

34748

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**RÜZGAR ENERJİSİ  
VE  
RÜZGAR TÜRBİNİ DİZAYNI**

**Mak.Müh.Mehmet SAYINDI**

F.B.E. Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Enerji Makinaları Programında  
hazırlanan

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Tez Danışmanı : Y.Doc.Dr.Adnan BALIK

**İSTANBUL, 1994**

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
SEMBOL LİSTESİ .....	ii
TURKÇE ÖZET .....	iii
YABANCI DİLDE ÖZET .....	iiii
BÖLÜMLER .....	i
1.GİRİŞ .....	1
1.1. Rüzgar Enerjisi .....	1
2.RÜZGAR HAKKINDA GENEL BİLGİLER .....	2
2.1. Genel Bilgiler .....	2
2.2. Rüzgar Oluşumu, Dünya Rüzgar Sirkülasyonu .....	2
2.3. Optimum Rüzgar Hızı Tayini .....	7
2.4. Hava Sıcaklığı ve Basıncı .....	14
2.5. Havanın Yoğunluğu .....	14
2.6. Türbülans .....	15
2.7. Rüzgar Hızı .....	16
2.8. Rüzgar Hızına Etki Eden Faktörler .....	17
3.ROTOR HAKKINDA BİLGİLER .....	18
3.1. Rotor Hareket Miktarları Teorisi .....	18
3.2. Hareket Miktarları Teorisi .....	20
3.3. Teorik Verim .....	22
3.4. Rotor .....	25
3.5. Trast Oluşumu .....	26
3.6. Basınc ve Hızlar .....	28
3.7. Hızların Birbirleriyle Olan İlişkileri .....	30
3.8. Sonsuz Sayıda Kanat Kullanımı .....	31
3.9. Hava Tüneli İçinde Çalışan Pervane .....	32
3.10. Froude Kanunu .....	33
3.11. Girişim Faktörleri .....	34
3.12. Rotor Dizaynı .....	35
3.13. Rotor ile Kule Arasındaki İlişki .....	35
3.14. Rotorun Yeri .....	36
3.15. Rotorun Buz ve Karlanmadan Korunması .....	36
4.KANAT PROFİLİ DİZAYNI .....	37
4.1. Kanat Rüzgar Etkileşimi ve Kanat Karakteristikleri .....	37
4.2. Rüzgar Makinalarının Karakteristikleri .....	39

4.3. Sistemin Güç Faktörü veya Verimi .....	40
4.4. Lanchester-Betz Limiti .....	40
4.5. Kanat Dizaynı .....	42
4.6. Kanada Etki Eden Kuvvetler .....	43
4.7. Pitch Momenti .....	44
4.8. Kanat Profil Teorisi .....	46
4.9. Yatay Eksenli Türbinlerde Kanat Teorisi .....	48
5. RÜZGAR TURBİNİ İLE İLGİLİ FORMÜLLER .....	52
5.1. Kaldırma, Sürüklenme ve Moment Denklemlerinin Çıkarılması .....	52
5.2. Karakteristik Sayılar .....	58
5.3. Kaldırma Katsayısı .....	60
5.4. Moment Katsayısı .....	61
5.5. Yatay Eksenli R. T. için Genel Momentum Teorisi .....	61
5.6. Kutta-Joukowsky Kanunu .....	63
6. RÜZGAR TURBİNİNİN SEÇİMİ .....	65
6.1. Yöre İncelemesi .....	65
6.2. Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması .....	66
6.3. Rüzgar Türbini Dizaynı .....	67
6.4. Rüzgar Türbini .....	68
6.5. Dikey Eksenli Türbinler .....	68
6.6. Dizayn Problemleri .....	69
7. GÜÇ HAKKINDA BİLGİLER .....	71
7.1. Faydalı Güç .....	71
7.2. Rotorun Faydalı Gücü .....	71
7.3. Rüzgar Gücü .....	73
7.4. Rüzgar Gücünde Gelişme .....	77
8. ENERJİ DÖNÜŞÜMÜ .....	80
8.1. Rüzgar Enerjisi Çevrim Sistemleri .....	80
8.2. Rüzgar Enerjisi .....	80
8.3. Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sistemlerinin Kullanılması .....	83
8.4. Rüzgar Gücü-Elektrik Gücü Dönüşümü .....	85
8.5. Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sistemlerinin Seçimi .....	86
8.6. Günümüzün Rüzgar Türbinlerindeki Gelişmeler .....	92
9. RÜZGAR TURBİNİNİN ELEMANLARI .....	96
9.1. Kılavuz Kuyruk .....	96
9.2. Platform ve Kule .....	96
9.3. Yataklar ve Jeneratör .....	96

9.4.Kule Dizaynı .....	97
9.5.Mekanizma Odası .....	97
10.MALİYET .....	98
10.1.Sistem Maliyeti .....	98
10.2.Birim Enerji Maliyeti .....	99
10.3.Çevreye Uyum .....	100
10.4.Ekonomiklik .....	100
10.5.Değişken Hızlarda Çalışmanın Enerji Maliyetine Etkisi	101
11.KONTROL SİSTEMLERİ .....	106
11.1.Kontrol Sistemi .....	106
11.2.Esneme Kontrolü .....	106
11.3.Rüzgar Çiftliklerinde Gürültü Problemi ve Kontrolü ...	106
11.4.R.T. Kontrol Sistemleri ve Bunların Uygulamaları .....	113
11.5.Yatay Eksenli R.T. Pasif Kontrol .....	124
11.6.Pitch Kontrol Sisteminin Klasik Yöntemi .....	136
12.RÜZGAR TURBİNİ KONSTRUKSIYONU .....	150
12.1.Veriler .....	150
12.2.Konstruktif Hesaplar .....	151
BİLGİSAYAR PROGRAMI .....	177
SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	195
REFERANSLAR .....	196
EKLER .....	198
ÖZGEÇMİŞ .....	205

## SEMBOL LİSTESİ

<u>Sembol</u>	<u>Anlamı</u>	<u>Birimi</u>
$C_p$	Güç Katsayısı	-
$\rho$	Yogunluk	$kg/m^3$
$\lambda$	Uç Hız Oranı	-
$N$	Kanat Sayısı	-
$R$	Yarıçap	m
$\Omega$	Rotorun Açısal Hızı	1/s
$V$	Ortalama Rüzgar Hızı	m/s
$D$	Rotor Çapı	m
$P$	Türbin Gücü	kW
$J$	İlerleme Hız Oranı	-
$Q$	Moment	Nm
$T$	Trast	N
$\eta$	Verim	%
$L$	Kaldırma Kuvveti	N
$D$	Sürükleme Kuvveti	N
$R$	Bileşke Kuvvet	N
$c$	Kord Uzunluğu	m
$\alpha$	Hücum Açısı	°
$C_L$	Kaldırma Katsayısı	-
$C_D$	Sürükleme Katsayısı	-
$b$	Kanat Uzunluğu	m
$S$	Kanat Yüzey Alanı	$m^2$
$P_R$	Rüzgardan Elde Edilen Güç	kW
$\sigma$	Katılık Oranı	-
$A$	Rotor Alanı	$m^2$
$\phi$	İyilik Derecesi	-
$N_e$	Türbin Rotorunun Gücü	kW
$q$	Dinamik Basıncı	$N/m^2$
$m$	Kütle	kg
$c_m$	Moment Katsayısı	-
$C_A$	Yükseklik Düzeltme Faktörü	-
$C_T$	Sıcaklık Düzeltme Faktörü	-

$\alpha$	Yüzey Pürüzlülüğü	-
$C_s$	Şekil Katsayısı	-
$V_{10}$	Deniz Sev.10 (m) Yükseklikteki Hız	m/s
$y$	Rakım	m
$x$	Us	-
$C_h$	Yükseklik Katsayısı	-
$A$	Projeksiyon Alanı	m <sup>2</sup>
$\beta$	Yükseklik Faktörü Usü	-
$\alpha'$	Bora,Fırtına Faktörü	-
$\Gamma$	Sirkülasyon	-
$\bar{W}_i$	Güç	kW
$C$	Havanın Akış Hızı	m/s
$a$	Girişim Faktörü	-
$P$	Basınc	N/m <sup>2</sup>
$F_x$	Eksenel Trast	N
$W_{th}$	Teorik Güç	kW
$E_k$	Kinetik Enerji	kW
$K_c$	Küp Faktörü	-
$P_{av}$	Ortalama Güç Yoğunluğu	W/m <sup>2</sup>
$K_{ep}$	Enerji Faktörü	-
$\eta_p$	Güç İkmal Verimi	%
$\eta_g$	Jeneratör Verimi	%
$\eta_m$	Mekanik Verim	%
$k$	Yıllık Ort. Enerji Üretim Faktörü	-
$P_R$	Tesis Gücü	kW
CDE	Enerji Maliyeti	\$/kWh
AFC	Yıllık Sabit Fiyat	\$
O&M	Bakım ve Onarım Masrafları	\$
dT	Trast	N
dQ	Moment	Nm
q	Hava Hızı	m/s
$\Pi$	Basınc	N/m <sup>2</sup>
$\omega$	Açısal Hız	1/s
$I$	Atalet	m <sup>4</sup>
B	Viskoz Sönümlenme Faktörü	-
K	Katılık Oranı	-
$T_A$	Zorlayıcı Kuvvet	N

$\phi$	Saftın Rotasyonel Konumu	$^{\circ}$
$V_t$	Ortalama Rüzgar Hızı	m/s
$n_g$	Jeneratör Devri	d/d
$C_T$	Rüzgar Türbini Toplam Kuruluş Maliyeti	\$
$i$	Faiz Oranı	%
$n$	Amortisman Süresi	Yıl
CRF	Kapital Geri Kazanma Faktörü	-
$k_T$	Trast Katsayısı	-
$k_g$	Moment Katsayısı	-
$P_o$	Statik Basınc	N/m <sup>2</sup>
H	Entalpi	kJ/kg
E	Kinetik Enerji	J
$\alpha$	Cismin Ekseni İle Rüzgar Yönü Ara. Açı	$^{\circ}$
C	Ortalama Rüzgar Hızı	m/s
f(v)	Yoğunluk Fonksiyonu	-
F(v)	Dağılım Fonksiyonu	-
$P_o$	Elektriksel Güç	kW
N	Rüzgar Türbini Sayısı	-

## ÖZET

Rüzgarın taşıdığı kinetik enerjiyi toplayan ve diğer enerji türlerine çeviren makinalara "Rüzgar Türbinleri" denir. Tipik bir rüzgar türbini şu kısımlardan oluşur: Rotor ( kanatlar ve göbek ) , Hız yükseltici , Jeneratör , Kontrol sistemi ve Kule'dir.

Bu çalışmada, rüzgar karakteristiklerinin rüzgar türbini tasarımına etkileri incelenmiştir. Rüzgar hızının sürekli olmayışı ve değişim aralığının büyük olması, rüzgar enerjisi sistemlerinin dizaynını güçleştirmektedir. Bu sistemlerin dizaynı için, çalışma hız aralığını sınırlandırmak gerekir.

Genelde, rüzgar türbinleri iki ana gruba ayrılır. Bunlar yatay ve dikey eksenli rüzgar türbinleri olarak adlandırılır.

Rüzgar enerjisi dönüşüm sisteminde en önemli eleman rüzgar türbinidir. En yaygın kullanılan çeşidi yatay eksenli pervaneli türbinlerdir, bunun yanında Darrieus tip rotorlu türbinler, Cyclogyro tip rotorlu türbinler, ufak boyutlu Savonius tip rotorlu türbinler sıkça uygulama alanı olan çeşitlerdir. Rüzgar türbininin performans analizi yapıldığında, ilk sırayı pervaneli tip rotora sahip türbinler almaktadır.

Rüzgar türbini-jeneratör grubunun dizaynı ve çalışma tarzı nasıl olursa olsun, en önemli parametre rüzgar-elektrik enerjisi dönüşüm sisteminin ekonomikliğidir. k olarak tanımlanan bu faktöre yük yada kapasite faktörü denir.

Rotorun veriminde en önemli faktör kanat dizaynıdır. Rüzgar türbinlerinin rotor dizaynlarıyla, hava taşıtlarının airfoil ve pervane ile helikopterlerin rotor dizaynları arasında çok yakın bir benzerlik vardır.

Sonuçta elde ettiğimiz veriler ışığında, rüzgar türbini dizayn etmeye ve bir örnek vererek olayı pekiştirmeye çalıştık.

## SUMMARY

A machine gets together kinetic energy of the wind and the kinetic energy of the wind is converted the other energy species that it is called "Wind Turbine". There are five part in the conventional wind turbine. These are Rotor ( blades and hub ) , Gear box , Generator , Control system and Tower.

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

Generally, there are two main groups of the wind turbines. These are called " Horizontal and vertical-axis wind turbines".

The predominant configurations are horizontal-axis propeller turbines and Darrieus and Cyclogyro turbines; in small sizes some Savonius rotors and other cup-anemometer devices are also occasionally seen. In the performance analysis of wind turbines, the propeller devices were studied first.

Regardless of the type of hardware and the mode of operation employed, the single most important parameter that determines the economic viability of wind-electric systems is the annual average energy production faktor  $k$ , otherwise known as plant factor, load factor or capacity factor.

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

At the end of all above mentioned discoveries, we tried to design the wind turbine and we tried to intensive the event by giving a sample.

## BÖLÜM 1

### RÜZGAR ENERJİSİ

Gittikçe büyüyen Ozon tabakası deliği ve asit yağmurlarının yarattığı çevre ile ilgili kaygılar, yeni teknolojilere olan ilgiyi arttırmıştır. 1973'deki petrol ambargosunun ardından başlatılan araştırma ve geliştirme programları çevre kirlenmesine yol açmayan enerji kaynakları arasında güneş enerjisine ve jeotermal enerjiye öncelik tanıdı. 1990'larda ise bunların yerini rüzgar enerjisi almıştır. Rüzgar enerjisi üretiminde dünya birincisi California'da 1990 yılında San Fransisco büyüklüğündeki bir şehrin elektrik ihtiyacını karşılayacak kadar elektrik üretmiştir.

A. B. D. Enerji Bakanlığı'nın yayımladığı rakamlara göre 1800 (Megawatt) elektrik üretimi 3,3 Milyon (Varil) ham petrol tüketimi ile sağlanabilir.

Rüzgar yeryüzünün değişen yüzey koşullarından dolayı güneşin, yeryüzünün değişik yerlerini değişik oranlarda ısıtmasından kaynaklanır. Sıcak hava yoğunluğu düşerek yükselir ve soğuk hava yoğunluğu artarak aşağı doğru inerken atmosfer basıncında ortaya çıkan farklılıklar deniz yüzeyindeki serin ve yoğun havanın iç kısımlardaki sıcak çöller ve vadilerdeki alçak basınç bölgelerine doğru akmasına neden olur.

Vadiler ve dağlar'ın ısınıp soğumasındaki farklılıkları bilindiğine göre rüzgarın esişi önceden tahmin edilebilmektedir. Bu tahminlere dayanarak rüzgar çiftlikleri için en uygun yerler belirlenebilir.

Deniz kıyılarından içlere doğru esen soğuk hava kütlesi dağların arasından geçerken çok yüksek süratlere ulaşır. Yeryüzünün sürtünme kuvvetinin etkisi ile rüzgar sürati yükseklerde önemli farklılıklar ortaya çıkarır ve en yüksek süratler dağ tepelerinde elde edilir.

Maksimum güç çıkışı elde edebilmek için, rüzgar türbinleri bu yüksek rüzgar hızlarından yararlanmak üzere tasarlanmaktadır. Rüzgarın süratindeki küçük değişiklikler üretilen kinetik enerjide ve böylece rüzgar türbininin vermekte olduğu güç üretiminde büyük

değişikliklere yol açacaktır; eğer rüzgarın hızı iki katına çıkacak olursa, rüzgar türbini 8 kat fazla güç üretecektir. Örneğin, rüzgarın hızı saatte 10 (km)'den 12 (km)'ye 2 (km)'lik bir artış gösterdiğinde enerji üretiminde %73'lük bir artış meydana gelecektir.

Bir rüzgar türbini bu değişken çalışma koşullarında ve belirli devreye girme ve devreden çıkma süratlerine göre dizayn edilirler. Devreye girme süratı, rüzgar türbininin enerji üretmeye başladığı en düşük sürattir. Devreden çıkma süratı ise güç üretiminin kesileceği rüzgar süratidir.

Rotorun kanatları, sabit bir 50 (Hertz)'lik frekansta alternatif akım üretecek şekilde ve sabit bir süratte dönmek zorundadır aksi takdirde elektrik şebekesini beslemesi mümkün olamaz. Çok yüksek rüzgar şiddetleri, türbine zarar verebilir. Dizayn suretinin üzerindeki esintiler, dişli mekanizmasında istenmeyen gerilmeler yaratabilir. Türbinin tasarımında gözütılması gereken noktalardan biride kanatların dönme hızı olmaktadır. Aynen bir uçağın kanatlarında olduğu gibi hava, türbinin uçak kanadı biçimindeki kanatlarının üzerinden akar. Kanadın alt ve üst yüzeyleri arasında ortaya çıkan basınç farkı, aerodinamik bir kaldırma kuvveti yaratır. Kaldırma kuvveti, kanatları eksen şaftı etrafında döndürerek türbinin gövdesinde bulunan üç fazlı bir alternatif akım jeneratörünü çevirir.

Rüzgar enerjisinin elektrik üretiminde kullanılan oranı, kanatların rüzgar yönüne doğru yapmış oldukları açı ile ayarlanabilmektedir. Daha büyük bir açı rüzgardan daha fazla bir yararlanma ile türbinin daha düşük rüzgar hızlarında çalışmasına imkan yaratmaktadır. Daha küçük açılarda ise çok daha yüksek rüzgar hızlarında emniyetli çalışma sağlanabilmektedir. Rüzgarın hızı arttıkça jeneratörün kilowatt olarak ölçtlen elektrik enerjisi üretimide artacaktır.

Dönme hızını kontrol eden frenler, kanat ucuna yerleştirilen küçük kanatçıklar şeklinde aerodinamik özellikli veya otomobil disk frenlerine benzer biçimde mekanik olabilir. Bu frenler rüzgar süratini ölçen anemometreden gelen sinyal ile veya kanatların dönme süratının artışı ile ortaya çıkan merkezkaç kuvvet ile harekete geçirilebilir. Disk frenlerde kauçuk bağlantılar

bulunmakta ve sistemin dakikadaki devir sayısını sabit tutarken veya sistemi bakım-onarım için durdurmak gerektiğinde gerekli esnekliği sağlamaktadır.

Anemometreye bağılı bir çevirme düzenegi ve bir rüzgar kanadı,türbini devamlı rüzgara doğru çevirmektedir.Bununla birlikte sabit süratli rüzgar türbinlerinin diğer enerji kaynakları ile karşılaştırıldığında daha düşük bir enerji üretme kapasitesi olduğu ortaya çıkacaktır.Bununda ana nedeni,rüzgarın düzensiz esmesi ve rüzgar hızının değişiklik göstermesidir.Rüzgarın tüm esme hızlarının tamamından değilde,yalnızca yüksek süratlerdeki hızlarından yararlanma eğilimi,türbinden beklenen enerji üretim kapasitesini düşürmektedir.

Amerikan Rüzgar Gücü Şirketi'nin kendi geliştirdikleri türbin prototipinin,ikili jeneratörün ürettiği elektrik enerjisinin tepe noktalarını yumuşatan karmaşık bir elektronik sistemi bulunmaktadır.Bu elektronik dönüştürücü,rotorun ve jeneratörlerin süratli rüzgar ve ani esintilerde süratlenmesine izin verecektir. Artan dönme enerjisi ise dişli sistemindeki torku arttırmadan daha fazla elektrik enerjisine dönüştürülecektir.Elektronik dönüştürücü ise,jeneratörün değişken çıkış frekansına karşılık 50 (Hertz)'lik çıkışı sabit tutacaktır.Sistemin özel programı rüzgar hızındaki değişikliklere karşılık,türbin kanatlarının açısında ayarlamaktadır.

Türbinin kanatları belirli bir devir sayısından daha süratle döndüğünde buna neden olan enerji fazlası,elektrik enerjisine dönüştürülecektir.Bu elektrik enerjisi,30 (m)'lik bir direktten aşağıya elektrik kabloları ile taşınarak yeraltındaki enerji nakil hattına bağlantılanır.Bu kablolar ile ana trafo merkezlerine taşınan elektrik akımı,voltajı yükseltilerek merkezi bir elektrik santraline taşınır.Bu elektrik santrali,rüzgar enerjisinin ülke genelindeki enterkonnekte şebekeye bağlanmasını sağlar.Rüzgar çiftliğinde üretilen elektrik enerjisinin voltajı ve güç faktörü ülke genelindeki enterkonnekte şebekenin voltajı ve güç faktörü ile aynı olması durumunda rüzgar çiftliğinde üretilen elektrik enerjisi,enterkonnekte sisteme verilir.Elektrik enerjisi bu trafoya geldiği esnada voltajı 12000,21500 veya 34500 (Volt)'tur.Ulke geneline dağıtım için voltaj ihtiyaca göre 34500,

115000 yada 230000 (Volt)'a yükseltilir.

Kullanım yerlerinde bu elektrik enerjisi kullanım voltajı olan 220 (Volt)'a düşürülür. Arada kullanılan yüksek voltajların nedeni,elektrigin iletimindeki enerji kayıplarını azaltmaktır. Trafo merkezinde ayrıca elektrik sayaçları kullanılmakta ve rüzgar çiftliğinin ürettiği elektrik enerjisi miktarını ölçmektedir.

Tipik bir otomobilin 200000 (km)'lik kullanım ömrü,saatte 80 (km) ile esen rüzgarda çalışan bir rüzgar türbininin 2500 (saat)'lik kullanımına eşdeğerdir.Rüzgar türbinleri her yıl yaklaşık 3000-5000 (saat) çalışırlar.Bu makinaları rüzgar esmeye başlayacağı anda maksimum verimle kullanmaya hazır tutmak için sürekli bakımları çok önemlidir.

Türbinin ana malzemelerinin ömrü 5 (yıl)'dır.Parçaların yenilenmesi ise çok masraflıdır.Türbinlerin tasarımlarını,ömrüleri 20-30 (yıl) olacak şekilde geliştirilmelidir.Daha verimli kanat yapıları,daha iyi kontrol sistemleri ve uzun ömürlü dişli kutuları için gelişmiş teknolojiler halen araştırılmaktadır./22/

## BÖLÜM 2

### RÜZGAR HAKKINDA GENEL BİLGİLER

#### 2.1. GENEL BİLGİLER

Rüzgar türbini tasarımında esas noktayı rüzgar karakteristiklerinin belirleyecek olması, bu konunun detaylı olarak ele alınıp incelenmesini gerektirmektedir. Bu sebeple rüzgarın ne olduğunu, nasıl meydana geldiğini, oluşum sebeplerinden, çeşitli karakteristik özelliklerine kadar birtakım nümerik sonuçlara varabilmek için ayrıntılı ve dikkatli olarak irdelenmek gerekir.

Rüzgarlar hakkındaki veriler, hava alanları ve meteoroloji istasyonları tarafından uzun senelerce yapılan ölçümlere dayanır.

Rüzgar türbininin tesis edileceği mahalın seçiminde elde edilebilecek enerji miktarı ve rüzgarın en şiddetli esebileceği zamanın bilinmesi çok önemlidir.

Bu enerji potansiyelinden önemli boyutlarda istifade eden ülkelerde, bu tür makinaların tesisi için veri teşkil edecek nitelikte detaylı hazırlanmış rüzgar haritaları ve bu haritaları içeren bilgisayar disketleri mevcut bulunmaktadır. /20/

#### 2.2. RÜZGAR OLUŞUMU, DÜNYA RÜZGAR SİRKÜLASYONU

Rüzgar enerjisi güneş enerjisinin bir türevidir. Güneş dünyanın bir tarafında havayı, suyu ve toprağı ısıtırken diğer tarafı termal radyasyon ile soğur. Günlük ısınma ve soğuma değişimleri gün boyunca tüm dünya yüzeyinde devam eder. Ekvator bölgesi kutuplardan daha fazla güneş enerjisini depo eder. Ekvatorda ısınan hava yükselerek kutuplara doğru gider, soğuyan hava ise ağırlaşarak ekvatora geri döner.

Hava 30 derece kuzey enleminde yığılma eğilimindedir. Bunun sonucu olarak bu bölgede basınç yüksek ve iklim ılımandır. Bazı hava kütleleri bu yüksek basınç bölgesinin dışında güney doğuya doğru eser ve dünyanın dönmesi nedeniyle batıya sapar, bu rüzgarlar alize rüzgarları olarak adlandırılır ve genellikle denizciler tarafından kullanılırlar. Ekvatorun güneyinde dünyanın dönmesiyle güney doğuya doğru esen rüzgarlar doğuya, kuzey doğuya esen rüzgarlar batıya saparlar.

Dünya yüzeyinin tümünün ısınması aynı şekilde olmaz.

Denizlerin ısınması hemen yanındaki kara kütlelerinin ısınmasından daha yavaştır, çünkü suyun ısınma ısısı yüksektir. Benzer olarak denizler kara kütlelerinden daha geç soğur. Isınmış hava kütleleri soğuk hava kütleleri ile çalıştığı zaman o bölgede büyük ölçüde yerel rüzgarları oluştururlar fakat hava kütleleri ile rüzgarı karıştırmamak gerekir. Tıpkı rüzgar gibi hareketli bir atmosfer elemanı olan hava kütleleri yatay doğrultuda binlerce kilometre yayılır, rüzgar ise hava kütlelerinin içinde gelişen, her zaman çok daha küçük bir atmosfer hareketidir. Bir hava kütleleri, bütün Atlas Okyanusu veya bütün Avrupa'yı kaplayabilir. Yerel rüzgarlar ise ancak bir ülkeyi, hatta çok daha sınırlı bir coğrafi bölgeyi etkisi altına alabilir. Yerel rüzgarlar yalnızca bir şehri yada vadiyi etkileyebilen çok daha sınırlı hava olaylarıdır. Rüzgarın yönü bütün bir hava kütlelerinin yönünü göstermez. Yüksek ve alçak basınç bu hava kütlelerinin hareketleri sonucu oluşur. Genellikle hava sıcaklığı artar, yoğunluğu düşer dolayısıyla barometrik basınçta düşer. Yüksek basınç sistemi soğuk hava kütlelerinin daha sıcak düşük basınç sistemine doğru basınçları dengeleninceye kadar iter. Büyük çaplı rüzgarlar dünya üzerindeki aynı basınç sistemlerini izlerler. Güneşin ısınması, gökyüzünün açıklığı, yağmur gibi olaylar. Bu gibi ayrıntılı oluşumların ne zaman meydana geleceğini bilmek çok zordur. Fakat her bölgenin kendine has aylık veya senelik ortalama düzenli hava hareketleri vardır. Bunların bazıları, bölgenin tahmini hava hareketleri konusunda yardımcı olur.

Büyük çaplı rüzgarlar genellikle daha hakim rüzgarlardır fakat büyük çaplı rüzgarların elverişli olmadığı zamanlarda yerel rüzgarlar artarak yada azalarak enerji potansiyeline yardımcı olurlar. Yüksek basınç bölgeleri havayı düşük basınç bölgelerine iterek rüzgarları oluştururlar. Rüzgarların meydana gelmesi sırasında her basınç bölgesinin büyüklüğü ve dağılımı değişir.

Hava hızlı hareketle vadiye iner bir süre eser ve vadiyi oluşturan tepelerin üzerinden eserek vadiyi terkeder. Sıcak ve soğuk hava kütlelerinin dağılımı değişir, çünkü bu rüzgarlar basınç ve sıcaklığıda değiştirir.

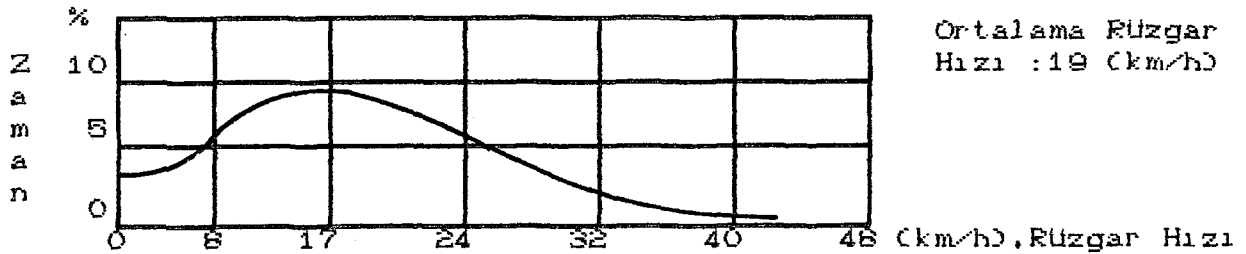
Daha düşük ısı kapasitesi nedeniyle gündüzleri kara kütlelerinin sıcaklığı yükselir. Geceleyin radyasyon ile ısı transferi

denizlerden daha hızlı olur. Bu sebepten gün boyunca deniz suyu kara kütlelerinden daha soğuktur ve geceleride daha sıcaktır. Havanın kara ile deniz arasındaki döngüsüne deniz-kara rüzgarları denir. Bu rüzgarlar sıcaklık farkından meydana gelir. Bütün gün boyunca özellikle öğleden sonraları ısınan hava kara üzerinden yükselir ve boşalan yeri deniz üzerindeki soğuk hava alır. Böylece kara meltemleri meydana gelir. Bu rüzgarlar gündüzleri 3,5 ile 7 (m/s) arasındaki hıza ulaştıkları bölgelerde rüzgar enerjisi için yeteri kadar kuvvetlidirler fakat geceleri 2 ile 2,5 (m/s) gibi daha düşük hızla eserler.

Soğuk hava bir sonraki tepe üzerinden geçerken sabah güneşi ile ısınır ve sıcaklığı artar. Soğuk hava kıyı boyunca yukarıya doğru tırmanır. Tepelerle vadiler arasında oluşan rüzgarlar sıcaklık farkından meydana gelir. Geceleri ise aynı olay tersinir olarak devam eder. Soğuma gökyüzünde radyasyon ile çok hızlı olur. Yüksek tepelerden vadiye inen rüzgarlar daha sıcak veya soğuk olabilir. Soğuk hava geceleri yerçekimi etkisiyle aşağıya doğru inme eğilimi gösterir. Sıcak hava vadiye doğru sıkıştırıldığından ısı enerjisi kazanır ve sıcaklık artar. /20/

### 2.3. OPTİMUM RÜZGAR HIZI TAYİNİ

Gerçek rüzgar hızı her yerde benzer karaktere sahiptir. Rüzgarlar kimi zaman hiç esmez, kimi zaman ortalama bir hızda bazende tüm sene boyunca sadece birkaç dakika maksimum hızla eserler. Aşağıdaki 2.1 nolu grafik buna örnek teşkil edecek tipik rüzgar dağılımını göstermektedir. Öngörülen bir yerde rüzgar hızları bütün bir sene boyunca ölçülüp, her farklı hızda esisteki tüm zamanı toplayarak şekildeki gibi bir grafik çizmek mümkündür. Hız sıfırdan maksimuma kadar alınır. Düşey eksen toplam zamanı veya her rüzgar hızında meydana gelen yüzde zamanı gösterir. Bu eğrinin konumu her ölçüm yapılan yerdeki bulunacak egriden biraz farklı olabilir.



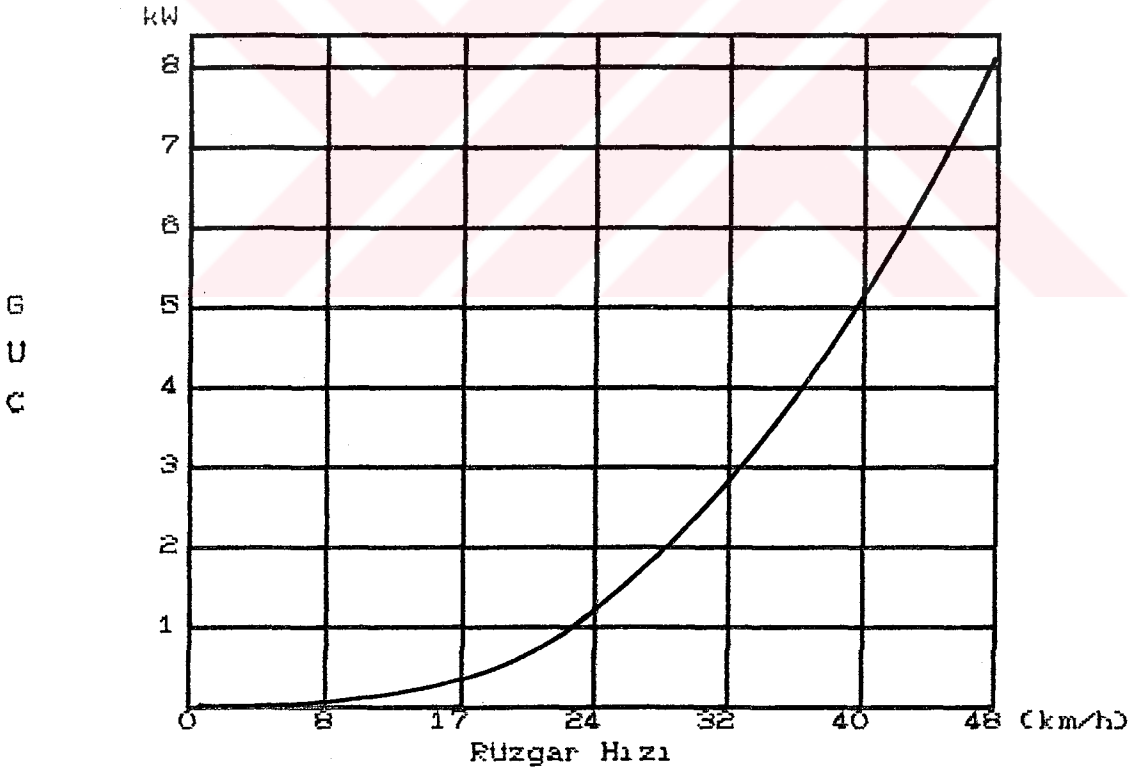
Grafik 2.1 : Tipik Rüzgar Dağılımı

Rüzgar hızının ortalamaları hesaplanabilir. Basit ölçümler toplanır ve alınan ölçüm sayısına bölünür. Öngörülen bu alanda rüzgarın ortalama hızı yaklaşık 19 (km/h)'tir. Bu ancak meydana gelen rüzgar hızı olan 14 (km/h) değerinden daha büyüktür.

Bu yöntemde sıcaklık ve basınç için ortalama değerler kullanılabilir. Hesaplama zamanı önemli ölçüde azaldığı için histogramlar şeklinde düzenlenmiş rüzgar verileri yaygın olarak kullanılmaktadır.

Geliştirilmek istenilen rüzgar türbininin önemine göre rüzgar hızı ölçümleri ayrıntılı olmak zorundadır. Bunun için çok para ve zaman gideceğide gerektir.

Grafik 2.2'de 0'dan 48 (km/h) arası rüzgar hızına sahip verimi % 59,3 olan 9,290 (m<sup>2</sup>) alanlı bir rotor ile elde edilebilecek güç değerleri verilmiştir. Grafikten rüzgar hızına bağımlı olarak rüzgar gücünün artışı görülmektedir. 17 (km/h) rüzgar hızında sadece 300 (W) güç elde edilirken 48 (km/h)'ta teorik olarak 3 (kW)'lık güç elde edilmektedir.



Grafik 2.2 : Hız-Güç Değişimi

Bu grafikler iki rüzgar hızı karakteristiğini tanımlar. Bunlar istatiki karakter, meydana gelen her rüzgar hızında rüzgarın

devamlılığını sürdüreceği zaman aralığıdır. Güç karakteristiği ise her rüzgar hızında elde edilmesi beklenen gücün büyüklüğüdür. Rüzgar hızında görülen 1 (m/s)'lik bir değişim rüzgar gücünün % 72 oranında değiştirmektedir. Eğer rüzgar hızı 10 (m/s)'den 11 (m/s)'ye değişirse güç % 33 artmaktadır.

İki ayrı bölge düşünelim ve rüzgar hızı sırasıyla 5 (m/s) ve 8 (m/s) olsun. Bölgelerin rüzgar güçleri arasındaki farkı bulalım. Hava yoğunluğunu 1180 (m) seviyesinde 1 (kg/m<sup>3</sup>) alalım.

$$P = 1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (2.1)$$

$$1. \text{ Bölge : } P/A = 0,5 \cdot 1 \cdot 5^3 = 62,5 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

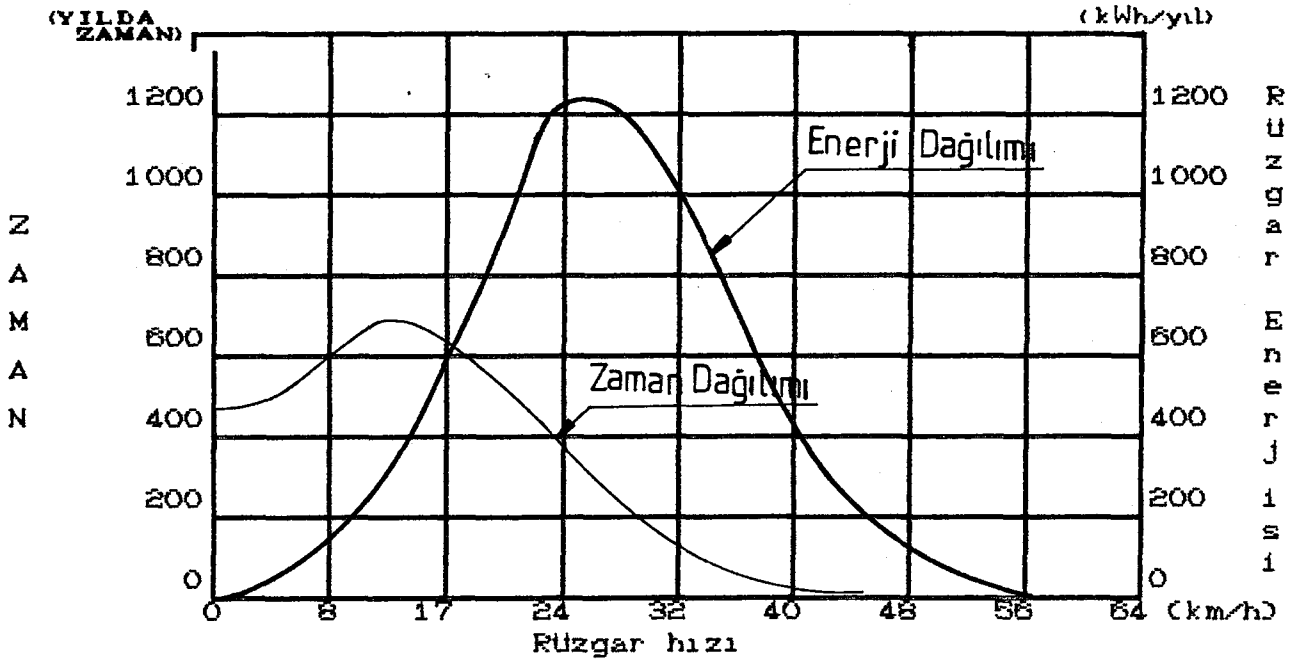
$$2. \text{ Bölge : } P/A = 0,5 \cdot 1 \cdot 8^3 = 108 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

Enerji, gücün zaman ile çarpılması ile hesaplanır. 100 (W) gücünde bir ampül 10 saatte 1 (kWh)'lik enerji harcar. Öngörülen bir alanda elde edilebilecek maksimum enerji benzer yolla hesaplanabilir. Grafik 2.3'te verilen güç eğrisi ile zaman eğrisi çarpılarak enerji dağılım eğrisi çizilebilir. Bizim için önemli olan bu enerji eğrisidir.

Öngörülen alanda 17 (km/h)'lik rüzgar hızı çok sık meydana gelir. Aslında bu hız enerji üretiminin boyutları açısından fazla önem taşımaz. Enerji eğrisi rüzgar hızının 24 ile 32 (km/h) arası bölgede rüzgarın taşıdığı enerjinin daha fazla olduğunu göstermektedir. Öngörülen alanda enerji dağılım eğrisinden görüldüğü üzere 12 (km/h)'in altında ve 48 (km/h)'in üstündeki rüzgar hızında elde edilebilecek enerji çok az miktardadır. Başka bir yerde aynı eğri aynı yolla çıkartılmak istense bir takım farklılıklar doğacaktır ama sonuç ve karakteristikler büyük ölçüde aynı olacaktır.

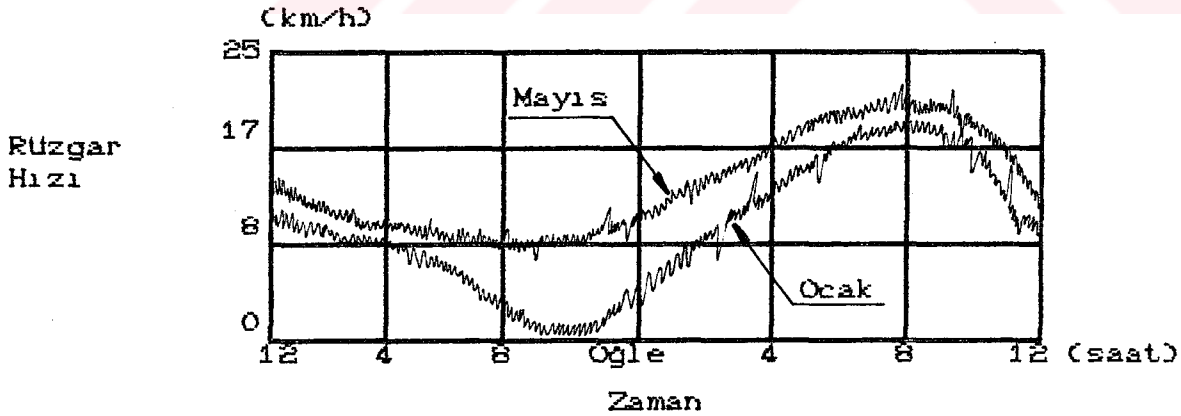
Tablo 2.1 : Beaufort Rüzgar Ölçeği

Beaufort Sayısı	Tanımlama	Hız (m/s)
5	Sert rüzgarlar	8,0 - 10,7
6	Kuvvetli rüzgarlar	10,8 - 13,8
7	Yavaş fırtına	13,9 - 17,1
8	Sert fırtına	17,2 - 20,7
9	Kuvvetli fırtına	20,8 - 24,4
10	Bora	24,5 - 28,4
11	Siddetli bora	28,5 - 32,6
12	Kasırga	32,7 -



Gratik 2.3 :Enerji dağılım eğrisi

Rüzgarın zayıf silsilelerle,kuvvetli çarpıntılar veya ani hamlelerle esmesi önemlidir.İncelenen yerde günlük olarak modeli çıkartılır bu,rüzgar hızının günlük değişimi olarak adlandırılır. Öngörülen alanda örneğin,rüzgar hızı sabahleyin düşük,öğleden sonra az yüklü ve akşamleyin 20<sup>00</sup> 'de en yüksek hızına ulaşabilir. Aşağıdaki 2.4 nolu grafik buna iyi bir örnektir.

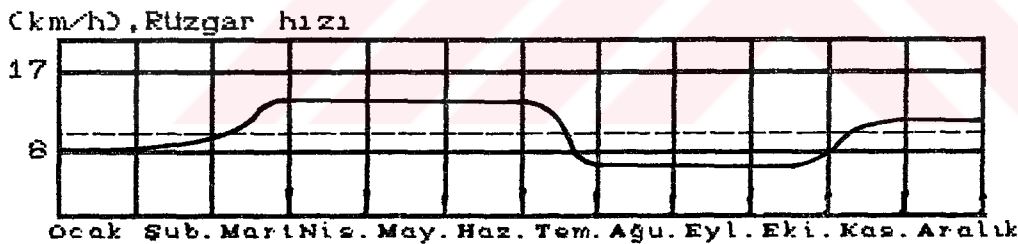


Gratik 2.4 :Rüzgar hızı değişimi

Birbirinden bağımsız iki farklı ayın Ocak ve Mayıs farklı eğrileri günlük değişimlerinin aydan aya farklı olabileceğini göstermektedir. Öngörülen alanda Mayıs ayının daha rüzgarlı olduğuna

dikkat etmek gerekir. 2.4 nolu grafik gerçekte rüzgar hızlarının ortalamasının aydan aya değiştiğini yansıtmaktadır. Bu yöresel verilere ait eğriler rüzgar hızının esaslarının saatten saate, günden güne, aydan aya değişimlerini gösterir.

İstatiki görüş noktasından rüzgarın herhangi bir yerdeki hızı, rüzgar hızı dağılım eğrisi ile tanımlanabilir. Bu eğriden de zamanın yüzde oranı için rüzgar hızı bulunabilir. Bu eğriden rüzgar hız aralığında ne kadar süre gerekebileceği öngörülemez. Şayet rüzgarın günlük ve aylık olarak hangi hızda esebileceği konusunda iyi bir fikir edinmek için verileri dikkatlice analiz etmek yeterli olacaktır. Burada analizin anlamı günlük ve aylık değişimlerdir. Bu sayede ihtiyaç duyulan enerji miktarı ile elde edilebilir enerji miktarı karşılanabilecektir. Burada öngörülen bölgede rüzgar enerjisinin çoğu akşamleyin elde edilebilir fakat sabahleyin enerji ihtiyacı daha fazla oluyorsa akşamleyin elde edilen enerji depolanarak muhafaza edilir ve ertesi sabah kullanılabilir. Fakat bir deneme pahalıya mal olacaktır, bu yüzden genellikle enerjinin depolanması yoluna gidilmez enerji depolanmadan direkt olarak kullanılması halinde hem sistemin maliyeti azalacak hemde performansı yükselecektir.



Grafik 2.5 : Senelik rüzgar hızı

Öngörülebilecek bir yerde rüzgar kaynaklarının elverişliliği ve değeri direkt olarak elde edilebilir enerjiye ve kaynakların enerji ihtiyacı ile ne kadar iyi uyduğuna bağlıdır. Rüzgar gücünün mevsimlere veya aylara göre dağılımı rüzgar türbinlerinin ekonomisini etkiler. Eğer rüzgar talebin en yüksek olduğu mevsimde en yüksek gücüne ulaşıyorsa, rüzgar türbininde elde edilen enerji daha değerli olacaktır.

Rüzgar hızı dağılımını elde etmek için 4 temel husus vardır.

1. Senelik ortalama rüzgar hızı ve doğrultma faktörü

tespitinde tüm seneye ait rüzgar hızı dağılımının ve tasarım hesaplarının göz ardı edilmesi gerekir.

2. Rüzgar hızı dağılımını tam ve doğru olarak veren matematiksel eşitlikte senelik ortalama rüzgar hızı kullanılır, her hızdaki rüzgarın esme süresi tespit edilir.

3. Rüzgar hızı son bir sene için gerçek ve doğru olarak ölçülür ve kaydedilir.

4. Rüzgar hızı kısa periyotlarla ölçülüp kaydedilir.

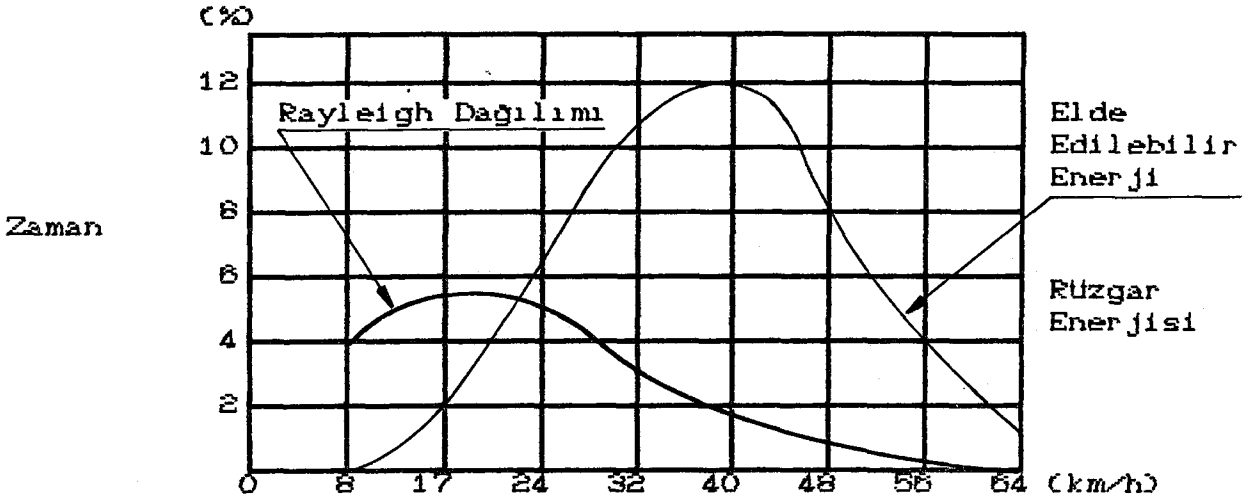
Senelik rüzgar hızı dağılımı, tasarımın görüş noktasının tam anlaşılabilmesi için çok önemli bir faktördür. Günlük ve aylık rüzgar hız değişimlerinin elde edilmesi çok basittir fakat rüzgar araştırmacıları çoğunlukla senelik rüzgar hızı dağılımına taraftardır. Tasarım hesapları, rüzgar hızının bir seneden fazla ölçümleri yerine tahmin yürütmeye dayandırılır.

Rüzgar hızı histogramı mevcut değilse, rüzgarın hız dağılımı, Rayleigh dağılımı bazı yerlerde rüzgar hızı karakteristiklerinin makul olarak tanımlanmasını sağlar. Yıllık ortalama enerji değerleri yıl içindeki saat sayısı olan 8760 ile çarpılarak güçten elde edilebilir. Rayleigh dağılımı % 10'dan daha az hata ile çalışır. Yaklaşık enerji tahmininde kullanılabilir.



Senelik ortalama rüzgar hızı 17 (km/h)

Grafik 2.6 : Rayleigh rüzgar hızı dağılımları



Senelik ortalama rüzgar hızı 23 (km/h)  
Grafik 2.7 : Rayleigh rüzgar hızı dağılımları

Grafik 2.6 , 2.7 farklı senelik ortalama rüzgar hızlarına sahip iki yöndeki tipik Rayleigh rüzgar hızı dağılım eğrilerini göstermektedir. Enerji miktarı ortalama rüzgar hızının 17 (km/h) ile 23 (km/h) değerleri arasında maksimum seviyesine ulaşmaktadır. Enerji dağılım eğrileri daha fazla enerjinin elde edildiği optimum performansa etki eden rüzgar hızı ki daha sonra rüzgar türbininin tasarımında kullanılan eğrilere benzerdir. Rüzgar hızı, atmosferik basınç ve hava sıcaklık değerlerinin her zaman aralığında birlikte kaydedildiği varsayılırsa, birim alana düşen güç:

$$\text{Güç} / \text{Alan} = 1/2 \cdot \rho \cdot V^3$$

$$\rho = 0,465 \cdot Pr / (273 + T) \quad (2.2)$$

(Pr, mmHg Basıncı; T, Sıcaklık (°C) )

Ortalama güç değeri ise tek tek hesaplanan bu eğrilerin ortalaması alınarak bulunabilir. Eğer rüzgar verileri 3 (saat)'te bir alınıyorsa, 2920 güç değerinin ortalaması ortalama yıllık güçü verir. Yıllık ortalama enerji 8760 (saat) ile çarpılarak bulunur. Bu tür analizler çok sayıda veriyi kapsadığından bilgisayar analizi pratik gereksinimlerdir. Bir bölge potansiyelinin sistemli olarak değerlendirilmesi için belli zaman dilimlerinde rüzgar hızlarının tespit edilmesi gerekir.

Rüzgar hızı ölçümlerinin yanısıra yön, sıcaklık, nem oranı ve basınç ölçümleride yapılmalıdır. Etkileri beklenen hata oranından az olan bu faktörler ihmal edilebilmektedir. Örneğin barometrik

basıncın ortalama hava yoğunluğuna etkisi % 5'in altındadır. Nem oranı güç değerini % 2, yarıçorak ve çorak bölgelerde % 1'in altında etkilemektedir. % 5'in üzerinde hava yoğunluğu farklarına yol açan bölgelerde sıcaklık verileri rüzgar hızları yanısıra toplanmalıdır. /20/

#### 2.4. HAVA SICAKLIĞI VE BASINCI

Hava basıncının sebebi üzerimizde bulunan havanın ağırlığıdır. Yeryüzünden uzaklaştıkça atmosfer basıncı düşer. Barometreler genel olarak atmosfer basıncını ölçmeye yarar. Azalan barometre basıncı havanın bozulacağına işarettir. Yükselen barometre basıncı ise havanın iyi olacağını gösterir.

Atmosferik basınç üç standart birim ile ifade edilir. Inches civa sütunu genellikle A. B. D. 'de basınç birimi olarak kullanılır; milibar metrik sistemde, fen bilimlerinde ve havacılıkta kullanılır.

Hava sıcaklığı, hava ağırlığı ve basıncı ile ilgili olan hava yoğunluğunu etkiler. Sıcaklık yükseldikçe havanın ağırlığı azalır yani artan sıcaklık ile birlikte havanın yoğunluğu azalır. Hava sıcaklığı arttıkça basınç azalır. /20/

#### 2.5. HAVANIN YOĞUNLUĞU

Bir maddenin birim hacmindeki ağırlığıdır. Rüzgarın kinetik enerjisi kütlelerinin ve hızının fonksiyonudur. Rüzgar enerjisinin ve gücünün hesaplanabilmesi için havanın yoğunluğunun bilinmesi gerekmektedir. Havanın yoğunluğu sıcaklığa ve deniz seviyesinden yüksekliğe bağlıdır. Sıcaklık, basınç ve hava yoğunluğunun bulunması için kesin standart değerler kullanılır. Doğal olarak performans hesaplarında bu standart değerlerden yararlanır. Deniz seviyesindeki standart şartlar:

Sıcaklık : 15,5 (°C)  
Basınc : 1,0132 (bar)  
Yoğunluk : 1,2237 (kg/m<sup>3</sup>)

Standart durumların dışında bir yerdeki hava yoğunluğu hesaplanırken deniz seviyesinden yüksekliği ve hava sıcaklığı doğru olarak alınmalıdır. Bu durumda aşağıdaki formül kullanılabilir.  
$$\rho = 1,2237 \cdot C_A \cdot C_T \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (2.3)$$

C<sub>A</sub>: Yükseklik düzeltme faktörü  
C<sub>T</sub>: Sıcaklık " "

Yükseklik(m)	$C_A$	Sıcaklık( $^{\circ}$ C)	$C_T$
0	1,000	0	1,130
2500	0,892	29	1,083
5000	0,832	40	1,040
7500	0,756	51	1,000
10000	0,687	62	0,893
		73	0,829

Tablo 2.2 :Yükseklik Düzeltme Faktörü

Tablo 2.3 :Sıcaklık Düzeltme Faktörü

$C_A$  ve  $C_T$  değerleri Tablo 2.2 ,2.3'ten alınabilir.Örneğin ortalama sıcaklık 28,7 ( $^{\circ}$ C) ve deniz seviyesinden yükseklik 781,75 (m) olsun.Bu durumda  $C_A=0,912$  ve  $C_T=0,983$  olarak tablolardan okunur.O halde yoğunluk:

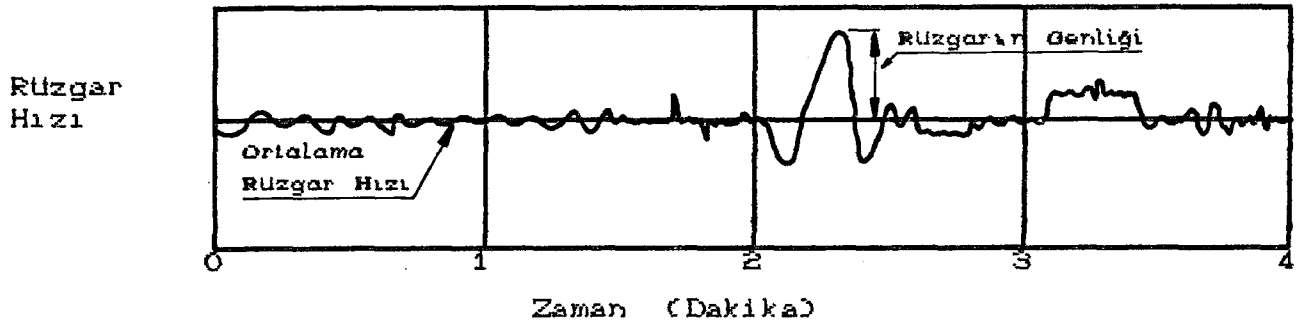
$$\rho = 0,912 \cdot 0,983 \cdot 1,2237 = 1,0773 \text{ (kg/m}^3\text{)},$$

olarak bulunur ve yoğunluk deniz seviyesindeki standart hava yoğunluğunun yaklaşık % 88'i olarak bulunur.

Doğrultma faktörlerinin bulunmasında ara değerler enterpolasyonla hesaplanır. /20/

## 2.6. TURBULANS

Sağlam bir rüzgar türbini tasarımında hava türbülansı çok önemli rol oynar.Rüzgar gerçek hızından farklı olarak ani hamleli esmesi türbin çıkış gücünü değiştirmez.Rüzgar hızının çok ani ve kuvvetli olması rüzgar türbinini tahrip edebilir.



Grifik 2.8 :Rüzgar hızının ani değişimleri

Rüzgar hızının ani değişimleri 2.8 nolu grafikte gösterilmiştir.Rüzgar hızı arttıkça türbinden alınacak teorik gücte artacaktır.Bir türbin bu şekildeki rüzgarın ani hamlelerine hemen cevap veremez,çok kısa aralıklı olan ani hamleler çıkış gücüne çok az tesir eder.Rüzgar diagramlarının genliği,ani esebilecek rüzgar

esme sayısını önceden tahmini olarak göstermesi açısından çok önemlidir.

Diagramın senelik ortalama rüzgar hızı ve genel olarak iki sınıfa ayrılan yüzey sürtünme katsayısı için yapılması yeterlidir.

Aşağıdaki 2.4 nolu tablo, ani hamleyle rüzgar çıkış hızının iki misli hıza ne kadar sıklıkla ulaşılacağını göstermektedir.

Rüzgar Hızının İki Misli Hızına Senelik Çıkma Sayısı									
Rüzgar Hızı (km/h)	Ortalama Rüzgar Hızı (km/h)								
	( $\alpha = 0,2$ ) <sup>†</sup>					( $\alpha = 0,3$ ) <sup>†</sup>			
	17	19	23	28		17	19	23	28
17	25	22	18	15		2269	2004	1701	1430
32	5	8	11	12		430	780	1022	1140
48	0	1	2	4		13	77	207	369
64	0	0	0	1		0	2	17	57
80	0	0	0	0		0	0	1	5

Tablo 2.4 : Rüzgar hızının iki misli hıza senelik çıkma sayısı

Arazi yüzeyi dalgalı (  $\alpha = 0,3$  ) ve senelik ortalama rüzgar hızı 28 (km/h) olsun. Burada ani hamleli rüzgar hızının 17 (km/h)'tan iki misli yani 34 (km/h) hıza senede 1430 kez çıkabileceği ifade edilmektedir. 80 (km/h)'tan 160 (km/h)'a senede 5 kez çıkması beklenebilir. Karşılaştırma olarak, yüzeyi daha az dalgalı bir yüzeye sahip arazi yapısında (  $\alpha = 0,2$  ) ve senelik rüzgar ortalama hızı 28 (km/h) iken 64 (km/h)'lik rüzgar hızının 128 (km/h) değerine (iki katına) senede 1 kez çıkması beklenebilir. Makinanın tasarımında uzun süreli ölçümlerden çıkarılan veriler yerine en yüksek rüzgar hızı kullanılabilir. Rüzgarın en yüksek hızı türbin kanatlarının ve kulenin yapısal dizaynında göz önüne alınması gerekir. /20/

## 2.7. RÜZGAR HIZI

Rüzgarın hızı, havanın hareket süratine bağlıdır. Bu hız saniyede metre veya saatte kilometre olarak ifade edilir.

Rüzgarın gücü, rüzgar hızının küpü ile doğru orantılı

olduğu halde,hava yoğunluğunun birinci dereceden kuvvetiyle doğru orantılıdır.Bundan dolayı,rüzgar hızının rüzgarın iş yapabilme yeteneğine etkisi,hava yoğunluğunun etkisinden çok daha fazladır.

Rüzgar hızı çok büyük oranda değişim gösterir.Rüzgarın estiği iki bölge arasındaki basınç farkı ne kadar büyük ise rüzgar hızıda o oranda büyük olur.Rüzgar hızı Beaufort skalasındaki esaslara göre tespit edilir.Beaufort skalası 0,sakinden 12 ile 17 Orkan kasırgaya kadar olan değerleri gösterir./21/

## 2.8.RÜZGAR HIZINA ETKİ EDEN FAKTÖRLER

Rüzgarın hızının sayısal değerine etki eden faktörler çok çeşitlidir.Bu faktörlerden en önemlileri aşağıda sıralanmıştır:

- a) İzobar çizgilerinin etkisi,
- b) Enlem derecelerinin etkisi,
- c) Yüzey şekillerinin etkisi,
- d) Hava yoğunluğunun etkisi,
- e) Yüksekliğin etkisi, dir./21/

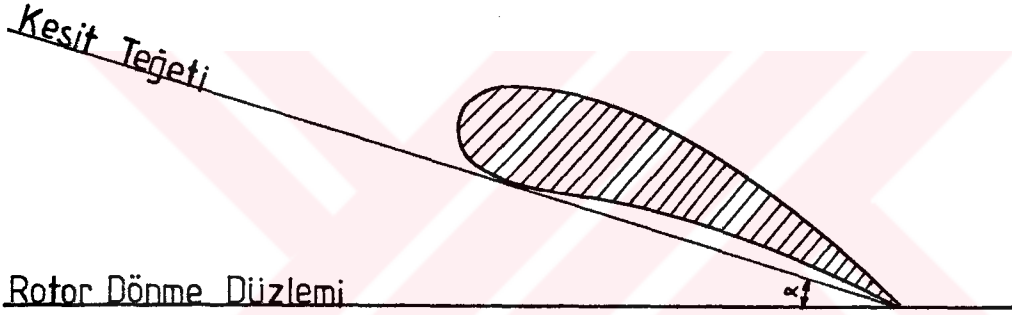
## BÖLÜM 3

### ROTOR HAKKINDA BİLGİLER

#### 3.1. ROTOR HAREKET MİKTARLARI TEORİSİ

Bir rotor, eşit aralıklı belirli sayıda kanattan meydana gelir.

Kanatlardan herhangi birinin rotor dönme ekseninden bir  $r$  mesafesindeki kesitinin kirişi kanadın dönme düzlemi ile bir  $\alpha$  açısı yapar. Aşağıdaki şekil 3.1'de bu açı gösterilmiştir.



Şekil 3.1 :  $\alpha$  açısı ve profil eğriligi

$\alpha$  açısı ve profil eğriligi, rotor dönme ekseninden kanat boyunca uzaklaştıkça çaprazlığı (dönme düzlemine göre) bozulur. Bir rotor, hava içerisinde bir civatanın somunu içerisindeki hareketine benzer şekilde hareket eder.

Rotorun ilerlemesi tur başına  $2 \cdot \pi \cdot r \cdot \tan \alpha$  değerindedir. Bu değer hatve (adım) diye tanımlanır. Gerçekte bu değer oluşturulmuş bütün kanat elemanları için aynı değerde değildir. Pervane eksenine, maksimum yarıçapın  $2/3$  mesafesindeki bir noktada bulunan kanat elemanının  $2 \cdot \pi \cdot r \cdot \tan \alpha$  değerine rotorun "geometrik hatvesi" denir. Diğer yandan hava, kanadın etkisinde sıkışarak hacim değişikliğine maruz kalır ve tur başına ilerleme geometrik hatveye eşit olmaz herhangi bir değer olur. Bu durumda rotor için pervane çekiş gücü ortadan kalktığından tur başına ilerleme değerine "deneysel hatve" şeklinde tanımlama yoluna gidilir. Bu çapa göre deneysel ortalama

hatve değeri bir deney raporu yardımıyla rotorun karakteristikleri olarak tanımlanır. Görülebileceği üzere bu değer ancak deneysel metodla bulunabilir.

Rotor tarafından meydana getirilen T çekişi ve rotorun dönmesini sağlayan Q momenti, V aksenal hızının, devir sayısı n'nin (yada açısal hızının) ve D, rotor çapının fonksiyonu olarak izah edilir. Bir rotorun çalışma şartı, ilerlemenin gerçekleşen dönme sayısına oranı ile tanımlanır. Ancak bu parametreyi boyutsuz bir katsayı ile göstermek tercih edilir. Rotor çalışma şartı,

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

Aşağıda verilecek katsayılar bir rotorun çekişi ve momentiyile ilişkilidir.

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

Bazen aşağıdaki katsayıları kullanmak daha pratiktir.

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

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

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

a) İleri İtici Rotor

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

b) Rüzgar Türbini Rotoru

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

c) Ventilator

Hava akımı üretmek için kullanılan bir pervanedir.

d) Anemometre

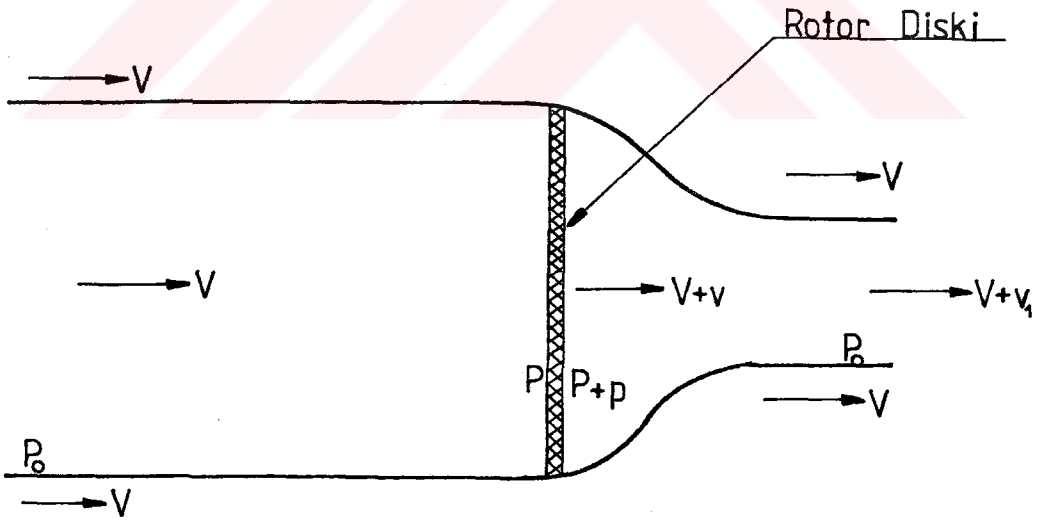
Dönme hızının ölçülmesi ile havanın izafi çizgisel hızının tanımlanmasına yarayan bir pervanedir. Pervane söz konusu olduğunda

kullanım yeri neresi olursa olsun çalışma teorisi her zaman aynıdır. Pervane şekli ise kullanım yerine göre değişecektir. Aerodinamik incelemelerin ötesinde aynı zamanda mukavemet şartları ve boyutunda olayda göz önüne alınması gerekmektedir. Diğer tertibatlarda pervanenin yerini tutabilir. Örneğin, sabit bir eksen etrafında serbestçe dönebilen çubukların uçlarına içi boş yarım küreler monte edilirse, bir rüzgar türbini rotoru gibi veya bir anemometre gibi kullanıma hazır aletler elde edilir.

Rotorun boyutları yada dönme hızı söz konusu olduğunda, kanat uçlarının hızı, ses hızı büyüklüğündedir. Havanın sıkışabilirliği, kanat elemanları üzerine etki eden kuvvetler için içine karışır. Bu sonuç 224 (m/s)'lik çevresel bir hızdan itibaren önem kazanır. Geliştirilecek teoride havanın sıkışabilirliği göz önüne alınarak ortaya atılmıştır. Bundan dolayı bir rotorun karakteristiklerine düzeltmeler getirmek gerekir. /20/

### 3.2. HAREKET MİKTARLARI TEORİSİ

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



Sekil 3.2 : Hareket miktarları teorisi

Rotorun çok sayıda kanattan oluştuğu, adeta dairesel bir disk şekline dönüştüğü ve aynı zamanda bu plaka üzerinde her noktanın çekiş kuvvetinin aynı olduğu varsayılır. Hava akımının dönmesi ile ilgili moment ihmal edilecektir. Rotor diskinden geçen

akışı sürekli tutabilmek açısından, akışkanın aksenal hızının sabit ve uniform olacağı dikkate alınacaktır.

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

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

$$H_0 = P_0 + 1/2 \cdot \rho \cdot V^2 = P + 1/2 \cdot \rho \cdot (V + v)^2 \quad (3.2)$$

$$H_1 = P_0 + 1/2 \cdot \rho \cdot (V + v_1)^2 = P + p + 1/2 \cdot \rho \cdot (V + v)^2 \quad (3.3)$$

Buradan şu sonuçlar çıkartılabilir:

$$p = H_1 - H_0 \quad (3.4)$$

$$p = \rho \cdot (V + 1/2 \cdot v_1) \cdot v_1 \quad (3.5)$$

Teoremin bu uygulamasına hareket miktarları yansıtılırsa çekiş kuvveti elde edilecektir.

$$T = A \cdot \rho \cdot (V + v) \cdot v_1 \quad (3.6)$$

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

$$p = \rho \cdot (V + v) \cdot v_1 \quad (3.7)$$

$p$ 'nin bu iki denklemini mukayese edersek;

$$V = 1/2 \cdot v_1, \text{ sonucu ortaya çıkar.}$$

Su halde akım çizgisinde pervane diskinin hemen önünde ve arkasında karşılıklı olarak eşit bir miktar için hız artışı

gerçeklenir. Çekiş kuvveti şu hale gelir.

$$T = 2 \cdot A \cdot \rho \cdot (V + v) \cdot v \quad (3.8)$$

Şimdi birim zamandaki akışkanın kinetik enerji değişimi

göz önüne alınacak olursa,

$$E = 1/2 \cdot A \cdot \rho \cdot (V + v) \cdot (V + v_1)^2 - v^2 \quad (3.9)$$

$$E = 2 \cdot A \cdot \rho \cdot (V + v)^2 \cdot v \quad (3.10)$$

$$E = T \cdot (V + v) \quad (3.11)$$

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

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

Akışkanın toplam kütlelerinin hareketsiz kaldığı durum göz önüne alınacak olursa, rotora bu duran havada  $V$  hızıyla ilerlerken hız ile çekiş arasındaki bir önceki ilişki değişmeden kalır. Fakat bu çekiş tarafından gelişen güç, rotorda  $T \cdot V$  ve akışkanda  $T \cdot v$  kadardır. Bu ikinci terim, akışkanın birim zamandaki kinetik enerjisinin izafi artışı tarafından sağlanmıştır. (Hızdaki izafi artış  $v_1$ 'dir)

$$E = 1/2 \cdot A \cdot \rho \cdot (V + v) \cdot v_1^2 \quad (3.13)$$

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

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

### 3.3. TEORİK VERİM

Bir rotorun teorik verimi kullanılan gücün, toplam güce oranıyla tanımlanır.

$$\eta = (T \cdot v) / (\Omega \cdot Q) = v / (V + v) \quad (3.16)$$

$v = a \cdot V$  olduğu varsayılırsa bu denklem;

$$\eta = 1 / (1 + a) , \text{ haline gelir.}$$

Bu ilişki bir rotorun pratikte asla ulaşılamayan teorik verimidir.

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

a) Kanadın profil çekışı (çekiş formu ve sürtünmeyi içerir)

b) Serbest akan akım çizgisinin dönme kinetik enerjisi

c) Akışın periyodikliği ve kanadın uçlarındaki itme kayıplarını

bu sınırlı kayıplar, pervane diskinde üniform olmayan itici kuvvetin

hisselerini tanımlar.

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

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

$$T = 2 \cdot A \cdot \rho \cdot V^2 \cdot (1 + a) \cdot a \quad (3.17)$$

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

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

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

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

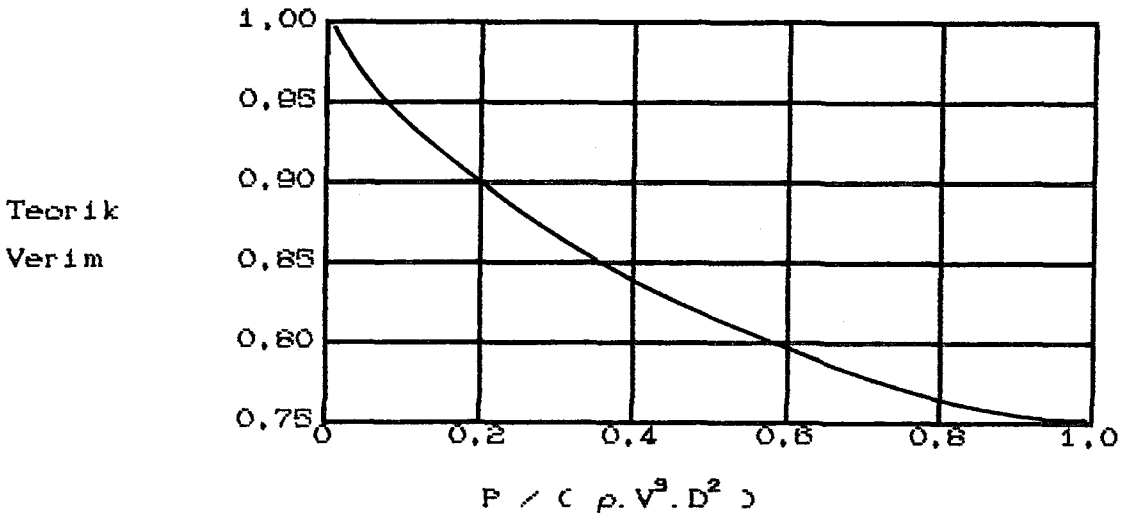
P gücünün, D çaplı rotor ile ilişkili olduğu varsayılırsa ve  $\eta \cdot P$ 'nin,

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

itici kuvvetiyle gerçekleştirilen güce eşitliği yazılırsa;

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

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



Grafik 3.1 : Güç sayısı ile teorik verim arasındaki ilişki

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

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

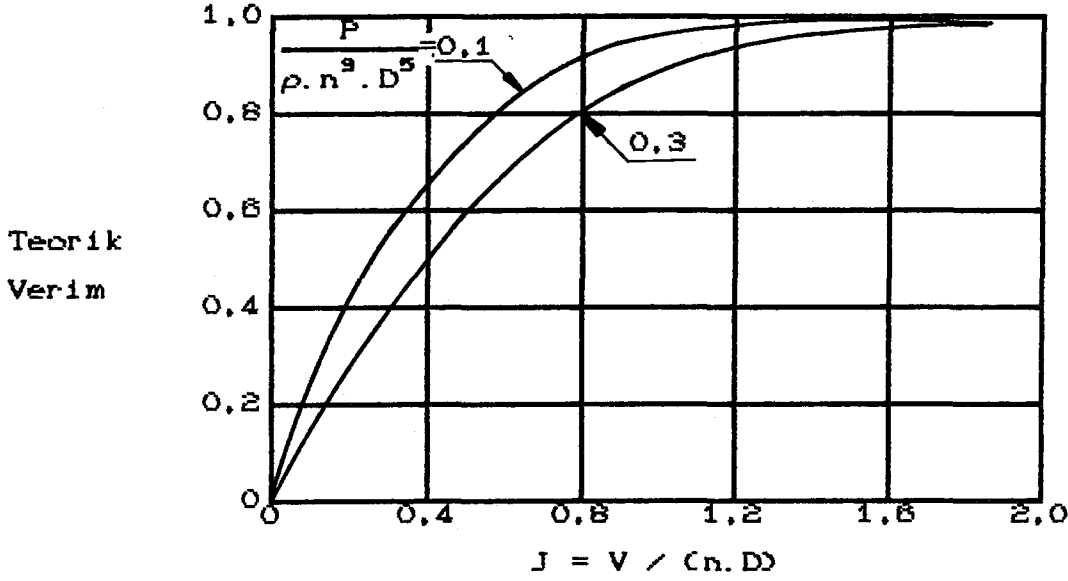
Tablo 3.1 :Güç katsayısı ve teorik verim değerleri

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

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

$$\frac{1 - \eta}{\eta} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{J^3} \cdot \frac{P}{\rho \cdot n^3 \cdot D^5} \quad (3.24)$$

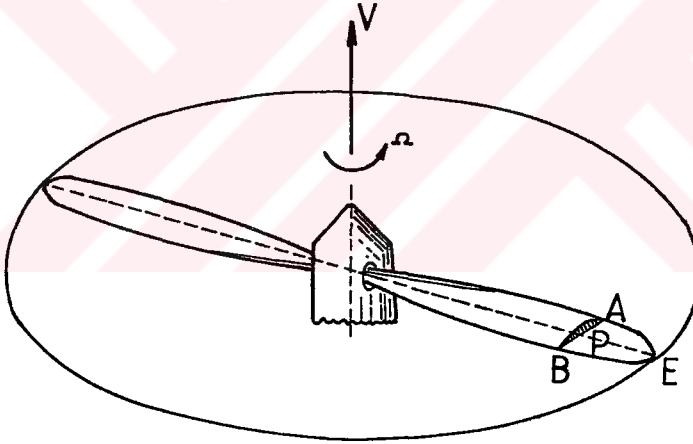
Bu formülde n, rotorun dönme sayısıdır. Bu sayı redüktörün çıkış milindekinden farklıdır. Öyleyse farklı  $P / (\rho \cdot n^3 \cdot D^5)$  güç katsayıları için J,  $\eta$  fonksiyonunda eğriler çizmek mümkündür. Bu teorik verim eğrileri, sabit bir dönme hızında değişik kanat hatveleri uygulanan bir rotorunki gibidir. Grafik 3.2'deki iki eğri  $P / (\rho \cdot n^3 \cdot D^5)$  'in iki değeri için J katsayısının teorik verim ile değişimini gösterir.  $\eta, J$  ile önce hızlı sonra yavaş artar. /20/



Grafik 3.2: J katsayısının teorik verim ile değişimi

### 3.4. ROTOR

Bir rotor bir eksen etrafında dönen belirli sayıda kanattan oluşur.



Şekil 3.3 : Rotor

Rotor hava taşıyıcısını hareket ettirebilecek trastı sağlayacak şekilde dizayn edilirler. Dönme eksenine yöndeki trast,  $T$ ; rotor şaftının açısal hızı,  $\Omega$ ; motor tarafından sağlanan moment,  $Q$  ve dönme eksenine yöndeki ilerletici hız,  $V$ 'dir. Birim zamanda motordan elde edilen iş,  $Q \cdot \Omega$  ve rotordan elde edilen iş ise  $T \cdot V$ 'dir. Böylece rotor moment gücünü, trast gücüne dönüştürmüş olur. Rotor'un verim

ifadesi aşağıda verilmiştir.

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

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

Eksenleri dönme eksenine aynı olan kanatların her bir noktası dairesel silindir üzerinde hareket eder böylece her bir nokta bu silindir içinde helisel yada spiral eğri çizer, bu silindirin yalnızca bir tane maksimum yarıçapı vardır. Şekil 3.3'te rotor kanadının E ile gösterilen uç noktası bu silindir içinde bulunmaktadır. E noktasından itibaren OE dönme eksenine dik bir eksen çizebiliriz. Bu eksen, kanat eksenine olarak adlandırılır. Dönme eksenine dik OE eksenine boyunca uzanan silindirik kısım, pervane diski yada kısaca disk olarak adlandırılmaktadır. OE üzerinde alacağımız bir P noktası ile  $OP = r$  olur buda yarıçapı OP, eksenine dönme eksenine olan silindiridir. Bu silindir üzerinde bulunan kanat üzerindeki her bir nokta airfoil profiline benzeyen eğriler meydana getirecektir, bu eğriler kanadın şekliyle değişkenlik gösterir. Bu nedendir ki düzlemsel planda kanadın şekli belirlenmiş olmalıdır. Kanat eksenine dik P düzlemi boyunca AB ile işaretlenmiş olan profil şekil 3.3'te gösterildiği gibi kanat profili olarak adlandırılır.

Kanat profili üzerinde dönme ekseninden  $r$  ile  $r + dr$  mesafeleri arasında kalan kısma, kanat elemanı adı verilir. /8/

### 3.5. TRAST OLUŞUMU

Herbir kanat elemanı bir airfoil gibi davranır, hareketi esnasında kaldırma ve sürükleme kuvvetlerinin etkisine maruz kalır. Burada hızların oluşumu ve etkileri ihmal edilmiş yalnızca ana prensiplerden bahsedilmiştir.

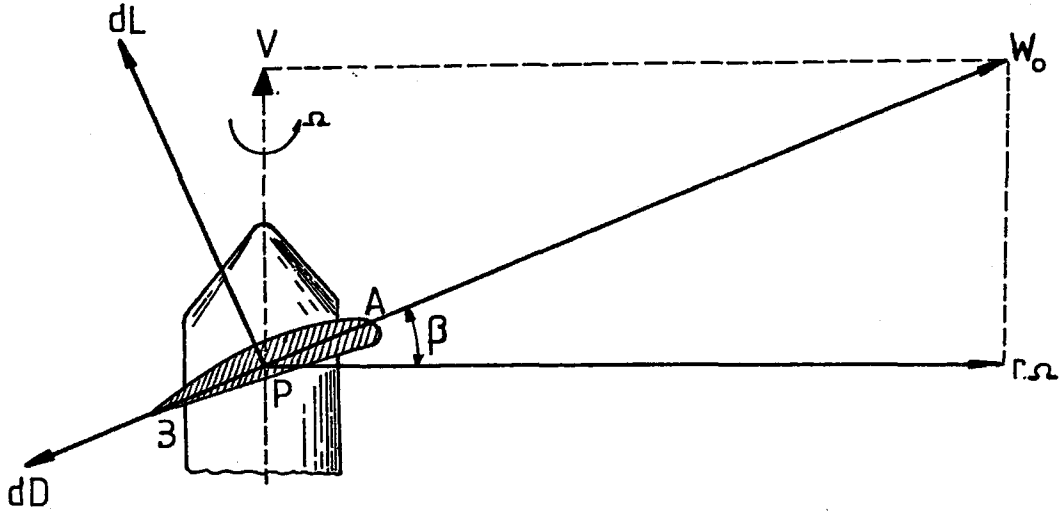
Şekil 3.4'de kanat elemanı gösterilmiştir.

Bu kısımda bazı kabullerimiz olacaktır.

Kabul : Hava taşıtı pervanesinin dönme eksenine doğrultusunda hareket etmektedir.

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

Kabul : Rotasyonel hareket yüzünden  $r$  ile  $r + dr$  mesafeleri arasında kalan kanat elemanının her bir noktası  $r.\Omega$  hızına sahiptir.



Şekil 3.4 :Kanat elemanı

$r$ 'nin büyük değerleri için bu kabul çok büyük bir ihtimalle doğrudur. Bileşke hız,  $W_0$  ise  $W_0^2 = V^2 + r^2 \cdot \Omega^2$  'dir.  $W_0$  hızına hızına dik  $dL$ , kaldırma kuvveti ve  $W_0$  hızına zıt yönde  $dD$ , sürüklenme kuvveti meydana gelir.

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

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

Toplam trast, kanat elemanında elde edilen diferansiyel trastın  $r$  ile çarpımına eşittir.

Aynı anda oluşacak moment ifadeside aşağıda verilmiştir.

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

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

Eğer  $\Omega = 0$  ise  $W_0 = V$  ve  $\beta = 90^\circ$  olmakta sonuçta

$$dQ = r \cdot dL \text{ olmaktadır. } V \text{ hızı yönünde sıfır kaldırma elde}$$

edilebilecek şekilde kanat profili ayarlanır sonuçta  $dQ = 0$  olur ve rotor shaftından moment elde edilemez. Dengeyi sağlamak amacıyla rotorun her bir kanadı aynı şekilde ayarlanmalıdır. Rotorlara uygulanan pitch kontrolü ile aynı amaca ulaşılabilir.

Kanat elemanında kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin varlığını ispatlarken üstü kapalı bir şekilde ifade edilsede kanat elemanlarında sirkülasyon oluştuğu kabul edilmiştir böylece kanat yüzeylerinde güçlü rüzgar hareketleri oluşmuş olacaktır. Böylece akış artacak ve  $W_0$  hızına ilave hızlar oluşacaktır. /8/

### 3.6. BASINÇ VE HIZLAR

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

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

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

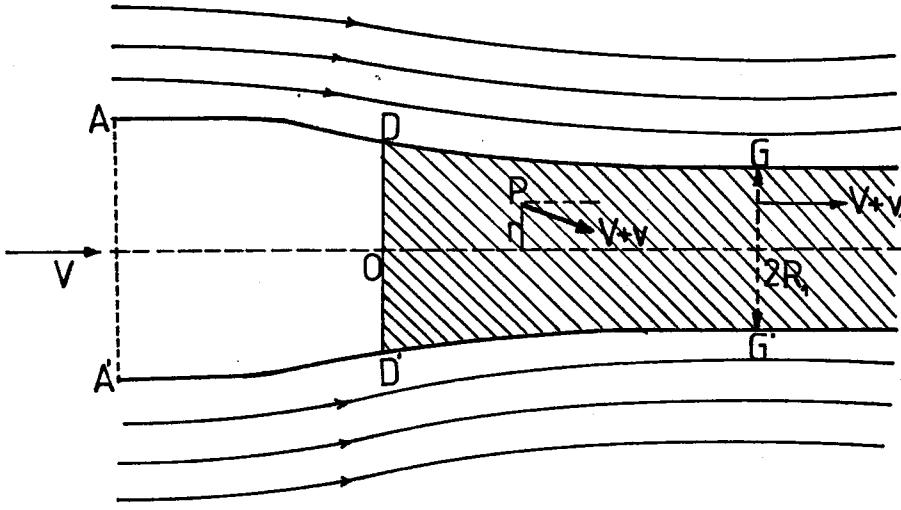
$$(\bar{q})^2 = q_a^2 + q_r^2 + (q_t - r.\Omega)^2 = q^2 + r^2.\Omega^2 - 2.q_t.r.\Omega \quad (3.28)$$

Böylece Bernoulli ifadesi aşağıdaki şekli alır.

$$P/\rho + 1/2.q^2 - q_t.r.\Omega = \text{Sabit} \quad (3.29)$$

$q$ , hava hızıdır.

Şekil 3.5 'te  $O$  merkezli rotor diskinin  $(DD')$  boyuna kesiti verilmiştir, taralı kısım rotor arkasında oluşan hava akışını ifade etmektedir ve akış referans ekseni boyunca gerçekleştiği kabul edilmektedir. Akışın meydana geldiği bölgenin dışındaki her yerde rotasyonel olmayan bir hareket vardır. Rotorun önündeki bölgede  $V$  hızına sahip düzenli bir hava akımı vardır.



Sekil 3.5 : Rotorda hava akımı

Disk in en büyük çaplı DD' ile gösterilen bölgesinde akışın meydana geldiği alan kendi kendine daralmaktadır ve şekil 3.5 'te gösterildiği gibi GG' çaplı dairesel silindir formunu almaktadır.

Sekil 3.5 'te ADG ve A'D'G' ile gösterilen sınır yüzeylerdeki ve rotor önündeki hava hareketlerinin ihmal edilmesi sonucu pek etkilemez ama akışın meydana geldiği bölgenin içinde ve dışında hızlardaki ani değişiklikler, akışın meydana geldiği sınırdaki vorteks (girdap) oluşmasına neden olabilir, AD ile gösterilen kısımda hızlarda değişiklik oluşamayacağından vorteks'te oluşmaz.

Akışın meydana geldiği bölge içinde bir P noktası alalım. P noktasındaki hava partikülünün açısal hızı  $\omega$  ise  $q_1 = r \cdot \omega$  'dir. P noktası ile rotorun dönme eksenini arasındaki mesafede r'dir. Akışın meydana geldiği bölgenin dışındaki açısal hız ( $\omega$ ) sıfırdır çünkü hareket rotasyonel olmadığından sirkülasyonda oluşmamaktadır. Böylece 3.29 nolu ifade aşağıdaki gibi yeniden ifade edilebilir.

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

$\Pi$ , diskin önünde meydana gelen basınçtır böylece 3.30 nolu eşitliği tüm akış boyunca kullanabiliriz.

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

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

Bu ifade akış için kesin sonuç verebilecek bir eşitliktir.

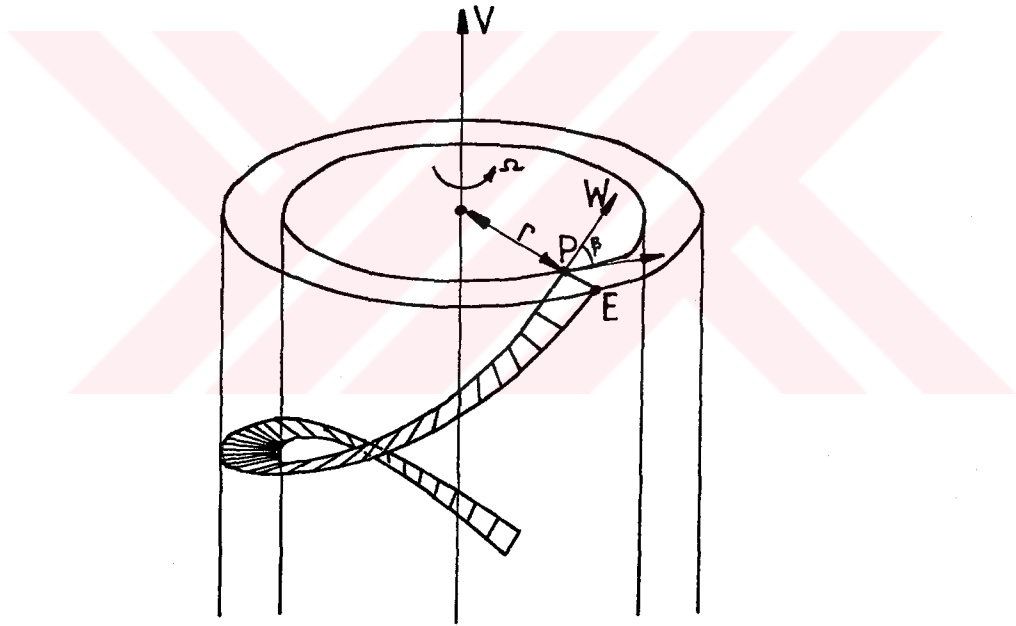
Eğer P'nin pozisyonunu dairesel koordinatlarda  $(r, \theta, z)$  ile tanımlarsak, z, O merkezi ile akım yönü arasındaki mesafedir. P, basıncıdır ve  $\omega$  ise bu uç koordinatın fonksiyonu olan açısal hızdır. /8/

### 3.7. HIZLARIN BİRBİRLERİ İLE OLAN İLİŞKİLERİ

Vorteks sisteminde bahsedilen hızlardaki artışlar, hızlarda girişim olarak bilinir.

Bu hız üç adet bileşene sahiptir ki bunlar aksenal, radyal ve teğetsel bileşenlerdir. Teğetsel bileşen akım bölgesi içinde dikkate aldığımız noktadan geçen dairesel kesite teğet olan hızdır.

Kabul : Radyal bileşen ihmal edilmiştir.



Şekil 3.6 : Disk düzlemi içindeki girişim hızları

Disk düzlemi içinde, akım yönü doğrultusunda şekil 3.6 'da gösterildiği gibi girişim hızı oluşur. Aksenal bileşeni rotor ilerleyiş yönünün tersi yöndedir, teğetsel bileşen ise dönme yönündedir. Böylece rotor relatif olarak aksenal bileşenlerin toplamı  $V \cdot (1 + a)$ 'ya yükselir ve teğetsel bileşenlerin toplamı ise

$r \cdot \Omega (1 - a')$ 'ne azalır.  $a$  ve  $a'$  sayıları girişim faktörü olarak adlandırılır, rotor için her ikisinde pozitif değer alır.

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

$$v = a \cdot V = 1/2 \cdot v_1 \quad (3.32)$$

Sınır yüzeydeki rüzgar hareketleri yüzünden  $P_1$  noktasında  $\omega'$ , açısal hızı oluşursa simetriklikten dolayı  $P_2$  noktasında da  $-\omega'$  açısal hızı oluşur. Böylece  $P_1$  noktasında indüklenen toplam açısal hız  $1/2 \cdot \omega_1 + \omega'$  şeklinde ve  $P_2$  noktasında indüklenen toplam açısal hız ise  $1/2 \cdot \omega_1 - \omega'$  şeklinde yazılabilir ama  $P_2$  noktasında meydana gelen akış rotasyonel olmadığından  $1/2 \cdot \omega_1 - \omega' = 0$  yazılmalıdır. Böylece hem sınır hemde serbest akış esnasında  $P_1$  noktasında meydana gelen hızların toplamı  $\omega_1 = 2 \cdot \omega' = 2 \cdot a' \cdot \Omega$ 'dur.  $\sqrt{8}$

### 3.8. SONSUZ SAYIDA KANAT KULLANIMI

Eğer rotor sonsuz sayıda kanattan oluşuyorsa ve herbir kanat toplam trastın çok küçük bir kısmını taşıyorsa, sistemin durumu (halî) dikkate değer bir basitlik kazanır yani momentum prensibi kolaylıkla uygulanabilir. Şekil 3.5'den faydalanarak AA' ve GG' ile sınırlanan hacimde meydana gelen hava akışı dikkate alınmalıdır. Akımın meydana geldiği bölgenin önünde  $V$  hızı dönme eksenine paraleldir ve basınçta  $\Pi$ 'dir. Akışın meydana geldiği bölgenin arkasındaki bir noktada hava akımı silindirik bir form alır. Akımın meydana geldiği bu bölgede  $p, \omega, v$  değerleriyle  $p_1, \omega_1, v_1$  değerlerinin karışmaması için 1 indisi kullanılmıştır ve yalnızca  $r$ 'nin fonksiyonudurlar,  $\theta$  açısının bir fonksiyonu yoktur. Akımın meydana geldiği bu bölgenin çapı  $2 \cdot R_1$  alınabilir. Akışkana etki eden kuvvetler aşağıda sıralanmıştır.

- Trast , T
- AA' kesitinde,  $\Pi$  sabit basıncı yüzünden meydana gelen basınç trasti
- GG' kesitinde,  $p_1$  basıncı yüzünden meydana gelen basınç trasti
- AG , A'G' eğrisel sınır yüzeyde  $p$  basıncı nedeniyle meydana gelen basınç trasti

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

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

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

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

ifadesini kullanarak aşağıdaki ifadeyi elde edebiliriz.

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

X'i sıfır alabiliriz (Daha sonra ispatlanacak)

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

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

Bunun anlamı dönme eksenine doğru  $p_1$  basıncı azalma gösterir.  $r = R_1$  olduğunda  $p_1 = \Pi$  olacağından aşağıdaki ifade elde edilir. /8/

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

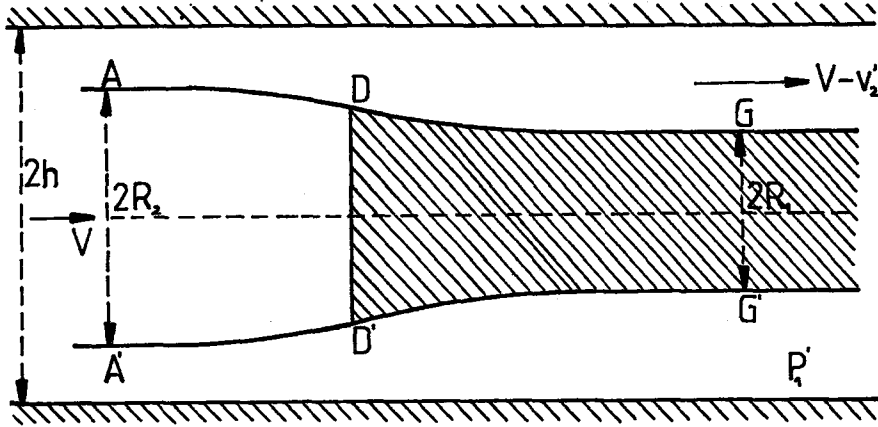
### 3.9. HAVA TUNELİ İÇİNDE ÇALIŞAN ROTOR

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

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

$p_1'$ , akımın meydana geldiği bölgenin dışındaki ortam basıncıdır. Bernoulli teoremi ( $\omega = 0$ ,  $v = -v_2'$ ) vasıtasıyla,

$$p_1 - \Pi = \rho \cdot v_2' \cdot (V - 1/2 \cdot v_2') \quad , \text{ yazılabilir.}$$



Sekil 3.7 : Hava tüneli içinde çalışan rotor

3.37 nolu denklemde  $v_2'$  , sabit bir hıza sahiptir.

$$X = 2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot \int_{R_1}^h -1/2 \cdot (v_2')^2 \cdot r \cdot dr = -1/2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot (h^2 - R_1^2) \cdot (v_2')^2 \quad (3.38)$$

Yukarıda görüldüğü gibi X'in değeri negatiftir yani trast'a zıt yöndedir.

Süreklilik denklemi vasıtasıyla şekil 3.7'de de görüldüğü gibi akımın genişleme gösterdiği AA' kesitinde çap  $2 \cdot R_2$  ise aşağıdaki ifadeleri yazabiliriz.

$$\pi \cdot (h^2 - R_2^2) \cdot V = \pi \cdot (h^2 - R_1^2) \cdot (V - v_2') \quad (3.39)$$

$$v_2' = (R_2^2 - R_1^2) \cdot V / (h^2 - R_1^2) \quad (3.40)$$

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

h mesafesi sonsuza giderse, X 'te sifıra gider. /8/

### 3.10. FROUDE KANUNU

Rotor sonsuz sayıda kanada sahiptir.

Kabul : Akışta meydana gelen daralma ihmal edilmiştir.

Akışın meydana geldiği bölgedeki diaframın yarıçapı R'dir.

AA' ile GG' arası genişlemenin meydana geldiği kısımdır ve akış, Diskten sonsuz uzaklıkta meydana gelmektedir. GG' kesitinde dönme ekseninden r kadar radyal mesafede bulunan bir noktanın hızı  $V+v_1$  olacaktır,  $v_1$  akımın oluştuğu bölgede meydana gelen vorteks sistemi

icindeki hızdır. Benzer bir şekilde vorteks sistemi içindeki aynı nokta için açısal hız,  $\omega_1$  'dir. Böylece GG' 'ne ait bir noktada hızlar  $1/2 \cdot v_1, 1/2 \cdot \omega_1$  değerine eşit olur. r yarıçaplı diskin herhangi bir noktasında da hızlar  $1/2 \cdot v_1$  ve  $1/2 \cdot \omega_1$  değerine eşit olur. /B/

### 3.11. GİRİŞİM FAKTÖRLERİ

Rotor, sonsuz sayıda kanata sahiptir.

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

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

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

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

$$dT_r/dr = 4 \cdot \pi \cdot r \cdot \rho \cdot V^2 \cdot a \cdot (1 + a) \quad (3.44)$$

$$dQ_r/dr = 4 \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho \cdot V \cdot \Omega \cdot (1 + a) \cdot a' \quad (3.45)$$

$$v_1 = 2 \cdot a \cdot V \quad ; \quad \omega_1 = 2 \cdot a' \cdot \Omega \quad (3.46)$$

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

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

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

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

/B/

### 3.12. ROTOR DİZAYNI

Büyük kapasiteli rüzgar türbinleri için iki kanatlı rotor kullanmak mali açıdan da optimum bir çözümdür.

1941 yılında Vermont'ta Putnam makinası olarak bilinen rüzgar türbini inşa edilmiştir. 53,34 (m) çapında iki kanatlı rotora sahip bulunmaktaydı. Hewson (Oregon, P. U. D. Yönetici) 1941 yılında Putnam'ın rotoru ile 1971 yılı fiyatlarını mukayese etmiştir. Onun mukayesesi göstermiştir ki iki kanatlı rotorun maliyeti, tüm tesis maliyetinin % 10 'una tekabül etmektedir. Üç kanatlı rotorun maliyeti ise tüm tesis maliyetinin % 14 'üne denk düşmektedir. NASA Lewis laboratuvarlarında 100 (kW) gücünde bir rüzgar türbini dizayn çalışmalarında rotorun maliyeti, toplam maliyetin % 46 'sını eğer rotor üç kanatlı ise toplam maliyetin % 56 'sını içermektedir. Günümüzde modern kanatlar, Putnam'ın makinesine göre çok karmaşık bir yapıya sahiptir tabiki fiyatları da çok yüksektir bu nedenle iki kanatlı rotora ilgi çok daha fazladır.

Kanat sayısı ne kadar çok olursa, ilk hareket için o kadar çok momente ihtiyaç duyulur. Bu nedenle, redüksiyon miktarı düşük olsa bile çok kanatlı rotorlarda herbir kanadın verimi düşük olacaktır.

Düşük kapasiteli rüzgar türbinlerinde genellikle iki kanatlı rotor kullanılır. /9/

### 3.13. ROTOR İLE KULE ARASINDAKİ İLİŞKİ

Birçok bölgede maksimum rüzgar hızı (tornada ve fırtınalar hariç) ortalama rüzgar hızını en az 8 kez aşar. Hem rotor hemde desteği şiddetli olmayan fırtınalarda meydana gelen rüzgar kuvvetine dayanabilir. Kanat pitch açısına bağlı olarak serbestçe dönen rotorda aerodinamik drag, hareketsiz rotora göre on kez daha fazladır. Özellikle büyük rotorlarda, rotorun baskın bir yapıda olabilmesi için çeşitli drag kontrol sistemleri kullanılması zorunludur. Özellikle ufak boyutlu rüzgar türbinlerinde frenleme sistemi veya drag kontrol sistemi merkezkaç kuvvetle, rüzgar hızıyla yada çıkış gücünün seviyesinden faydalanılarak kumanda edilebilir. Rotorda meydana gelecek büyük drag kuvveti, külenin devrilmesine neden olacak çok büyük bir moment oluşmasına neden olur. Rüzgar nedeniyle kulede oluşacak yatay gerilmelere, rotorun zorlanmasıyla meydana gelen yatay gerilmelerde ilave edilmelidir. Kule, her yöndeki

yatay kuvvete dayanabilmelidir;rüzgar yönündeki değişikliğe bağlı olarak rotor 360° dönebilme serbestliğine sahip olmalıdır.

Rüzgar hızındaki değişiklik kulede titreşimsel kuvvetlerin oluşmasına neden olur.Bu yüzden,kule malzemesinin seçimi malzeme yorulması yüzünden önemlidir.

Rüzgar türbinlerinde en önemli potansiyel tehlikelerden biri ise rotorun aşırı hızlanmasıdır.Yüksek hızlara sahip rüzgarlar,serbestçe dönebilen rotorda tehlikeli bir şekilde drag'ın artmasına sebep olduğu gibi rotorun kendi kendini tahrip etmesinede neden olur.Yapısal sağlamlık sadece kulenin dayanımına değil aynı zamanda regülasyon sisteminede bağımlı bulunmaktadır.Kule gerekenden on kat sağlam yapılsa bile eğer regülasyon sistemi güvenilir değilse tahrip olur./@/

### 3.14. ROTORUN YERİ

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

Eğer rotor rüzgarı arkasına alırsa,kuledeki titreşimler azalır.Bu nedenle titreşimler kanat üzerinde toplanır çünkü onlar kule nedeniyle oluşan hava akımı vasıtasıyla taşınır.Kulenin parçalanması yerine kanadın parçalanması daha az bir felakettir.Başka bir deyişle kanattaki başarısızlığın getireceği felaket,kulede meydana gelebilecek bir felaket demektir./@/

### 3.15. ROTORUN BUZ VE KARLANMADAN KORUNMASI

Kanatların üzerinde kar ve buzlanma olması işletme açısından sakıncalıdır.Kanatlardaki titreşimler kanatların buz ve kar yüzünden kabuk bağlamasını engeller./@/

## BÖLÜM 4

### KANAT PROFİLİ DİZAYNI

#### 4.1. KANAT-RÜZGAR ETKİLEŞİMİ VE KANAT KARAKTERİSTİKLERİ

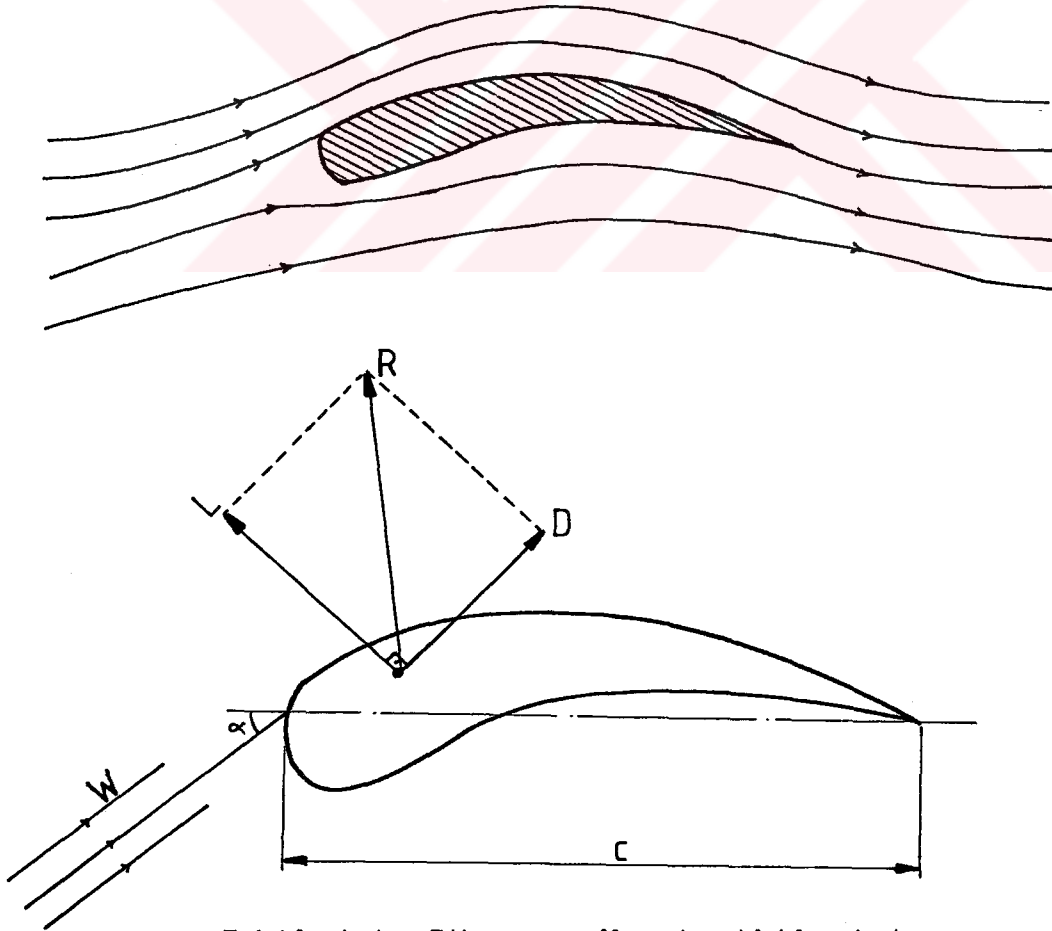
Kutta teoremine göre,  $W$  hızındaki bir akım içerisinde konmuş bir kanada  $W$  hızına dik bir yönde,

$$R = L = \rho \cdot W \cdot \Gamma \quad (4.1)$$

şiddetinde bir kuvvet etkimektedir. Sürtünmeli akışkanlar halinde, kanada etkiyen aerodinamik kuvvetin akışa paralel bir bileşimi mevcuttur. O halde genel olarak  $R$  tesir kuvveti iki bileşene ayrılır. Öyleki akışa paralel olan bileşen  $D$ , direnç kuvveti; akışa dik olan bileşen  $L$ , kaldırma kuvvetidir.

$$\Gamma = 1/2 \cdot c \cdot C_L \cdot W \quad (4.2)$$

Yukarıdaki formülle verilen ifade, kanat etrafındaki sirkülasyonu ifade eder.



Sekil 4.1 : Rüzgar - Kanat etkileşimi

c : Cord (Kiriş) uzunluğu  
L : Kaldırma kuvveti  
D : Drag (İtme,direnç) kuvveti  
 $\alpha$  : Etki açısı

Boyut analizi,kanada etkiyen bu kuvvetlerin

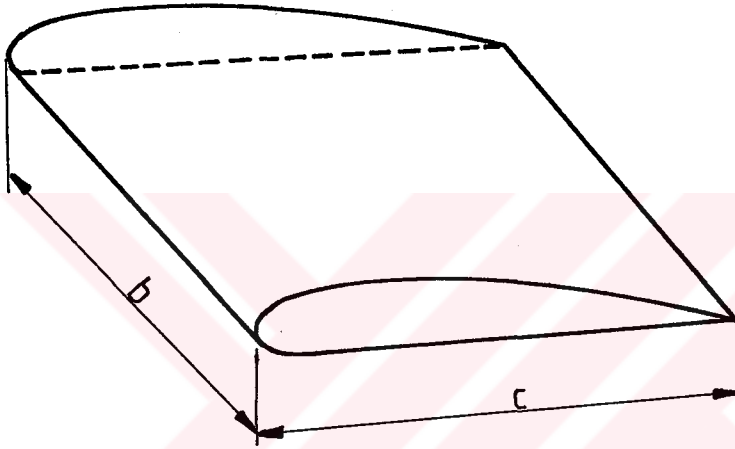
$$L = 1/2 \cdot C_L \cdot \rho \cdot W^2 \cdot S \quad (4.3)$$

$$D = 1/2 \cdot C_D \cdot \rho \cdot W^2 \cdot S \quad (4.4)$$

şeklinde ifade edilebileceğini göstermektedir.

Burada S,kanadın karakteristik yüzeyine karşı gelmektedir.

S yüzeyi olarak,kanat izdüşüm alanı alınır.



Sekil 4.2 :Kanat profili

$$S = b \cdot c \quad (4.5)$$

$C_L$  ve  $C_D$  boyutsuz kaldırma ve direnç katsayılarını göstermektedir. Bu katsayılar belirli bir kanat formu için Reynold (Re) sayısı ve pürüzlülüğün birer fonksiyonudur.

Pürüzsüz ve belirli bir kanat formu için Re sayısı ve hücum açısına bağlı olarak değişen,

$$C_L = f(Re, \alpha) \quad (4.6)$$

$$C_D = f(Re, \alpha) \quad (4.7)$$

fonksiyonları mevcuttur.

D/L veya  $C_D/C_L$  oranı ne kadar küçükse,kanat o kadar verimlidir. Az bir dirençle büyük bir kaldırma temin ediliyor demektir. /18/

#### 4.2. RÜZGAR MAKİNALARININ KARAKTERİSTİKLERİ

Dönüştürücü sistemleri birbirleriyle karşılaştırabilmek için, sistemi tanıtan karakteristik sayılar tarif edilmiştir. Bunların en önemlileri aşağıda açıklanmıştır.

##### a) Güç sayısı ( $C_p$ )

Rotordan elde edilen gücün, rüzgarın sahip olduğu güce oranı şeklinde tarif edilir.

$$C_p = P_R / P = P_R / (1/2 \cdot \rho \cdot V^3 \cdot A) \quad (4.8)$$

Güç sayısı aynı zamanda rotorun veriminide gösterir.

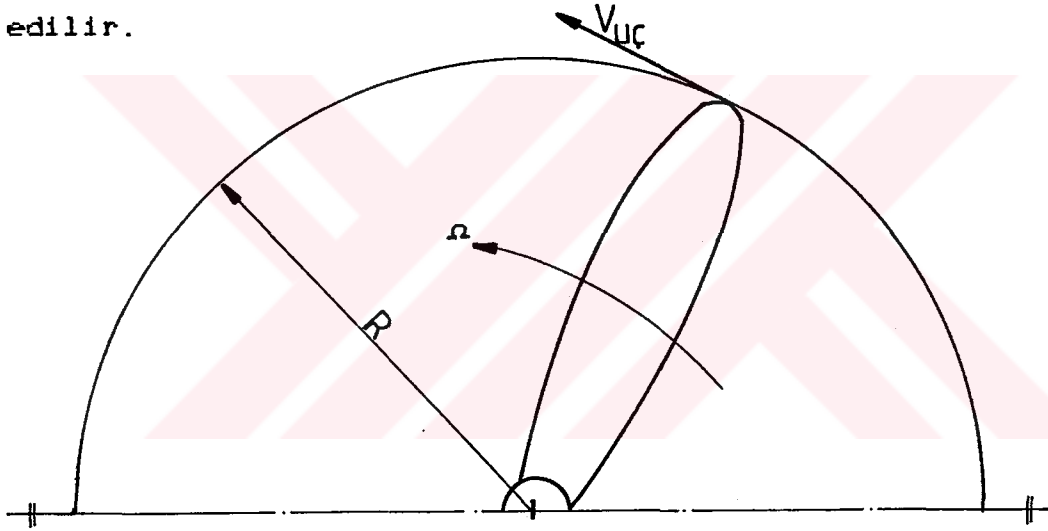
$C_p$  : Güç sayısı (Boyutsuz)

$P_R$  : Rotordan elde edilen güç ( W yada kW )

$P$  : Rüzgar gücü ( " ) 'dır.

##### b) Uç hız oranı ( $\lambda$ )

Kanat ucundaki çevresel hızın, rüzgar hızına oranı şeklinde tarif edilir.



Sekil 4.3 :Kanat ucundaki hız

$$\lambda = (R \cdot \Omega) / V = V_{uc} / V \quad (4.9)$$

$\Omega$  :  $2 \cdot \pi \cdot n$  , Rotorun açısal hızı (1/s)

$n$  : Rotorun devir sayısı (dev./dak.)

$\lambda$  : Uç hız oranı

##### c) Katılık oranı ( $\sigma$ )

$$\sigma = A^\circ / A \quad (4.10)$$

şeklinde tarif edilmiştir.

$A^\circ$  : Rotor kanatlarının toplam alanı ( $m^2$ )

$A$  : Rotor kanatlarının süptürdüğü alan ( $m^2$ ) /19/

#### 4.3. SİSTEMİN GÜÇ FAKTÖRÜ VEYA VERİMİ

$$C_P = \text{Faydalı güç} / \text{Gelen güç} = P_R / P \quad ; \quad C_{P_{\max}} = P_{R_{\max}} / P$$
$$C_{P_{\max}} = P_{R_{\max}} / P = 16/27 = 59,3 (\%)$$

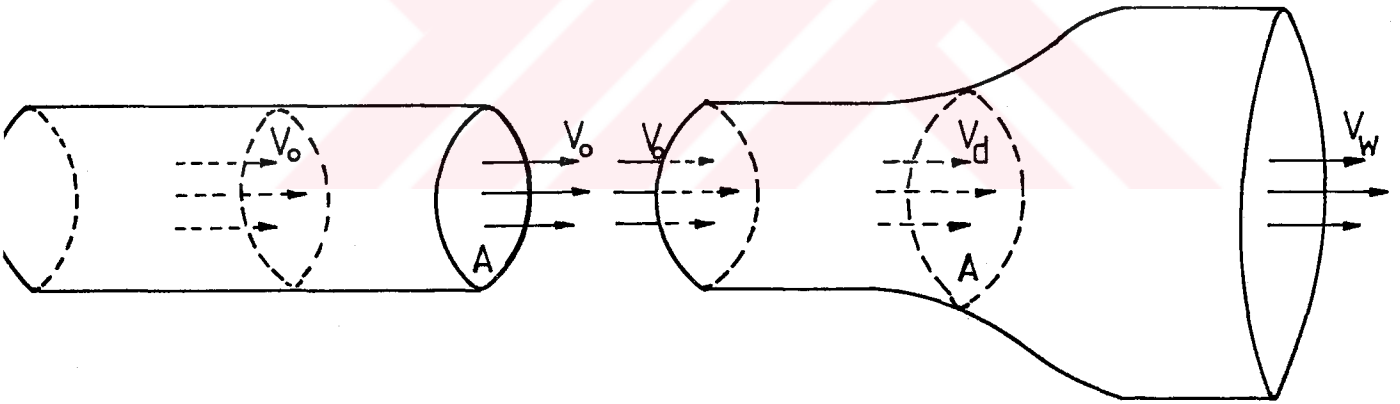
16/27 oranına Lanchester - Betz limiti denir. Bu limit değeri, rüzgar enerjisi elektrik santrallerinin en fazla % 59,3 verime sahip olabileceklerini göstermektedir. /19/

#### 4.4. LANCHESTER - BETZ LİMİTİ

Bir rüzgar türbini tesis etmeden önce seçilen yörenin rüzgar enerjisi potansiyelinin ve buna ait teorik hesapların yapılması gerekir.

Sağlıklı bir tahmin için rüzgar hızı ölçümleri, türbin kanat çapı, kanat sayısı, türbinin yerden yüksekliği, kanat ucu hız oranı ve katılık oranı gibi parametrelerin bilinmesi gerekir.

Bu maksatla, kanat alanı ( $A = \pi \cdot R^2$ ) ve kanat yarı çapı  $R$  olan bir rüzgar türbininin rotoruna  $V_0$  hızıyla yaklaşan rüzgarın, rotor düzleminde  $V_d$ , rotordan uzaklaşırken  $V_w$  hızına ulaşacağını kabul edelim.



a) Rotorsuz

b) Rotorlu ( $V_0 > V_d > V_w$ )

Sekil 4.4 : Rotorda hızlar

Sekil 4.4'deki a ve b, rotora yaklaşan ve uzaklaşan hava kütlelerinin hız değişimini göstermektedir.

Rotorsuz durumda rüzgarın akış yönüne dik, herhangi bir  $A$  alanı içinden birim zamanda taşınan enerji ( $P$ ) aşağıdaki formülde ifade edilmiştir.

$$P = 1/2 \cdot \dot{m} \cdot V_o^2 \quad (W) \quad (4.11)$$

Burada  $\dot{m}$ , kütlelesel debi olup

$$\dot{m} = \rho \cdot V_o \cdot A \quad (kg/s) \quad \text{ifadesi ile bulunur.}$$

Rüzgarın getirdiği güç,

$$P = 1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot V_o^3 \quad (W) \quad (4.12)$$

olarak bulunmaktadır. Bu ifadeden de anlaşılacağı gibi güç, hızın küpü ve tipik alanın yarıçapının karesiyle orantılıdır.

Bu defa akıma dik olarak yerleştirilen rotor üzerinde oluşan kuvvet F, Newton'un ikinci kanundan yararlanılarak bulunabilir.

$$F = \dot{m} \cdot (V_o - V_w) \quad (N) \quad (4.13)$$

olup rotor üzerinde birim zamanda yapılan iş ( $P_r$ ):

$$P_r = F \cdot V_d = \dot{m} \cdot (V_o - V_w) \cdot V_d \quad (W) \quad (4.14)$$

$\dot{m}$ : Rotorlu durumda kütlelesel debi'dir.

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot V_d \quad (kg/s) \quad (4.15)$$

formülüyle ifade edilir.

İş - Enerji ilişkisine göre, birim zamandaki kinetik enerji değişimi rotor üzerinde birim zamanda yapılan işe eşit alınabilir.

$$\dot{m} \cdot (V_o - V_w) \cdot V_d = 1/2 \cdot \dot{m} \cdot (V_o^2 - V_w^2) \quad (4.16)$$

$$V_d = (V_o - V_w)/2 \quad (m/s) \quad (4.17)$$

Yani rotor düzlemindeki akım hızı, rotora yaklaşan ve uzaklaşan akımların hızlarının ortalamasıdır.

$$P_r = (\rho \cdot A/4) \cdot (V_o^2 - V_w^2) \cdot (V_o + V_w) \quad (4.18)$$

Bu güç fonksiyonunun maksimum değeri uygulamada çok önemlidir, çünkü buradan sistemin maksimum verimini tahmin etmek mümkündür.

Bu maksatla güç ifadesini  $V_w$  hızına göre türevlersek,

$$dP_r / dV_w = (\rho \cdot A/4) \cdot (V_o^2 - 2 \cdot V_o \cdot V_w - 3 \cdot V_w^2) = 0 \quad (4.19)$$

$(V_o^2 - 2 \cdot V_o \cdot V_w - 3 \cdot V_w^2)$  ifadesi  $V_w$  'ye göre ikinci dereceden bir denklem olup bu denklemin kökleri,

$$V_{w_1} = -V_o \quad \text{ve} \quad V_{w_2} = V_o/3$$

olup  $V_{w_2}$ , gerçek köktür.

$$P_{r_{max}} = 8/27 \cdot \rho \cdot A \cdot V_o^3 \quad (W) \quad , \quad \text{olarak bulunur. /19/} \quad (4.20)$$

#### 4. 5. KANAT DİZAYNI

Rotorun veriminde en önemli faktör kanat dizaynidir. Rüzgar türbinlerinin rotor dizaynlarıyla, hava taşıtlarının airfoil ve pervane ile helikopterlerin rotor dizaynları arasında çok yakın bir benzerlik vardır. Putnam'ın rotoru 1945 yılında malzeme yorulması yüzünden kullanım dışı bırakılmıştır. Bugünkü teknolojiye kanatlarda malzeme yorulması pek meydana gelmemektedir.

Helikopter rotoru eksenini etrafında kendi kendine dönmese bile bir rüzgar türbini rotoru gibi çalışır ve herbirinin dizayn karakteristikleri birbirleri ile kısmende olsa aynıdır.

Büyük, güvenilir ve bakım masrafları düşük olan rüzgar türbinleri rotorları aerodinamik, gravitasyonel ve atalet kuvvetlerinin dinamik etkilerini minimuma indirir. Eğer tahrik eden kuvvetin frekansı rotorun doğal frekansına (yada kullenin) yaklaşırsa, dinamik yüklerin büyümesiyle sistem rezonansa girer. Rotorun uzun ömürlü olabilmesi, malzeme yorulmasının minimuma indirilebilmesi için rotor kanatları rezonansa yaklaşmayacak şekilde dizayn edilmelidir. Düşük çalışma hızlarında genellikle sorun çıkmaktadır. Eğer kontrol altında tutulmаса, bazı hız değerlerinde rezonanstan sakınmak mümkün değildir.

Rotor kanatlarında aşağıdaki nedenlerden dolayı elastik deformasyon olur.

- a) Dönüşe dik yönde, kanat uçlarında titreşimden eğilmeler veya çarpma sesi,
- b) Dönme yönüne paralel yönde denge kurşunları nedeniyle kanatlarda eğilme,
- c) Kanatlarda burulma yada elastik burkulma,
- d) Yatay veya dikey eksenli rotor şaftında eğilmeler,

meydana gelir.

Rotasyonel doğal frekanslara ulaşırsa, titreşimsel yükler meydana gelir. Bu kuvvetler yada yükler, rotor kanatlarının dengeli bir şekilde yüklenmediği her anda varolacaktır. Ortalama aksenal rüzgar bileşenleri trast kuvvetini türetirler, bu kuvvet akış yönünde kanatlara dengeli bir şekilde etki eder. Aksenal hızdaki düşüm, dikey eğim, rotor diskinde şafta göre eğrilige neden olur. Rüzgar türbininin bulunduğu yere özgü düzensiz rüzgar hızları, atmosferik türbülans önemli düzensiz yükler oluşmasına

sebepler olur.

Büyük rotorlarda gravitasyonel kuvvetler nedeniyle gerilmeler meydana gelir. Gravite nedeniyle rotorda statik sapma nedeniyle çalışamama problemi doğar.

Aerodinamik gerilmelerin boyuttan bağımsız olmasına rağmen rotorun ağırlığı, boyutunun küpü oranında artış gösterir. Ağırlıkla orantılı olarak gravitasyonel etkilerde artar. Ekonomiklik açısından da rotolar sonsuz boyutlu değildir çünkü ağırlık boyutu sınırlandırır.

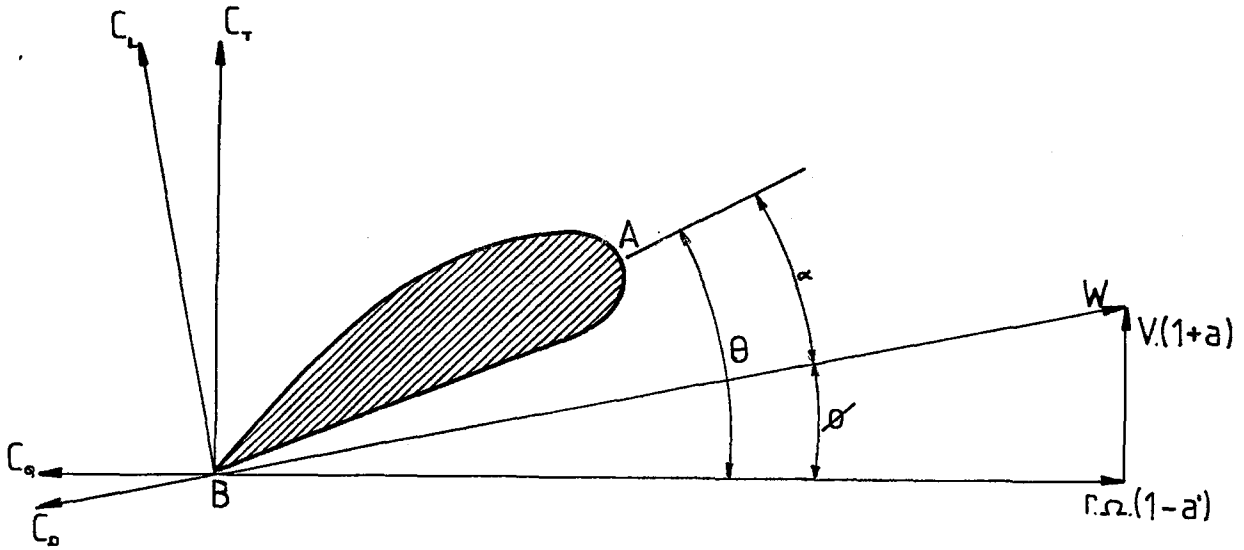
Malzeme seçiminde gösterilecek titizlik, rotor ağırlığını azaltacağı gibi bazı titreşim problemlerinde minimuma indirir. Fiber, Epoksi ve diğer plastik malzemeler için hem aerodinamik hemde yapısal karakteristikler için birçok araştırmaya ihtiyaç vardır. /9/

#### 4.6. KANADA ETKİ EDEN KUVVETLER

Kuvvetleri hesaplayabilmek için çeşitli kabuller yapmak gerekmektedir.

Kabul : Herbir kanat elemanı iki boyutlu bir airfoil olarak ele alınmış disk önündeki akışın olduğu bölgede relatif hızla hareket ettirilerek hesap edildiği kabul edilmiştir.

Burada relatif hız, aralarında  $r$  mesafe bulunan radyal ve aksenal hız bileşenlerini ifade etmektedir. Bunlar  $V.(1+a)$  ve  $r.\Omega.(1-a')$  'dir.



Sekil 4.5 : Kanada etki eden kuvvetler

AB kanat elemanının kord uzunluğudur. AB doğrultusuyla teğetsel hız vektörü arasındaki  $\theta$  açısı, kanat açısı olarak tarif edilir. Eğer  $\phi$  açısı relatif hava hızı  $W$  ile teğetsel hız arasındaki açı ise  $\alpha = (\theta - \phi)$  'dir ve kanat profili için uygun bir grafikten kaldırma ve sürükleme katsayıları bulunabilir. Eğer  $c$ , kord uzunluğu ise kanat elemanına ait kaldırma ve sürükleme ifadeleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$dL = C_L \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot W^2 \cdot c \cdot dr \quad (4.21)$$

$$dD = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot W^2 \cdot c \cdot dr \quad (4.22)$$

$C_L$  ve  $C_D$ , kanat elemanına ait kaldırma ve sürükleme katsayılarıdır.

$$C_T = C_L \cdot \cos\phi - C_D \cdot \sin\phi \quad (4.23)$$

$$C_Q = C_L \cdot \sin\phi + C_D \cdot \cos\phi \quad (4.24)$$

B adet kanattan oluşmuş rotor için trast ve moment ifadeleri aşağıdaki gibi olur.

$$dT_r = B \cdot dT \quad ; \quad dQ_r = B \cdot dQ \quad (4.25)$$

Kord'ları üzerinde tüm kanatların projeksiyon alanı  $B \cdot c \cdot dr$ 'dir ve  $r$  ile  $r+dr$  yarıçapları arasındaki halka biçimindeki alan ise  $2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr$  'dir. Bu alanlar arasındaki oran kanat elemanına ait katılık olarak tarif edilmekte ve  $\sigma = (B \cdot c) / (2 \cdot \pi \cdot r)$  olarak ifade edilmektedir. Şekil 4.5'ten faydalanarak,

$$\tan \phi = [V / (r \cdot \Omega)] \cdot [(1+a) / (1-a')] \quad (4.26)$$

şeklinde yazılabilir. Böylece,

$$dT_r / dr = C_T \cdot \pi \cdot \rho \cdot \sigma \cdot r \cdot V^2 \cdot (1+a)^2 \cdot \text{Cosec}^2 \phi \quad (4.27)$$

$$" = C_T \cdot \pi \cdot \rho \cdot \sigma \cdot r^3 \cdot \Omega^2 \cdot (1-a')^2 \cdot \text{Sec}^2 \phi$$

$$dQ_r / dr = C_Q \cdot \pi \cdot \rho \cdot \sigma \cdot r^2 \cdot V^2 \cdot (1+a)^2 \cdot \text{Cosec}^2 \phi \quad (4.28)$$

$$" = C_Q \cdot \pi \cdot \rho \cdot \sigma \cdot r^4 \cdot \Omega^2 \cdot (1-a')^2 \cdot \text{Sec}^2 \phi$$

olur. /8/

#### 4.7. PITCH MOMENTİ

Tek kanatlı uçaklarda kanadın moment katsayısı sadece profile ve efektif tesir/hücum açısının büyüklüğüne bağlıdır. Kaldırma katsayısının değerinin efektif tesir açısının büyüklüğüne bağlı olması bütün kanat profilleri için kaldırma ve moment katsayıları arasında bir bağıntı kurulabileceğini gösterir. Bileşke kuvvet vektörünün kanada göre konumunun niçin kaldırma katsayısına

bağlı olduğunu anlamak için kanat yüzeyindeki akım hattının ve bununla birlikte üzerindeki basınç dağılımının efektif tesir/hücum açısına bağlı olduğunu hatırlamak gerekir.

Hem kaldırma hemde moment efektif tesir/hücum açısıyla lineer bir gösterdiğinden birbirleriyle de indüksiyon olaylarından bağımsız kalarak lineer bir değişim gösterirler. Bu yüzden düz bir aerodinamik eksene veya gittikçe incelen bir yapıya sahip olan kanatlarda, kaldırma ve moment arasındaki bu ilişki kavis ile yükseklik oranındaki değişimlerden etkilenmez.

Hatırlanacağı gibi iki boyutlu akışta kanadın kaldırma eğrisinin eğimini veren Kutta denklemi pratikte bütün kanat profilleri için geçerlidir. Elbetteki moment katsayısında da benzer bir durum söz konusudur fakat moment karakteristikleri indüksiyondan etkilenmediği için bir moment dönüşüm denklemine ihtiyaç yoktur. Tek bir bağıntı iki ve üç boyutlu akışların her ikisi içinde geçerlidir. Kaldırma ve kılavuz kenar moment katsayısı arasındaki bağıntıyı veren denklemin genel hali,

$$C_m = C'_m - (C_L/4) \quad (4.29)$$

$C_m$  : Kılavuz kenar moment katsayısı

$C'_m$  : Sıfır kaldırmada kılavuz kenar moment katsayısı

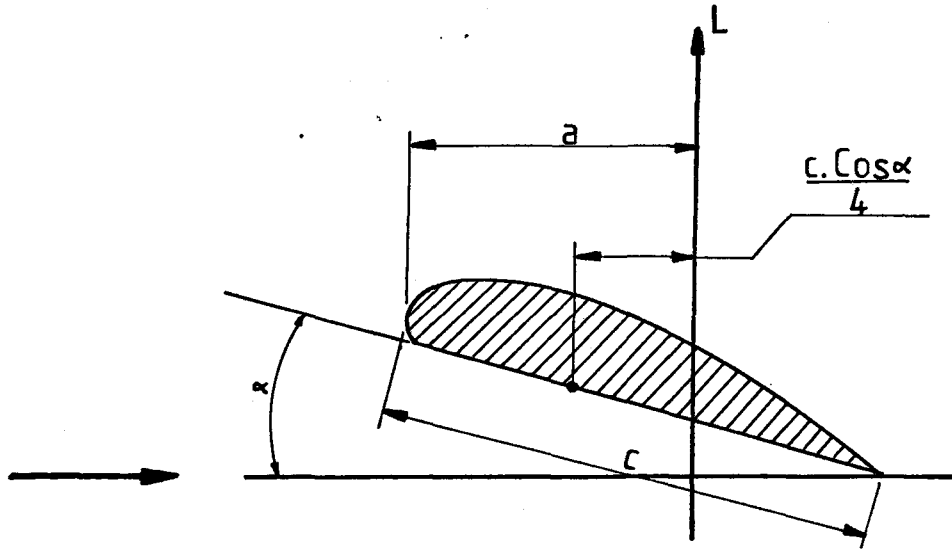
$C_L$  : Kaldırma katsayısı

4.29 nolu bağıntı eğimi -4 olan bir doğru ailesinin denklemidir. Buda moment eğrilerinin ( $C_L, C_m$ )  $C_m$  eksenini  $C'_m$  'de kesen paralel doğrular olacağı anlamına gelir. Moment katsayısı yükseklik oranına ve indüksiyona bağlı değildir.

Moment katsayısı için kanadın kılavuz kenarı referans olarak alınır. Buna rağmen kanat genişliğinin dörtte biri kadar bir mesafedeki kirişi moment eksenini olarak almanın bir takım avantajları vardır. Çeyrek giriş moment katsayısı  $C_{m/4}$  'un en önemli özelliği kaldırma katsayısının bütün değerleri için sabit kalmasıdır.

Bu özellik 4.29 nolu denklemle aşağıdaki gibi açıklanabilir.

İki boyutlu akışlarda pitch momentini şekil 4.6'da görüldüğü gibi kaldırma hareketiyle sağlanır.



Sekil 4.6 : Kaldırma kuvvetiyle yaratılan pitch momenti

Kılavuz kenar ve çeyrek kiriş eksenine göre alınan momentler aşağıda belirtilmiştir.

$$M = -a.L \quad (\text{Kılavuz kenar}) \quad (4.30)$$

$$M = -[a - (c/4.\cos\alpha)].L \quad (\text{Çeyrek kiriş}) \quad (4.31)$$

Moment katsayıları ise aşağıdaki gibidir.

$$C_m = -(a.L)/(q.S.c) = -(a/c).C_L \quad (4.32)$$

$$C_m = -[(a - (c/4.\cos\alpha)).L] / (q.S.c) \quad (4.33)$$

$$= -[(a/c) - (\cos\alpha/4)].C_L \quad (4.34)$$

$$C_{m/4} = C_m + (C_L.\cos\alpha/4) \quad (4.35)$$

$C_m$  'in 4.29 nolu bağıntısında verilen değerini yerine koyarsak,

$$C_{m/4} = C_m^* - (C_L/4) + (C_L.\cos\alpha/4) \quad (4.36)$$

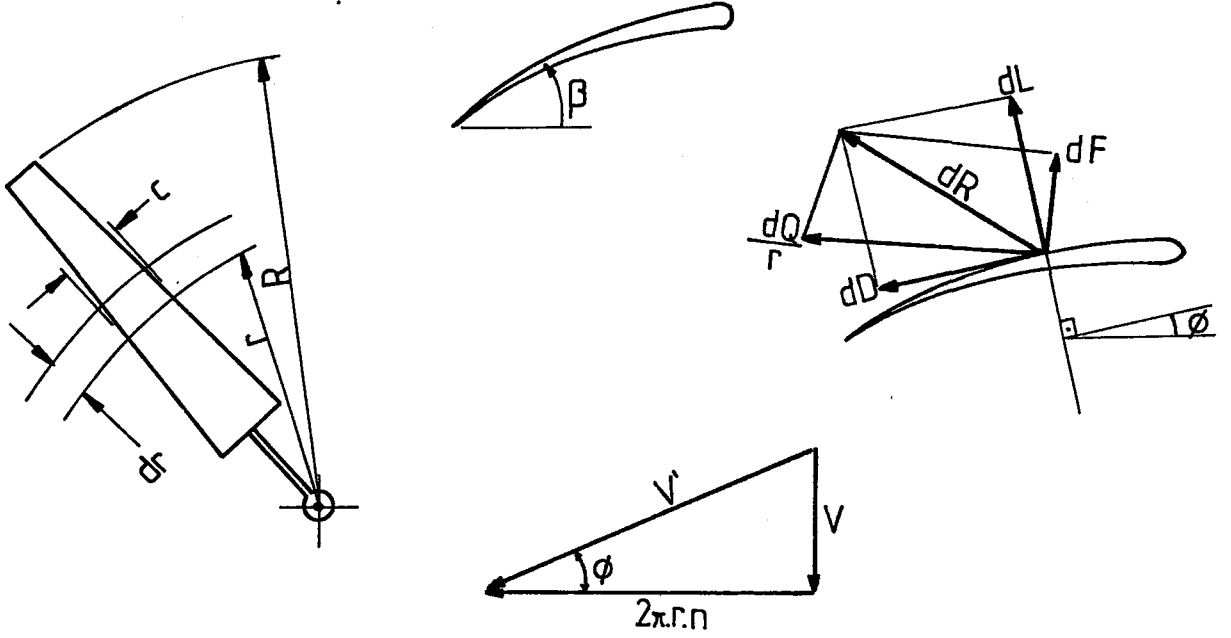
olur.

Küçük hücum açıları için  $\cos\alpha$  'da çok küçük olacağından denklemi yaklaşık olarak  $C_{m/4} = C_m^*$  şeklinde yazabiliriz. /18/

#### 4.8. KANAT PROFİL TEORİSİ

Sekil 4.7'da tek bir kanat elemanı gösterilmiştir. Rotor, B adet kanada sahip ise roturun arkasında B adet helisel vorteks (girdap) oluşur ve akışın olduğu bölgede ivmelenmeye sebep olur. Bu bölgelerin hesaba katılması teorinin tümünde gerçekten karmaşıklığa sebep olur. Üç boyutlu airfoil teorisi ile efektif  $\omega$  'nin (ivmelendirici hız) hesaplanmasında temel oluşturmaktadır. Analiz

sonucunda aşağıdaki katsayılar elde edilir.



$\beta$  = Kanat açısı ;  $\phi = \tan^{-1}(V / \pi \cdot d \cdot n)$  ;  $d = 2r$   
İlerleme oran katsayısı,  $J = V / (\pi \cdot d \cdot n)$  ;  $D = 2r$   
 $dQ$  : Elementer tork ;  $J^2 = C_T / T_c$

Sekil 4.7 :Kanat elemanı

Trast Katsayısı,  $C_T = F / (\rho \cdot n^2 \cdot D^4)$  (4.37)

Tork " ,  $C_Q = d / (\rho \cdot n^2 \cdot D^5)$  (4.38)

Trast " ,  $T_c = F / (\rho \cdot V^2 \cdot D^2)$  (4.39)

Güç " ,  $C_P = P / (\rho \cdot n^3 \cdot D^5)$  (4.40)

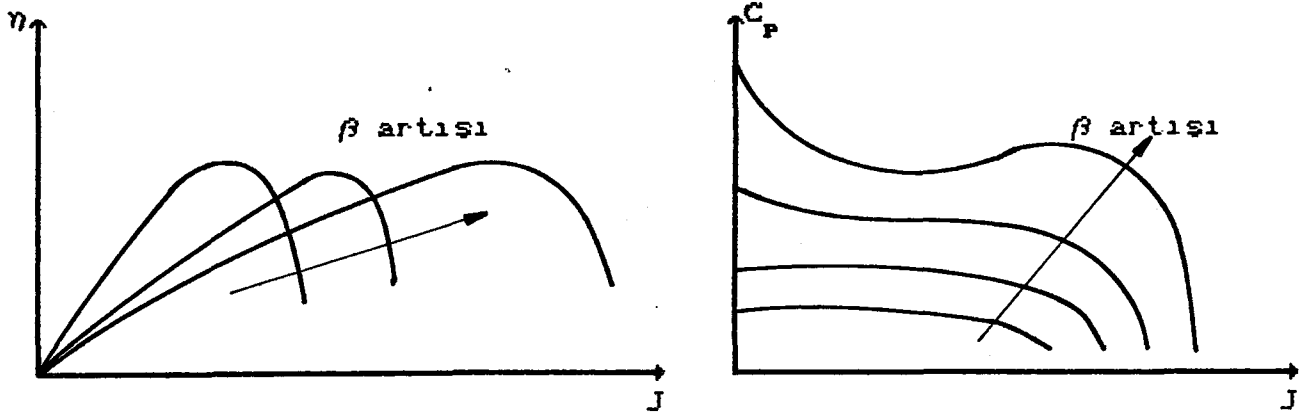
$$\eta = F \cdot V / P = J \cdot C_T / C_P$$

Etkinlik Faktörü,

$$AF = \frac{10^5}{18} \int_0^1 (c / D) \cdot (r / R)^3 \cdot d \cdot (r / R)$$

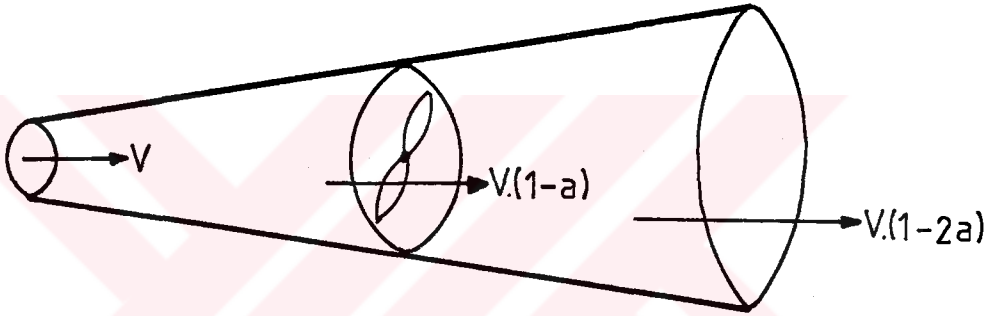
$$" = 1562 \cdot (c / D) \quad (4.41)$$

Etkinlik faktörü ile kanadın absorbladığı enerji miktarı hesaplanabilir. Grafik 4.1 'de İlerleme oran katsayısının (J), verim ( $\eta$ ) ve güç katsayısı ( $C_P$ ) ile değişimi grafik olarak verilmiştir. /3/



Grafik 4.1 : J 'nin,  $\eta$  ve  $C_p$  ile değişimi

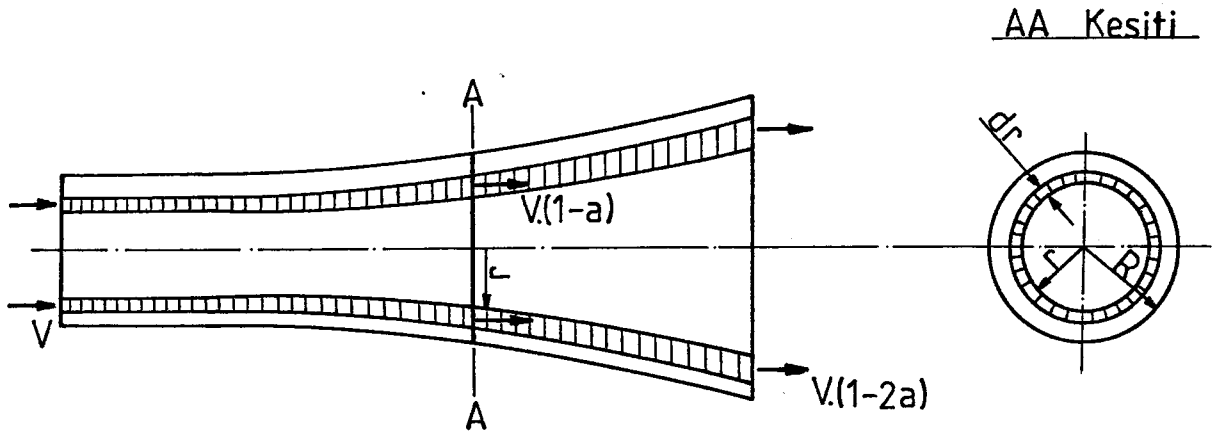
#### 4.9. YATAY EKSENLI TÜRBLNLERDE KANAT TEORİSİ



Sekil 4.8 : Kontrol hacmi

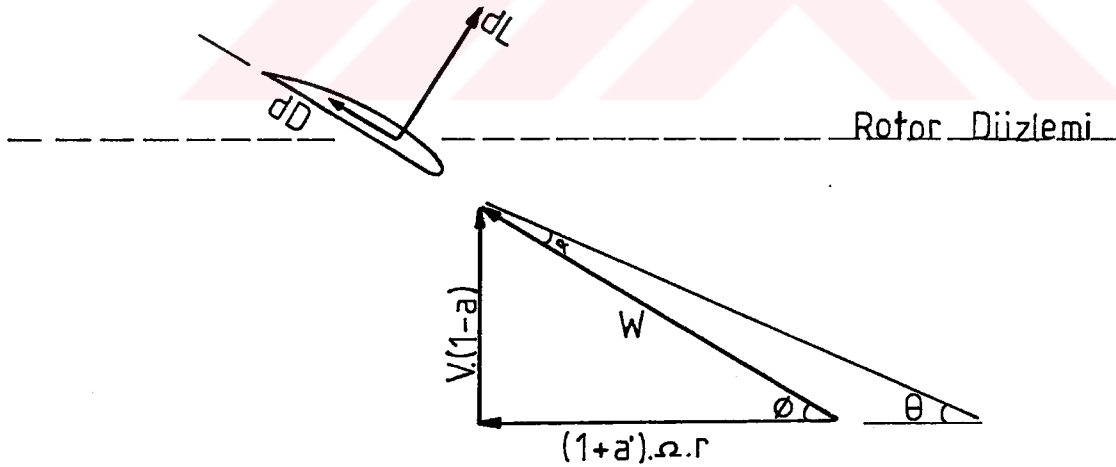
Airfoil özellikleri ile girişim faktörü,  $a$ ; türbin gücü,  $P$ ; türbin aksenal trastsı,  $T$  arasındaki ilişkilerin analizinden kanat profili teorisi geliştirilmiştir. Sekil 4.8 'deki akım tüpünden ziyade, şekil 4.9 'da gösterilen aerodinamik şekilde dizayn edilmiş halka biçiminde kontrol hacmi kullanılmıştır. Herbir halka biçimindeki kesitte meydana gelen akışın diğer halkalardan bağımsız gerçekleştiği kabul edilmiştir.

Sekil 4.10 'da şematik hız ve kuvvet vektörü verilmiştir. Türbin  $B$  adet kanada sahiptir, kord (kiriş) değişimi,  $c$ ; kanat açısının değişimi,  $\theta$ ; kanat kısmının şekli,  $a' = \omega / 2 \cdot \Omega$  'dur.  $\omega$ , türbinin arkasındaki havanın açısal hızıdır ve  $\Omega$  ise türbinin açısal hızıdır. Airfoil'deki relatif rüzgar hızı  $W$  'dir.



Sekil 4.9 : Kontrol hacmi

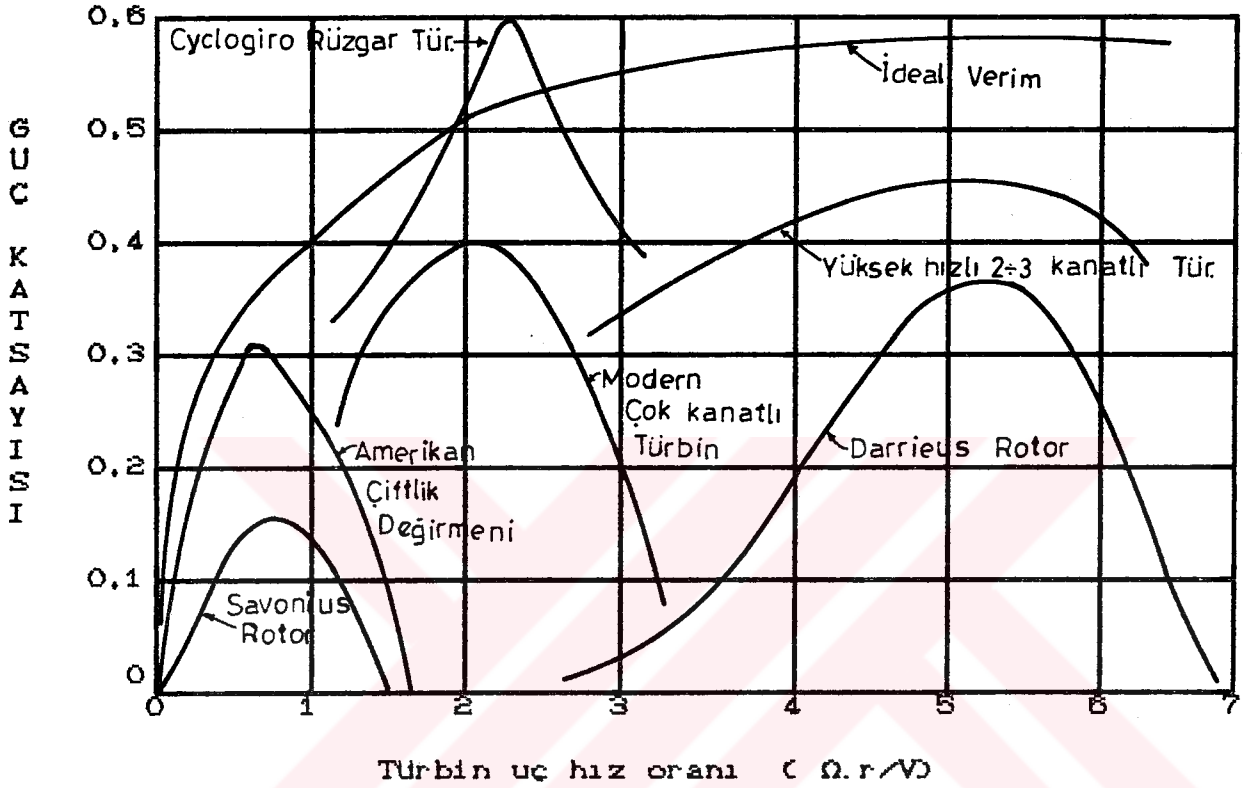
Herbir kanat için  $\phi$  açısı farklı olacaktır, kanat hızı kanat çapının fonksiyonudur. Değişken  $\theta$  açılı çift kanatlı rotorların dizaynında genellikle lokal akışta hücum açısı  $\alpha = (\theta - \phi)$  alınması gerekmektedir. Kaldırma ve Sürüklenme katsayısı  $C_L$  ve  $C_D$ , tecrübi airfoil bilgilerinden, lokal akışta hücum açısı  $\alpha = \theta - \phi$ 'nin fonksiyonundan ve lokal akıştaki Reynold sayısından faydalanarak elde edilir. Tüm hesaplamalarda deneme-yanılma yoluyla aksenal girişim faktörü,  $a$  ve açısal hız ifadesi,  $a'$  elde edilebilir.



Sekil 4.10 : Hız ve kuvvet vektörü diagramı

Grafik 4.2 'de iki yada üç kanatlı yatay aksenli rüzgar türbininin statik ortamda çalışabilmesi için çözüm gösterilmiştir. İyileştirildikleri takdirde bu türbinler yüksek hız oranlarında çalışabilir. Grafik 4.2 'de gösterilen eğriler iki veya üç kanatlı

sabit pitch açısına sahip kanatlar için çizilmiştir. Bu türbinler rüzgarın şiddetine göre kanat açısını değiştirebilen pitch kontrol mekanizmasına sahiptir. Sabit hız ve uygun güç çıktısı için türbine yardımcı olması amacıyla sürekli olarak kanatlara pitch kontrolü uygulanır. Pitch kontrollü türbinler memnun edici bir performansa sahiptir.



Grafik 4.2 : Rüzgar türbinleri için performans eğrileri

Geleneksel Amerikan çiftlik tipi rotor yüksek katılık oranı,  $\sigma$  'ya sahip çok sayıda kanada sahiptir (  $\sigma$ , kanatların süpürdüğü alanın, türbin alanı  $\pi \cdot r^2$  'ye olan oranıdır ). İyi bir başlangıç momenti için bu tip rotorlar düşük hızlarda ve düşük güç katsayılarında çalıştırılırlar.

Grafik 4.2 'de gösterilen yüksek ve düşük hızlı rüzgar türbinlerinin teorik performans eğrileri deneysel bulgularlada desteklenmiştir. /5/

Kontrol hacmi boyunca kanatlardan elde edilebilecek moment ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$dQ = B/2 \cdot c \cdot r \cdot g \cdot W^2 \cdot ( C_L \cdot \sin\phi + C_D \cdot \cos\phi ) \cdot dr \quad (4.42)$$

Kaldırma ve sürüklenme katsayıları ( şekil 4.10 ) aşağıda verilmiştir.

$$dL = C_L \cdot ( 1/2 \cdot \rho \cdot W^2 ) \cdot c \cdot dr \quad (4.43)$$

$$dD = C_D \cdot ( 1/2 \cdot \rho \cdot W^2 ) \cdot c \cdot dr \quad (4.44)$$

Reynold sayısı,  $Re = W \cdot c / \nu$  ile ifade edilmektedir.  $\nu$ , havanın kinematik viskozitesidir ve değeri  $14,9 \cdot 10^{-6}$  (  $m^2/s$  )'dir.  $dL$ , kanadın kaldırma kuvveti ve  $dD$  ise kanadın sürüklenme kuvvetidir.

Güç ifadesi, moment denkleminin entegrasyonu ile türbin açısal hızı  $\Omega$  'un çarpımından elde edilir.

$$P = \rho \frac{B \cdot \Omega}{2} \int_0^R c \cdot r \cdot W^2 \cdot ( C_L \cdot \sin\varphi - C_D \cdot \cos\varphi ) \cdot dr \quad (4.45)$$

Türbinden elde edilecek toplam trakt (itme kuvveti) ifadesi aşağıda verilmiştir. /B/

$$T = \rho \frac{B}{2} \int_0^R c \cdot W^2 \cdot ( C_L \cdot \cos\varphi + C_D \cdot \sin\varphi ) \cdot dr \quad (4.46)$$

## BÖLÜM 5

### RUZGAR TURBİNİ İLE İLGİLİ FORMÜLLER

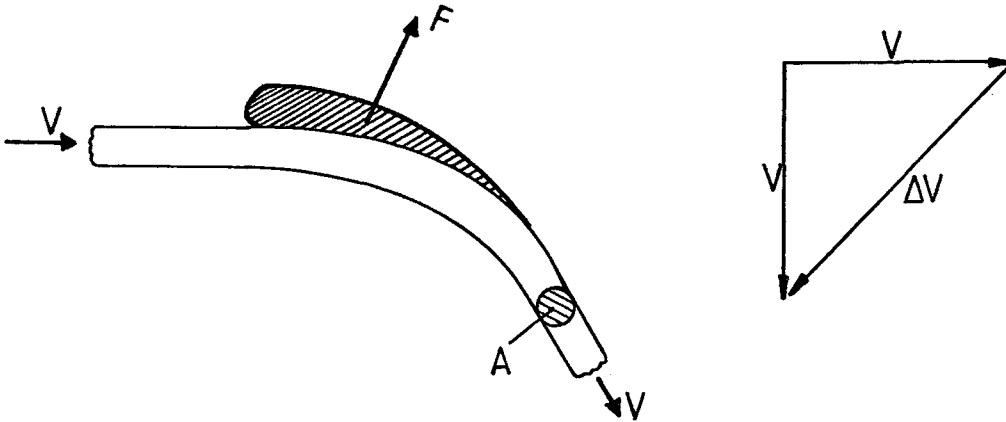
#### 5.1. KALDIRMA, SÜRÜKLEME VE MOMENT DENKLEMLERİNİN ÇIKARILMASI

Bir akışkan içinde hareket eden cisme tesir eden kuvvetler ya sürtünme yoluyla ortaya çıkan yada basınç farkları sebebiyle meydana gelen kuvvetlerdir. Sürtünme kuvvetleri, basınç kuvvetlerinin yanında merteye 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 araçtan elimizi çıkardığımızda elimizin hissettiği kuvveti incelemektedir. İlk bakışta dinamik basınç tarafından meydana getirilecek maksimum kuvvet,

$$F = q \cdot S \quad (5.1)$$

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 değerden çok üstündedir.

Bunun neden böyle olduğunun basit bir açıklaması şöyle yapılabilir. Aşağıdaki şekil 5.1 'de görüldüğü gibi bir jetin yönünü değiştiren bir türbin palasını göz önüne alalım.



Şekil 5.1 : Jetin yönünü değiştiren türbin palası

Eğer pala civarındaki akımı sürtünmesiz kabul edersek jet içinde hız kaybı olmayacak demektir. O halde Newton'un ikinci kanununa göre,

$$F = m \cdot a = m \cdot dV/dt \quad (5.2)$$

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

$$F = \rho \cdot A \cdot V \cdot \Delta V \quad (5.3)$$

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

$$F = 1,414 \cdot \rho \cdot A \cdot V^2 \quad (5.4)$$

ifadesi elde edilir. İfadeye dinamik basınç tanımını getirirsek,

$$F = 2,828 \cdot 1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot V^2 = 2,828 \cdot q \cdot A \quad (5.5)$$

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

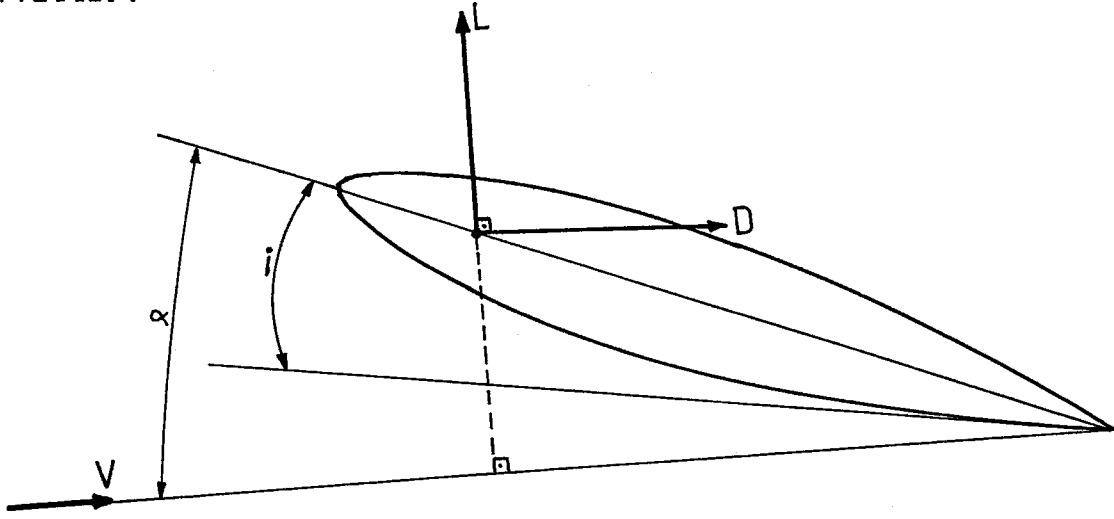
Bir profilin bir hava akımının yönünü değiştirme kabiliyeti profilin eğrilğine ve profilin akım içindeki hücum açısına bağlıdır. Bu duruma bağlı olarak profilin eğrilğini artırarak veya hücum açısının değerini büyütürük büyük kaldırma kuvvetleri elde etmek mümkündür.

Şimdiye kadar profil üzerinde oluşan bileşke kuvveti göz önüne aldık. Oluşan kuvvetin şiddeti ve yönü hakkında herhangi bir fikir ileri sürmedik. Şekil 5.2'de görüldüğü gibi toplam kuvvet genel olarak iki doğrultuda bileşenlere ayrılarak bunlardan hız doğrultusundaki bileşenin kuvveti Sürükleme (drag), hız doğrultusundaki dik bileşene ise Taşıma (trast) kuvveti denir.

Yine şekil 5.2'de görüldüğü gibi Veter hattı izafi rüzgar doğrultusu ile  $\alpha$  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 kestığı 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. Sürükleme kuvveti

bileşke kuvvetin hareket doğrultusuna zıt yöndeki bileşenidir. Bu sebeple hareketi yavaşlatmaya çalışan bir kuvvettir. Taşıma kuvveti ise uçağı havada tutar ve yörüngesine dik doğrultuda yararlı bir kuvvettir.



Şekil 5.2 :Kanat profili ve Veter açısı

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

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

Deneyssel olarak bilinmektedirki hava içinde hareket eden bir cismin üzerinde meydana gelen kuvvetler aşağıda sıralanan değişkenlerin bir fonksiyonudur.

- a) Serbest hava akış hızı
- b) Hava yoğunluğu
- c) Cismin alanı
- d) Cismin geometrisi
- e) Havanın sonik hızı veya ortalama moleküler hızı
- f) Cismin yüzey pürüzlülüğü
- g) Havanın vizkozitesi
- h) Hücum açısı

Teorik olarak cisim üzerinde oluşan kuvvetleri etkileyen başka parametrelerde mevcuttur. Ancak bu parametrelerin etkileri mühendislik problemlerinde ihmal edilebilecek mertebede küçüktür. Bu sebeple kaldırma, sürükleme ve yunuslama momenti (bileşke kuvvetlerin indirgendığı nokta etrafında ve iki boyutlu akım 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 içinde hareket eden bir cisimi etkileyen kuvvet (örnek olarak bir kanadı etkileyen aerodinamik kuvvet)  $\alpha$ ,  $V$ ,  $\rho$ ,  $S$ ,  $V_a$ ,  $\mu$  ile yüzey pürüzlülüğü ve cismin geometrisine bağlıdır. Başlangıçta şeklin 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  $\alpha$ ,  $V$ ,  $\rho$ ,  $S$ ,  $V_a$  ve  $\mu$ 'ye bağıllığı  $F = f(\alpha, V, \rho, S, V_a, \mu)$  (5.6) şeklinde ifade edilebilir.

Eğer boyutsal homojenlik muhafaza edilecekse bu miktarlarla toplama veya çıkarma yapmak (boyutlar farklı olduğundan) mümkün olmayacaktır. Bu sebeple denklem, muhtelif parametrelerin üslu yada köklü ifadelerinin çarpımlarını veya oranlarını ihtiva etmek zorundadır. Buna dayanarak  $F$  ifadesi,  $F = \phi(V^a \cdot \rho^b \cdot S^d \cdot V_a^e \cdot \mu^f)$  (5.7) şeklinde yazılır.

Bu ifade de  $a, b, d, e, f$  ve  $\phi$  bilinmeyen sabitlerdir.  $\alpha$ 'nın boyutu olmadığı için etkisi boyutsuz olarak kabul edilen  $\phi$ 'nin içinde bulunduğu kabul edilmiştir. Yukarıdaki fonksiyonel ifadeyi M. L. T. boyut sistemi cinsinden yazarsak,  $(M \cdot L \cdot T^{-2}) = \phi \cdot (L \cdot T^{-1})^a \cdot (M \cdot L^{-3})^b \cdot (L^2)^d \cdot (L \cdot T^{-1})^e \cdot (M^{-1} \cdot L \cdot T^{-1})^f$  (5.8) 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 tatbik edersek,

M için ,  $1 = b + f$   
L için ,  $1 = a - 3b + 2d + e - f$   
T için ,  $-2 = -a - e - f$   
bulunur.

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

$V_a$  ve  $\mu$ 'nın,  $\rho$ ,  $S$  ve  $V$ 'ye nazaran daha az önemli olduğunu kabul edersek,

$$a = 2 - e - f$$

$$b = 1 - f$$

$$d = 1 - (f/2)$$

bulunur.

Böylece kanadı etkileyen kuvvet denklemi,

$$F = \rho \cdot (V)^{2-e-f} \cdot (\rho)^{1-f} \cdot (S)^{1-(f/2)} \cdot (V_a)^e \cdot (\mu)^f \quad (5.9)$$

şekline girer. Benzer üslu büyüklükleri toplarsak,

$$F = \rho \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot (V_a / V)^e \cdot [ \mu / (\rho \cdot V \cdot S^{1/2}) ]^f \quad (5.10)$$

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,

$$F = \rho \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot (V_a / V)^e \cdot [ \mu / (\rho \cdot V \cdot d) ]^f \quad (5.11)$$

ifadesi elde edilir. Bilindiği gibi,

$$V_a / V = 1 / M = 1 / \text{Mach Sayısı} \quad (5.12)$$

$$\mu / (\rho \cdot V \cdot d) = 1 / Re = 1 / \text{Reynold Sayısı} \quad (5.13)$$

olduğundan,

$$F = \rho \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot (1 / M)^e \cdot (1 / Re)^f \quad (5.14)$$

sonucu bulunmuş olur.

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

$$F = \text{Sabit} \cdot \text{Dinamik Basınç} \cdot \text{Referans Alan}$$

Görüüleceği gibi sabit çarpan boyutsuz olup,

$$c = 2 \cdot \rho \cdot (1 / M)^e \cdot (1 / Re)^f \quad (5.15)$$

şeklinde ifade edilir.

Bu sabit sayılar taşıma ve sürtkleme kuvvetleri için ayrı

notasyonlarla ifade edilirse genel aerodinamik kuvvet ifadesine benzer olarak,

$$L = c_l \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \quad (L : \text{Kaldırma kuvveti})$$

$$c_l / 2 = \varphi \cdot (1 / M^2) \cdot (1 / Re^f) \quad (5.16)$$

bulunur. Benzer şekilde sürükleme kuvveti için,

$$D = c_d \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \quad (D : \text{Sürükleme kuvveti})$$

$$c_d / 2 = \varphi \cdot (1 / M^2) \cdot (1 / Re^f) \quad (5.17)$$

şeklinde yazılabilir. Sonuçta sürükleme kuvveti ve taşıma kuvveti için,

$$L = c_l \cdot q \cdot S$$

$$D = c_d \cdot q \cdot S$$

denklemleri yazılabilir.

Yukarıdaki denklemlerin çıkarılış tarzından taşıma ve sürükleme katsayılarının yani  $c_l$  ve  $c_d$  'nin hız, hücum açısı ( $\alpha$ ), Mach sayısı (M) ve Reynold sayısı (Re) ile değişmesi gerektiği, yani bu büyüklüklerin bir fonksiyonu olduğu açıktır.

Dikkat etmek gereklidir ki  $c_d$ , iki boyutlu akım şartlarında profil sürükleme katsayısı'dır.

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

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

Veter üzerindeki herhangi bir nokta etrafındaki yunuslama momenti taşıma ve sürükleme kuvvetlerinin bir fonksiyonu olmalıdır.

O halde moment,

$$M_o = f(\alpha, V, \rho, S, V_a, \mu) \quad (5.18)$$

veya

$$M_o = \varphi(V^a \cdot \rho^b \cdot S^d \cdot V_a^e \cdot \mu^f) \quad (5.19)$$

şeklinde ifade edilebilir.

M.L.T. boyut sistemini kullanırsak

$$(M \cdot L^2 \cdot T^{-2}) = \varphi(L \cdot T^{-1})^a \cdot (M \cdot L^{-3})^b \cdot (L^2)^d \cdot (L \cdot T^{-1})^e \cdot (M \cdot L^{-1} \cdot T^{-1})^f \quad (5.20)$$

Denklemin her iki tarafındaki 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,

$$a = 2 - e - f$$

$$b = 1 - f$$

$$d = (3 - f) / 2$$

bulunur. Bu değerler yardımı ile moment ifadesini yazarsak,

$$M_o = \rho \cdot (V)^{2-e-f} \cdot (\rho)^{1-f} \cdot (S)^{(3/2)-(f/2)} \cdot (V)^e \cdot (\mu)^f \quad (5.21)$$

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

$$M_o = \rho \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S^{3/2} \cdot (1/M)^e \cdot (1/Re)^f \quad (5.22)$$

şeklinde elde edilir.

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

$$c_m / 2 = \rho \cdot (1/M)^e \cdot (1/Re)^f \quad (5.23)$$

olduğunu söylersek, moment ifadesi için nihayi olarak,

$$M_o = c_m \cdot q \cdot S \cdot c \quad (5.24)$$

denklemini elde edilir. Eğer moment profilin hücum kenarını yukarı kaldırıyor ise pozitifdir.

Bu en son iki denklemi katsayılar için çözersek, iki boyutlu akım için kuvvet ve moment katsayıları,

$$c_l = L / (q \cdot S) \quad (5.25)$$

$$c_d = D / (q \cdot S) \quad (5.26)$$

$$c_m = M / (q \cdot S \cdot c) \quad (5.27)$$

ifadeleri bulunur. Her üç katsayıda  $\alpha$ ,  $M$ ,  $Re$  ve profil geometrisinin bir fonksiyonudur. /21/

## 5.2. KAREKTERİSTİK SAYILAR

$$T_r = \tau \cdot \xi \cdot \rho \cdot R^4 \cdot \Omega^2 \quad (5.28)$$

$$Q_r = \kappa \cdot \xi \cdot \rho \cdot R^5 \cdot \Omega^2 \quad (5.29)$$

$$\xi = r / R \quad (5.30)$$

$$dT_r / d\xi = c_T \cdot \pi \cdot \sigma \cdot \xi^3 \cdot (1 - a^*)^2 \cdot \text{Sec}^2 \phi \quad (5.31)$$

$$dk_{\xi} / d\xi = c_a \cdot \pi \cdot \sigma \cdot \xi^4 \cdot (1 - a^*)^2 \cdot \text{Sec}^2 \phi \quad (5.32)$$

Rotorun tümü için trast ve moment ifadeleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$T = \tau \cdot \rho \cdot R^4 \cdot \Omega^2 \quad (5.33)$$

$$Q = \kappa \cdot \rho \cdot R^5 \cdot \Omega^2 \quad (5.34)$$

$$\tau = \int_0^1 \frac{d\tau_{\xi}}{d\xi} d\xi \quad (5.35)$$

$$\kappa = \int_0^1 \frac{d\kappa_{\xi}}{d\xi} d\xi \quad (5.36)$$

n, dakikadaki devir sayısı ve D ise disk çapıdır. İlerleme oran katsayısı aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

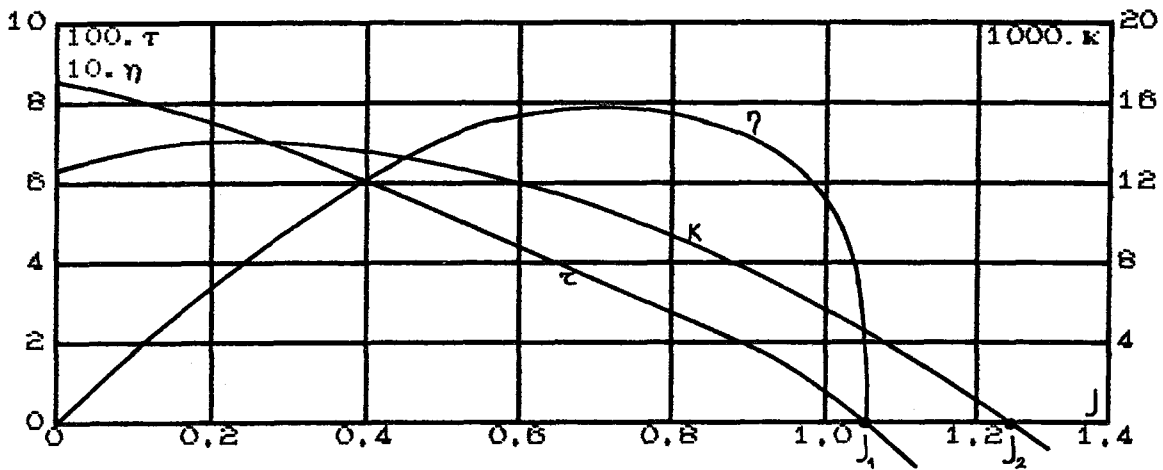
$$J = \frac{V}{n \cdot D} = \frac{\pi \cdot V}{R \cdot \Omega} = \pi \cdot \xi \frac{1 - a^*}{1 + a} \tan \phi \quad (5.37)$$

Rotor verimi aşağıda verilmiştir.

$$\eta = \frac{T \cdot V}{Q \cdot \Omega} = \frac{J \cdot \tau}{\pi \cdot \kappa} \quad (5.38)$$

Verilen bir rotorun herbir  $\xi$  değeri için  $\alpha$  ve  $\theta$  'nın geometrik değerleri ile herbir  $\alpha$  değeri için  $C_L$  ve  $C_D$  katsayılarının aerodinamik değerleri bilinebilir. Böylece, eğer girişim faktörleri  $a$  ve  $a^*$  'nın değerlerini biliyorsak  $d\tau_{\xi} / d\xi$  katsayılarıyla  $\phi$ ,  $J$ ,  $c_T$  ve  $c_a$  değerlerini hesaplayabiliriz.

Grafik 5.1 'de  $J$  'nin farklı değerleri için  $\eta$ ,  $\tau$  ve  $\kappa$  'nin değişimleri verilmiştir.



Grafik 5.1 : J'ye bağlı olarak  $\eta$ ,  $\tau$ ,  $\kappa$  'daki değişiklikler

$J$ 'nin  $J_1$  değeri için  $\tau$  ve  $\eta$  ,  $J$ 'nin  $J_2$  değeri için ise  $\kappa$  değeri sıfır olmaktadır.

Eğer  $J = J_1$  olursa trast üretilemez ve rotor boşa döner.

Eğer  $J_1 < J < J_2$  olursa trast negatif, moment ise pozitif değer alır. Böylece rotor, fren gibi çalışır.

Eğer  $J > J_2$  olursa hem trast hemde moment negatif olur ve pervane bir rüzgar türbini rotoru gibi çalışır yani rüzgardan faydalanılarak güç elde edilir. Verim değeri  $1/\eta$  , pozitif değer alır.

Eğer  $J = J_2$  olursa pervane otomatik rotasyona geçer yani motordan güç çekmeden pervane dönebilir.

$J_1$  değeri göz önüne alındığında rotor birim zamanda tam bir devir gerçekleştirir ve uç noktada hız değeri,  $V = J_1 \cdot D$  'ye eşit olur.  $J_1 \cdot D$  'nin uzunluğuna deneysel ortalama pitch uzunluğu denmektedir, trast ihtiyacının olmadığı anlarda kanatların herbir turunda pervane çapı bütür.

Değişken pitch'li pervanelerde kanatların eksenleri etrafında döndürülebilmesi mümkün olduğundan herbir ayarlama farklı deneysel pitch değeri elde edilebilir. /8/

### 5.3. KALDIRMA KATSAYISI

Kutta-Joukowski kanunu aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$L' = \rho \cdot c \cdot c_l \quad (5.38)$$

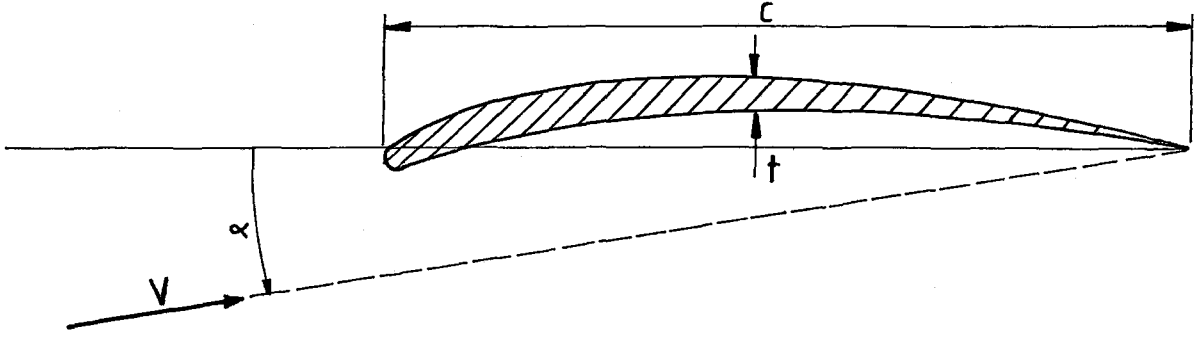
Dinamik basınç,  $q = \rho \cdot V^2 / 2$  ; profilin kordu,  $c$  ve kaldırma katsayısı  $c_l$  aşağıdaki gibidir.

$$c_l = 2 \int \left( \frac{\vec{V}'}{V} \right) \cdot d \left( \frac{\vec{s}}{c} \right) \quad (5.40)$$

Yapışkan olmayan ve sıkıştırılamayan bir ortamda  $c_l$  katsayısı boyutsuz ve profilin kord uzunluğu  $(c)$  ile uçuş hızı,  $V$  'den bağımsızdır. Bu şartlar altında kaldırma katsayısı yalnızca  $\alpha$  açısının fonksiyonudur, bu açı  $V$  hızı ile kanat profil eksen arasındadır. Profil eksenini, kanadın kaldırma yapmayacağı andaki eksendir.

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

$$c_l = 2 \cdot \pi \cdot \sin \alpha \quad (5.41)$$



Sekil 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 ( $t_{max}/c = 0,1$ ) çok yakındır.

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

Viskoz ortamlarda, teorik olarak  $\alpha$  ile  $c_l$  arasındaki değişim  $10$  ile  $15$  ( $^\circ$ ) arasında olmalıdır. /3/

#### 5.4. MOMENT KATSAYISI

Kaldırma esnasında airfoil'in yüzeyinde homojen basınç dağılımı oluşur. Bu basınç dağılımı verilen bir X noktasına göre  $M_x$  momentini oluşturacaktır. Moment katsayısı aşağıdaki gibi ifade edilebilir. Boyutsuz bir degere sahiptir.

$$C_{m_x} = M_x / (c \cdot q \cdot c^2) \quad (5.42)$$

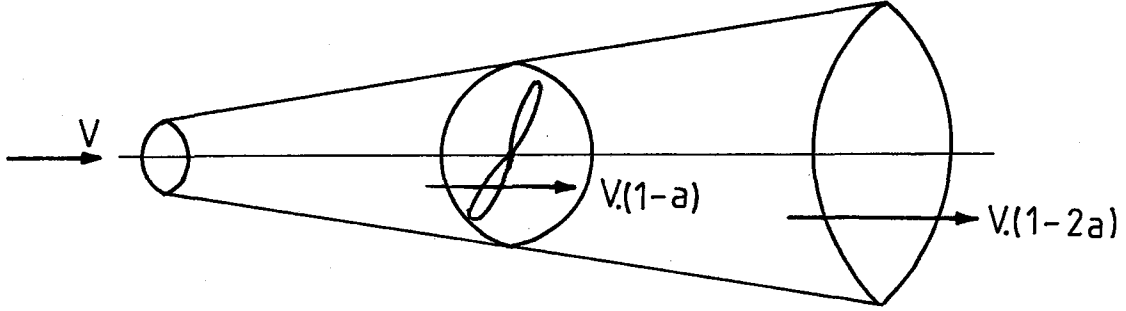
Moment kolu boyunca etki eden kaldırma kuvveti vasıtasıyla moment üretilir. /3/

#### 5.5. YATAY EKSENLI TÜRBİNLER İÇİN GENEL MOMENTUM TEORİSİ

Sekil 5.4 'te gösterilen Rankine'nin kullandığı kontrol hacmi 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

ise basınç düşer ve akışın yavaşladığı kısımlarda yeniden atmosferik basınca ulaşır.



Sekil 5.4 : Akım tüpü

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

$$T = 2. \pi. R^2. \rho. V^2. a. (1-a) \quad (5.43)$$

Formülasyonda  $\rho$ , hava yoğunluğudur. Deniz seviyesinde standart atmosferik şartlarda havanın yoğunluğu  $1,221 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ 'tür.

Sekil 5.4 'te gösterilen kontrol hacmine mekaniksel enerji denklemini uygulanarak güç hesap edilebilir.

$$P = 2. \pi. R^2. \rho. V^3. a. (1-a)^2 \quad (5.44)$$

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

$$E = 1/2. \rho. V^3. \pi. R^2 \quad (5.45)$$

Sonuçta güç katsayısı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$C_p = P/E = 4. a. (1-a)^2 \quad (5.46)$$

$a$ 'nın maksimum teorik değeri  $1/2$  için güç katsayısı,

$C_p = 0,593$  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 ( $a$ , küçükse), gücün çok büyük bir kısmı türbinin arkasından kaçıp gider ve eğer yük çok büyük ise ( $a$ , büyükse), akışı aşırı derecede engeller ve yaklaşan havanın büyük bir kısmı türbinin etrafından

gecip gider.

Bu türetim kesinlik ve uygulanabilirlik açısından bazı önemli sonuçları içerir. Özellikle akım çizgisi boyunca oluşan girdaplar nedeniyle kinetik enerjinin kaybolan kısmı ihmal edilmiştir. Akım çizgisi boyunca oluşan rotasyonel hareketlerin kısmi hesabı Glauert'in analiziyle incelenmiş ve sonuçta grafik 4.2'de gösterildiği gibi türbin çeşidine bağlı hız oranının fonksiyonu olarak ideal güç katsayısı verilmiştir. Türbin tipine bağlı hız oranı,  $X = \Omega.R/V$ ;  $\Omega$ , türbin açısal hızıdır. Düşük türbin hızı ile yüksek tork gerektiren ortamlarda meydana gelen girdaplar, işe yaramaz kinetik enerji oluşumuna neden olur. İdeal akış analizlerinde sürtkleme etkilerinin ihmal edilmesi yüzünden iki yada üç kanatlı rotorların ve çok kanatlı rotorların performansları ideal performanstan daha düşüktür ama yüksek hızlı iki veya üç kanatlı rotorlar, düşük hızlı çok kanatlı rotolara göre çok verimlidir. /5/

#### 5.6. KUTTA JOUKOWSKY KANUNU

Atmosfer içinde hareket eden cisimde kaldırma, hareket yönüne dik olan aerodinamik kuvvet bileşenidir. Birim aralık başına kaldırma,  $L'$ , sonsuz uzunluktaki sabit formlu kanat sıkıştırılamaz bir ortamda sabit bir hızla hareket etsin. Kutta-Joukowski kanunu'na göre teori aşağıda ifade edilmiştir.

$$L' = \rho \cdot V \cdot \Gamma \quad (L' \perp V) \quad (5.47)$$

$\rho$  : Yoğunluk

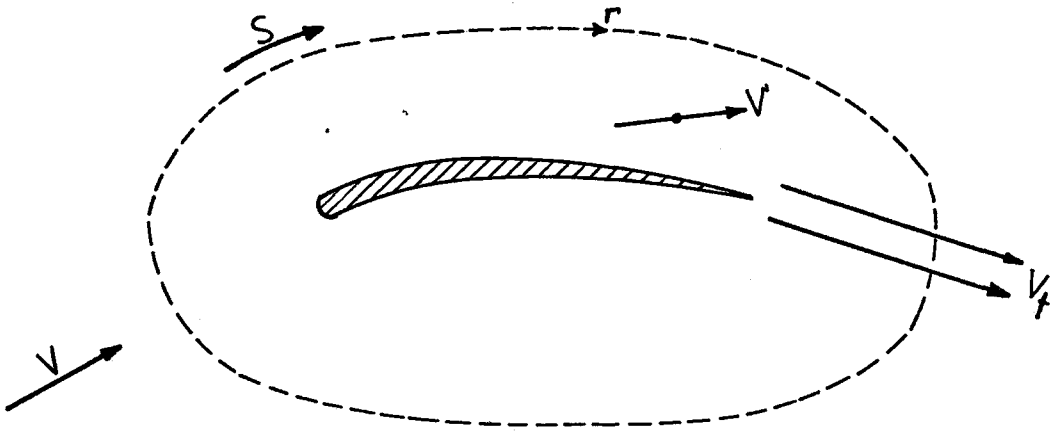
$V$  : Akışkana uzak bir noktadaki relatif hız

$\Gamma$  : Sirkülasyon

$$\Gamma = \int \vec{V} \cdot d\vec{s} \quad (5.48)$$

Sirkülasyon, kanat profiline yakın bölgede meydana gelmektedir. Kanadın sabit tutulduğunu ve akışkanın sabit bir hızda aktığını varsayalım,  $V$  hızı akım bölgesinin uzağındadır (Şekil 5.5), kanada yakın bölgede  $V'$  hızı vardır ama hem etki hemde yön bakımından farklıdır.

Teorik olarak sirkülasyonun sağlanması için kanadın her iki yüzeyinden  $V_1$  hızı ile düzgün bir akış olması gereklidir. Kutta'nın durum ifadesidir.



Sekil 5.5 :Kutta teoremi

Akışkan ortam içinde (genellikle hava), kaldırma miktarı teorik değerden % 10 daha az çıkmıştır sonuçta Kutta 'nın durum ifadesi memnun edici sonuç vermemiştir. /3/

## BÖLÜM 6

### RÜZGAR TÜRBİNİNİN SECİMİ

#### 6.1. YÖRE İNCELEMESİ

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 tetkik yapılmasına izin verir. Basit istatiki veriler ile yapılan testler 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 zamanlarda rüzgar davranışını kestirmemizi sağlar.

Bir mevkinin tetkikinde rüzgar kaynağı ve rüzgar türbini ilk olarak dikkate alınması gereken hususlardır.

Bunun yanında,

- a) Yıllık ortalama rüzgar hızı
- b) Rüzgar hız dağılımı
- c) Rüzgar yönü
- d) Rüzgarın kesilmesi
- e) Yüzey yapısı
- f) Mevkinin denizden yüksekliği'nde irdelenmesi gerekir.

Rüzgar kaynağı ile ilgili bazı karakteristikler ise şunlardır.

- a) Çok kuvvetli fırtına veya kasırga beklenmesi
- b) Buz, sulu sepeken yağmur, dolu, kar ve don
- c) Tozlu esmesi
- d) Ağır nesnelere esmesi

Rüzgar türbini tasarımını etkileyen fakat rüzgara ait olmayan diğer faktörler ise şunlardır.

- a) Göçebe kuşlar
- b) Televizyon sinyal parazitleri

- c) Toprak şartları
- d) Sismik (depremsel) kararlılık
- e) Bölgesel, sosyal, kanuni ve çevresel kısıtlamalar'dır. /20/

## 6.2. RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

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 ayırma bulunmamaktadır. Bu çeşit rüzgar türbinleri genel bir dizayna sahiptirler ve seri üretimleride yapılmaktadır. Şu andaki en son uygulamada, enterkonnekte şebekeye çok uzak bulunan evlerde veya büyük çiftliklerde kullanılmaktadır. Diğer sınıf ise 100 (kW) ve daha büyük kapasiteye sahip rüzgar türbinlerini içerir. 100 (kW)'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) yada daha büyük kapasiteli rüzgae türbini inşa etmeyi planlamaktadırlar.

Ufak rüzgar türbini dizayn eden kişiler, sistemin kurulacağı yer ve rüzgar hakkında bilgilere ihtiyaç duyar çünkü rüzgarın davranışları hakkında genel bir bilgi gerekmektedir. Bu nedenle büyük rüzgar türbini dizayn edenler yöre analizleri ile ilgili kesin bilgiler bulmak zorundadır. /9/

Rüzgar türbinleri ya kapasitelerine yada dizayn şekillerine göre sınıflandırılabilir.

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

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

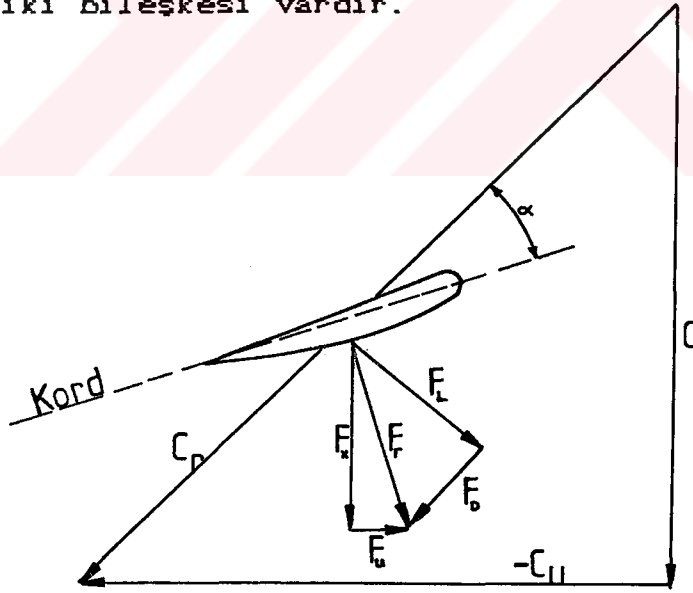
Rüzgar türbinleri şekillerine ve kuruluş sistemlerine

görede sınıflandırılabilir. Genellikle rüzgar türbinleri ya yatay eksenli yada dikey eksenli olarak kategorize edilebilir. /3/

### 6.3. RÜZGAR TURBİNİ DİZAYNI

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 türbinini kanat profillerinden farklıdır. Buhar ve gaz türbinlerinde akışkanı saptırıcı açı çok büyüktür. Rüzgar türbininin kanat profilindeki eğim, her türlü makinada çalışabilecek şekilde dizayn edilmiştir. Buhar ve gaz türbinlerindeki rotasyonel kanatların tersine rüzgar türbinlerindeki rotor kanatlarının kord açısı, rüzgar hızına bağlı olarak göstereceği değişimle optimum açıyı alır. Yatay eksenli rotor, eksenel akışlı türbinlerdeki gibi ikili, üçlü yada uzun kanatlı olabilir.

Bir  $C$  hızıyla hava rotor boyunca hareket ederken, kanatların yüzeyinde dinamik bir basınç oluşur. Kanadın kord merkezinde  $F_r$ , basınç kuvveti meydana gelir. Şekil 6.1 'de gösterilmiştir. Bu kuvvetin  $F_L$ , kaldırma kuvveti ve  $F_D$ , sürtükme kuvveti olarak iki bileşkesi vardır.



Sekil 6.1 : Rotor kanadına etki eden kuvvetler

Bu iki kuvvet,  $C_r$  vektörel rüzgar hızına dik ve paralel yönde olan kuvvetlerdir.  $F_r$  kuvveti aynı zamanda radyal kuvvet  $F_x$  ile eksenel kuvvet  $F_u$  'nun bileşkesidir.

$F_u$  kuvveti, dış dirençlere karşı rotoru döndürmeye yarayan momenti üretir.  $F_x$  kuvvetide aksenal trasti sağlar.

Rüzgar türbini-jeneratör grubunun dizaynında rüzgar hızı en önemli faktördür çünkü türbinde rüzgar hızının küpü ile orantılı olarak güç üretilir. Yıllık rüzgar eğrisinin seçilen aralığında çalışabilecek şekilde dizayn edilir. Güçlü rüzgarlarla çok fazla güç elde edilebilmesine rağmen ortalama rüzgar hızının standart değerinden daha yüksek olması rüzgar türbini-jeneratör grubu için en önemli karakteristiklerden biridir. Şiddetli rüzgarlar genellikle arzu edilmez. /4/

#### 6.4. RÜZGAR TÜRBİNİ

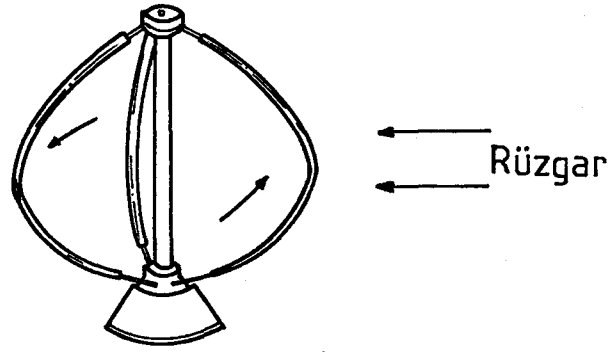
Rüzgar enerjisi dönüşüm sisteminde en önemli eleman rüzgar türbinidir, halk dilinde yel değirmeni olarakta adlandırılmaktadır. En yaygın kullanılan çeşidi yatay eksenli rotora sahip olan türbinlerdir, bunun yanında Darrieus tip rotorlu türbinler, ufak boyutlu Savonius tip rotorlu türbinler sıkça uygulama alanı olan çeşitlerdir. Rüzgar türbinlerinin performans analizleri yapıldığında ilk sırayı pervaneli tip rotora sahip rüzgar türbinleri almıştır. /5/

#### 6.5. DİKEY EKSENLI TÜRBİNLER

Şekil 6.1 'de Darrieus tip rotor görülmektedir. Kanatlar simetrik formlu airfoil'e sahip olduğundan yüksek performanslıdır ve kanatlardaki hafif eğim sayesinde, kanatlardaki eğilme gerilmeleri minimuma iner. Grafik 4.2'de görüldüğü gibi türbin yüksek hızlarda verimli çalışabilmektedir ve türbinde iki yada üç adet kanat bulunmaktadır.

Şekil 6.2 'de gösterilen Cyclogiro rüzgar türbini, dikey eksenli en önemli rüzgar türbinlerinden biridir. Darrieus tip rotora benzemektedir ama iki önemli farkı vardır. İlki, airfoil düzdür ve ikincisi ise rotasyonel hareket esnasında rüzgar kuvvetini maksimum yapabilmek için sürekli olarak kanatlara pitch kontrolü uygulanır. Aynı hız oranında güç katsayısının maksimum değeri, Darrieus tip rotora göre daha yüksektir.

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



Şekil 6.1 : Darrieus rotoru

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

**Artırımlar :** Arasına dizayn edilecek yapı kullanımında rüzgar gücü hesaplandıktan sonra türbin önerilir. Rüzgar türbininde, rüzgarın akış yönünde gövdeye kısa difüzörler konarak en büyük etki sağlanabilir. Rüzgar türbinlerinde butür artırımların dezavantajı, statik dengenin sağlanması için harcanan maddiyattır. /5/

### 6.6. DİZAYN PROBLEMLERİ

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

Konuyla direkt ilgili olmasa bile önemli olan bir sorunda, elektrik ihtiyacı düştüğünde türbin hızının nasıl kontrol altında tutulacağıdır, türbin aşırı hızlanarak sistemin bozulmasına sebep olabilir.

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

Zorlayıcı kuvvetlerin frekans ile serbest titreşimlerin

frekansı çakıştığında sistemin rezonansa girmesine sebep olur. Baskın frekanslar, kanat geçiş frekansı olarak bilinen kanatların saniyedeki dönme sayılarına doğru meylederler. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinde en önemli frekanslar, kulenin salınım frekanslarıdır. Kule salınım yapmasın 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 çakışmaması için türbin hızı daima kontrol altında tutulmalıdır. /5/



## GÜÇ HAKKINDA BİLGİLER

## 7.1. FAYDALI GÜÇ

Sistemden elde edilen güç, faydalı güç olarak tarif edilir.

$$P_f = 1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot \eta_t \quad (7.1)$$

$\eta_t$ : Sistemin toplam verimi

Pratikte ise bir rüzgar enerji sisteminin faydalı gücü aşağıdaki şekilde kabaca tahmin edilebilir. /19/

$$P_f = (0,1 - 0,3) \cdot 1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (7.2)$$

## 7.2. ROTORUN FAYDALI GÜCÜ

Rüzgar rotorunun gücü,

$$N_{\max} = 8/27 \cdot \rho \cdot F \cdot V^3 \quad (F, \text{Rotor kesit alanı}; V, \text{Rüzgar hızı}) \quad (7.3)$$

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

$$N_e = \eta \cdot \phi \cdot 16/27 \cdot 1/2 \cdot \rho \cdot V^3 \cdot F \quad (7.4)$$

eşitliği yazılabilir. 15 (°C)'de ve 760 (mmHg) basıncında yeryüzündeki ortalama hava yoğunluğunun MKS birim sistemindeki 1/8 (kgs<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>) olan değeri yukarıdaki eşitlikte yerine yazılırsa,

$$N_e = \eta \cdot \phi \cdot 16/27 \cdot 1/16 \cdot V^3 \cdot F \quad (7.5)$$

bulunur. Buradaki  $\phi \cdot 16/27$  terimi güç katsayısı olarak adlandırılır ve  $c_1$  ile gösterilirse maksimum yararlı güç olarak,

$$(N_e)_{\max} = \eta \cdot c_1 \cdot 1/16 \cdot V^3 \cdot F \quad (7.6)$$

elde edilir. Maksimum yararlı güç ve maksimum teorik güç değerleri göz önüne alınarak, rotorun toplam resirlik derecesi  $\eta_t$  bulunabilir.

$\phi = 1$  olarak kabul edildiğinde, maksimum gücü ifade eden

$(c_1)_{\max}$  için,

$$16/27 = 0,592592592 = 0,6$$

bulunur.

Uygulamada bu maksimum güç değerine hiçbir zaman

ulaşamaz. Rüzgar kanalındaki denemeler sırasında en fazla  $c_1 = 0,45$  değeri elde edilmiştir. Hesapları emniyetli yapabilmek için  $c_1$ 'in 0,38 değeri, mekanik tesir derecesi olarak  $\eta = 0,8$  değeri alınır ve aynı zamanda süpürme alanı için,

$$F = \pi \cdot D^2 / 4 = 0,78 \cdot D^2 \quad (7.7)$$

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

$$N_{\circ} = 0,8 \cdot 0,38 \cdot 1/16 \cdot V^3 \cdot 0,78 \cdot D^2 = 0,0147 \cdot V^3 \cdot D^2 \quad (\text{kgf} \cdot \text{m/s}) \quad (7.8)$$

$$N_{\circ} = 0,0147 / 75 \cdot V^3 \cdot D^2 = 0,000196 \cdot V^3 \cdot D^2 \quad (\text{BG}) \quad (7.9)$$

$$N_{\circ} = 0,0147 / 102 \cdot V^3 \cdot D^2 = 0,000145 \cdot V^3 \cdot D^2 \quad (\text{kW}) \quad (7.10)$$

Bu eşitliklerde,

$N_{\circ}$  : Türbin rotorunun gücü

$V$  : Rüzgar hızı (m/s)

$D$  : Süpürme alanı çapı (m) 'dir.

Yukarıdaki eşitliklerin bulunuşu sırasında  $c_1 = 0,38$  kabul edilmiştir. Çeşitli kanat 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 Noetzlin adlı bilim adamlarının tavsiye ettiği emsal değerlerine göre yararlı güç eşitlikleri yazılırsa,

$$N_{\circ} = 0,000214 \cdot V^3 \cdot D^2 \quad (\text{kW}) , \quad \text{Betz} \quad (7.11)$$

$$N_{\circ} = 0,000185 \cdot V^3 \cdot D^2 \quad (\text{kW}) , \quad \text{Noetzlin} \quad (7.12)$$

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

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

çapıda  $D_2$  ile gösterirsek sonuç olarak,

$$D_1^2 \cdot \pi/4 - (D_1/3)^2 \cdot \pi/4 = D_2^2 \cdot \pi/4 \quad (7.13)$$

bulunur.

Bu eşitlikten faydalanarak  $D_1$  çapı,  $D_2$  'ye göre bulunabilir. /21/

$$D_1 = 3/\sqrt{8} \cdot D_2 \quad (7.14)$$

### 7.3. RÜZGAR GÜCÜ

Hava hareketleri rüzgar olarak tanımlanır. Yerçekimi, dünyanın dönmesinden oluşan saptırıcı kuvvetler yada rüzgarın izlediği yol yüzünden oluşan merkezkaç kuvvetler hava hareketlerine sebep olabilir. Rüzgar kinetik enerjiye sahiptir. Rüzgar 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 akan rüzgarın önüne konulan herhangi bir engel, farklı basınç kuvvetlerinin oluşmasına sebep olur. Bu kuvvetler rüzgarın hızına, yönüne, estiği bölgeye ve cismin şekline bağlı olarak değişir.

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

$$\rho \cdot (V_o^2 / 2) + P_o = \rho \cdot (V^2 / 2) + P \quad (7.15)$$

$$q_o + P_o = q + P \quad (7.16)$$

$\rho$  : Havanın yoğunluğu

$P$  : Statik basınç

$V_o$  : Serbest akış hızı

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

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

$$F_D = C_D \cdot q \cdot A \quad (7.17)$$

$$F_L = C_L \cdot q \cdot A \quad (7.18)$$

$F_D, F_L$  : Sürükleme ve kaldırma kuvveti

$C_D$  : Sürükleme katsayısı

$C_L$  : Kaldırma "

A : Projeksiyon alanı

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

1) API Rüzgar Kuvveti

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

$$F = 0,00258.V^2.C_s.A \quad (\text{İngiliz birimleri ile}) \quad (7.19)$$

$$F = 0,0473.V^2.C_s.A \quad (\text{Metrik " " }) \quad (7.20)$$

F : Rüzgar kuvveti, lb veya Newton

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

$C_s$  : Şekil katsayısı

A : Projeksiyon alanı,  $ft^2$  veya  $m^2$

API'nin tavsiye ettiği şekil katsayıları aşağıda verilmiştir.

Kirişlerde : 1,5

Bina cephelerinde : 1,5

Silindirik bölgelerde : 0,5

Projeksiyon alanında : 1,0

API formülasyonundaki yükseklik faktörü aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$V = V_{10}.(y / 10)^x \quad (7.21)$$

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

y : Deniz seviyesine göre yükseklik

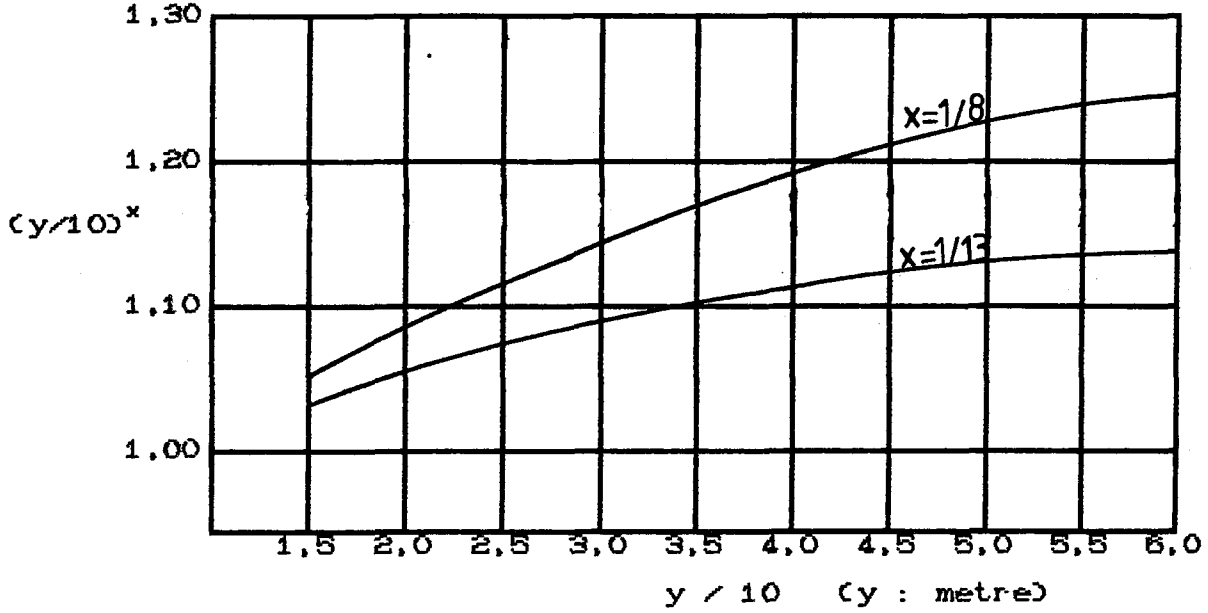
x : Us, deniz haline, karadan olan mesafeye ve rüzgar dizayn hızının süresine bağlı olarak 1/13 ile 1/7 arasında alınabilir.

API'ye göre,

x = 1/13 , bora için

x = 1/7 , sürekli rüzgar için

alınmalıdır.



Grafik 7.1 : API yükseklik faktörü

Grafik 7.1'de yükseklik faktörü diagramı verilmiştir.

## 2) ABS Rüzgar kuvveti

Amerikan Denizcilik Dairesi'nin, rüzgar kuvvetinin

hesaplanmasında kullandığı formül aşağıda verilmiştir.

$$F = 0,0623 \cdot V_k^2 \cdot C_h \cdot C_a \cdot A \quad (\text{Metrik birimler ile}) \quad (7.22)$$

$$F = 0,00338 \cdot V_k^2 \cdot C_h \cdot C_a \cdot A \quad (\text{İngiliz " " }) \quad (7.23)$$

F : Rüzgar kuvveti , kp yada lb

$V_k$  : Rüzgar hızı , m/s yada knot

$C_h$  : Yükseklik katsayısı

$C_a$  : Şekil "

A : Projeksiyon alanı , m<sup>2</sup> veya ft<sup>2</sup>

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

0 - 15 (m)	: 1,00
16 - 30 (m)	: 1,10
31 - 46 (m)	: 1,20
47 - 61 (m)	: 1,30
62 - 76 (m)	: 1,37
77 - 91 (m)	: 1,43

ABS 'nin tavsiye ettiği şekil katsayıları aşağıda

verilmiştir.

Silindirik şekiller	: 0,5
Fındık kabuğu şeklindeki yüzeyler	: 1,0
Tek katlı ev	: 1,0
Ayrık nizamlı binalarda	: 1,5
Deniz seviyesinin altındaki bölgelerde	: 1,0
Gemi vinci	: 1,25

### 3) DNV Rüzgar kuvveti

Rüzgar kuvvetinin hesaplanmasında Det Norske Veritas 'ın tavsiye ettiği formül aşağıda verilmiştir.

$$F = 1/2 \cdot \rho \cdot V_{yt}^2 \cdot C \cdot A \cdot \sin \alpha \quad (7.24)$$

- $\rho$  : Hava yoğunluğu ( 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  
 $\alpha$  : Cismin eksenini ile rüzgar yönü arasındaki açı

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

$$V_{yt} = \alpha' \cdot V_{10} \cdot (y/10)^\beta \quad (7.25)$$

- $\alpha'$  : Bora faktörü  
 $\beta$  : Yükseklik faktörü üssü  
 $y$  : Deniz seviyesinden itibarenki yükseklik  
 $V_{10}$  : Deniz seviyesinden 10 (m) yükseklikte ve bir saat süre içindeki ortalama rüzgar hızı

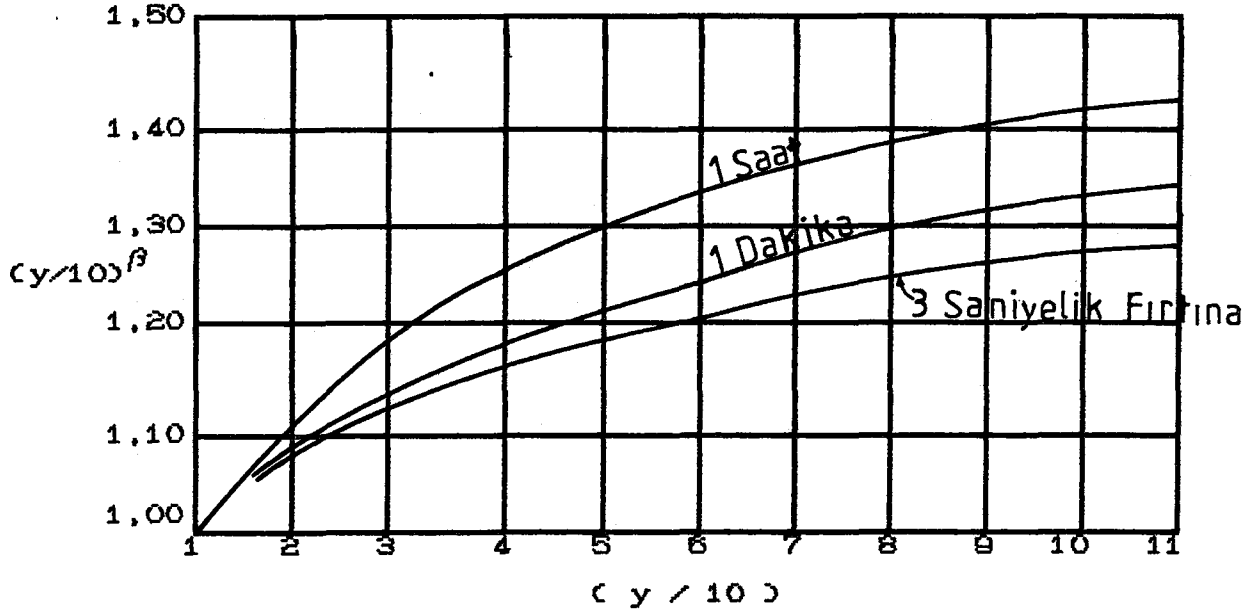
DNV 'nin tavsiye ettiği değerler aşağıda verilmiştir.

- $\alpha' = 1,00$  ,  $\beta = 1,50$  ( 1 saatlik zaman zarfı için )  
 $\alpha' = 1,18$  ,  $\beta = 0,113$  ( 1 dakikalık " " " )  
 $\alpha' = 1,33$  ,  $\beta = 0,100$  ( 3 saniyelik " " " )

Sonlu uzunluktaki cisimler için şekil katsayısı aşağıda ifade edilmiştir.

$$C = k \cdot C'$$

- $k$  : Redüksiyon faktörü  
 $C'$  : Sonsuz uzunluktaki cisimler için şekil katsayısıdır.



Grafik 7.2 : DNV yükseklik faktörü

Grafik 7.2 'de yükseklik oranına bağlı olarak yükseklik faktörü grafiği verilmiştir. /1/

Rüzgar en yaygın kullanılan en eski enerji kaynaklarından biridir. Bazı ülkelerde kullanılmasına rağmen, fosil yakıtların bolluğu 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. /5/

#### 7.4. RÜZGAR GÜCÜNDE GELİŞME

Yüzyıllardan beri rüzgar makinaları su pompalama ve tahıl öğütme gibi çeşitli işlerde güç sağlamak için kullanılmıştır. Hollanda'daki yel değirmenleri rüzgar gücünden yararlanma yönünden en önemli uygulamalardan biridir. Bir zamanlar Amerika'da da yel değirmenleri kurulmuştu. Fakat yel değirmenleri, elektriğin ulaşamadığı bölgelerde elektrik üretiminde ve su pompalama işlerinde kullanılmıştır.

En büyük rüzgar gücü makinaları 1941 yılında kurulmuştu. Türbin-jeneratör grubunca üretilen elektrik enerjisi lokal şebekeleri beslemekteydi. İlk prototip 1250 (kW) gücünde elektrik üretmek için Smith-Putnam rüzgar türbini dizayn edilmiştir. En iyi

rüzgar gücünün elde edileceği yer ve meteorolojik araştırmalar yapılmalıdır. Yapılan araştırmalar sonucunda 48 (km/h)'lik rüzgar hızı ile ancak elektrik üretimi sağlanabilir.

37 (m) yüksekliğindeki çelikten kulenin tepesinde bulunan rüzgar türbini içine elektrik jeneratörü, şaft ve kanatlar monte edilmiştir. Yeldegirmeni rotoru, bir uçtan diğer uca kadar 53,3 (m) uzunluğundaydı. İki kanattan herbiri 19,8 (m) uzunlukta ve 3,66 (m) genişlikteydi. Büyük rotor kullanılmasındaki amaç sudur rotor, 29 (dev/dak) civarında döner sonuçta kanadın uç noktalarında 290 (km/h)'lik hızlara ulaşılır. 24 (km/h)'lik minimum rüzgar hızı ile rüzgar makinasında yeterli hıza ulaşılabilir. Böylece rüzgar hızı 24 ile 48 (km/h)'lik değerler arasında değişirken kanadın uç noktasındaki hız ile rüzgar hızı arasındaki oran  $1/6$  ile  $1/12$  arasında olabilir.

24 (km/h)'lik rüzgar hızına ulaşıldığında, hız kontrol dişlisi sistemi otomatik olarak devreye sokarak elektrik üretilmesini sağlar. 24 (km/h)'lik rüzgar hızı ile güç üretmeye başlayan sistem, 48 (km/h)'lik rüzgar hızına ulaşıncaya 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 (pitch) kontrolü ile esneme 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 pitch kontrol mekanizması vasıtasıyla eksenleri etrafında döndürülerek uygun açı elde edilir.

Hız kontrol sisteminin devreye girmesiyle kanatlar boylamasına, eksenleri etrafında hareket ettirilerek pitch kontrolü sağlanır.

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

Rotor göbeğine bağlanmış olan türbin kanatlarının herbiri 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 kuvvetlere etki eder.

Smith-Putnam rüzgar türbini 1941'den 1945'e kadar çalıştırıldı ve kanatların birisindeki metal yorulmasından dolayı devreden çıkarıldı. Kanatın 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 grubu 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 ve Danimarka'da 200 (kW) gücünde rüzgar türbini-jeneratör grubunu kurmuşlardı. 10 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'ın dizaynı ve konstrüksiyonu olan rüzgar türbini mühendislik açısından başarılı bir çalışma idi. Bugünlerde ise Grandpa's Knob'un 1940'lı yıllarda kurduğu yatay eksenli rüzgar türbinlerine ilgi daha fazladır. Aircraft imalat teknolojisinden faydalanılarak rotor çapları daha büyük ve kanatlar daha hafif imal edilmektedir. /4/

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

$$K.E. = \rho \cdot D \cdot V^3 \quad (7.26)$$

$\rho$ , 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. /17/

## BÖLÜM 8

### ENERJİ DÖNÜŞÜMÜ

#### 8.1. RÜZGAR ENERJİSİ ÇEVİRİM SİSTEMLERİ

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

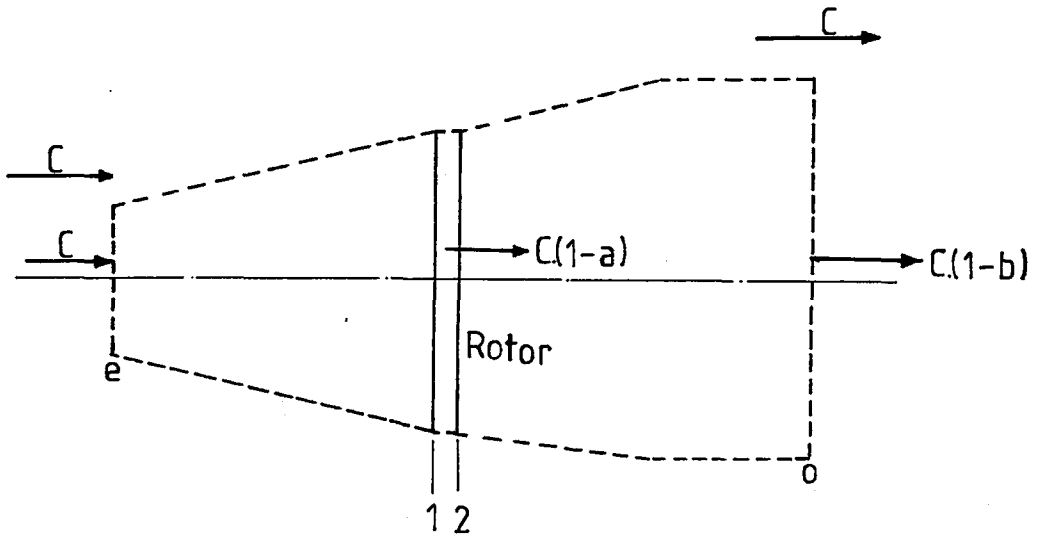
- Rotor ( kanatlar ve göbek )
- Hız yükseltici
- Enerji dönüşüm sistemi ( Jeneratör )
- Kontrol sistemi
- Kule 'dir. /19/

#### 8.2. RÜZGAR ENERJİSİ

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

$$\dot{W}_i = 1/2 \cdot \dot{m} \cdot C^2 = 1/2 \cdot (\rho \cdot A_r \cdot C) \cdot C^2 = 1/2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \rho \cdot C^3 \quad (8.1)$$

Formülasyonda  $\rho$ , havanın yoğunluğu;  $C$ , havanın akış hızı ve  $\dot{W}_i$  ise güç'tür.



Şekil 8.1 : Rüzgar türbini rotorundan hava akışı

Aerodinamik faktörler yüzünden teorik güç,  $\bar{W}_1$  gücünden daha düşük olacaktır. Şekil 8.1'de rotor diski boyunca kontrol hacminde havanın akışı gösterilmektedir. e 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  $\pi \cdot r^2$  değerinden daha azdır; kanat yarıçapı, r 'dir.

Kanatların süptürdüğü 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. Sıkıştırılamaz akışkanların akımı için enerji denklemini yazabiliriz.

$$(P_e - P_1) / \rho = (C_1^2 - C_e^2) / 2 = [C^2 \cdot (1-a)^2 - C^2] / 2 \quad (8.2)$$

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

$$(P_2 - P_e) / \rho = (C_o^2 - C_2^2) / 2 = [C^2 \cdot (1-b)^2 - C^2 \cdot (1-a)^2] / 2 \quad (8.3)$$

olur.

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

$$P_1 - P_2 = 1/2 \cdot \rho \cdot C^2 \cdot [1 - (1-b)^2] \quad (8.4)$$

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

$$F_x = (P_1 - P_2) \cdot A_r = 1/2 \cdot \rho \cdot C^2 \cdot A_r \cdot [1 - (1-b)^2] \quad (8.5)$$

Eksenal trast, momentum eşitliği ile ifade edilebilir.

$$F_x = \bar{m} \cdot (C_o - C_e) \quad (8.6)$$

$$\bar{m} = \rho \cdot A_r \cdot C \cdot (1-a) \quad (8.7)$$

$$C_e = C \quad ; \quad C_o = C \cdot (1-b) \quad (8.8)$$

Böylece aksenal trast aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$F_x = \rho \cdot A_r \cdot C \cdot (1-a) \cdot [C - C \cdot (1-b)] \quad (8.9)$$

veya

$$F_x = \rho \cdot A_r \cdot C^2 \cdot (1-a) \cdot b \quad (8.10)$$

yazılabilir.

Eksenel trast ifadelerinin eşitliklerinden  $b=2a$

yazılabilir.

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

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

$$\bar{m} = \rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot C \cdot (1-a) \quad (8.11)$$

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

$$E_k = 1/2 \cdot \rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot C \cdot (1-a) \cdot [C^2 \cdot (1-2a)^2 - C^2] \quad (8.12)$$

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

$$W_{th} = - E_k = 2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \rho \cdot C^3 \cdot a \cdot (1-a)^2 \quad (8.13)$$

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

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

$$\bar{W}_{max} = 8/27 \cdot \pi \cdot \rho \cdot r^2 \cdot C^3 \quad (8.14)$$

8.1 ve 8.14 nolu denklemler karşılaştırıldığında havadan elde edilen gücün % 59,3 'ü rotordan alınabilecek maksimum teorik güçtür. Güç katsayısı 0,593 Betz limiti olarak bilinir.

Akışkan kayıpları yüzünden, rotor kanatlarından elde edilen gerçek güç  $\bar{W}_{max}$  değerinden daha düşüktür. Dönüşüm verimi, rotorun konstrüksiyonuna ve hız oranına yani değişken rüzgar hızlarında

kanattan elde edile hıza bağlı bulunmaktadır. İki kanatlı rotorda iyi bir aerodinamik dizayn için hız oranı 6 civarlarında olmalıdır bu taktirde dönüşüm oranı 0,75 civarında olur. Böylece,  $\bar{W}_a = 0,75 \cdot \bar{W}_{max}$  olur. 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 artırıcı unsurdur. Amerikan çok kanatlı tip rotorda ve Hollanda yapısı dört kollu rotorda dönüşüm verimi nispeten düşüktür. Bu tip rotorlar düşük hız oranlarında ve yüksek moment ihtiyacının gerektiği yerlerde kullanılmaktadır.

Elde edilen çıkış gücü rotor çapının karesiyle doğru orantılı olduğu için rotor kanat boylarının uzatılmasının avantajı vardır. /4/

### 8.3. RÜZGAR ENERJİSİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİNİN KULLANILMASI

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

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

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

$$P_w = 1/2 \cdot \rho \cdot V^3 \cdot A \quad (8.15)$$

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

$$F(v) = 1 - \exp [ -(v/a)^{\beta} ] \quad (8.16)$$

$$f(v) = \beta \cdot (v^{\beta-1} / \alpha^\beta) \cdot \exp [ -(v/\alpha)^\beta ] \quad (8.17)$$

$\alpha$  ve  $\beta$  parametreleri, her çalışma periyodunda elde edilen bilgilere göre yeniden hesap edilir genellikle bu çalışma ayda bir gerçekleştirilir.  $\alpha$  ve  $\beta$  parametreleri ortalama ifadesi,  $m_v$  ve fark ifadesi  $\sigma_v^2$  'den faydalanılarak hesaplanabilir.

$$m_v = \alpha \cdot \Gamma(1 + 1/\beta) \quad (8.18)$$

$$(\sigma_v / m_v)^2 = [ \Gamma(1 + 2/\beta) / \Gamma^2(1 + 1/\beta) ] - 1 \quad (8.19)$$

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

$\alpha$  ve  $\beta$  'ya ilave olarak, rüzgar rejiminin karakterize edilmesinde bazı parametreler kullanılır. Aşağıda bunlar ifade edilmiştir.

$$\text{Ortalama Rüzgar Hızının Küpü : } \langle v^3 \rangle = \int_0^\infty v^3 \cdot f(v) \cdot dv \quad (8.20)$$

$$\text{Küp Faktörü : } K_c = [ \langle v^3 \rangle ]^{1/3} / m_v = \alpha \cdot \Gamma(1 + 3/\beta) \quad (8.21)$$

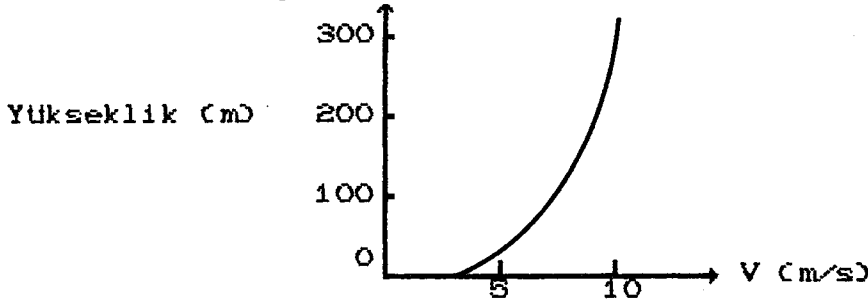
( Weibull modeli için )

$$\text{Ortalama Güç Yoğunluğu : } P_{av} = 1/2 \cdot \rho \cdot \langle v^3 \rangle \quad (W/m^2) \quad (8.22)$$

$$\text{Enerji Faktörü : } K_{ep} = \langle v^3 \rangle / m_v^3 = K_c^3 \quad (8.23)$$

Tipik rüzgar hızlarında,  $K_{ep}$  'in değeri 1,5 ile 3 arasında alınabilir.

Grafik 8.1 'de yüksekliğin fonksiyonu olarak rüzgar hız dağılım grafiği verilmiştir. Anemometreler genellikle deniz seviyesinden 10 (m) yükseklikteki irtifada kullanılır.



Grafik 8.1: Yüksekliğe bağlı olarak ortalama rüzgar hızındaki değişim

h metre yükseklikteki rüzgar hızı, 10 Cm yükseklikteki referans rüzgar hızı ile yüksekliğin 1/7 'inci kuvvetinin çarpımıyla hesaplanabilir.

$$(V / V_{10m}) = (h / 10)^{1/7} \quad (8.24)$$

Yukardaki güç ifadesinde, h/10 değerinin 1/7'inci kuvvetinin alınması yüzey pürüzlülüğü ve diğer arazi şartları ile ilgili faktörlere bağlı bulunmakta ve değeri 0,1 ile 0,3 arasında değişebilmektedir. Arazi ile ilgili bazı bilgilerin eksikliği nedeniyle, 1/7 değerini almak yeterli olmaktadır. Enerji dönüşüm sistemlerinde güçlü destekleri olan kule kurmak her zaman avantajlıdır. /5/

#### 8.4. RÜZGAR GÜCÜ-ELEKTRİK GÜCÜ DÖNÜŞÜMÜ

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

$$P_e = 1/2 \cdot \rho \cdot \eta_g \cdot \eta_m \cdot \eta_p \cdot A \cdot C_p \cdot V^3 \quad (8.25)$$

Formülasyonda  $P_e$ , elektriksel güç;  $\eta_g$  ve  $\eta_m$ , sırasıyla jeneratör ve mekanik verim;  $\eta_p$  ise güç ikmal verimidir. Bu verimler ile performans katsayısının çarpımı 0,20 ile 0,35 değerleri arasında olmaktadır.

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

Sabit yada sabite yakın hızlar için senkronize, indüksiyon jeneratörü kullanmak gerekir. Türbinin değişken hızlarda çalışması gerekiyorsa ve jeneratör çıkışından sabit frekanslı AC gerilim elde edilmek isteniyorsa ilave elektronik devrelere ihtiyaç duyulur. Prototip olarak üretilenlerin çoğu sabit hızda ve senkronize jeneratörle çalışmaktaydı. Değişken hızlarda çalışması gereken türbin-jeneratör grubunda hiç olmazsa hız aralığı sınırlı

olmalıdırki kuleler arası girişimlerden ve rüzgar kesme kuvvetlerinin etkileri yüzünden, çıkış gücünde oluşabilecek osilasyonlar elimine edilebilsin. Gelecekte 100 (kW)'tan daha güçlü türbin-jeneratör gruplarında, rüzgar enerjisi-elektrik enerjisi dönüşüm sistemleri değişken rüzgar hızlarında sabit frekanslı elektriksel güç elde edilebilecektir.

Değişken hızlarda çalışan rüzgar-elektrik enerjisi dönüşüm sistemlerinde sabit frekanslı AC gerilim elde edebilmek için çeşitli uygulamalar mevcuttur. Bunlardan bazıları alternatif akımı doğru akıma dönüştüren alternatörler, doğru akım jeneratörleriyle beslenen hat veya kuvvet komütatörlü invertörler, alternatif akım komütatörlü jeneratörler, alternatif akım-doğru akım-alternatif akım linkler, manyetik alan frekanslarını değiştirebilen jeneratör sistemleridir, rotordan elde edilen gücü kullanarak bir jeneratör gibi çalışabilirler. Genelde basit jeneratör sistemi, sabit frekanslı alternatif akım üretir. Örneğin senkron invertörler oldukça küçük, ekonomik ve özellikle 50 (kW) 'tan daha düşük güçlü olanları çok daha fazla tercih edilmektedir ama harmonik enjeksiyon ile verimli güç çıkışı elde edememe gibi problemlere sahiptirler ve enerjinin büyük bir kısmında boşa gider. Manyetik alan frekansını değiştirebilen jeneratör sistemleri, mükemmel kalitede çıkış gücüne sahiptirler ama bu cihazlarında fiyatları çok yüksektir. /5/

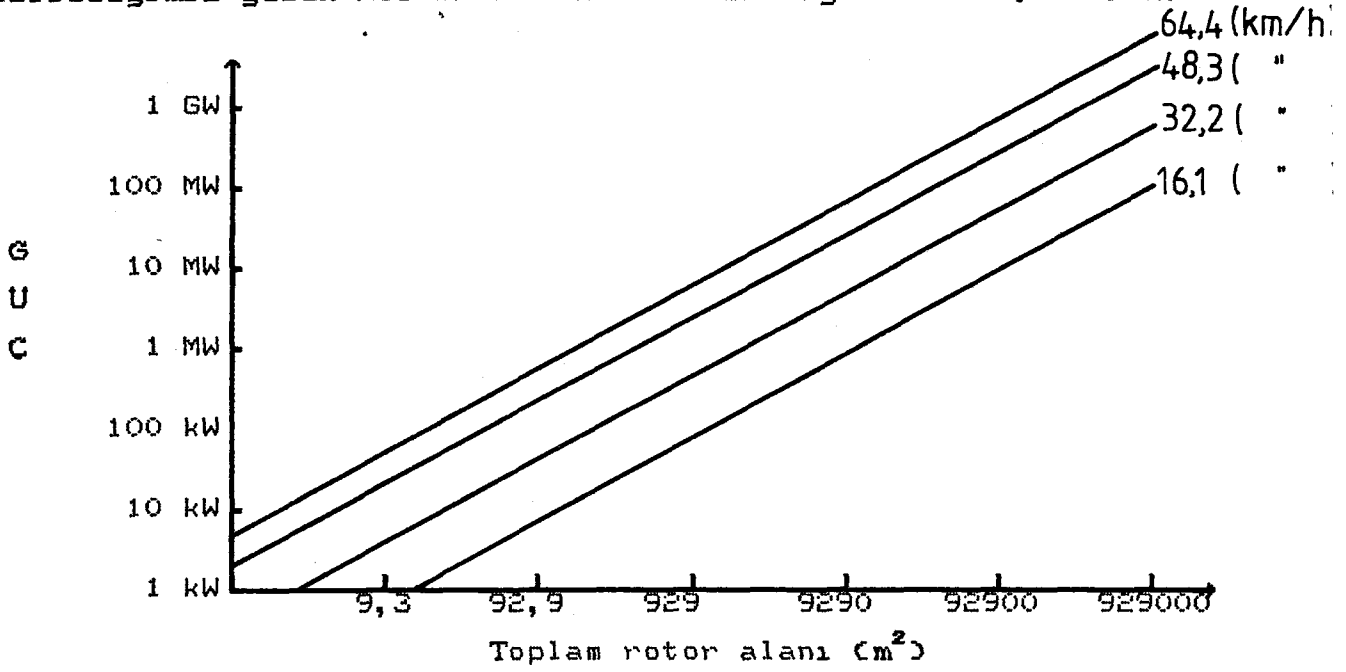
## 8.5. RÜZGAR ENERJİSİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİNİN SEÇİMİ

Deniz seviyesindeki bir bölgede sabit hızda ve sabit frekansta elektrik üretmek için seçilmiş rüzgar enerjisi dönüşüm sistemi, ortalama 20 (km/h) 'lik rüzgar hızında, 13 (km/h) 'lik hız değerinin altında ve 100 (km/h) 'lik hız değerinin üstünde kanatlar boşa dönebilecek şekilde dizayn edilecektir. 240 (km/h) 'lik maksimum rüzgar hızına sistem dayanabilmelidir. Müsaade edilebilir maksimum rotor çapı 38 (m) 'dir.

### 1) Faydalı Rüzgar Gücünün Hesaplanması :

Grafik 8.2'de deniz seviyesindeki bir alanda, değişik rüzgar hızlarında, rüzgardan elde edilebilecek faydalı güç değerleri verilmiştir. Maksimum rotor çapının ( 38 (m) ) kullanıldığını farz edersek, akışın meydana geldiği bölgenin alanı  $A = \pi \cdot d^2 / 4 = \pi \cdot 38^2 / 4 = 1140,1 \text{ (m}^2\text{)}$  yani rotorun süpürdüğü alandır. Grafik 8.2 'den faydalanarak yatay eksende 1140,1 (m<sup>2</sup>) değerini kullanırsak ve

dikey ekseninde de 29 (km/h) 'lik rüzgar hız değerini kullanarak elde edebileceğimiz gücün 200 (kW) civarında olacağını bulmuş oluruz.



Grafik 8.2 :Rotor alanı ile güç arasındaki ilişki

## 2) Uygun Rüzgar Türbininin Seçimi :

Şekil 8.2 'de modern rüzgar türbinlerinin çeşitleri

gösterilmiştir. Herbir rüzgar enerjisi dönüşüm sistemi üç adet alt sisteme sahiptir. Bunlar aerodinamik sistem, mekanik iletim sistemi ( dişliler, şaftlar, yataklar vs.) ve elektrik üretim sistemidir.

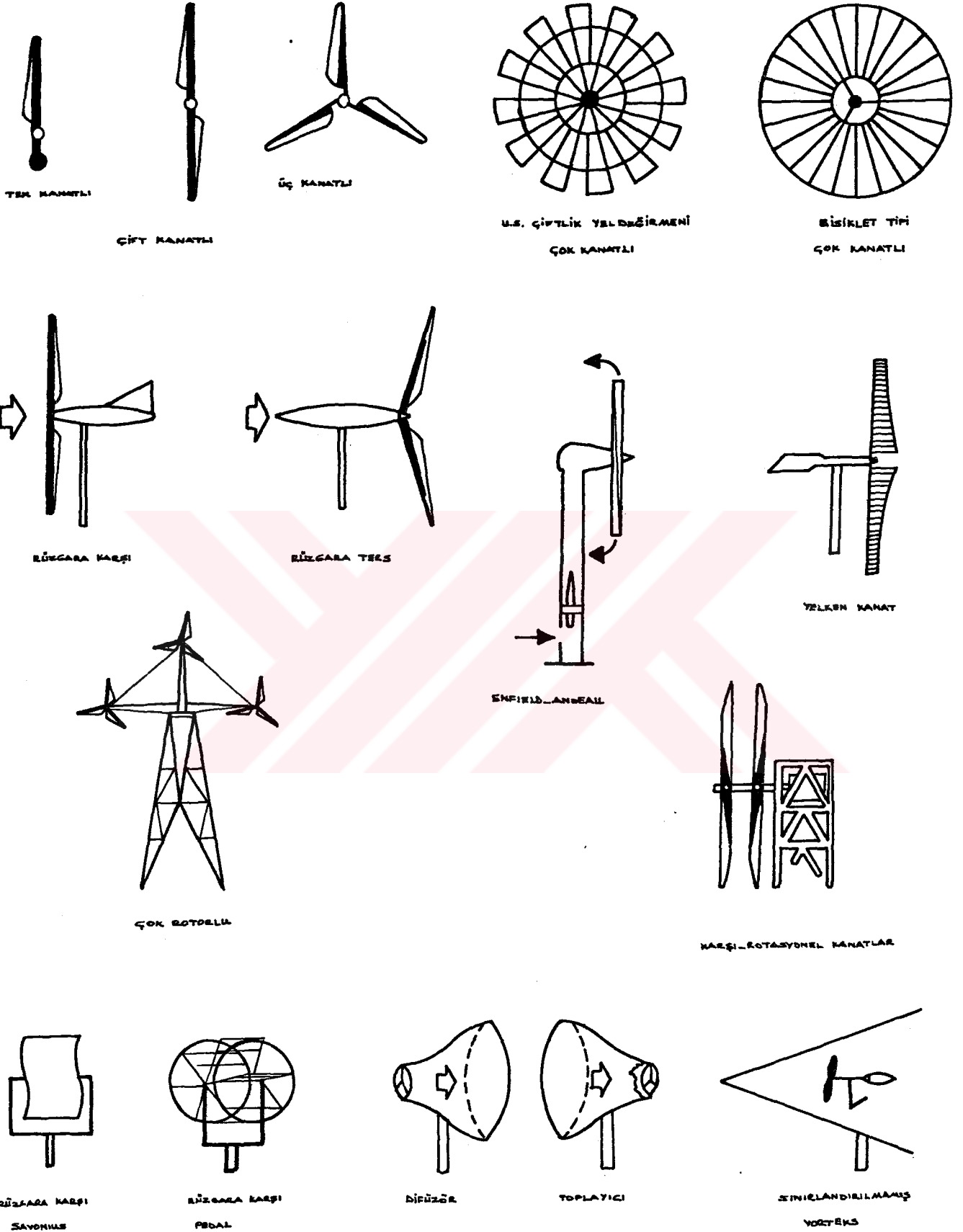
Günümüzde uygulama alanı olan rüzgar türbinlerinin özellikle aerodinamik sistemlerin çeşitleri şekil 8.2 'de verilmiştir. Şekil 8.3 'te değişik tip rotorlar için maksimum güç katsayıları verilmiştir.

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 dizayn etmek için uygundur.
- 3) Çift kanatlı rotor, 29 (km/h) 'lik ortalama rüzgar hızında verimli çalışabilmektedir.
- 4) Sabit hız ve sabit frekans elde edilmesinde çift kanatlı

## Yatay Eksenliler



Şekil 82 : Ruzgar Makinaları (A)

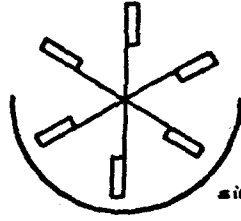
# Dikey Eksenliler



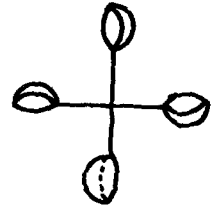
SAVONİUS



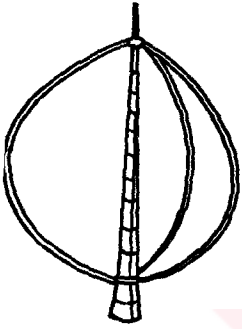
ÇOK KANATLI  
SAVONİUS



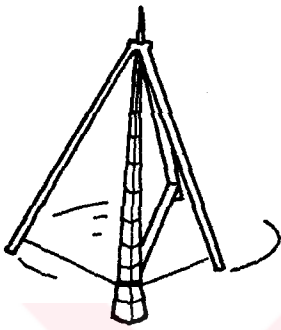
PLANELAR



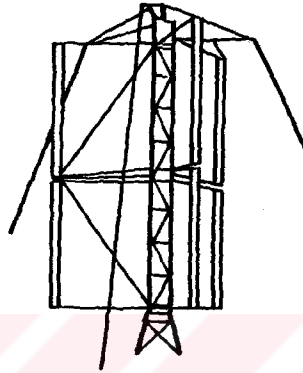
MÜPA



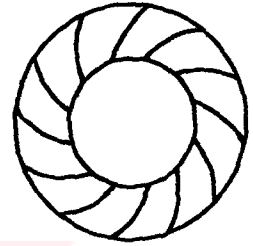
φ-DARBÜL



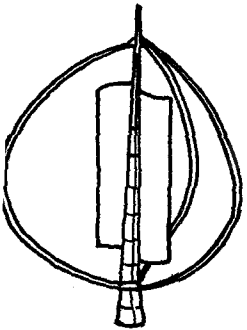
Δ-DARBÜL



GİRİVÜL



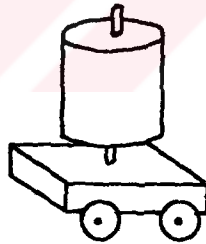
TÜRBİN



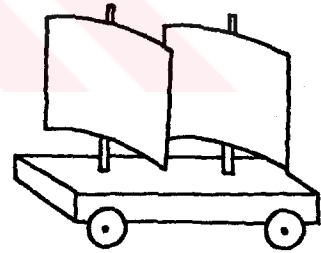
SAVONİUS - φ DARBÜL



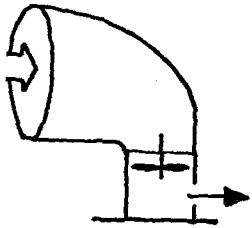
AYRIK SAVONİUS



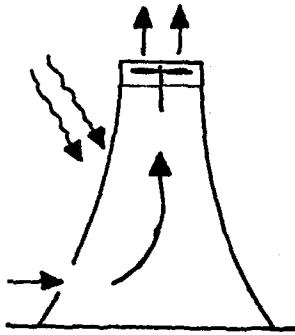
MAGNUS



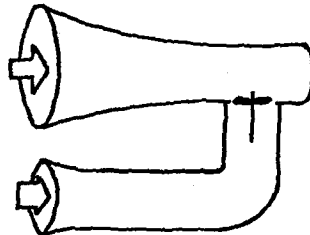
AEROFOİL



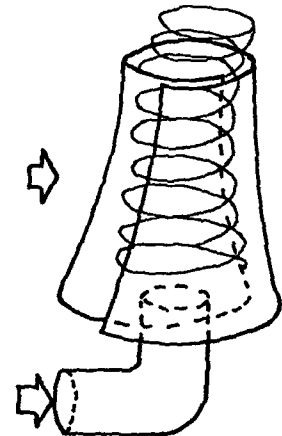
DEFLEKTÖR



GÜNEŞ MIÇIĞI



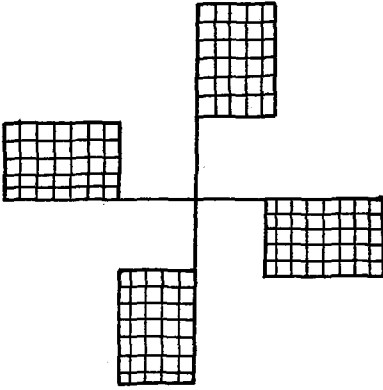
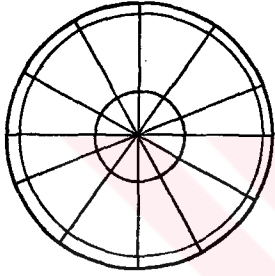
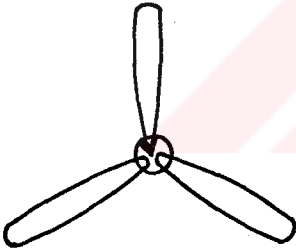
VENTURİ



SINIRLANDIRILMIŞ  
VORTEKS

(B)

rotorlar uygundur.

Rotor tipi	$C_p$ (max)	Düşünceler
	0,17	Yüksek tork, Düşük devir, Verimsiz kanat profili
	0,15	Yüksek tork, Düşük devir, Yüksek kayıp
	0,47	Düşük tork, Yüksek devir, Verimli kanat dizaynı

Sekil 8.3 :Çeşitli rotor tipleri için maksimum güç katsayıları

3D Rüzgar Türbininden Elde Edilebilecek Maksimum Elektriksel Çıkış Gücünün Hesaplanması :

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

$$P_e = P_w \cdot \eta_m \cdot \eta_g$$

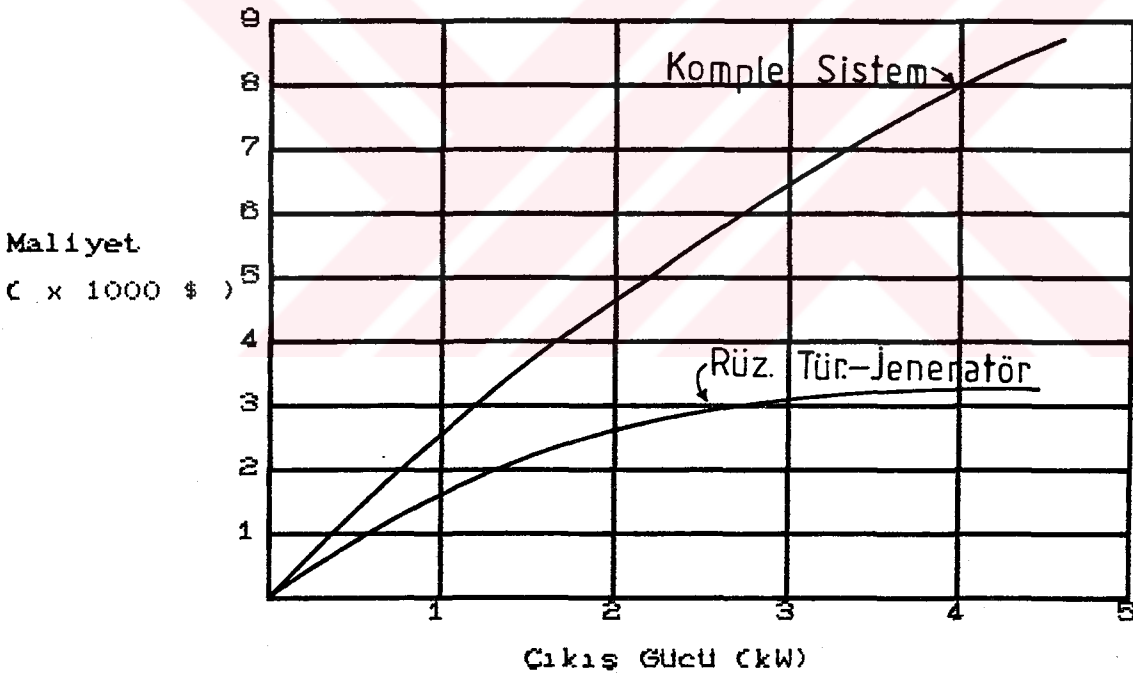
(8.26)

şeklinde ifade edilir.

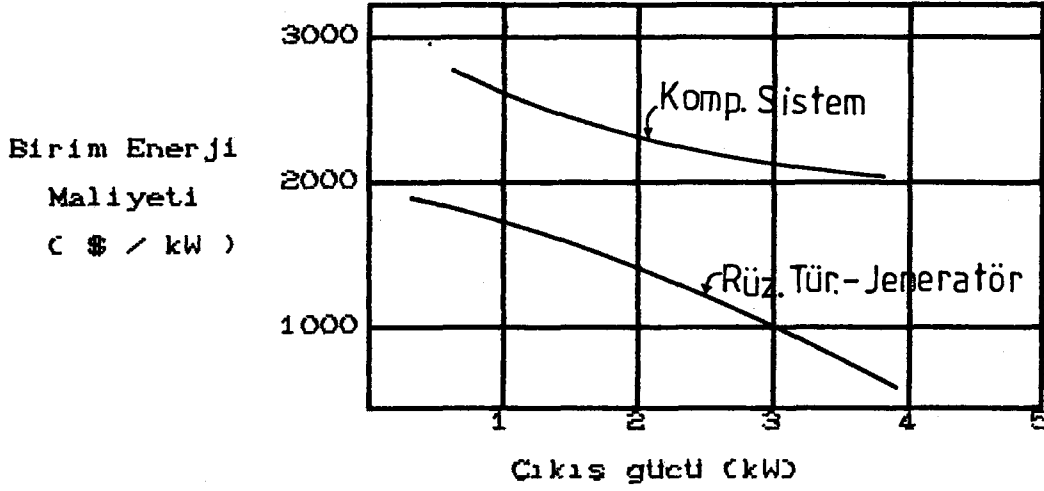
#### 4) Türbin Fiyatının Hesaplanması :

Grafik 8.3 ve 8.4 '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 başka bir deyişle herbir kW başına 1500 (\$) harcanacağı tahmin edilmektedir. İlk yıl için bu fiyatlar rahatlıkla kullanılabilir gerekiyorsa enflasyon nedeniyle gerekli ayarlamalarda yapılmalıdır.

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



Ortalama rüzgar hızı 38,8 ile 40,2 (km/h) arasında  
Grafik 8.3 : Rüzgar türbini maliyeti-Cıkış gücü ilişkisi



Ortalama rüzgar hızı 38,6 ile 40,2 (km/h) arasında

Grafik 8.4 : Birim enerji maliyeti

### 8.6. GÜNÜMÜZÜN RÜZGAR TÜRBİNLERİNDEKİ GELİŞMELER

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. 1978, Ekim ayında bölgesel elektrik üretimi rüzgar türbini-jeneratör grubu sayesinde sağlanmıştır.

NASA istasyonundaki türbin-jeneratör grubu 30 (m) 'lik açık girişli çelik kule üzerine inşa edilmiştir (Şekil 8.4). Rotor çapı, 38 (m) ve her bir kanadın kütlesi 910 (kg)' idi. Kule üzerinde kurulan sistemin rotor dahil toplam kütlesi 18 (ton)' idi. Amerika'da kurulan rüzgar türbini-jeneratör gruplarında, NASA'da kurulanı liste başıydı. Amaçlanan türbinler 200 ile 2500 (kW) arasında güce sahipti, rotor çaplarında 90 (m) 'nin üzerindediydi.

NASA 'da kurulan rüzgar türbini-jeneratör grubunun alternatörü 1800 (dev/dak) 'lık sabit bir hızda çalışmaktadır. Rüzgar hızındaki değişikliklere göre pitch kontrol mekanizması yardımıyla kanat açıları otomatik olarak ayarlanarak rotorun 40 (dev/dak) 'lık bir hızda çalışması sağlanmaktadır. Rüzgar hızı 13 (km/h) değerini aştığı andan itibaren güç üretimi gerçekleşmektedir. 22,5 (km/h) 'lik bir rüzgar hızında 50 (kW) 'lık güç, 29 (km/h) 'lik bir hızda ise 100 (kW) değerinde güç elde

edilebilmektedir, çok yüksek rüzgar hızlarında kanatlara pitch kontrolü uygulanarak fazla enerji dışarı atılır. Rüzgar hızı, 96 (km/h) değerini aştığı zaman kanatlar boşta döner böylece 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) yükseklikteki kule üzerine tesis edilmişti. Rüzgar hızı 18 ile 56 (km/h) 'lik hız değerleri arasındayken , rotor 35 (dev/dak) hızla döner. Ortalama rüzgar hızı yukarıdaki sınırların dışına çıkarsa pervane boşta döner. 40 (km/h) 'lik bir rüzgar hızında, rüzgar türbininden 2000 (kW) değerinde güç elde edilebilir.

1981 yılında Washington 'un güney kesimlerindeki Columbia River Gorge kıyısında üç kanatlı bir rotora sahip rüzgar türbini-jeneratör grubu inşa edildi. Rotor çapı 91 (m) uzunluğundaydı ve 2,5 (MW) gücünde elektrik üretilecek kapasitedir. 16 (km/h) 'lik rüzgar hızında elektrik üretmeye başlar, 32 ile 56 (km/h) 'lik rüzgar hız değerleri arasında türbinden tam güç elde edilebilmektedir. Bu bölgedeki yıllık ortalama rüzgar hızı 24 (km/h) değerindedir ( 9 (m) yükseklikteki rüzgar hızı referans alınmıştır ). İki yıl boyunca bu bölgedeki rüzgar enerjisi potansiyeli, kurulan rüzgar türbini-jeneratör grubu vasıtasıyla gelecekte bir enerji kaynağı olup olmayacağı konusunda test edildi. Bu türbin, ticari amaçlı güç üretiminde kullanılan büyük boyutlu ilk prototiptir. Eğer bol miktarda üretilirse yani seri üretime geçilirse, tek bir türbinin maliyetinin 2 Milyon (\$) civarında olacağı umulmaktadır.

Washington, Goldendale 'de üçgenel 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 türbinde etkilemesini sağlamaktır. Bu türbinlerin rotorları, rotor yönünde esen rüzgarın akışına mani olmayacak şekilde çalışmaktadır. Her iki kanada uygulanan pitch kontrolü ile rotorun sabit bir hızda dönmesi sağlanır. Kanatlar eksenleri etrafında 30° 'lik açı altında hareket edebilmektedir.

Rotor ve kanatların hareketleri Smith-Putnam'ın türbinine benzemektedir. Kulenin tepesinde gövdenin dikey eksen etrafında dönmesi, sağa-sola sapması, kanatların devri ve kanatların açısı kontrol altında tutulmaktadır. Kanatlar ilave bir serbestlik derecesine sahiptir yani düzgün olmayan hava akışlarında, meydana gelen kanat kuvvetlerinden oluşacak etkileri minimuma indirecek kadar sınırlı bir hareket serbestliğine sahiptir.

California, Palm Springs yakınlarında inşa edilen yatay eksenli rüzgar türbini-jeneratör grubu bazı önemli gelişmelerin gerçekleştirildiği bir örnektir. Kule ile birlikte tüm yapı rüzgarın esiş yönüne göre dairesel iz üzerinde dönebilme serbestliğine sahiptir. Uç kanatlı rotor, rüzgar hızı ile kanat hızı arasında sabit bir oran sağlayabilmek için değişken devirlerde dönebilmektedir. Rotor çapı, 58 (m) uzunluğundadır ve 64 (km/h) 'lik rüzgar hızında türbinden 3 (MW) değerinde güç elde edilebilmektedir.

Yatay eksenli rüzgar türbinlerine ilaveten diğer tip rüzgar türbinleride özellikle dikey eksenli rüzgar türbinlerinin dizaynı ve konstrüksiyonuda gerçekleştirilmektedir. En basit dikey eksenli türbin, Darrieus tip rotorla dizayn edilmiştir.

Sandia laboratuvarlarında Darrieus tip rotora sahip dikey eksenli rüzgar türbini test edilmiştir (Şekil 8.5). Rotorun yüksekliği 19 (m) ve çapı 17 (m) uzunluğundadır. Türbin-jeneratör grubu 45 (km/h) 'lik rüzgar hızında 60 (kW) değerinde güç, 35 (km/h) 'lik rüzgar hızında 30 (kW) değerinde güç üretebilmektedir. Üretilen elektriğin frekansı 60 (Hz) 'lik alternatif akımdır ve enterkonnekte şebekeye bağlantısı yapıldığında, türbin-jeneratör grubunun hızı değiştirilerek frekans kontrolü sağlanır.

Darrieus tip rotorda yön tayinine gerek yoktur bu nedenle rotor kendi kendine devreye giremez. Rüzgar hızı ne olursa olsun, bu tip rotor kendi kendine çalışma devri olan 15 (dev/dak) 'lik hızdan normal çalışma hızına yardım edilmeksizin ulaşamaz. Bu nedenle Darrieus tip rotorun dikey eksenli shaftının alt ve üst kısmı ilk hareket düzeniği ile donatılmıştır (Şekil 8.5)

Darrieus tip rotor döndüğü zaman kanadın simetrik airfoil kısmındaki hücum açısı sürekli olarak değişir. Hücum açısındaki bu değişiklik sonucunda, rotorun herbir turunda kaldırma ve sürükleme kuvvetlerinin şiddetlerinde belirgin bir değişiklik gözlenir çünkü

kaldırma kuvveti baskındır,rotör dış kuvvetlere karşı dönebilir ve iyi bir dönüştürme veriminde fonksiyonudur.6 civarındaki hız oranında,Darrieus tipi rotor için maksimum güç katsayısı 0,35 değerindedir.

Konutlarda kullanılmak amacıyla düşük kapasiteli,küçük yatay ve dikey eksenli rüzgar türbinleri inşa edilmiş ve fizibilite çalışmaları araştırılmıştır.Başarılı olabilmek için rüzgar türbini-jeneratör grubu düşük fiyatlı ve kullanım kolaylığı olmalıdır.En büyük problem enerjinin depolanması problemi,ufak bir rüzgar türbini-jeneratör grubundan enerji sağlanımı,lokal ağdan elektrik enerjisinin sağlanmasına benzer şekilde olmalıdır.Bu çeşit tesisatta,rüzgar hızındaki değişikliklere göre otomatik olarak kontrol dişlisiyle jeneratör devreye sokulabilmeli ve çıkarılabilmelidir.Aşırı ısınmadan koruyucu termal kesiciyle donatılmış bir elektrikli su ısıtıcısına çok pahalı olmayan bir rüzgar türbini-jeneratör grubu bağlanmıştır.

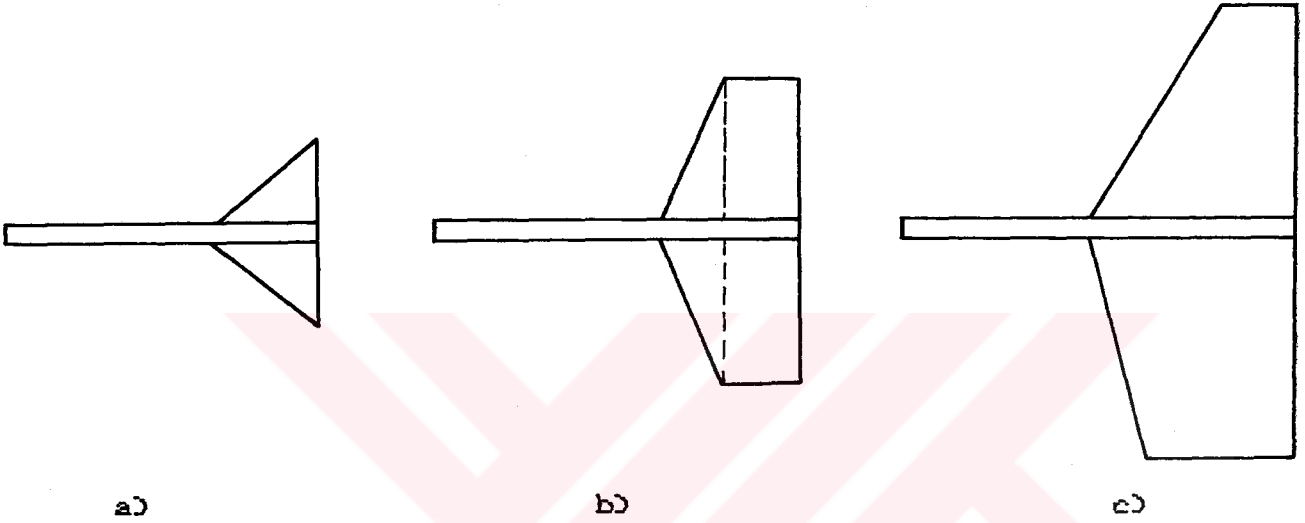
Ufak bir rüzgar türbini-jeneratör grubunun yerleştirilmesinde bazı zorluklarla karşılaşmaktadır.Deniz seviyesi yakınlarında esen düzensiz rüzgarlar rotorda kararsızlıklara veya tektük operasyonlara sebep olur ve sonuçta türbinin dönüştürme verimi çok bozulur./4/

## BÖLÜM 9

### RÜZGAR TÜRBİNİNİN ELEMANLARI

#### 9.1. KILAVUZ KUYRUK

Rotorun rüzgara yönelmesi kılavuz kuyruk vasıtasıyla sağlanır. Çeşitli tipte kuyruk yüzeyleri şekil 9.1'de gösterilmiştir.



Şekil 9.1 : Kuyruk yüzeyleri

( c c şikkındaki kuyruk yüzeyi en kullanışlı olanıdır. ) /19/

#### 9.2. PLATFORM VE KULE

Sistemin ve kılavuz kuyruğun bağlanacağı platform, kule eksenini etrafında dönebilecek şekilde dizayn 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. /19/

#### 9.3. YATAKLAR VE JENERATÖR

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

Güç iletim elemanlarının yataklanmasında radyal bilyalı rulmanlar kullanılmaktadır. /19/

#### 9.4. KULE DİZAYNI

Köşebent profilli çelik kuleler en çok kullanılan en yaygın kule tipidir çünkü bu tip konstrüksiyon kolaylıkla inşa edilebilmektedir. Silindirik formlu kulelerde çok sık olmasada kullanılmaktadır.

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

Kulenin yüksekliği rotor çapına bağlı bulunmakla birlikte yüksek kulelere büyük boyutlu rotolardan ziyade ufak boyutlu olanları çok daha kolay montaj edilebilir. Ufak rüzgar türbinleri için en popüler kule, teleskopik tüp şeklinde olanıdır, dahili bir vinçle kulenin yükselmesi sağlanabilmektedir. /9/

#### 9.5. MEKANİZMA ODASI

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

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

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

Pitch kontrolü genellikle hidrolik sistemlerle sağlanmaktadır. /9/

## BÖLÜM 10

### MALİYET

#### 10.1. SİSTEM MALİYETİ

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

- \_ Tesisin ilk maliyeti
- \_ Yıllık olarak üretilen enerjinin miktarı

Ekonomiklik açısından incelendiğinde, diğer teknolojilerle üretilen enerjinin birim maliyeti ve satış fiyatıda önem kazanmaktadır.

Rüzgar türbinini satın almak isteyenlerin değerlendirmesi gereken konular şunlardır:

#### a) İlk kuruluş maliyeti

- 1) Alış fiyatı
- 2) Nakliye
- 3) Tesis maliyeti
- 4) İthal vergisi miktarı
- 5) Tesisin kapladığı alana ilişkin maliyet

#### b) Elektrik enerjisi üretimi

- 1) Rüzgar türbininin kullanım faktörü
- 2) Rüzgar türbininin tipi ve büyüklüğü
- 3) Rüzgar rejiminde görülen yıllık ve yıllar arası değişimler

#### c) Sistem tarafından üretilen enerjinin satış fiyatı ile diğer

kaynaklardan üretilen satış fiyatlarının karşılaştırılması

#### d) İşletme ve bakım masrafları

#### e) Paranın maliyeti

#### f) Yasal mevzuat

#### g) Enflasyon

#### h) Amortisman

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

#### a) Jeneratör büyüklüğü

b) Rotor alanı ve rüzgar haritası

c) İmalatçı eğrisi

a) Jeneratör büyüklüğü :

$$YKWH = VER.JB.8760 \quad (10.1)$$

YKWH : Yıllık üretilen enerji (kWh)

JB : Jeneratör büyüklüğü

VER : Verim faktörü

b) Rotor alanı ve rüzgar haritası :

Bir rüzgar haritasından yıllık ortalama güç elde edilebilir.

$$RE = P.A.8760 \quad (10.2)$$

RE : Rüzgar enerjisi

P : Güç yoğunluğu ( $W/m^2$ )

A : Rotor alanı

Çeşitli rotorlar için alan hesabı :

Rotor	Alanı
YERM	$\pi.R^2$
DERM	
Savonius	H. D
Darrieus	H. D. 0,65

YERM : Yatay eksenli rüzgar türbini

DERM : Dikey " " "

Yıllık enerji üretimi sistemin toplam verimine bağlıdır.

$$YKWH = RE.VER \quad (10.3)$$

c) İmalatçı eğrisi :

Rüzgar hız dağılımı ve rüzgar türbinlerinin güç eğrilerinden yararlanarak, enerji üretimi öngörülebilmektedir: Eğer 1 ( $m/s$ )'lik hız dilimleri kullanılıyorsa, enerjiyi bulmak için o hızdaki saat sayısı karşılık gelen güç ile çarpılır. Yıllık toplam enerji üretimini bulmak içinde bu değerler toplanır. /19/

## 10.2. BİRİM ENERJİ MALİYETİ

Kapitali geri kazanma faktörü (CRF),

$$CRF = \frac{i.(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (10.4)$$

Üretim maliyeti (UM),

$$UM = \frac{C_T.(CRF + I)}{YKWH} \quad (\$/kWh), (TL/kWh) \quad (10.5)$$

UM : Üretim maliyeti

I : Servis,bakım ve sigorta giderleri (%)

i : Faiz oranı (%)

n : Amortisman süresi (Yıl)

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

Rüzgar türbininin toplam kuruluş maliyeti rüzgar türbini, taşıma ve dikme,kurma,trafo ve şebekeye bağlantı giderlerinden oluşmaktadır./19/

### 10.3.ÇEVREYE UYUM

Rüzgar enerjisi,kirlilik yaratmayan bir enerji kaynağı olmasına rağmen çevrim sistemlerinin çok yaygın bir şekilde kullanılması halinde aşağıda sıralanan bozucu etkilere sebep olabilir./19/

a) Çevre görüntümünü bozması

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

c) İklim değişikliğine sebep olabilir

d) Toprak işgali

### 10.4.EKONOMİKLİK

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

$$k = \frac{\text{Yıllık Faydalı Enerji Üretimi ( kWh )}}{8760 \cdot P_R} \quad (10.6)$$

$P_R$  : Tesis gücü (kW)

Rüzgar hızındaki değişiklikler yüzünden k değeri 1'den küçüktür,genellikle 0,1 ile 0,5 arasındadır.k ' nın yüksek değeri olması üretilen enerjinin maliyetinin düşük olmasını sağlar.

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

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

$$\text{COE} = \frac{\text{AFC} + \text{O\&M}}{\text{Yıllık Enerji Üretimi}} \quad (10.7)$$

Kilowattsaat (kWh) olarak yıllık enerji üretimi 8780.k değerine eşittir.

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

Sınırsız enerji kaynaklarının ulusal politikaya faydası ve bu enerji türünün vergilerden etkilenmemesi yüzünden rüzgar gücünün önemi gittikçe artmaktadır.Fosil yakıtların fiyatlarının gittikçe zamlanması ve rüzgar türbinlerinin çevre kirlenmesi yaratmamasıda rüzgar enerjisine olan ilgiyi gittikçe arttırmaktadır. /S/

#### 10.5. DEĞİŞKEN HIZLARDA ÇALIŞMANIN ENERJİ MALİYETİNE ETKİSİ

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

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

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

Elektronik güç konvertörü ilavesi ile değişken hızlarda çalışma sağlanabilir.Sabit hızlı rüzgar türbinleri ile değişken hızlı rüzgar türbinlerinin karşılaştırılmasında USW 58-100 modeli kullanılmıştır.Rotor ve transmisyonda meydana gelen tork değerinin

sabit kaldığı farz edilir. Sabit hızlı rüzgar türbinlerinde rotorun çalışma hızı, normal çalışma hızının % 75 'i ile % 125 'i arasında olabilmektedir. Elektronik güç konvertörlü rüzgar türbinlerinde hızın artmasına rağmen moment oluşmaz ama kondüktörler (iletkenler) daha fazla kapasiteye ihtiyaç duyar. Gerçekte, rotor hızlanırken elektronik güç konvertörünün momenti sınırlama kabiliyeti sayesinde bazı mil yataklarının ve transmisyonun maliyetinde azalma olacağı umulmaktadır.

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

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

#### 1) Değişken Hızlı Rüzgar Türbinlerinin Maliyeti

Değişken hızda çalışma esnasında, dizayn amacıyla sisteme bir elektronik güç konvertörü ilave edildiği zaman sabit hızlı rüzgar türbinine (CSWT) göre bazı parçaların maliyetleri değişebilir. Moment yüklerine ait tepe değerlerin zayıflatılmasıyla transmisyon maliyetinde azalma meydana gelir. Değişken hızlı rüzgar türbinlerinde ( VSWT) kondüktörlerin maliyeti, CSWT 'ye göre daha yüksektir, kontrol mekanizmalarında maliyetleri yüksek olacaktır ama güç faktörü kapasitörü ve kontaktör gibi bazı güç cihazları çok fazla kullanılmayacaksa PEC 'in maliyet hesabına dahil edilebilir. Bir CSWT ile bir VSWT arasındaki diğer maliyetlerin sabit kaldığı kabul edilir. Tablo 10.1 'de VSWT komponentlerinin maliyetleri ile CSWT komponentlerinin maliyetleri oranlanmıştır ve elektronik güç konvertörünün maliyeti ile CSWT 'nin kuruluş maliyeti karşılaştırılmıştır.

<u>Komponent</u>	<u>VSWT/CSWT Maliyeti</u>
Transmisyon	0,95
Jeneratör,güç cihazları,kontrol sistemleri	0,93
PE Konvertör/CSWT Toplam	0,18

Tablo 10.1 :Relatif VSWT komponent maliyetleri

## 2) Bir VSWT 'de Enerji Verimliliğinin Artırılması

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

## 3) Ekonomiklik

Yatırım maliyeti ile enerji tasarrufu arasındaki farklılıklar temelde tek bir yolla değerlendirilmeli ve mukayese edilmelidir.Deger hesabında kullanılan yöntem rüzgar türbininin enerji maliyetinin,rüzgar türbininin ömrüne bağlı olarak hesaplanmasıdır.Enerji maliyetinde bir kez hesaba katılan yatırım maliyetinin içine,enerji verimliliği nedeniyle elde edilen yıllık gelirinde sokulması gerekir.Bu karşılaştırma için,yıldan yıla mali analizler yapılmalı ve rüzgar türbininin kurulması için harcanan yatırım maliyetide göz önünde bulundurulmalıdır.Kredi vergileri ve uzun yıllar süren kuruluş çalışmaları nedeniyle oluşan faktörler dikkate alınmamalıdır çünkü analizleri çok karmaşık hale getirirler zaten CoE 'nin maliyetinede pek fazla etkileri olmaz.İlk yıl için enerjinin maliyetini hesaplarken projenin gerçekleştirilmesi

esnasında enflasyon nedeniyle meydana gelecek kayıp yüzünden paranın bugünkü değeri (NPV) hesap edilmelidir. Enerjinin ilk maliyeti ile CoE karşılaştırıldığında ne kar nede zarar elde edilir,yatırımcının yatırımlarını uygun bir şekilde geri kazanmasını sağlar ve rüzgar türbinlerinde iyi bir ekonomik etkileşime neden olur.

Mali (nakit para) analizlerinde yapılan kabuller iki kısma ayrılabilir.Bunlardan ilki rüzgar türbininin kuruluşu esnasındaki spesifik harcamalardırki bunlar verimlilik ve projenin çalıştırma ile bakım ( O&M ) masraflarıdır.O&M maliyetinin değişken ve sabit hızlı rüzgar türbinleri için değişmediği kabul edilmiştir,enerji verimliliğindeki artış sayesinde elektronik güç konvertörünün bakım masrafları bertaraf edilmiş olacaktır.İkinci kabulde ise mali analizler ekonomik durumlarla direkt ilgili tutulmuştur.Tablo 10.2' de ekonomiklik açısından kabul edilebilir değerler verilmiştir.

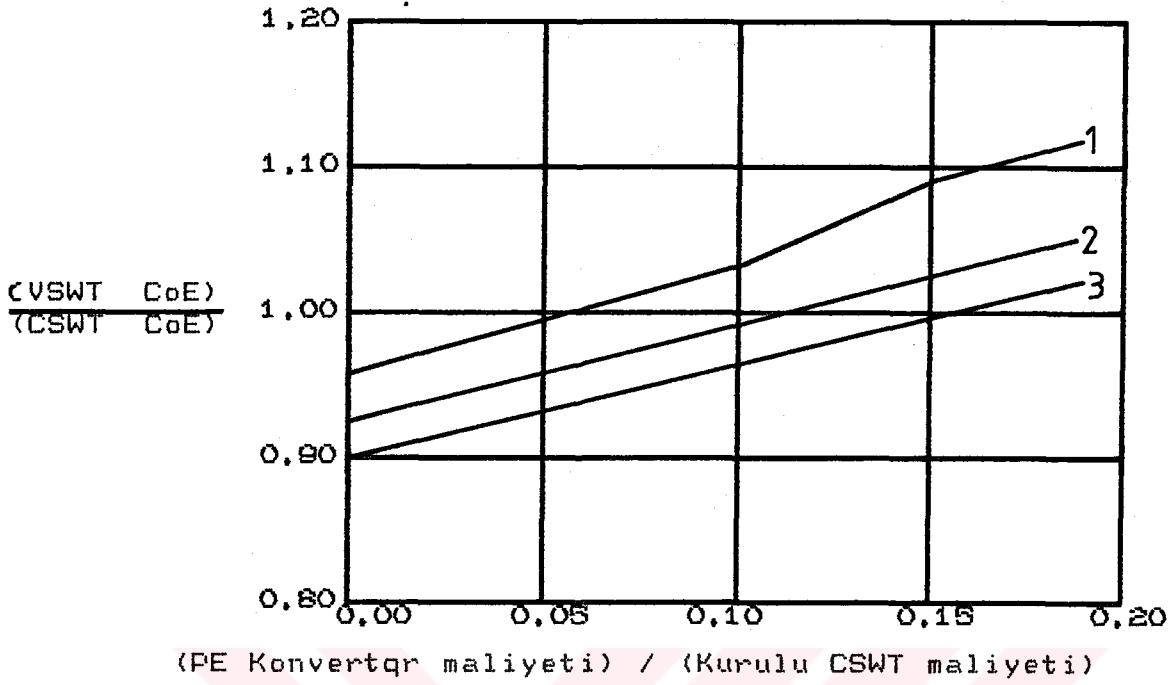
Borçlanma yüzdesi	50	%
İlgilenme oranı	11	%
PV iskonto oranı	12,5	%
Enflasyon	6	%
Federal gelir vergisi	34	%
Eyalet " "	6	%
Arazi vergisi	1,5	%
Sigorta	0,5	%
Vergi değerinde düşme	5	Yıl
Borçlanma ömrü	10	Yıl
Proje ömrü	30	Yıl

Tablo 10.2 :Mali analizlerde ekonomiklik kabulleri

#### 4) Enerji Maliyetinin VSWT ile CSWT Arasında Karşılaştırılması

USW 56-100 modelinde kullanılan parçaların maliyetleri,bir VSWT 'deki enerji verimliliğini ve parça maliyetleri için parametre olacaktır.Enerji maliyetinin hesaplanmasında çeşitli yöntemler kullanılabilir.Grafik 10.1 'de de bunlarla ilgili sonuçlar verilmiştir.Kurulu bir CSWT 'nin bir bölümü olan elektronik güç konvertörü maliyetinin fonksiyonu olarak bir VSWT 'nin enerji maliyeti grafiği çizilmiştir.Bu eğriler enerji verimliliğinin

dogurdugu etkilerin, VSWT ile CSWT üzerindeki artışı göstermektedir. /11/



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

Grafik 10.1 : Maliyet karşılaştırması

## BÖLÜM 11

### KONTROL SİSTEMLERİ

#### 11.1. KONTROL SİSTEMİ

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 yada durduracak mekanizmalara ihtiyaç vardır.

Bu çeşitli şekillerle gerçekleştirilebilir.

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.)/18/

#### 11.2. ESNEME KONTROLÜ

Çapı 4,5 (m)'e kadar olan rotolarda esneme kontrolü (rüzgar içinde rotorun otomatik olarak yön bulması) kılavuz kuyruk ile sağlanır. Bazı modellerde rotor rüzgarı arkasına alır ve döndürme momenti üreten rotolarda drag'a bağımlı olmaktadır.

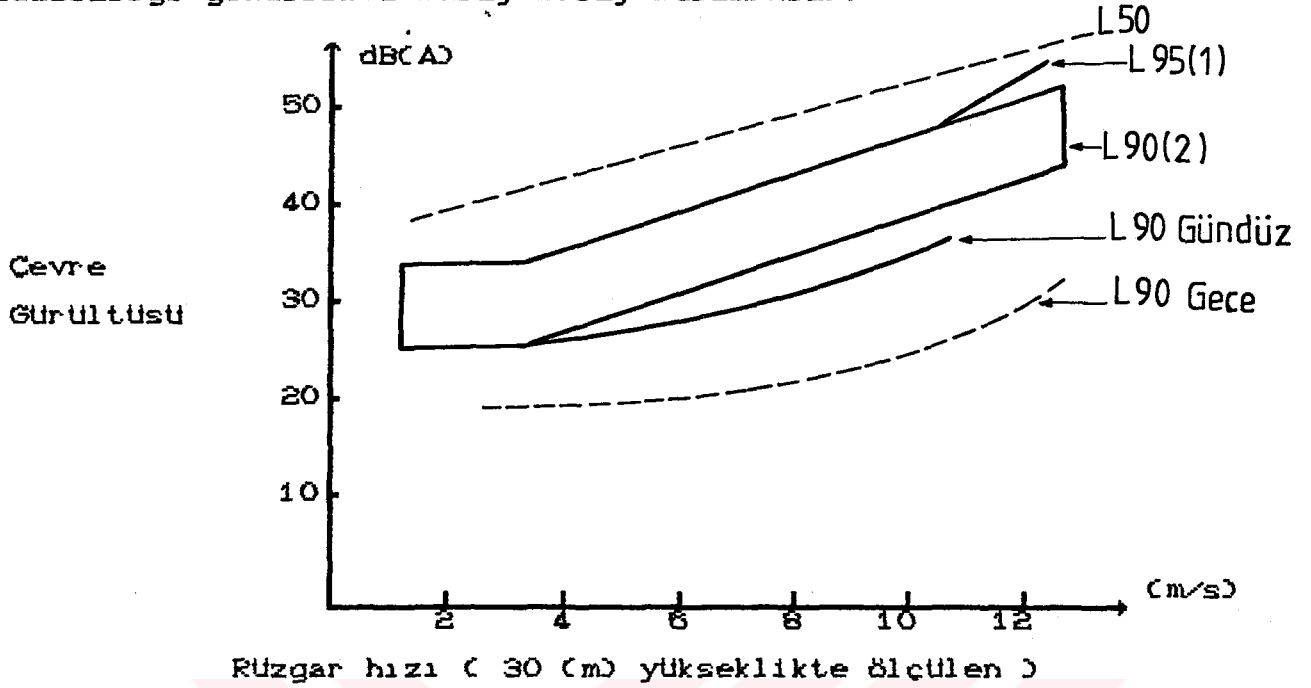
4,5 (m)'den daha büyük çaplı rotolarda esneme kontrolünün sağlanması daha zordur, kılavuz kuyruk yeterli iş görmez. Büyük rüzgar türbinleri yardımcı kontrol cihazlarına yada rüzgarın hız ve yön değişikliğini hissedebilen mekanik bir düzeneğe bağlanmalıdır.

Kanatlar ister yükte, ister boşta çalışsın her zaman esneme kontrolü yapılmalıdır. Rüzgar içindeki rotorda müsaade edilebilir esneklik  $\pm 12^\circ$  sınır değerleri arasında olmalıdır./9/

#### 11.3. RÜZGAR TURBİNİ ÇİFTLİKLERİNDE GÜRÜLTÜ KONTROLÜ

Çevremizdeki Gürültü Seviyeleri : Rüzgar ağaçlardan, çalılıklardan, 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, şehirsiz yada endüstriyel bölgelerin her zaman varolan gürültü seviyeleri aynı olmaz. Çevremizde varolan bu gürültülerin seviyelerini daha iyi kavrayabilmek için problemin boyutunu açıklamak gerekir. Şehirlerde yada kasaba gibi daha ufak

yerleşim bölgelerinde yaşayan insanlar, kırsal kesimlere has sessizliği genellikle kolay kolay bulamazlar.



Grafik 11.1 : Her zaman varolan gürültü seviyeleri

Grafik 11.1 ,değişik rüzgar hızlarında çevremizde meydana gelen gürültüleri göstermektedir. Bir rüzgar türbininin bulunduğu yerde,yarattığı gürültü etkileriyle ilgilenmek için 30 (m) yükseklikteki rüzgar hızının yaratacağı gürültü seviyelerinin etkileri grafik edilmiştir.

Gece vakti,5 (m/s) 'lik değere sahip rüzgar hızında çevrede 20-25 dB(A) 'lık ( L90s ) son derece düşük seviyeli gürültü oluşur,11 (m/s) 'lik rüzgar hızında bu değer 25-35 dB(A) 'ya yükselir.Gündüz vakti,5 (m/s) 'lik rüzgar hızında gürültü seviyesinde 25-32 dB(A) yükselme eğilimi görülmüştür,11 (m/s) 'lik rüzgar hızında ise bu değer 29-45 dB(A) arasında olur.

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 , 2,8 ile 5 (m/s) 'lik sınır değerler arasındadır.Rüzgar çiftliği operatörleri türbin gruplarını farklı hız değerlerinde devreden çıkabilecek şekilde programlar.Sebekeyle bağlantı problemleri veya potansiyel gürültü sorunlarından sakınmak için bu şekilde yapılmaktadır.

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

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

a) Dönel kanatlar ile türbülanslı akış,birbirlerini karşılıklı olarak etkiler.

b) Kanatların kuyruk kısmında ve airfoil yüzeylerinde sınır tabaka türbülansı oluşur.

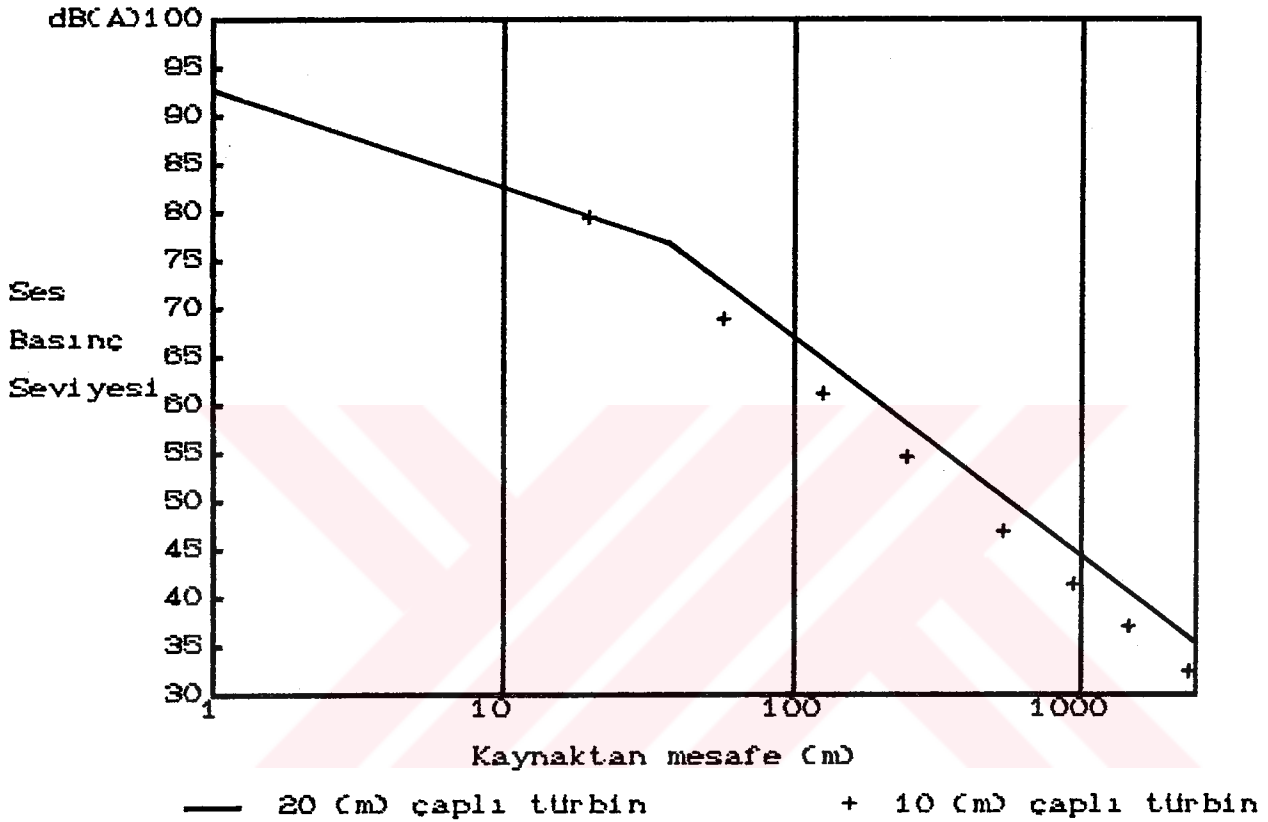
c) Kuyruk kısmındaki körlük yüzünden vortekste bozulma oluşur.

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

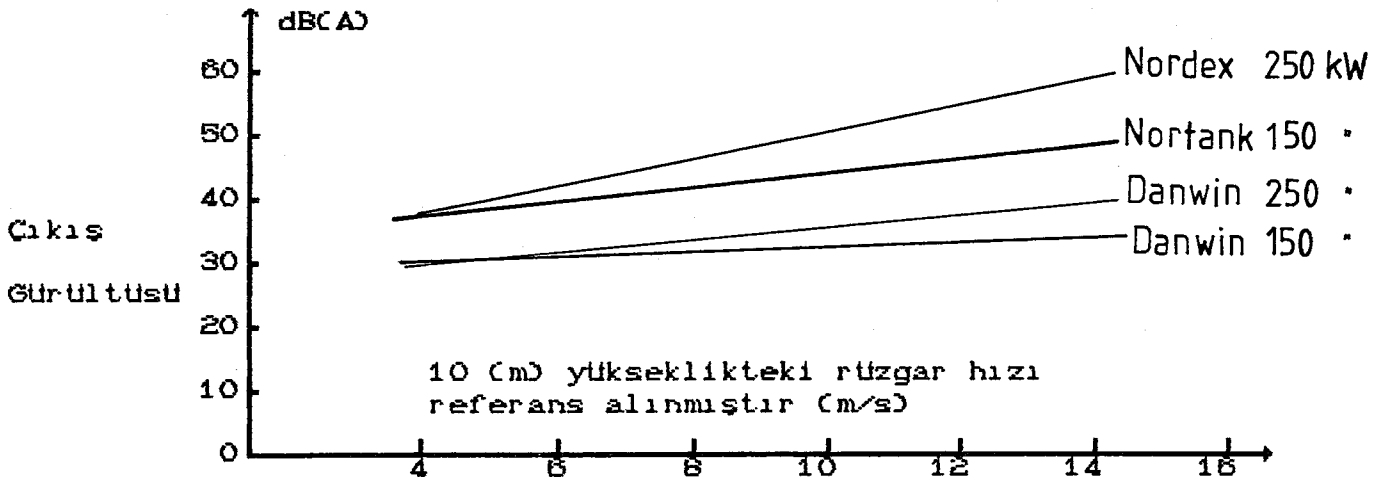
Mesafe ile zayıflama : Grafik 11.2 ile ses enerjisinde, küresel yayılma sırasında mesafeyle orantılı meydana gelen zayıflama grafiği verilmiştir.Bölgesel zayıflama genellikle iki kanatlı rotor çapının iki katı mesafede,kaynaktan itibaren 3 (dB) civarında olur,altı kanatlı rotor çapının iki katı mesafede ise zayıflama 6 (dB) olur.

Rüzgar hızının 1 (m/s) artmasına karşılık,gürültü seviyesi

yaklaşık olarak 1 (dB) artar.10 (m) yükseklikteki rüzgar hızı referans alınarak,çeşitli rüzgar türbinlerinden 400 (m) uzakta meydana gelen gürültü.seviyeleri grafik 11.3 'te gösterilmiştir.Uç üreticinin tahminine göre Danwin 'in rüzgar türbini en sessiz çalışanıdır,10 (m) yükseklikteki rüzgar hızı ( 8 (m/s) ) referans alındığında 400 (m) mesafede gürültü seviyesi yaklaşık 30 (dB) civarında çıkmıştır.

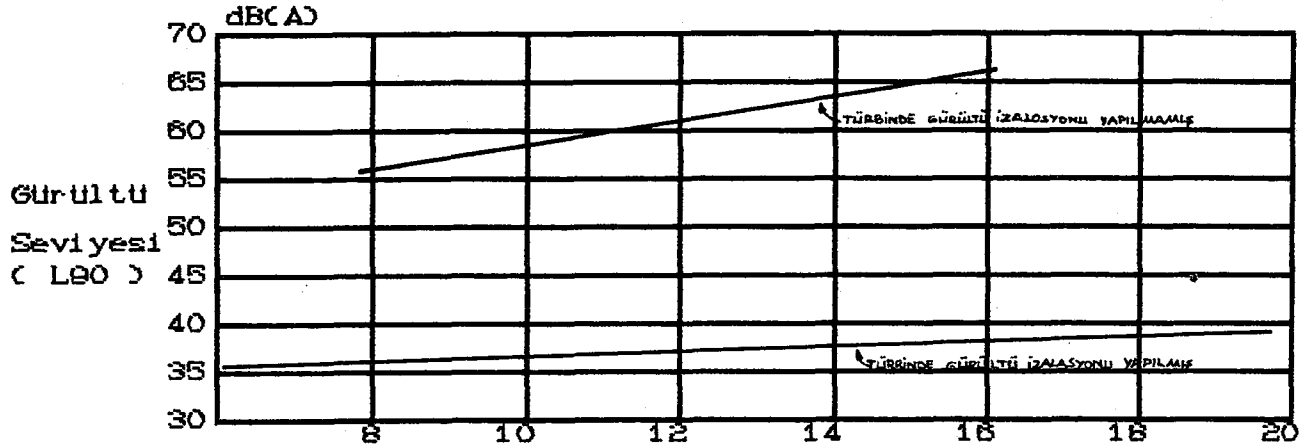


Grafik 11.2 : Rüzgar türbininde gürültü



Grafik 11.3 : Rüzgar türbini çıkış gürültüleri (400 m mesafede)

Grafik 11.4 'te gürültü seviyelerinin akustik tedbirlerle ne kadar azaltılabileceği gösterilmiştir. Bu örnekte 20 dBCA 'lık bir zayıflama sağlanabilmektedir. 8 (m/s) 'lik rüzgar hızında 50 (m) mesafede 36 dBCA 'nında altında gürültü seviyesi elde edilebilir.



30 (m) yükseklikteki rüzgar hızı (m/s)

Grafik 11.4 : İzole edilmiş ve edilmemiş rüzgar türbini gürültü seviyeleri ( 48 (m) mesafede )

Kırsalkesimde Gürültü Regülasyonu : Tablo 11.1 'de bazı ülkelerde şuanda faaliyet gösteren spesifik regülasyonlarla ilgili sonuçlar verilmiştir.

Maksimum Gürültü dBCA

1. Avrupa

1.1. Danimarka

Kırsal kesimlerdeki yerleşim bölg.	45
Oturmaya elverişli yerler	40
Rüzgar türbininden 400 (m) uzakta	45

1.2. İsviçre

Endüstriyel gürültü	35-40
---------------------	-------

1.3. Hollanda

Kırsal kesimler ( Gündüz )	40
" " ( Gece )	35
Sakin kasabalar ( Gündüz )	45
" " ( Gece )	35

1.3.1. Schleswig-Holstein

Yerleşim bölgeleri dışı ( Gündüz )	50
" " " ( Gece )	35

Yerleşim bölgeleri içi ( Gündüz )	35
" " " ( Gece )	25

## 2. Amerika Birleşik Devletleri

Kern L8.3	45
Solano L50	47
Riverside	45
Almeda ( Rüzgar türbininden 300 (m) uzaklıkta )	55

Tablo 11.1 :Rüzgar türbini gürültü regülasyonu

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 yukarıydı.Örneğin California 'da 8 (m/s) 'lık rüzgar hızında,L90 'da 43 dB(A) 'lık gürültü seviyesi oluşmaktadır.G.J.Williams 'ın ( G.J.Williams,Survey of the wind energy potential for Cornwall:report to the Cornwall Energy Project,1988 ) notlarına göre Hollanda,Almanya ve Amerika Birleşik Devleti 'ndeki türbin testlerinde yaydıkları gürültü seviyeleri Cornish 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 dip kesimlerine ulaşamaz aynı anda tepelerde yüksek,vadilerde de düşük seviyelerde gürültüler çevreye yayılır.

Tablo 11.2 'de Taylor ve Rand ( Taylor,D and Rand.M Planning for wind energy in Dyfed 1990 ) ile Capel Cynon ve Cold Northcott ( Central Electricity Generating Board,Proposed Capel Cynon windpark and environmental statement , 1989 ) tarafından önerilen çevreyle ilgili gürültü standartları verilmiştir.

<u>Taylor ve Rand</u>	<u>Maksimum Gürültü Seviyesi dB(A)</u>
Kırsal kesimlerdeki yerleşim bölgeleri	45
Oturmaya elverişli yerler	40
Rüzgar türbininden 400 (m) uzakta	45
Binaların çok yakınında L50	50

Tablo 11.2 :Önerilen gürültü standartları

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

Uygun Mevki Seçimi : Konutlardan yeteri kadar uzak olan bölgelere,rüzgar çiftlikleri kurularak gürültü problemi çözülebilir.Tablo 11.3 'te Batı Wales ile Güney Wales bölgelerinde,uygun rüzgar çiftliği kurulabilecek yerlerin sayısı verilmiştir.

Yerleşim Bölgesine Olan Uzaklık (m)	Rüzgar Çiftliği Olabilecek Yerlerin Sayısı	
	Batı Wales	Cornwall
0 - 200	Bulunamadı	347
201 - 300	"	584
301 - 400	437	324
401 - 500	21	174
501 - 600	8	41
601 - 700	11	60
701 - 999	5	1
1000 - Yukarısı	8	0
	<b>Toplam :</b>	<b>1511</b>

Tablo 11.3 : Rüzgar çiftliği kurulabilecek bölgelerin,yerleşim bölgelerine olan uzaklıklarına göre analizi

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

Bu analiz göstermektedirki 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 % 60 civarındadır.

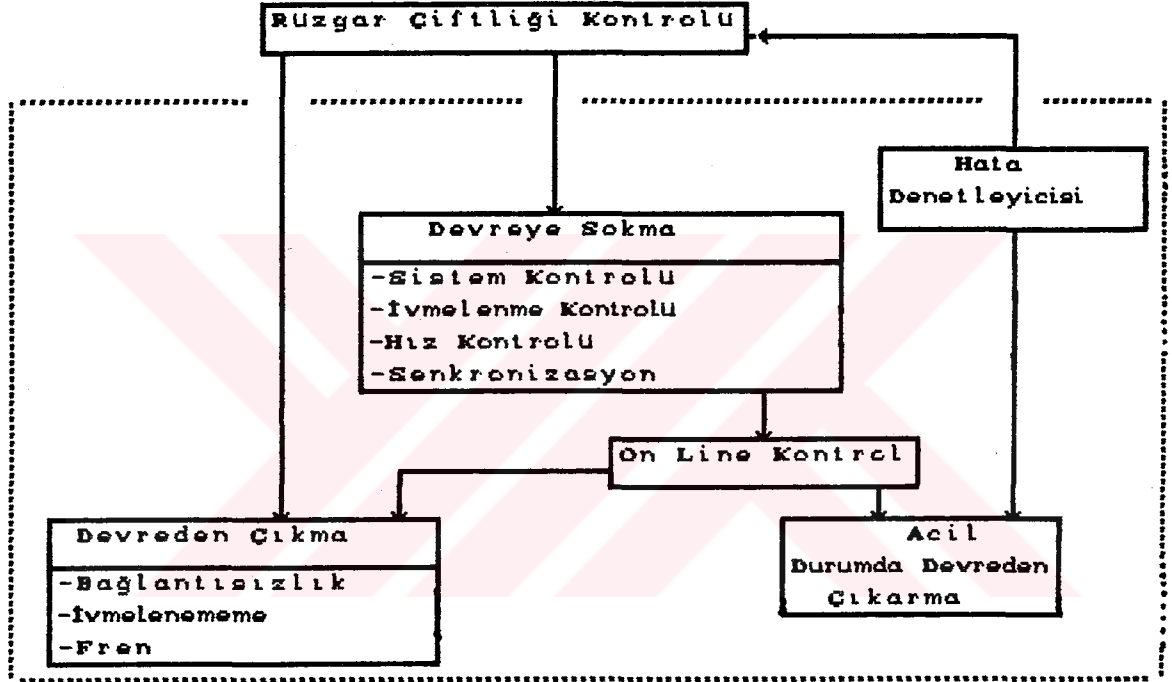
Dyfed 'de,rüzgardan elde edilebilecek güç potansiyeli yaklaşık 2 (GW) civarındadır ama rüzgar çiftliği kurmaya elverişli bölgelerin % 95 'i,gürültü problemi yüzünden kullanmaya elverişli değildir bu taktirde ise rüzgardan elde edilebilecek potansiyel güç 100 (MW) civarında olacaktır./10/

#### 11.4. RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE KONTROL SİSTEMLERİ VE BUNLARIN UYGULAMALARI

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

##### 1) Kontrol Sistemleri ve Rüzgar Türbinleri

Tipik bir rüzgar türbini birçok sayıda kontrol sisteminin etkisi altında çalışır. Şekil 11.1 'de kontrol devresinin şeması gösterilmiştir.



Şekil 11.1 : Kontrol devresinin akış şeması

##### 1.1) Rüzgar Türbini Çiftliği Kontrol Sistemleri

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

## 1.2) Rüzgar türbini Kontrol Sistemleri

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

### a) Kapalı Devre TV Sistemiyle Gözlem

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

### b) Devreye sokma/Devreden çıkarma

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

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

### c) Regülasyon

Güç regülasyon ve kontrol devresinin fonksiyonu üretilen gücün regülasyonunu sağlamaktır. Referans değerleri ile spesifik türbin ölçüm değerleri arasında meydana gelebilecek farklılıklardan doğan hata sinyallerine cevaben çalışma karakteristikleri değiştirilerek regülasyon sağlanabilir. Pitch kontrollü rüzgar türbinlerinde, kanat pitch açısı otomatik olarak ayarlanır böylece efektif rotor verimi değiştirilerek güç üretilir. Değişken hızlı rüzgar türbinlerinde muhtemelen pitch açısıyla bağlantılı olarak jeneratör momentinin ve rotor hızının kontrolüne müsaade edilir böylece rotor gücü üretilmiş olur.

### 1.3) Komponent Kontrol Sistemleri

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

#### 2) Feedback ( Geri Bildirim ) Kontrolü

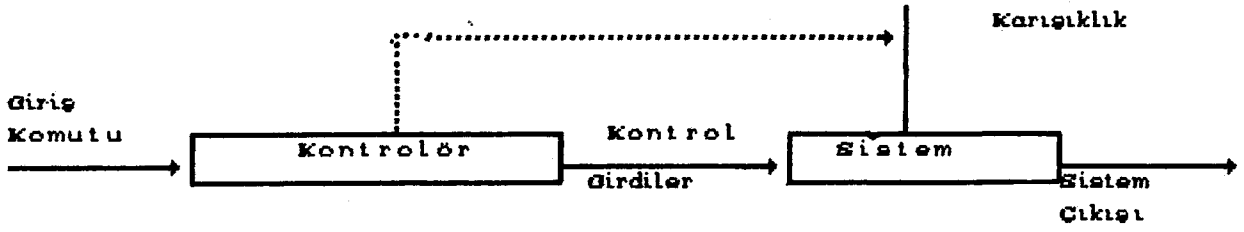
Kontrol kavramındaki gerçek, sistemin dinamiksel doğallığının anlaşılmasıdır. Bir sistem girdiler ile çıktılar arasındaki ilişkileri düzenler. Teknik, biyoloji ve sosyoloji ile ilgili spektrumlar arasından örnekler bulunabilir. Ekonomik sistemler, hayvanların biyolojik fonksiyonları ve endüstriyel proseslerdeki karmaşıklık birer örnektir. Karakteristik özellik, bir sistemi alt sistemlerine hiyerarşi içinde ayrıştırılabilmektir.

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

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

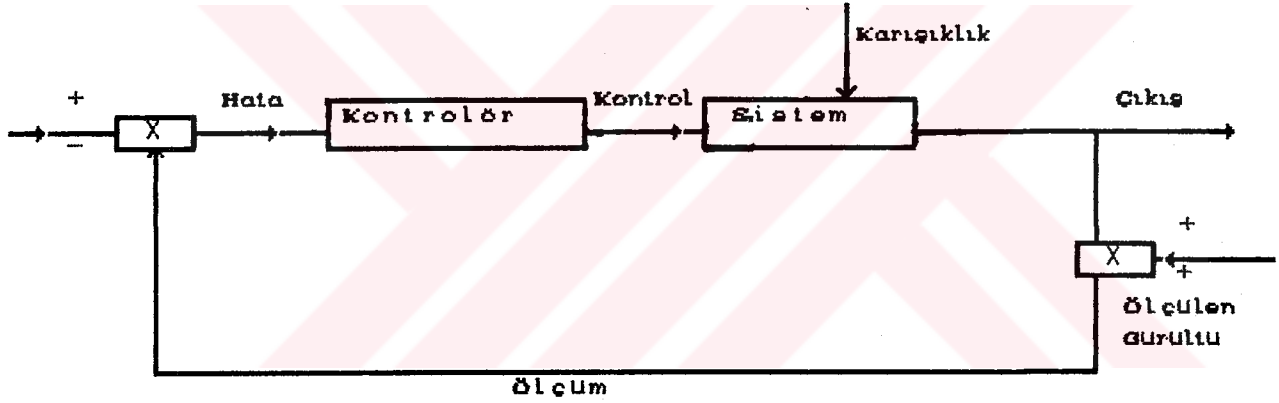
Eğer bir sistemin dinamik davranışlarından meydana getirilen modelde, hem sonsuz bir kesinlik elde edilebilse hemde girdilerdeki tüm değerler ölçülebilseydi, sistem davranışları açık devre kontrol sistemleriyle hesaplanabilirdi.

Karışıklık olduğunda ve komuta sinyalleri bilindiği zaman şekil 11.2 'deki model kullanılarak proses çıktıları tahmin edilebilir. Bir girdi kontrol sinyali ile bu girdiler telafi edilebilir.



Sekil 11.2 : Açık devre kontrol sistemi

Pratikte, mükemmel bir model yoktur. Sistemlerin büyük bir çoğunluğunda çok karmaşık prosesler basitleştirilir. Çok karmaşık sinyaller daima ölçülemez, en pratik kontrol stratejisi, değerler arası farklılardan doğan hata sinyallerini kontrol etmektir. Sekil 11.3 'te feedback (geri bildirim) kontrolü ile ilgili şema verilmiştir.



Sekil 11.3 : Kapalı devre kontrol sistemi

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

a) Kontrol yoluyla dinamiksel etkilerin sınırlandırılması

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

$$I \cdot \ddot{\varphi} + B \cdot \dot{\varphi} + K \cdot \varphi = T_A \quad (11.1)$$

I, shafta meydana gelen atalet; B, viskoz sönümlenme faktörü; K,

katılık;  $T_A$ , zorlayıcı kuvvet ve  $\phi$  ise shaftın rotasyonel pozisyonudur. Sisteme kontrol işlevini yerine getiren  $T_f$  kuvvetini ilave edersek, 11.1 nolu denkleme düzeltme yapmak gerekir.

$$I.\ddot{\phi} + B.\dot{\phi} + K.\phi = T_A - T_f \quad (11.2)$$

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

$$T_f = K_1.\dot{\phi} + K_2.\phi \quad (11.3)$$

11.1 nolu ifade yeniden düzenlenerek yazılabilir.

$$I.\ddot{\phi} + (B + K_2).\dot{\phi} + (K + K_1).\phi = T_A \quad (11.4)$$

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

#### b) Yabancı sinyallerin yarattığı etkilerin kontrolü

Kapalı devre kontrol sistemlerinde kabul edilmelidir ki komut girdileri ve karışımlar gibi yabancı sinyaller sistemin çıkış sinyallerini değiştirmektedir. Şekil 11.3 'e göre kontrol merkeziyle proses girdi-çıkışı arasındaki ilişkiler  $K$  ve  $G$  ile ifade edilmiştir. Kullanılan vektör sinyalleri  $r$ , komut;  $d$ , karışım;  $y$ , sistem çıkışı ve  $v$  ise ölçülen gürültü için kullanılmaktadır. Açık devre sistemlerde, karışım girdileri aşağıdaki gibi ifade edilir.

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

Kapalı devre sistemlerde çıktı, aşağıda ifade edilmiştir.

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

Buradan iki önemli sonuç çıkmaktadır.

1) y çıktısı üzerinde d ve r sinyallerinin etkisi  $[I + (G.K)]^{-1}$  terimi ile düzeltilmiştir.

2) Sistem çıktısı, gürültü etkilerini ölçüp verebilecek bir katkıya sahiptir.

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

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

### 3) İyi Bir Kontrol ve Rüzgar Türbinleri

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

Rüzgar türbininde güç, rüzgar hızının küpüyle doğru orantılı olarak artar. Sürekli çalışma esnasında önceden tayin edilmiş rüzgar hızıyla, rüzgar türbinine güç girdisi istenilen miktarda gerçekleşir. Rüzgar hızı sınır değeri çok aşarsa türbinin aşırı yüklenmemesi için rüzgardan elde edilen fazla güç rotordan atılmalıdır. Rüzgar türbininin devreden çıkma hızına kadar sistemden güç elde edilebilir. Hassas olmayan bir regülasyonla çıkış gücü sınırlandırılabilir. Kontrol ve ilk hareket düzeneklerinin kullanılmasıyla, zaruri düzenekler basit bir şekilde tamamlanmış olur. Rüzgar hızındaki dalgalanmalar nedeniyle rotorda meydana gelecek yüksek seviyeli bozulmalar, elektronik güç regülasyonu ile başarılı bir şekilde yok edilir.

Güçteki sınırlandırmalar, kararlı elektrikselsel güç elde etmek için yeterli değildir. Rüzgar kesme kuvveti, kule ve rüzgar hızındaki türbülans rotor diskinde değişik hızlar oluşmasına sonuçta yükte dalgalanmaya neden olur. Bu çeşit değişken yükler, rüzgar türbininin parçalarında malzeme yorulmasına neden

olur. Türbin parçaları için kabul edilebilir yorulma ömürleri, rüzgar türbininin yüklenmesine bağlı olarak değişiklik gösterir.

Yükteki dalgalanmalar tamamen elimine edilememektedir ama genlikleri istenilen düzeyde tutulabilmektedir. Herbir 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 staretaji vardır. Kontrol staretajisindeki seçim, momentte azalma yada artmaya sebep olur. Kontrol sisteminin seçimindeki gaye sadece düzgün bir yüklenmeyle kaliteli güç elde etmek değildir.

Rüzgar türbinine ait herbir parçanın yorulma ömrüyle bağlantılı olarak kontrol sisteminin seçiminde oluşan yüklerde dikkat etmek gerekir. İyi bir kontrolde amaç kabul edilebilir değerler elde etmektir. Kontrol sisteminin dizaynında 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 bağımlı olmaktadır.

Kontrol sisteminin amaçları aşağıda sıralanmıştır.

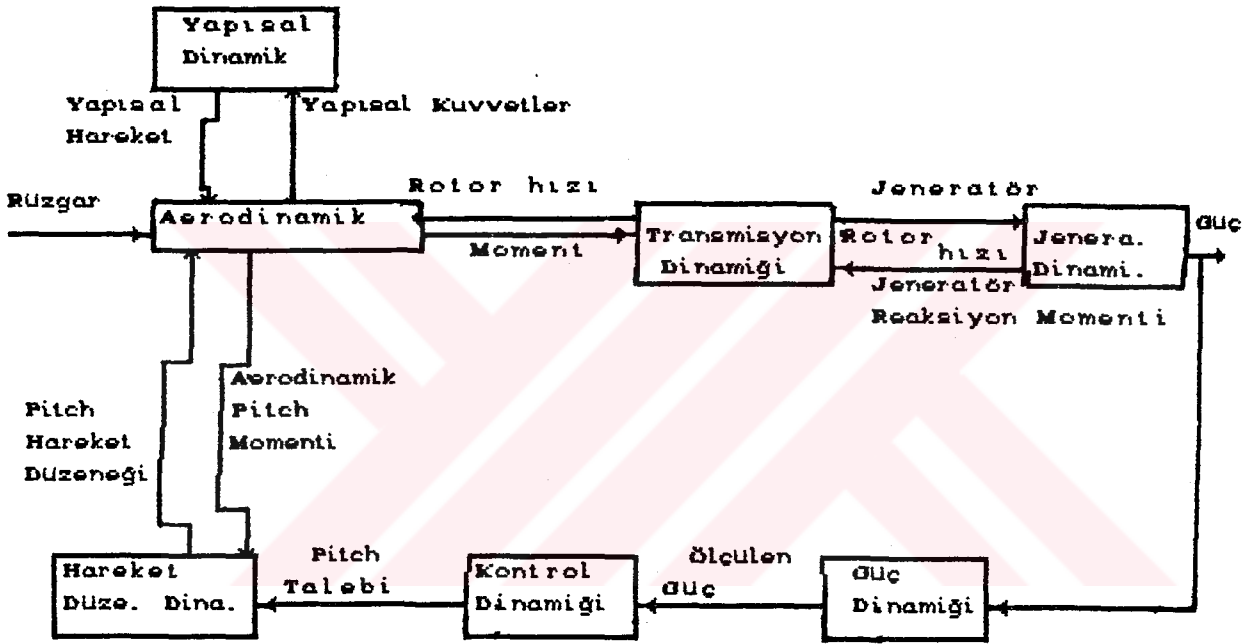
- a) Rüzgar türbinine etki eden geçici yükler hafifletilerek gerilmeler azaltılmalıdır.
- b) Regüleli ve dengeli güç üretilmelidir.
- c) Dinamiksel açıdan rotor, uygun bir performans değerini elde edebilecek şekilde olmalıdır.
- d) Enerji kaybı minimuma indirilmelidir.

#### 4) Rüzgar Türbinlerinde Feedback ( Geri bildirim ) Kontrolü İle İlgili Problemler

Rüzgar türbini birbirleriyle ilgili alt sistemlere ayrılabilir. Alt sistemlerin herbiri türbinin çalışma şartları ile ilgili bazı durumları tanımlayabilmelidir. Daha ucuz ve daha hafif rüzgar türbinleri üretilmeye çalışılmaktadır, çok esnek yapı eldesi, rezonans ve dinamiksel etkileşim gibi konulara daha fazla önem

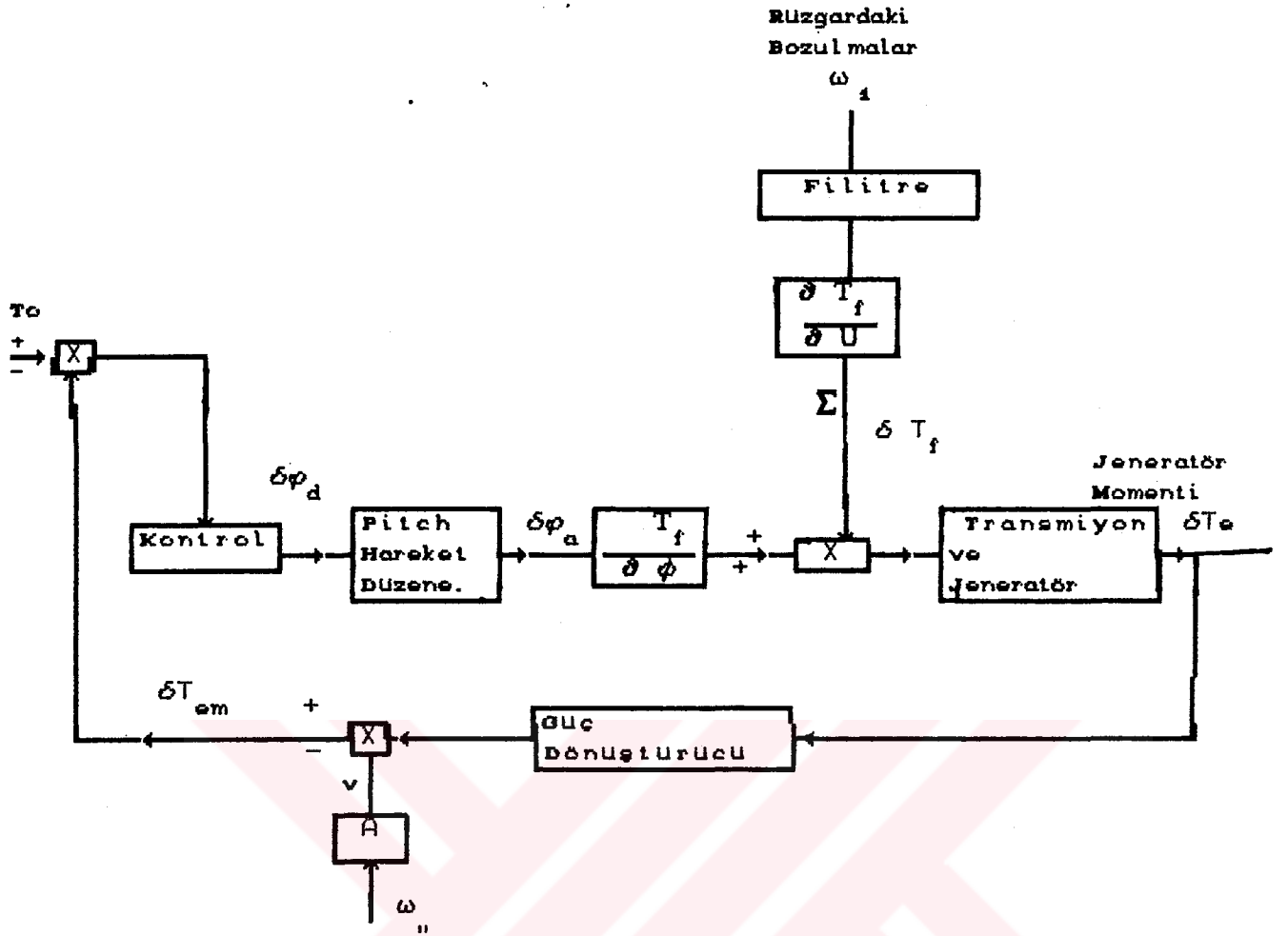
gösterilmektedir. Dinamiksel açıdan sistemin modellenmesi yapılmalıdır. En önemli alt sistemler aşağıda sıralanmıştır.

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



Şekil 11.4 : Rüzgar türbini dinamiği

Alt sistemler ve bunların birbirleriyle olan bağlantıları şekil 11.4 'te verilmiştir. Türbin dinamiği şekil 11.5 'te verilen standart bir kontrol şemasıyla açıklanabilir. Sistem çıkışından elde edilen elektriksel tork ve efektif güce dikkat edilmelidir. Şekil 11.5 'teki kontrol modeli, lineleştirilmiş modelleri içermektedir ve rüzgar türbininin en önemli dinamiksel özellikleri tanımlanmıştır.



Sekil 11.5 : Jeneratör çıkış momentinin kontrol modeli

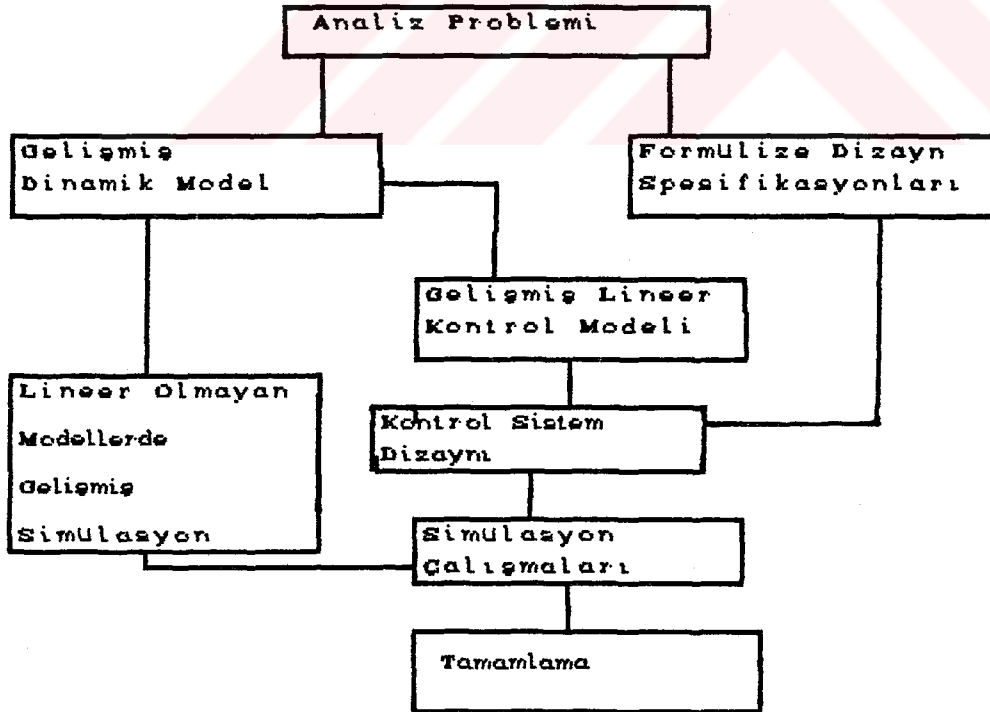
Sekil 11.3 'te verilen standart kontrol sistemiyle karşılaştırıldığında ölçülen gürültü  $v$  ve rüzgarın neden olduğu rotor torku  $\delta T_i$  vasıtasıyla rüzgar türbini dinamik bir sistem gibi modellenebilir. Bu konfigürasyonda güç tertibi ve güç iletimi, değişken kontrolü ve aerodinamik tork için bir sensör gibi çalışır. Ölçülen değişkenlerin seçimi için bu kavram önemli şeyler içermektedir örneğin bu şartlar altında shaft hızının ölçülebilmesi bir avantajdır.

Kontrol sisteminin dizaynı, sistem modeline dayandırılır. Bir kontrol merkezinin üretilebilmesinde dizayn metodolojisinin seçimi, performans özelliklerini garanti altında tutabilecek en basit kontrolörlerin bulundurulmasını zorunlu kılmaktadır buna tasarımcıların deneyimlerinde büyük ölçüde kılavuz olmaktadır.

## 5) Kontrol Sistemi Dizaynı

Kontrol sistemlerindeki dizayn proseslerinin genelleştirilerek ifade edilmesi faydalıdır.

Sekil 11.6 'da verilen akış diagramı ile dizayn prosedürü tanımlanabilir. Dizayn problemleri nedeniyle edinilen deneyimler ve konu ile ilgili yeni bulgulara dayanılarak dizaynlar yenileştirilebilir, prosesin tamamı pekçok kere tekrar edilmektedir. İlk adımda problemler belirlenmeli ve analiz edilmelidir. Rüzgar türbinlerinde kontrol sistemlerinin gerçekten ne çeşit gereksinimlere ihtiyaç olduğu belirlenmelidir. İşe yarar kontrol elde etmeye çalışmanın yanında uygun performans regülatörü için özelliklerde hesaba katılmalıdır. Analizler, türbin dizaynında değişikliklerin meydana geleceğini işaret etmektedir ve türbin, kontrol karakteristiklerinin gelişmesine önderlik etmelidir. Problemin anlaşılabilirliğine dayanılarak deneme niteliğinde dizayn özellikleri formüle edilebilir. Kontrol probleminin analizinde, sistem dinamiğinin anlaşılması şarttır. Sistem davranışlarının matematiksel modellemesiyle formülize edilebilir. Gerçek bilgilerden faydalanılarak bu modellerden lineer olmayan bir model simülasyonu geliştirilebilir.



Sekil 11.6 : Kontrol sistemi dizayn problemi

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

Lineer kontrol sistemlerinin dizaynı için çok sayıda metod vardır bunların en popüler olanları ise klasik ve optik metoddur. 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 uygun performans seviyelerinin elde edilmesini sağlar. İkinci olarak geçiş frekansı civarlarındaki orta frekans bölgesi faz marjlerinin gelişmesini ve yeterli kazancın elde edilmesini sağlar. Sonuçta yüksek frekanslı performans, gürültü etkilerinin azaltılmasını ve modelize edilmemiş dinamik kısımlarla ilgili belirsizliklerin ortadan kalkmasını sağlar.

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

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

Dizaynın herbir safhasında önemli olan deneyim yada yeni kavramların ışığı altında bir önceki safhaya yeniden dönülmesi gerekir. /12/

## 11.5. YATAY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN PASİF KONTROLÜ

Bir pasif sistem kullanarak rüzgar türbininin çıkış gücünü birçok şekilde kontrol edebiliriz. Böyle bir sistem, kontrol işlevinin yerine getirilebilmesi için rüzgar türbinine etki eden kuvvete bağımlı olmaktadır. Pasif kontrol sayesinde elde edilen büyük güvenilirlik ve çok hassas kontrol imkanı, bu kontrol sistemine has bir avantajdır.

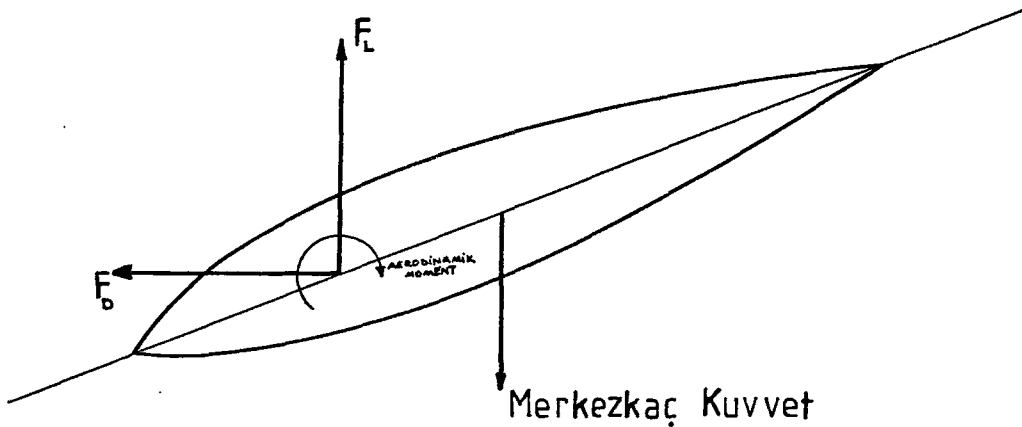
Devam eden çalışmalarda birçok kontrol sistemleri üzerinde durulmaktadır. Bu nedenle en çok kullanılan metod, hem aktif hemde pasif sistemin bir arada kullanıldığı metoddur, bu metodta pitch kontrolü ya kanadın tümüne yada bir kısmına uygulanmaktadır.

Pasif kontrol problemlerinin araştırılmasında takip edilecek prosedürler aşağıda verilmiştir.

- Orta boy bir rüzgar türbini için tipik bir aerodinamik model kurulur.
- Güç kontrolü için ihtiyaç duyulan pitch hareketi türetilir.
- Rotora etki eden kuvvet, rüzgar hızının ve pitch açısının fonksiyonu olarak hesaplanır.
- Birkaç tane kontrol düzeneği için net pitch momenti, pitch açısının fonksiyonu olarak hesaplanır.
- Pasif kontrol sisteminin dinamik cevabı hesaplanır.

### 1) Kuvvetler

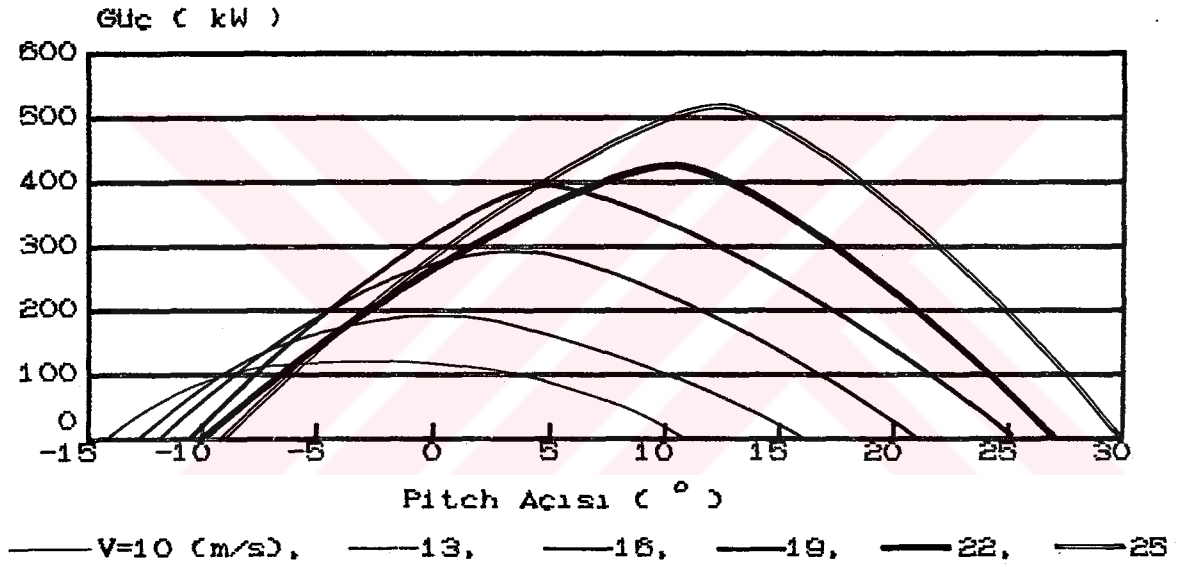
Sekil 11.7 'de rüzgar türbininin rotoruna etki eden kuvvetler gösterilmiştir. Pitch momenti ve pitch açısı pozitif yönde alınmıştır. Pasif kontrolün faydalı olabilmesi için kuvvetin çeşitli kriterleri yerine getirmesi gerekir.



Sekil 11.7 :Kanat kuvvetleri.

- a) Rotor gücünü iyi bir şekilde algılamalıdır.
- b) Yeniden faydalanılabilecek uygun bir kuvvetin mümkün olması için güçle arasında bir bağlantı olması gerekir.
- c) Sürtünme ve mekanik toleranslar gibi dışarıdan gelen etkilerin güç kontrolünü bozmaması için yeterli büyüklükte olmalıdır.

Rotora etki eden her bir kuvvetin büyüklüğünü tahmin edebilmek için bir pasif kontrol kullanılmalıdır, ayrı ayrı her bir kuvveti incelemek içinde faydalıdır. Bu amaçla 25 (m) çaplı, iki kanatlı tamamıyla pitch kontrolü uygulanan rotora sahip 200 (kW) gücünde bir model geliştirilmiştir. Sıfır derecelik uç açısı için sabit hızda ve sabit pitch açısında 260 (kW) değerinde bir güç elde edilebileceği tahmin edilmektedir.



Grafik 11.5 :Sabit rotor hızında pitch açısına bağlı güç değişimi

Grafik 11.5 'te değişik rüzgar hızlarında ve değişik pitch açılarında rotordan elde edilebilecek güç eğrileri verilmiştir. 200 (kW) 'lık sabit bir güç çıktısı için, sabit hızlı rüzgar eğrileri ile sabit güç çizgilerinin kesişmesi ihtiyaç duyulan pitch açısı verir. Aynı şekilde pitch açısı, pitch momenti ve rüzgar hızına bağlı bir grafik elde edilebilir. Bu prosedürün sonucunda ya pozitif yada negatif yönde eğim olmalıdır.

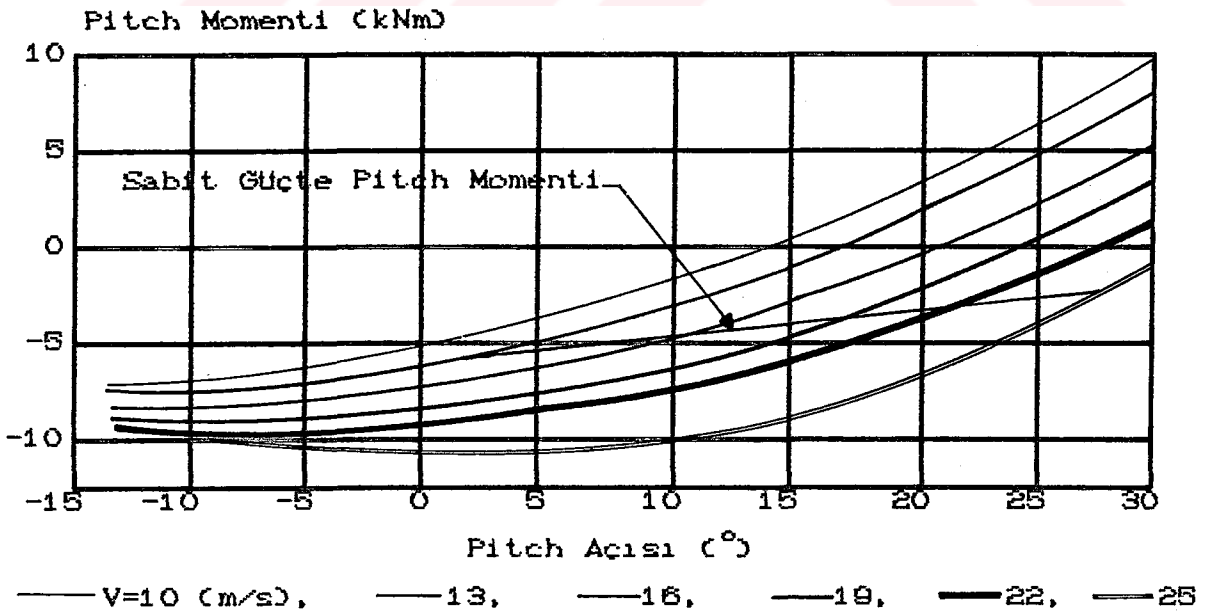
## 2) Pozitif Eğim

Pitch ekseninde meydana gelen toplam momentin

hesaplanmasında en önemli parametre, kanadın kütleli ve aerodinamik merkezi ile vade pitch ekseninin pozisyonuyla ilgilidir. Pitch ekseninin pozisyonundaki farklılıklar ve pitch kontrollü kanatlar üzerindeki baskın kuvvetlerde meydana gelen farklılıklarla ilgili dört ana problem açıklanmalıdır.

#### a) Yüze Dışındaki Baskın Kuvvetler

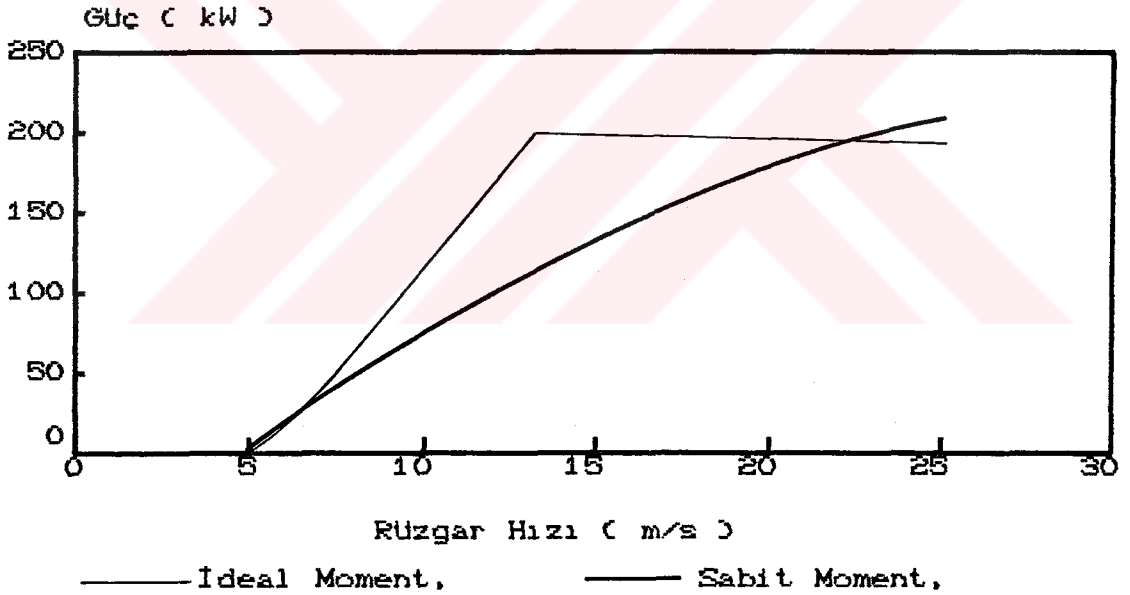
Kord (kiriş) hattı üzerinde pitch eksenini, aerodinamik merkeze doğru yer değiştirir. Yüzeysel ve aerodinamik pitch momentinin etkileri birbirine benzer ama karşılaştırıldıklarında küçükler. Merkezkaç kuvvetinin pitch ekseninde belirgin bir moment oluşturmaması için kon açısının sıfır olduğu farz edilmiştir. Grafik 11.6 'da pitch açısına, rüzgar hızına ve pitch momentine bağlı bir grafik verilmiştir. Güç kontrol seviyesi için ihtiyaç duyulan moment grafik 11.6 ve grafik 11.5 'ten faydalanılarak, pitch 'teki değişikliklere bağlı kalınmak şartıyla belirlenebilir. Pitch hareketine bağlı olarak depolanmış momentteki değişim oranı, bu çizginin eğimidir ve pitch mekanizmasında ihtiyaç duyulan katılık karakteristiğine eşdeğerdir. Pitch momentine uygulanan, zıt yönde hissedilen depolanmış kuvvetin etkilerinin meydana getirdiği izlerin tersi alınmalıdır. Nispi gücün altında katılık pozitifdir, nispi gücün üzerinde ise negatiftir. Aerodinamik ve depolanmış moment toplamındaki katılık ile kanattaki toplam katılık (sertlik) sürekli pozitif kalır.



Grafik 11.6 : Pitch açısına bağlı pitch momenti

Pitch 'e bağılı olarak negatif moment, basit mekanizmaların kullanılmasını mümkün kılar. Bu nedenle ihtiyaç duyulan kuvvet profilini geliştirmek; doğruluğunu saptamak zor olacaktır. Sonuçta nispi gücün üzerindeki sabit olmayan güç seviyelerinde idealden sapma meydana gelecektir. Pitch eksenini ile seçilen ana çizgiden dikey olan mesafe hassasiyeti değiştirecektir ama 3 (kW) civarında kuvvet ile karşılaştırıldığında pitch momenti sabittir. Ön yükleme, uzun periyotlar sonucunda yay mekanizmasında meydana gelebilecek yorulmalar, sürtünme, pislik, toz ve toprak yüzünden meydana gelen aerodinamik yüklenmeler, tahtakuruları ve yağmur gibi sorunlar moment hassasiyetinde hatalara neden olur bunun sonucunda da güç seviyesinde kayıp olur.

Sabit bir moment hesabı kolaylıkla yapılabilir, pasif kontrol mekanizması üreticileri ideal momente benzeterek kullanabilmektedirler. Güç eğrisinde yüksek hassasiyet yüzünden hata oluşma ihtimali düşüktür. Grafik 11.7 'de ifade edilmiştir.



Grafik 11.7 : İdeal ve sabit momentin rüzgar hızına göre değişimi

Değişken hızla çalışma şartları için gerekli olan pasif kontrol sistemi, sabit hızla çalışma şartları için gerçekleştirilen pasif kontrol sistemine benzemektedir. Bu nedenle rüzgar hızı, sınırlanan değer üzerine çıkarsa rotor hızında artmaya sebep olur, bunun sonucunda da ihtiyaç duyulan momentin azalmasına neden olur. Aşırı pitch değişikliği ve büyük negatif moment, rijitlik için

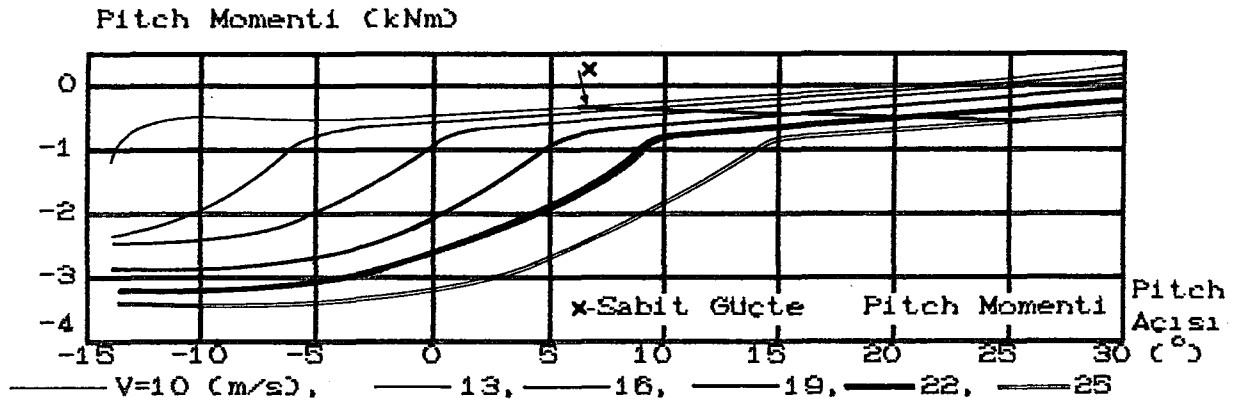
önemli değildir.

Benzer bir şekilde, aralık kontrolünden daha önemli olan rotor uç kontrolü için pitch açısına ihtiyaç duyulmasıdır. Bu nedenle kanadın sabit kısmını durdurabilmek için yüksek hızlı rüzgarlarda pitch açısının değeri azaltılmalıdır. Bunun sonucunda moment karakteristiğinde karmaşıklık meydana gelir ve bu kontrol metodunun kullanılması problemlerin sayısını artırır.

#### b) Aerodinamik Pitch Momenti Vasıtasıyla Pitch Kontrolüne Hakim Olma

Kanada etki eden aerodinamik yüklerin, kanat merkezine etki edebilmesi için pitch ekseninde yer değişikliği meydana gelebilir böylece yatay kuvvetler elimine edilebilir. Genellikle düşük değerli aerodinamik pitch momentini kullanılır. Grafik 11.8 'de pitch moment karakteristiği verilmiştir, ihtiyaç duyulan moment değerine göre pitch'te meydana gelebilecek değişiklikler doğru bir şekilde elde edilebilir. 500 (Nm) civarında moment değeri sabit kalmaktadır. Bu nedenle düzgün pitch moment karakteristiği ve güç seviyesindeki yüksek hassasiyet nedeniyle hata oluşmaz, düşük değerli kuvvetlerin ihmal edilmesinin hiçbir sakıncası yoktur. 290 (kW/kNm) civarında bozulma meydana gelmektedir.

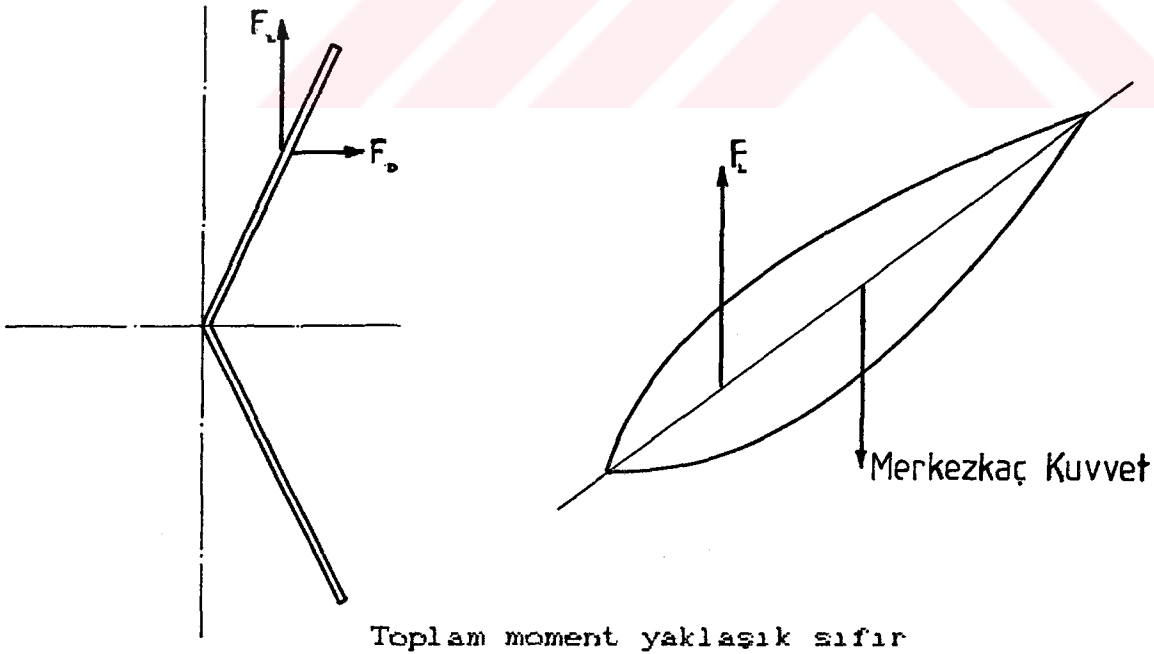
Kanadın aerodinamik merkeziyle bağlantılı olarak pitch ekseninin pozisyonunda meydana gelebilecek değişiklikleri sistem derhal hissedebilmektedir. Pitch momentine hakim olan yatay kuvvetlerin sonucunda aerodinamik merkezde 20 (mm) 'lik bir hata meydana gelebileceği tahmin edilmektedir. Hassasiyet açısından düşük değerli kuvvetlerde hesaba katılırsa sistemin çalışması imkansız olacaktır.



Grafik 11.8 : Pitch açısına bağlı olarak pitch momentindeki değişim

Yukarıdaki problemin tek bir çözümü vardır, şekil 11.8 'de gösterildiği gibi kanadın ve pitch ekseninin serbestçe kon açısı almasına müsaade edilmelidir. Bunun çeşitli sonuçları olacaktır. İlki, faydalı pitch momentiyle, pitch yataklarına etki eden yükler azaltılabilir. İkincisi, pitch eksenine etki eden merkezkaç kuvvetlerin bileşenleri vasıtasıyla yatay kuvvetlerin dışındaki kuvvetler dengelenebilir. Kon açısı, yatay yüklerin dışındaki yüklerin fonksiyonudur. Rüzgar hızı ve pitch açısıyla, yatay yüklerin dışındaki yüklerde merkezkaç moment sürekli aynı formda kalır. Pitch momentindeki relatif büyüklükler yatay düzlemdeki aerodinamik kuvvetlerin dışındaki kuvvetlere, aerodinamik merkezin relatif pozisyonuna bağımlı olan merkezkaç kuvvete ve kanadın ağırlık merkezine bağımlı olmaktadır. Üreticiler iyi bir balans sağlayabilmek için kanadın ağırlık merkezinde ölçme ve ayarlama yapabilmektedirler. Aerodinamik merkezin pozisyonunda ufak bir yanlış eşleme yapmak pitch ekseninde ufak bir moment oluşmasına sebep olur.

Güçteki ufak tefek değişikliklerin pitch momentinde hataya sebep olmaması için değişken hızlı çalışma şartlarında pitch momentinde büyük değişiklikler oluşur. Bu nedenle herhangi bir hata güç seviyesinden çok rotor hızında hata oluşmasına neden olur.

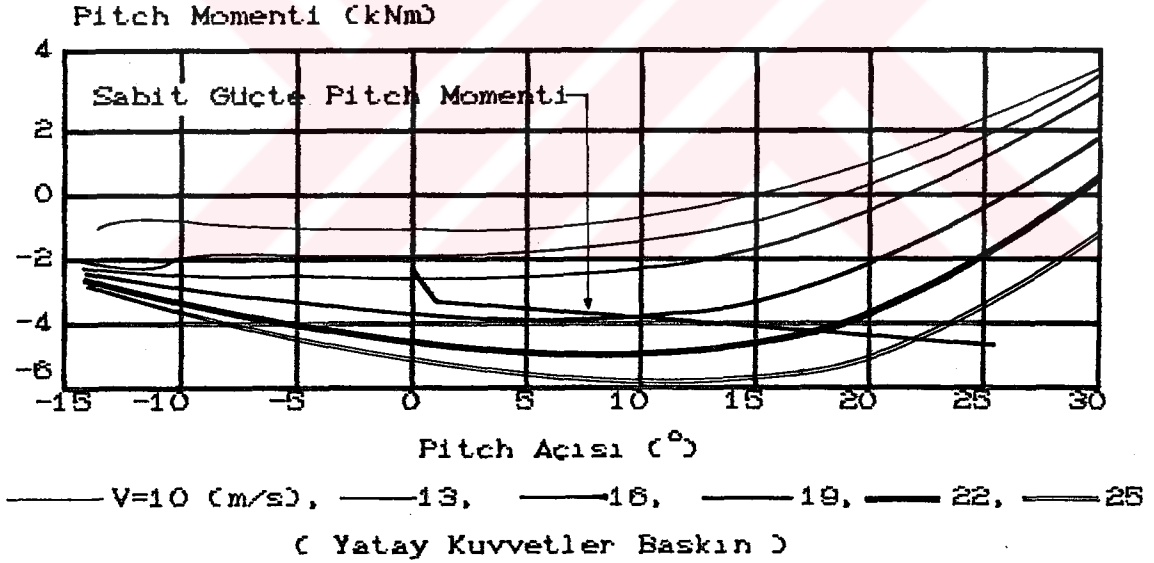


Şekil 11.8 : Serbest kon konfigürasyonu

### c) Yatay Kuvvetlere Göre Pitch Kontrolü

Yatay kuvvetler, güç eldesinde en etkili kuvvetlerdir ve bu kuvvetler rotor momentinin üretilmesinde de kullanılır. Pitch ekseninde moment meydana getirebilmek için pitch eksenini rotasyon düzlemine doğru yer değiştirmelidir. Eğer pitch eksenini, aerodinamik merkeze doğru hareket ettirilirse arzu edilen karakteristiklerin elde edilebilmesi için pitch açısıyla, moment kolunda artış olması gerekir. Yukarıda tanımlanan yatay kuvvetlerin dışındaki baskın kuvvetleri elimine edebilmek için rotor, serbestçe kon açısı alabilmelidir.

Yukarıdaki sistem için pitch moment karakteristikleri grafik 11.9 'da gösterilmiştir, kütle ve aerodinamiksel kuvvetlerin mükemmel bir şekilde dengelendiği kabul edilmiştir. Momentin pozitif alınmasıyla hesaplamalar basitleştirilebilir. 2.4 (kW) civarında pitch momentinin hassasiyetinde azalma olur. Aerodinamik pitch momenti için kuvvet değerleri oldukça yüksektir, yataklarda meydana gelecek sürtünmeler yüzünden sistemde hassasiyet kaybı pek olmaz.



Grafik 11.9 : Pitch açısına bağlı olarak pitch momentindeki değişim

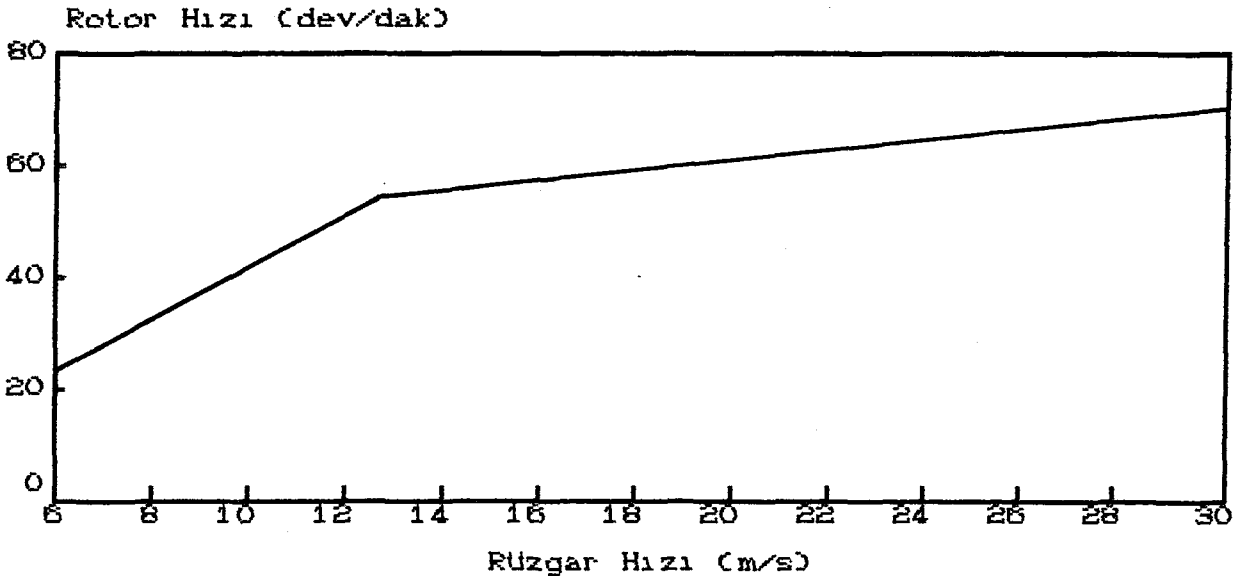
Pitch ekseninin aerodinamik merkeze doğru yaklaşması bazı problemler yaratır ve bunların hesaplanmasında oldukça zordur, parçalı kanat dizaynı buna bir çözümdür. En önemli zorluklardan biride kanatta meydana gelebilecek eğilmelere, mukavemet gösterecek esnek bir kanat dizaynının gerçekleştirilebilmesidir. Kanadın

ağırlık merkezi ile aerodinamik merkezi arasındaki denge, pitch ekseninde belirgin bir moment oluşturur. Böylece yatay kuvvetlerin dışındaki herhangi bir kuvvet, büyük bir pitch momentinin oluşmasına neden olacaktır. Bu problemin pratikte halledilmesi mümkün değildir.

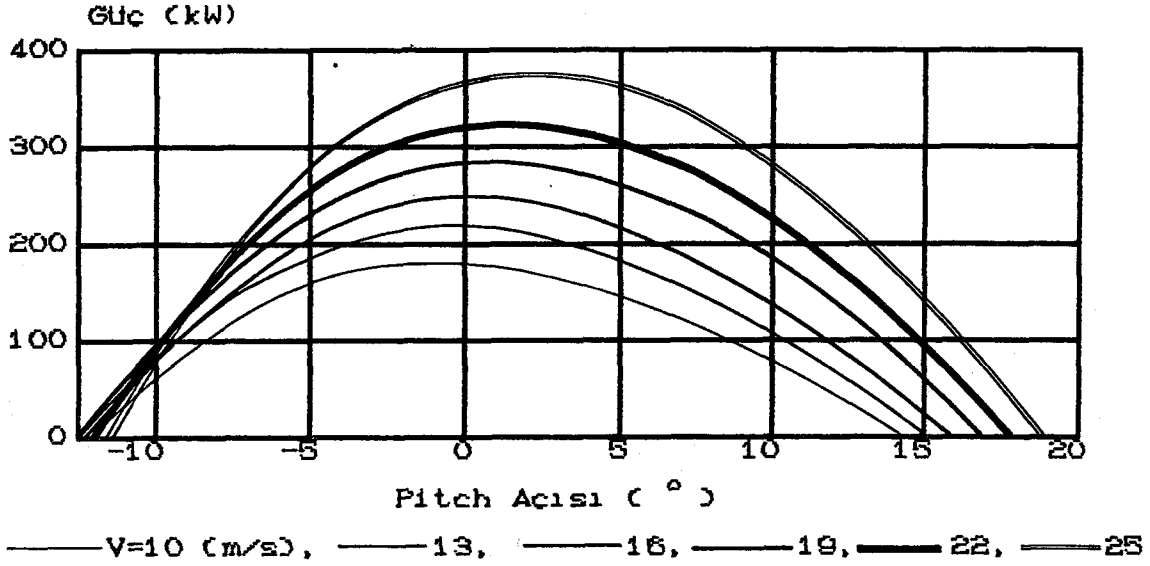
Kanatlardaki pitch açısına bağlı olarak pitch ekseninde rotor torku meydana gelir. Eğer rotor ile dişli kutusunun arasındaki düşük hızlı şaftta, rotasyonel harekete müsaade edilirse basit bir mekanizmayla kanatlardaki pitch kontrolü kumanda edilebilir. Sabit hızlı rüzgar türbinlerinde rotor gücünden faydalanılarak moment ölçülebilir, sürekli güç kontrolü ile güvenilir sonuçlar elde edileceği tahmin edilmektedir. Bu nedenle rotor ile transmisyon arasında rijit bir bağlantı sağlayabilmek oldukça kompleks olduğu kadar pahalıdır.

#### d) Merkezkaç Kuvvetler Vasıtasıyla Pitch Kontrolü

Değişken hızlı rüzgar türbinlerinde merkezkaç yükler oldukça fazladır. Grafik 11.10 'da gösterildiği gibi hızlanma gücüne artışa neden olacaktır. Grafik 11.11 'de pitch açısına bağlı olarak güç eğrisi, rüzgar hızıyla değişmektedir. Rüzgar hızıyla bağlantılı olarak merkezkaç kuvvetler artar ve küre başlı vida vasıtasıyla kanatların tümünde yada belirli bir kısmına pitch kontrolü uygulanabilir. Pitch açısına karşı, kuvvetle meydana gelen meyil sabit değildir. İstenilen güçte, sabit yay kuvvetiyle rotor hızında lineer olmayan bir artış meydana gelir.



Grafik 11.10 : Rotor hız değişimi ( Değişken hızlı rüzgar türbini)



( Değişken hızlı rüzgar türbini )

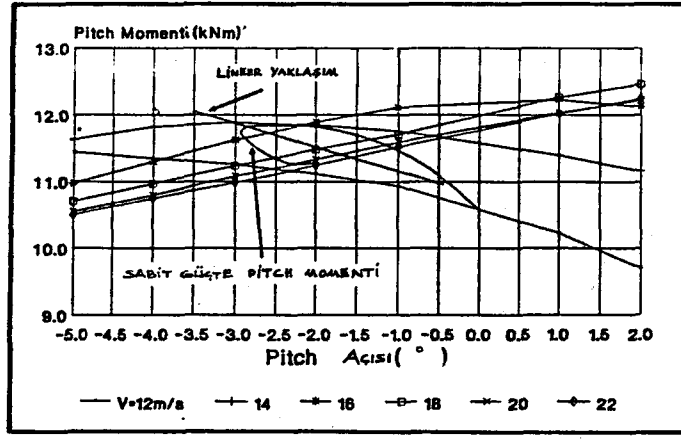
Grafik 11.11 :Pitch açısına bağlı olarak güçteki değişim

### 3) Negatif Moment

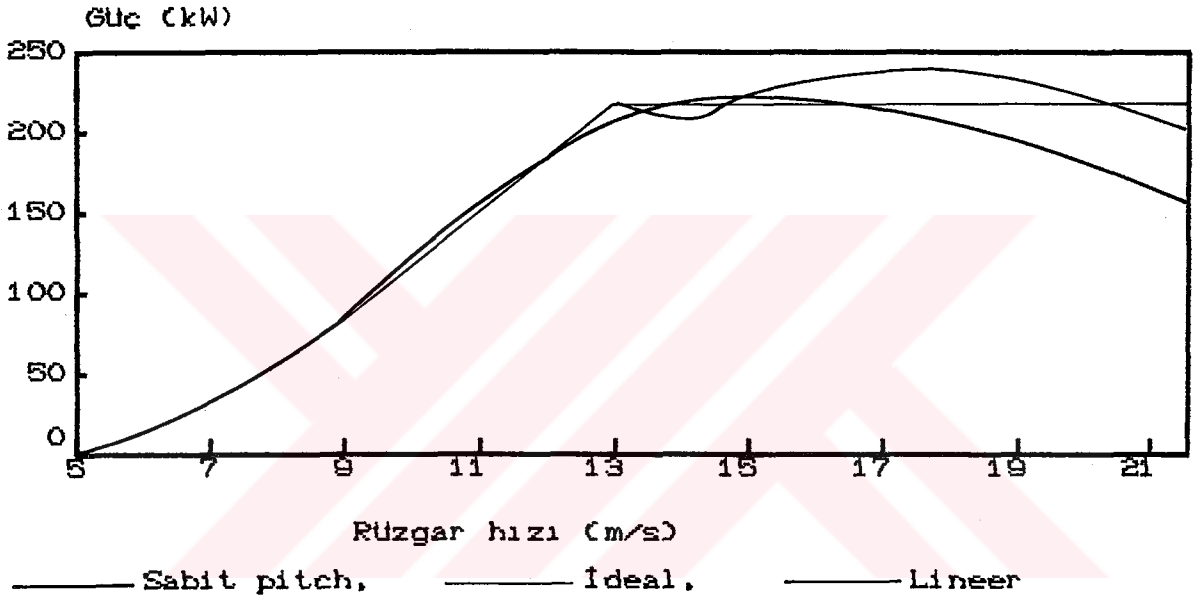
Pasif kontrolde kullanılan en yaygın metodlar,sabit pitch sağlanımı ile hız kaybı yada aşırı yüklenme esnasında sistemin stop etmemesi için yapılan regülasyondur.pitch momentinin elde edilebilmesi için pitch eksenini,aerodinamik merkezin gerisine doğru yer değiştirir.

Grafik 11.12 'de bu konfigürasyon için pitch açısının fonksiyonu olan pitch momentini grafik edilmiştir.Bu grafikte sabit 200 (kW) 'lık güçte meydana gelen kuvvetler gösterilmiştir.Pitch açısı genellikle negatiftir ve aerodinamik merkez,kuyruk sırtına doğru hareket eder.Kuvvetleri hesaplamak genellikle zordur bu nedenle karakteristikler kabul edilebilir değerlere yaklaştırılır. Grafik 11.13 'te güç,ideal moment ve sabit pitch karşılaştırılmıştır.

Pasif kontrolde başarılı bir dizayn,sabit pitch,hız kaybı yada aşırı yüklenmeden meydana gelecek bozulmaları regüle edebilecek rotorla sağlanabilir.Bunların dinamik etkileri iyi bir dizayn yaparken çok önemli rol oynar.



Grafik 11.12 :Pitch açısına bağlı pitch momenti



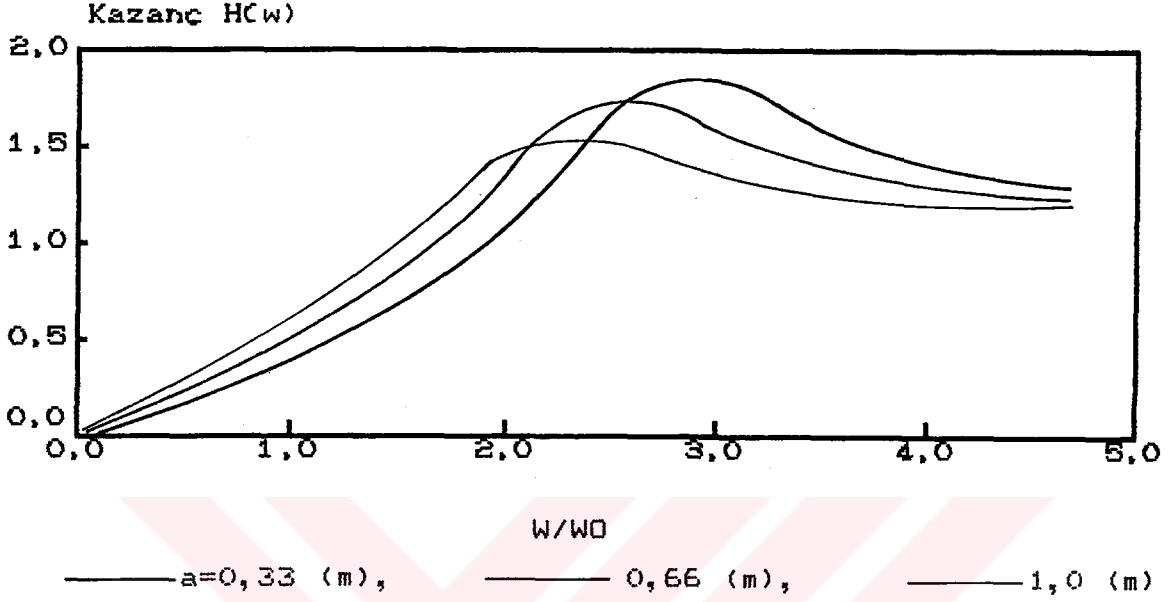
Grafik 11.13 :Rüzgar hızına bağlı olarak güç değişimi

#### 4) Dinamik Karakteristikler

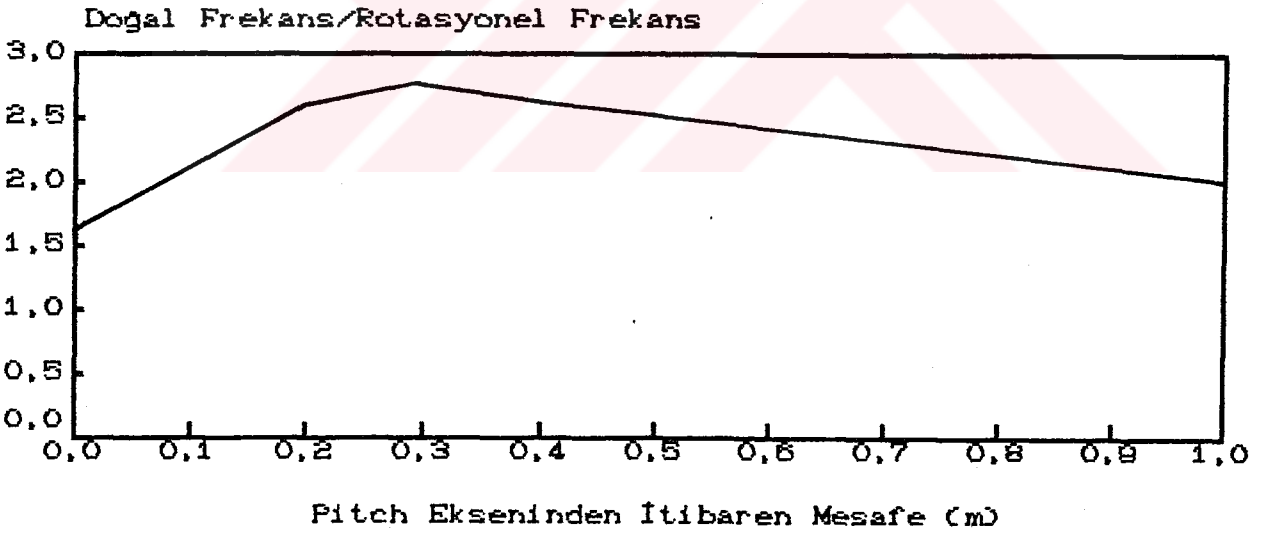
Kanatlardaki pasif pitch kontrolünün değişken rüzgar yüklerinde meydana getireceği sonuçlar sistem kazancına ve kontrollü veya kontrolsüz rotorda oluşacak güç oranına göre tanımlanır. Pitch açısı ve rüzgar hızına göre güç ve pitch momentinin türetilmesinden bunlar çıkartılabilir.

Grafik 11.14 'te, 3,1 civarında değişik uzunluktaki pitch moment kolları ve 0,9 civarındaki dampink (zayıflatma) katsayısı için pasif kontrol sisteminde meydana gelecek kazanç gösterilmiştir. Pitch mekanizmasının rezonans frekansı civarındaki sıçramalardan (ani tepe değerlerinden) sakınmak için sistemin

ağırlığının artması gerekir. Sistemin doğal frekansı, moment kolunun atarlanması ile değiştirilebilir. Bu nedenle grafik 11.15 'te gösterildiği gibi sistem rijitliğinin ve pitch ataletinin her ikisinde pitch ekseninin pozisyonuna bağımlı olmaktadır, doğal frekans  $2,7P$  değerinin üzerine çıkmaz.



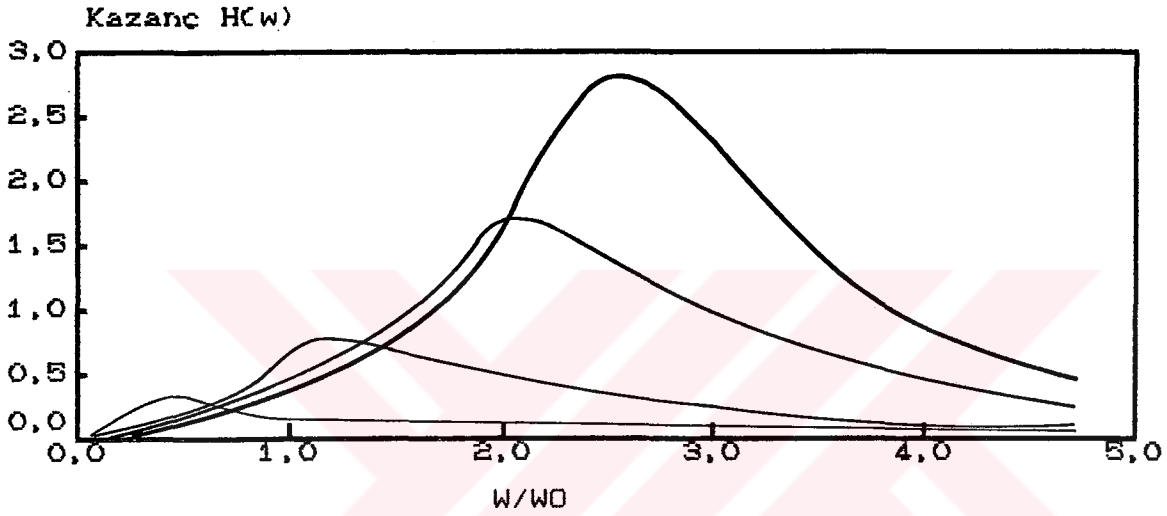
Grafik 11.14 : Pasif pitch kontrolünde toplam kazanç



Grafik 11.15 : Doğal frekans

Jeneratörde meydana gelecek tork dalgalanması için transmisyondan alınan kazanç, pasif kontrol sisteminde gösterilen kazanç ile birleştirilmelidir. Bu büyük bir ihtimalle transmisyonun dinamiğine bağımlıdır. Grafik 11.16 'da transmisyon frekans

bölgesinde sistemin toplam kazancı gösterilmiştir. Alçak frekanslarda pasif kontrol sisteminde, kazanç düşük olur. Bu nedenle transmisyonadaki çok alçak doğal frekanslarda, 1P ve 2P bölgesinde kazançlar oldukça büyüktür. Bu herşeyden önce pitch'teki düşük değerli doğal frekansın nedeni olmaktadır ve bu pasif kontrol sistemi kullanımının kaçınılmaz sonucudur. Değişken hızlı çalışma şartlarında, transmisyonun doğal frekansı sifıra yaklaşmaktadır. transmisyon vasıtasıyla yüksek frekans karışımları zayıflayabilmektedir ve böylece pasif kontrol sistemi bir hız kontrol mekanizması gibi çalışır.



— Dişli Kutusu Frekansı=0,5(Hz), — 1(Hz), — 1,5(Hz), — 2(Hz)

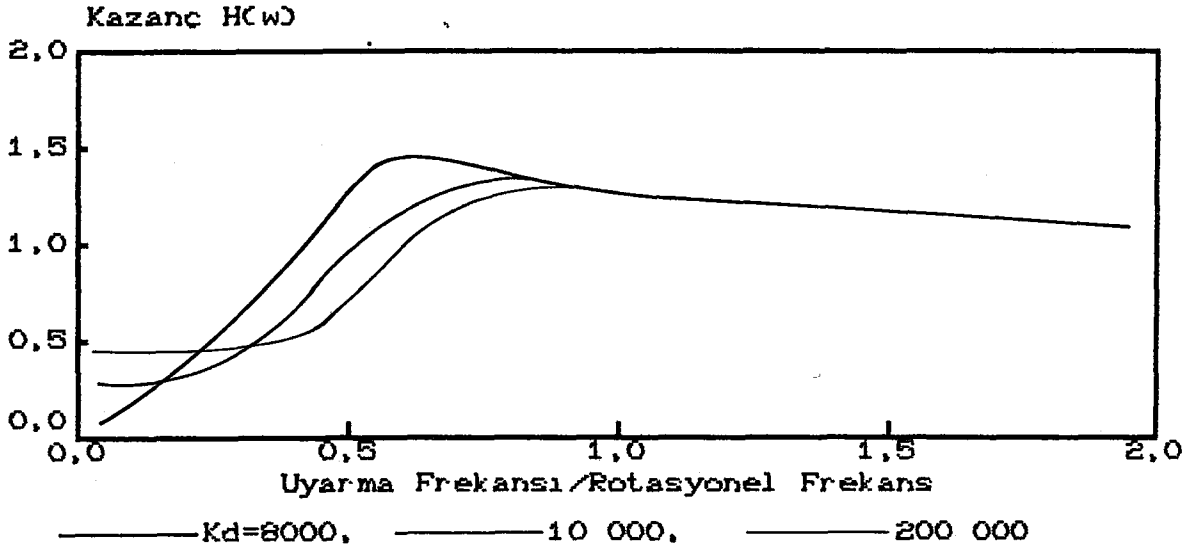
Grafik 11.18 : Pasif kontrol sisteminde toplam kazanç

3,2 civarında tanımlanan konfigürasyon için pitch rijitliği dikkate değer düşüklüktedir ve doğal frekans 0,75P civarındadır. Bu nedenle değişken hızlı çalışma şartlarıyla birleştirildiğinde kazanç karakteristikleri dikkate değer olmaktadır.

3,3 civarında rotorda, pasif tork kontrolü tanımlanmıştır ve çok düşük doğal frekanslara sahiptir. Büyük pitch hareketleri için torkta ufak bir artışa ihtiyaç duyulur.

Grafik 11.17 'de transmisyon ile rotor arasında ve birçok torsın ( bükülme) rijitliği için sistem kazancı verilmiştir. Yüksek torsınlı rijitlik, düzgün hal güç kontrolünde bozulmalara neden olur. Torsınlı rijitlik için kabul edilebilir değerler transmisyonadaki doğal frekansların 0,1 (Hz) civarında yada altında olmasıyla

sağlanır. Bu değer gerçekte oldukça yapılabilirliğe sahiptir. /10/



Grafik 11.17 : Tork kontrollü rotor ( 25 (m) çaplı, 50 (dev/dak) )

## 11.6. PITCH KONTROL SİSTEMİNİN KLASİK YÖNTEMİ

### 1) Tanıtım

Enterkonnekte şebekeye bağlı sabit hızlı, yatay eksenli rüzgar türbininde değişken hızlı rüzgarlar, rotor diskinde geçen türbinde, yükte meydana gelen dalgalanmalara maruz kalır. Yükler, özellikle transmisyonadaki yüklerle dişli kutusunun ve jeneratörün zarar görmemesi için regüle edilmesi gerekir. Rüzgar hız sınırının üzerinde, ticari türbinlerde transmisyon yüklerini regüle etmek için iki metod kullanılır. Rüzgar hızındaki dalgalanmaların kanatta meydana getirdiği hassasiyetsizlikleri azaltabilmek için hızda meydana gelen düşmeler ve ani yük değişikliklerinden meydana gelen bozulmalar regüle edilmelidir, değişken hızlı rüzgarların etkilerinin azaltılabilmesi için rotor kanatlarındaki pitch açıları azaltılarak yada artırılarak pitch regülasyonu sağlanabilir.

Rüzgar hızının pitch regülasyonunu sürekli değiştirmesi, sürekli olarak aktif feedback (geri bildirim) regülasyonunda yerine getirir. Transmisyon yüklerinin sürekli ölçülmesiyle pitch açısı ayarlanabilir. Rüzgar hızındaki karışımların sahip olduğu iki bileşene dikkat edilmelidir. Yavaş değişen bileşen saatlik ortalama hız olarak ifade edilmektedir ve hızlı değişen bileşen ise ortalama hız civarındaki türbülans değişimleri olarak ifade edilmektedir. Rüzgar türbininde kontrol algoritması, her ikisini regüle etmeye

yeterli olmaktadır.

Algoritma için birtakım kullanılması mümkün olan seçenek vardır ama burada bunların iki tanesinden bahsedilecektir. Endüstriyel standart olan basit bir PI kontrolörü ile yeterli bir performans sağlanabilir, ticari rüzgar türbinlerinin aktif pitch kontrolünde de kullanılmaktadır. Nispi performans klasik kontrolörler vasıtasıyla sağlanabilir, bağlantılar arasındaki basitlik, rüzgar türbini sisteminin fiziksel performansının daha iyi olmasını sağlar. Klasik kontrolörler, uygulamalarda aşırı karışıklık yaratmadan iyi bir performans sağlayabilecek şekilde dizayn edilir.

Literatürden ve üreticilerden elde edilen bilgilerin birleştirilmesiyle meydana getirilmiş hayali bir rüzgar türbini için kontrolörler dizayn edilmiştir. Dizayn zorluklarını minimuma indirebilmek ve dinamiksel açıdan çok aktif olmalarını sağlayabilmek için yavaş yavaş dizayn edilmiştir. Bu nedenle tek başına hiçbir parça dinamiksel açıdan rialistik değildir ama ticari türbinlerde bulunabilme ihtimalide vardır. Kontrol ve simülasyon modelleri rüzgar türbinini temsil etmek için kullanılır, fiziksel açıdan güvenilirlikleride vardır.

Rüzgar türbininin tamamıyla pitch kontrollü üç adet kanadı vardır. Transmisyon, dişli kutusu ve jeneratörden oluşan basit bir konfigürasyondur. Basit bir transmisyonun konvensiyonel kontrol sistemi dizaynında kriter, rotor yükleri şiddetlenmeksizin dişli kutusundaki geçici moment yüklerinin minimize edilmesidir.

## 2) PI Kontrol

PI/PID 'de en çok kullanılan temel kontrol algoritmalarıdır. Proses endüstrisinde çok fazla kullanılır ve endüstriyel kontrol sistemlerinin % 50 'sinde bu kontrolörler kullanılır. Birçok uygulamada yüksek performans ihtiyacına cevap verdikleri ve dizaynları kolaylaştırdıkları için oldukça popülerdirler. Bu nedenle iyi bir performansa ihtiyaç duyulduğunda, az sayıdaki sistemler için daha uygundur. Sadece rüzgar türbinlerinin kontrolü içinde kullanılmamaktadır.

PI kontrol sistemi iki terimden ibarettir. Nispi terim P, düzeltme işlevi, sistemin gerçek cevabı (dişli kutusundaki moment ölçülerek elde edilir) ile arzu edilen cevap (dişli kutusunda olması gereken moment) arasındaki farklılıkları kontrol eder ve

nispi terimin integraline cevaben düzeltme işlevi vasıtasıyla integral terim elde edilir. Daha öncekiler geçici yüklerin meydana getireceği kısa dönemli türbülansları regüle etmeye uygundu. Yeni versiyonlar ise ortalama rüzgar hızında meydana gelebilecek değişmelerin sebep olduğu yükleri regüle edebilmekte ve dişli kutusundaki ortalama momentin olması gereken değerden sapmasını önlemektedir. PID kontrolde, D terimi türetilmiş terimdir, rüzgar hızındaki tahmini dalgalanmalar yüzünden rüzgar türbininin kontrolünde pek sık kullanılmaz.

Bir PI kontrolör, rüzgar türbini için mümkün olan en iyi şekilde performans gösterecek biçimde dizayn edilmektedir. Nominal değerler civarındaki P ve I 'daki değişiklikleri kontrol edebilecek şekilde dizayn edilmektedirler.

Kontrolörün teorik performansı, kontrol dizayn analizinde hesaplanarak tablo 11.4 ve 11.5 'te özetlenmiştir. Transmisyonadaki yüklerin belirlenmesinde rotordaki aerodinamik momentten faydalanılır, yükte meydana gelen artış yada azalışlardan veya hızda meydana gelebilecek kayıpların neden olacağı bozulmaların regülasyonu gibi diğer regülasyon metodlarının karşılaştırılması için çok uygundur. Pitch açısı yüzünden yükte, rotasyonel harekette ve rüzgar türbülansında meydana gelen bozulmalar gürültü ölçümlerinde hataya neden olur. Pitch açısındaki ivmelenme benzer bozulmalar için ikinci performans göstergesi olarak kullanılır. Kontrol işlevinin aşırı güçlü olmasını önlemek için kesin limitler vardır. 12 (m/s), 18 (m/s) ve 22 (m/s) 'lik ortalama rüzgar hızları için performans değerleri belirlenmiştir. Rüzgar hızındaki artış torkta geçici artışa sebep olur ama kontrol işlevi zayıflar. Düşük rüzgar hızlarında kontrol işlevinin çok büyük bir kısmı kargaşa spektrumunda (gürültü ölçümü ve rotasyonel hareketteki tepe değerler gibi) yüksek frekanslı bileşenlerin oluşmasına sebep olur.

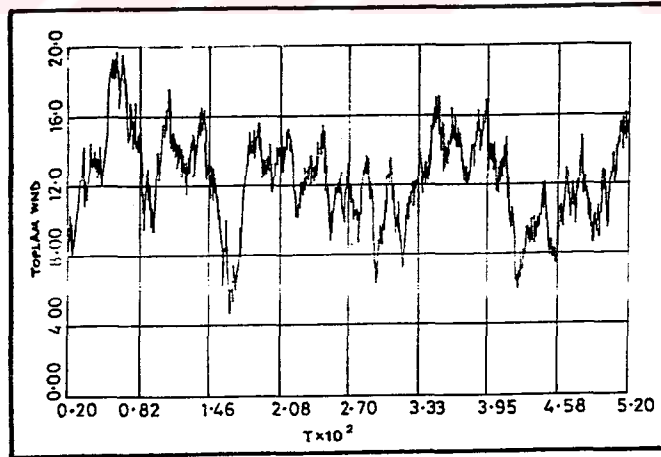
Rüzgar Hızı (m/s)	Aerodinamik tork'un standart sapması (kNm)			
	Rüzgar	$3 \cdot \omega_r$	Ölçülen gürültü	Rüzgar + $3 \cdot \omega_r$ + Ölç. gürültü
12,0	12,88	4,28	0,01	13,57
15,7	21,17	4,28	0,01	21,59
22,9	48,81	4,28	0,01	48,80

Tablo 11.4 :PI kontrolör için aerodinamik torktan standart sapma

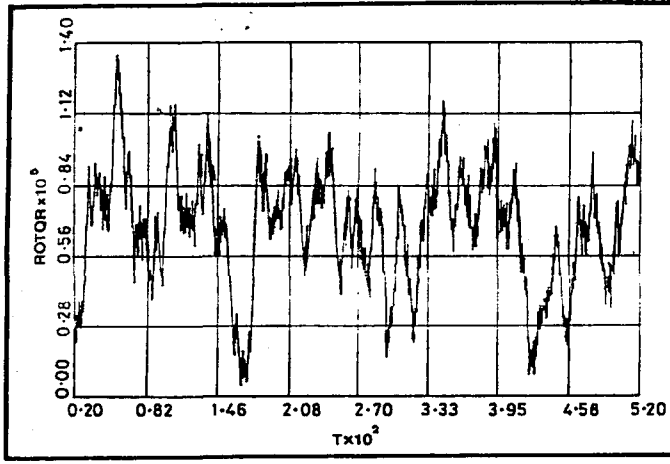
Rüzgar Hızı (m/s)	Pitch ivmelenmesindeki standart sapma ( $^{\circ}/s^2$ )			
	Rüzgar	$3 \cdot \omega_r$	Ölçülen gürültü	Rüzgar + $3 \cdot \omega_r$ + Ölç. gürültü
12,0	1,798	1,841	20,78	20,922
15,7	0,0878	0,3008	3,805	3,878
22,9	1,024	0,1528	1,931	2,191

Tablo 11.5 :PI kontrolör için pitch ivmelenmesindeki standart sapma

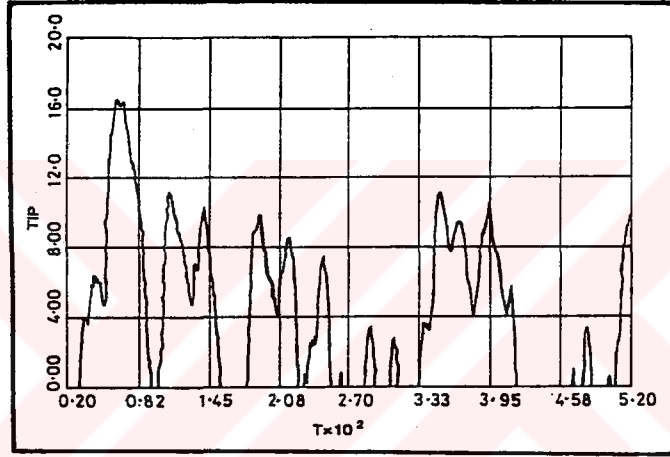
12 (m/s)'lik rüzgar hızının altında yada üstündeki çalışma şartları için türbinde meydana gelecek değişikliklerin ihmal edilmesi şartıyla rüzgar türbininin basitleştirilmiş lineer modeli kullanılarak PI kontrolörünün teorik performansı hesaplanabilir ve dolayısıyla da dizayn edilebilir. Kontrolörün rialistik değerlendirilmesinde rüzgar türbininin lineer olmayan tahmini simülasyonu göz önünde bulundurulmalıdır. Grafik 11.18,11.19 ve 11.20 'de 12 (m/s)'lik ortalama rüzgar hızı için sonuçlar verilmiştir ve grafik 11.21,11.22 ve 11.23 'da 20 (m/s)'lik ortalama rüzgar hızı için sonuçlar verilmiştir. Rüzgar hızı, aerodinamik tork ve kanat pitch açısı her iki durumda da verilmelidir. 12 (m/s)'lik rüzgar hızında 78000 (Nm) civarında tork elde edilebileceği tahmin edilmektedir.



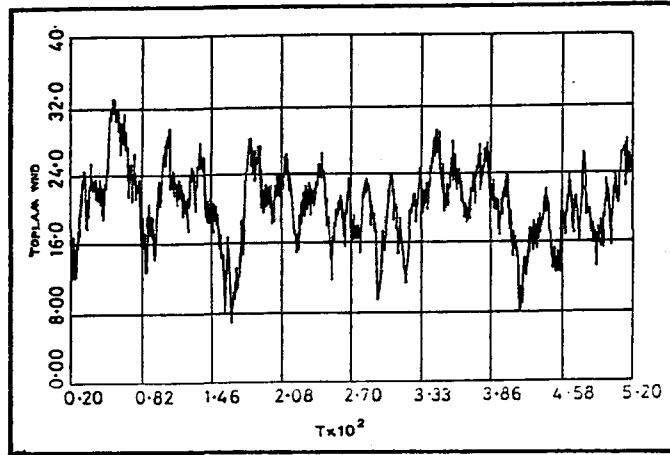
Grafik 11.18 : Ortalama rüzgar hızı 12 (m/s)



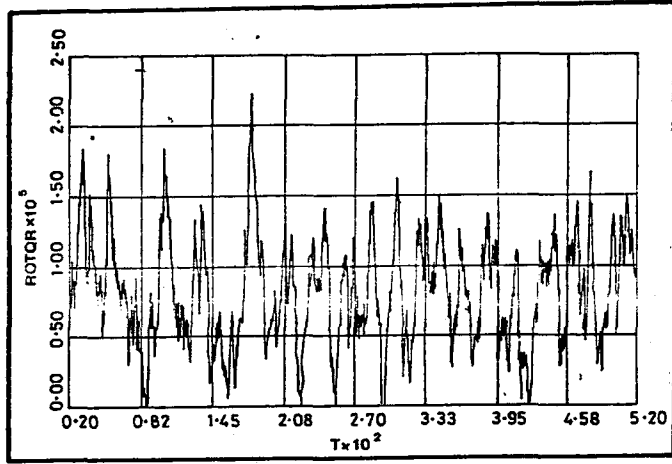
Grafik 11.19 :PI kontrolör için aerodinamik tork ( 12 (m/s) )



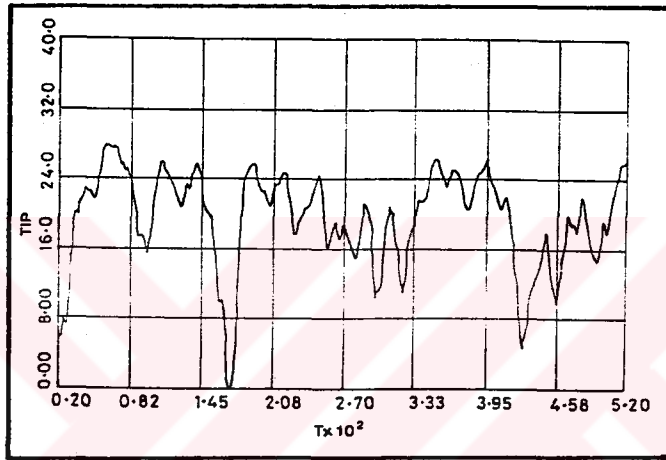
Grafik 11.20 :PI kontrolör için kanat pitch açısı ( 12 (m/s) )



Grafik 11.21 :Ortalama rüzgar hızı 20 (m/s)



Grafik 11.22 :PI kontrolör için aerodinamik tork ( 20 (m/s) )



Grafik 11.23 :PI kontrolör için kanat pitch açısı ( 20 (m/s) )

### 3) Klasik Kontrol

Klasik kontrolde sistem cevaplarının frekans sahası içinde tüm frekanslar ayarlanarak rüzgar türbininin performansı iyileştirilebilir. Rüzgar hızındaki türbülans, kontrol sisteminin objektifliği ve rüzgar türbininin dinamikmi için göz önünde bulundurulması gereken hususlar aşağıda sıralanmıştır.

a) Düzgün bir şekilde artan veya azalan rüzgar hızlarına veya ortalama rüzgar hızındaki değişikliklere göre dişli kutusunda oluşan ve olması gereken moment değerleri arasındaki farklılığı minimuma indirebilmek için rüzgar türbinlerinin çalışması esnasında oluşan hatalar iyileştirilmelidir.

b) Rüzgar türbininin transmisyonunda yeterli azaltmaların yapılabilmesi ve kontrolörün cevaplama hızının uygun olabilmesi

için sistem, geçici dinamik cevaplamaları yapmaya uygun olmalıdır.

c) Zayıflatılmış yüklerin rüzgar türbülansına dahil edilebilmesi için sistemin karışıklıkları red etme fonksiyonu geliştirilmelidir.

d) Rüzgar türbininde kullanılan kesin olmayan modellerin (jeneratör dinamiği ve aerodinamik gibi) dinamiksel bileşenlerin etkilerinin, kontrol sisteminin geçici yükleri regüle etme kabiliyetini yok etmemesi için sistem güçlü olmalıdır.

e) Rüzgar türbini gürültü ölçümü ve rotor moment spektrumu içindeki rotasyonel örneklemelerin harekete geçirici işlev ile mukayese edilmemesi için sistem, yüksek frekanslı karışımlardan ve parazitlerden korunmalıdır.

Sadece iki terime sahip PI kontrolörler gibi basit kontrolörlerde bu sıralanan amaçların hepsi aranmamalıdır ama bu amaçların herbiri rüzgar türbini kontrol sisteminin tesirli olabilmesi için önemlidir. a ve e şıklarının birbirleriyle bağımsız olmadıklarına dikkat etmek gerekir, kontrolörler vasıtasıyla iyi bir balans gerçekleştirilmesi gerekir.

Rüzgar türbini için klasik kontrolörler bu gayeleri karşılayabilecek şekilde dizayn edilmelidir. Kontrol dizayn analizlerinden faydalanılarak hesaplanan teorik performans, tablo 11.6 ve 11.7 'de özetlenmiştir. 12 (m/s), 15 (m/s) ve 22 (m/s) 'lik ortalama rüzgar hızları için PI kontrolörlerin performansı benzer bir indikatörde de gösterilebilir.

Rüzgar Hızı (m/s)	Aerodinamik tork'un standart sapması (kNm)			
	Rüzgar	$3 \cdot \omega_r$	Ölçülen gürültü	Rüzgar + $3 \cdot \omega_r$ + Ölç. gürültü
12,0	2,25	4,58	0,10	5,10
15,7	4,57	4,58	0,10	8,47
22,9	13,29	4,58	0,10	14,05

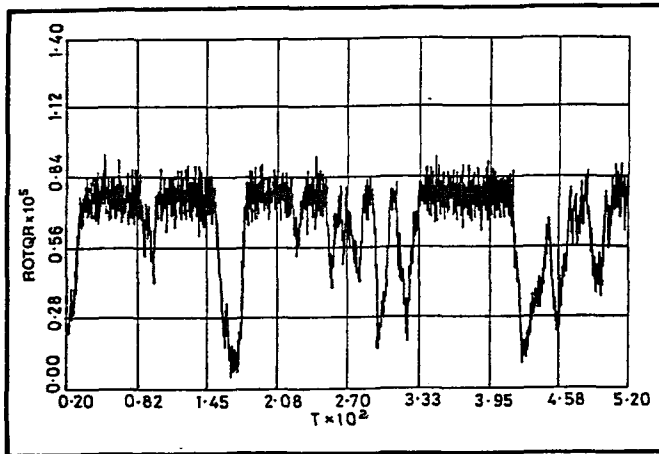
Tablo 11.6: Klasik kontrolör için aerodinamik torktan standart sapma

Rüzgar Hızı (m/s)	Pitch ivmelenmesindeki standart sapma ( $^{\circ}/s^2$ )			
	Rüzgar	$3 \cdot \omega_r$	Ölçülen gürültü	Rüzgar + $3 \cdot \omega_r$ + Ölç. gürültü
12,0	8,989	43,98	43,14	82,252
15,7	3,442	8,049	7,901	11,796
22,9	5,330	4,085	4,010	7,821

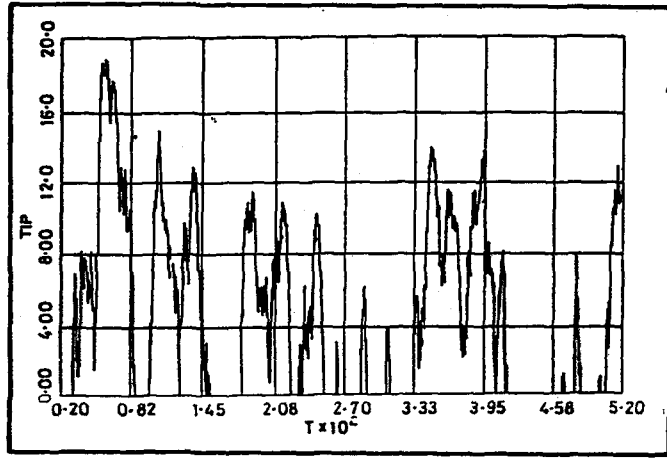
Tablo 11.7: klasik kontrolör için pitch ivmelenmesindeki stand. sapma

Rüzgar hızıyla orantılı olarak momente geçici artış meydana gelmektedir ama düşük hızlarda rotasyonel hareket yüzünden karışım spektrumunda meydana gelen tepe değerler, kontrolörler vasıtasıyla yeteri derecede frenlenebilir. Rüzgar hızındaki artışa rağmen kontrol işlevinde azalma görülür. Gürültü ölçümleri ve rotasyonel hareket nedeniyle oluşan tepe değerler gibi karışım spektrumundaki yüksek frekanslı bileşenler her türlü rüzgar hızlarında oldukça şiddetlidir genellikle düşük rüzgar hızlarında ancak frenlenebilmektedirler.

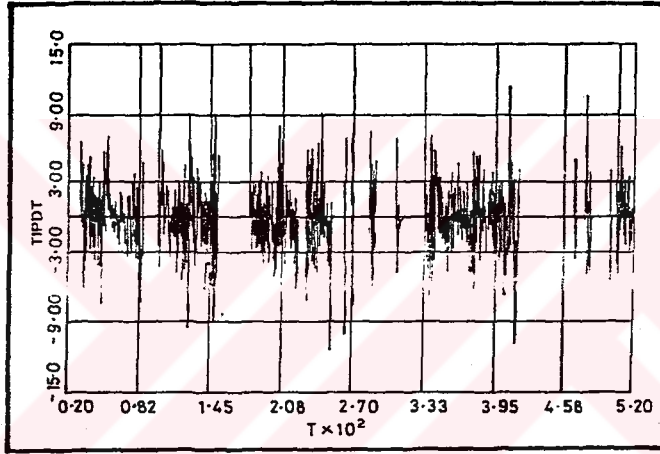
Kontrolörlerin alt ve üst çalışma sınırları arasındaki bölgede meydana gelebilecek değişiklikler ve hemde lineer olmayan aerodinamik davranışlar için klasik kontrolörlerdeki şeffaflık vasıtasıyla bu ihtiyaçların karşılanabilmesi bir avantajdır. Simülasyon ile performans kontrol edilmiştir. 12 (m/s)'lik ortalama rüzgar hızı için grafik 11.24, 11.25, 11.26 ve 11.27'de sonuçlar gösterilmiştir, 20 (m/s) 'lik ortalama rüzgar hızı için ise grafik 11.28, 11.29, 11.30 ve 11.31 'de sonuçlar gösterilmiştir. Direkt mukayese imkanı için PI 'da rüzgar hızları girdi olarak kullanılmıştır yani grafik 11.24-11.27 'deki rüzgar hızı grafik 11.18 'de ve grafik 11.28-11.31 'deki rüzgar hızı grafik 11.21'de gösterilmiştir. Her iki durumda da girdi olarak aerodinamik tork, kanat pitch açısı, kanat pitch hızı ve kanat pitch ivmelenmesi verilmiştir.



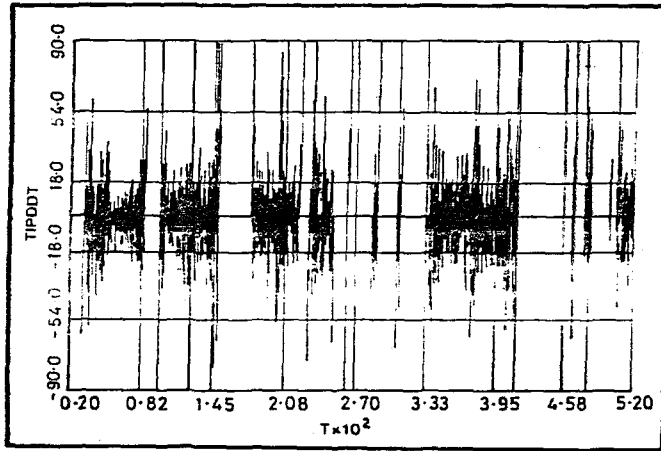
Grafik 11.24 :Klasik kontrolör için aerodinamik tork



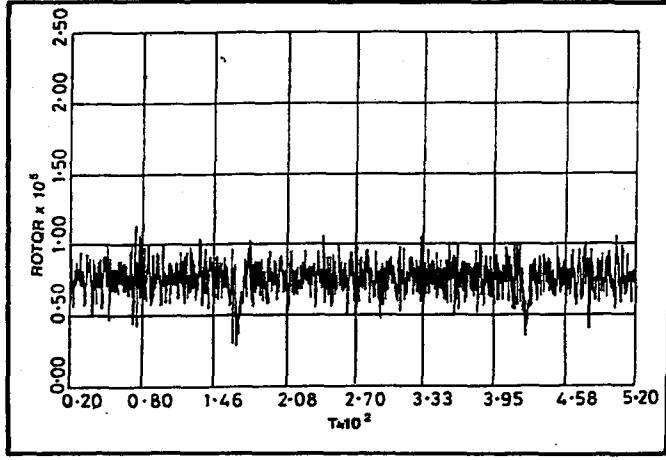
Grafik 11.25 :Klasik kontrolörler için kanat pitch açısı(12 (m/s))



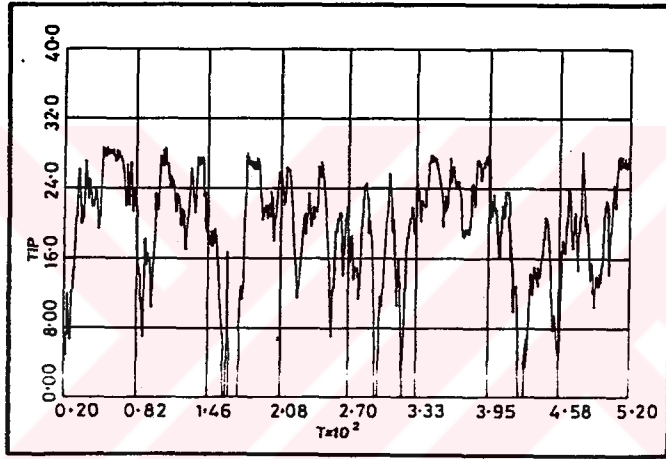
Grafik 11.26 :Klasik kont. için ilk hareket düze.pitch hız ihtiyacı



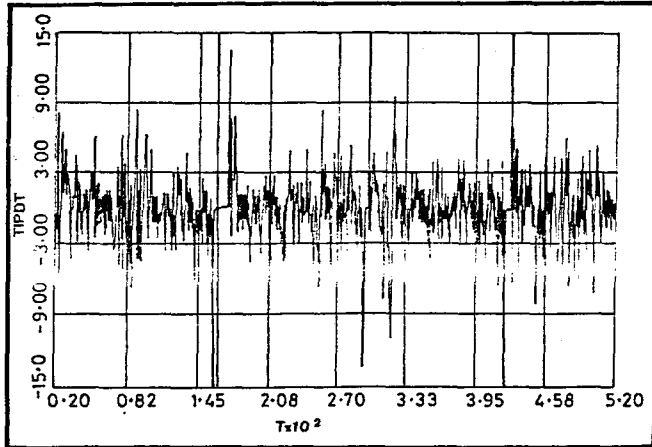
Grafik 11.27 :Klasik kont. için ilk hareket düzenegi ivme ihtiyacı



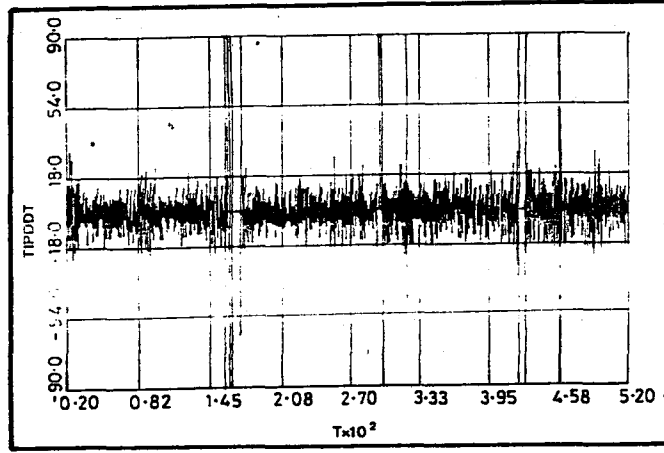
Grafik 11.28 :Klasik kontrolör için aerodinamik tork ( 20 (m/s))



Grafik 11.29 :Klasik kontrolör için kanat pitch açısı ( 20 (m/s))



Grafik 11.30 :Klasik kont. için ilk hareket düze. pitch hız talebi



Grafik 11.31 :Klasik kont. için ilk hareket düze. pitch ivme talebi

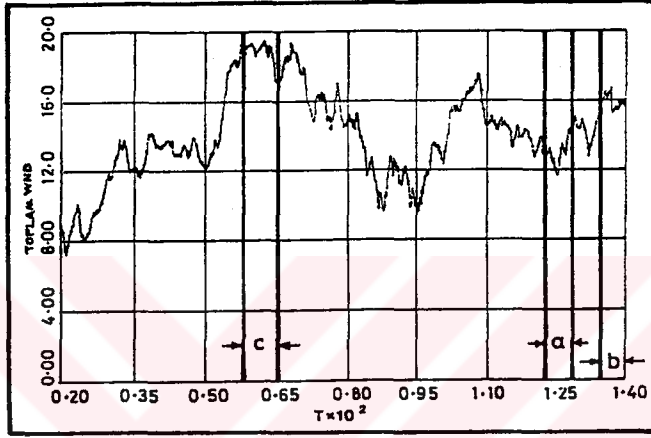
#### 4) Kontrol Performansının Mukayesesi

Grafik 11.19 ile grafik 11.22 ve grafik 11.22 ile grafik 11.28 mukayese edilirse,aerodinamik momentin gecici bileşenlerindeki artmalar,klasik kontrolörler vasıtasıyla dikkate değer ölçüde azaltılabilmektedir.Çünkü kontrol işlevindeki zorlukları dinamiksel açıdan en iyi şekilde yenebilmek için varsayıma dayanan rüzgar türbini seçilebilir,grafik 11.19,11.22,11.24 ve 11.28 'de momentte meydana gelen dalgalanmaların çok dar sınırlar içinde olduğu görülmektedir ama dalgalanmalarda,kabul edilebilir sınırlar içinde olmalıdır. .

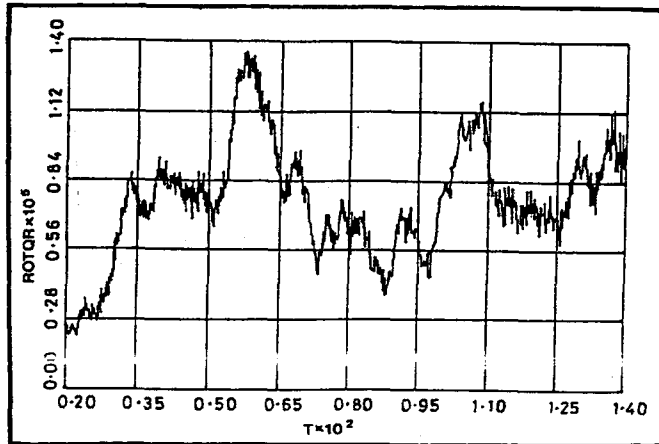
Kontrol işlevinin maliyetinin artırılmasıyla momentte meydana gelen dalgalanmalar azaltılamamaktadır.Grafik 11.20 ve 11.25 'de ortalama 12 (m/s)'lik rüzgar hızı için,grafik 11.23 ve 11.29 'da 20 (m/s)'lik ortalama rüzgar hızı için PI kontrolörlerinden çok klasik kontrolörler vasıtasıyla kanatların işlevlerindeki artışlar gösterilmiştir ama artışlar aşırı düzeyde değildir.Kanat pitch hızlanma ve ivmelenme değerleri 90 ( $^{\circ}$ /s/s) ile 15 ( $^{\circ}$ /s) doyma seviyeleri arasında bulunmaktadır,grafik 11.26 ve 11.27'de 12 (m/s)'lik ortalama rüzgar hızı için ve grafik 11.30 ve 11.31 'de ise 20 (m/s)'lik ortalama rüzgar hızı için sonuçlar gösterilmiştir.

Klasik kontrolörlerde,PI kontrolörlerine göre daha iyi performans sağlanır bu yüzden rüzgar türbinlerinin kontrolü için daha uygundur.Grafik 11.32-11.35 'te ortalama 12 (m/s)'lik rüzgar hızı için detaylı bir şekilde performans grafikleri

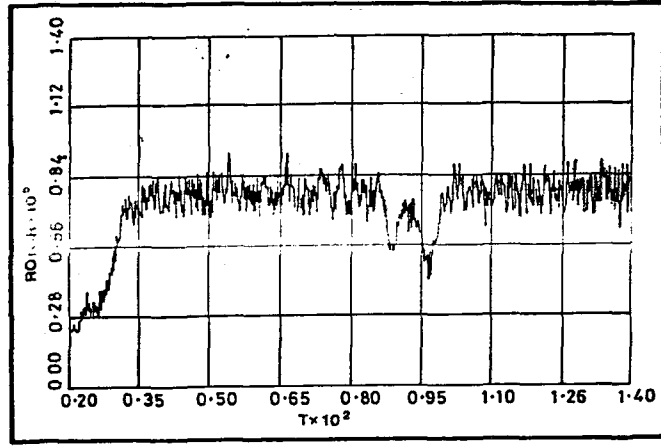
verilmiştir. Grafik 11.34 'teki aerodinamik tork a,b,c bölümleriyle mukayese edilirse rüzgar hızındaki artışla doğru orantılı olarak momentte artış olabileceği görülmektedir. 12 (m/s)'lik rüzgar hızı civarlarında ( a bölümü) kanat pitch ivmelenmesinde azalma görülür bu çoğunlukla yeterlidir ama 20 (m/s)'lik rüzgar hızı civarındaki doyuma seviyesi ile karşılaştırıldığında çok az olmaktadır. Bu gözlemler tablo 11.6 ve 11.7 'deki sonuçlardaki desteklenmiştir.



Grafik 11.32 :12 (m/s)'lik ortalama rüzgar hızının kısımları

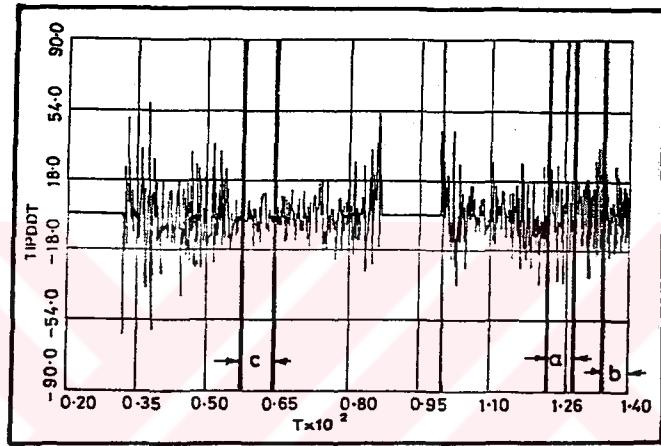


Grafik 11.33 :PID kontrolör için aerodinamik tork kısımları



12 (m/s)

Grafik 11.34 :Klasik kontrolör için aerodinamik momentin kısımları



Grafik 11.35 :Klasik kontrolör için ilk hareket düzenegi pitch ivme ihtiyacının kısımları ( 12 (m/s) )

Klasik kontrolörler, 16 (m/s)'lik rüzgar hızında en iyi şekilde çalıştıklarından bu hız değeri civarında dizayn edilmektedir. 12 (m/s)'lik rüzgar hızında çok iyi aktivite elde edilse bile kanat pitch kontrolündeki çok fazla kayıp nedeniyle performansta kayıp olur. 20 (m/s)'lik rüzgar hızında ise kontrolörlerin aktivitesi düşüktür, transmisyon yüklerindeki dalgalanmaların azaltılabilmesi için artırılabilir. Eğer kontrolörler bu modifikasyonları yerine getirebilecek şekilde dizayn edilirse grafik 11.25 ve 11.28 'de gösterildiği gibi yüksek hızlarda, yükte meydana gelen artışlar azaltılabilir. Pratikte de bu artışları azaltabilmek mümkün olmaktadır.

5) Türbin Konfigurasyonunda Klasik Kontrolörlere Bağımlılık  
Kontrol sisteminin performansı, rüzgar türbininin

konfigurasyonuna bağımlı olmaktadır. Bazı konfigürasyonlar kontrol sisteminin etkili olmasını sağlayabilmektedir ama titiz çalışma türünü olmayan kontrol sistemleri ise etkisiz olmaktadır. Konfigürasyonun özelliklerine göre klasik kontrolörler dizayn edilirken, kontrol performansına ve geçici yüklerin azaltılmasına dikkat etmek gerekir.

Kontrol işlevinin tipi (kanatlara tümüyle yada kısmi pitch kontrolü uygulanmasına bakılmaksızın) ve kontrol dizayn kriterleri (rotor yada transmisyon yüklerine bakılmaksızın) en önemli faktörlerdir. İlâveten kanat sayısının seçimi, ilk transmisyon modelinin frekansı ve harekete geçirici düzeneğin cevaplama hızı gibi etkilerin yüksek frekanslardaki artışlarına bakılmaksızın alçak frekanslardaki etkileri kontrol sistemi ile azaltılabilir. Konu ile ilgili faktörler aşağıda sıralanmıştır.

- a) Tamamen veya kısmen pitch kontrolü
- b) İki yada üç kanat
- c) Rotor yada transmisyondaki yükler, kontrole ait dizayn kriterleridir.
- d) İlk transmisyon modunun frekansı
- e) Harekete geçirici düzeneğin cevap hızı

d şıkkıyla güç dinamiğini sınırlandırılmaktadır aynı zamanda transmisyonda kullanılan her bir parçaya bağımlı olmaktadır yani dişli kutusu seçimi, jeneratör ve her türlü elektro-mekanik cihazların kullanılmasına bağılı olarak artabilir yada azalabilir. Bu nedenle aktif pitch kontrolü ile mümkün olduğu kadar yükler zayıflatılmalıdır, transmisyon bileşenlerinin seçimi ilk transmisyon modunu artırarak dengelenmesini sağlar.

Kontrol sisteminin çok kapsamlı dizayn edilmesine rağmen özellikle kesin olmayan aerodinamik modellerin iyi bir performans sağlayabilmesi için iki dinamik alt sistem arasında doğru bilgi transferinin olması gerekir. Alçak frekanslarda çalışma esnasında transmisyon dinamiğiyle ilgili ilk transmisyon modunun frekansı ve zayıflatma derecesi bilinmelidir. İkincisi, harekete geçirici düzeneğin dinamiğini, rotorda rotasyonel hareket nedeniyle meydana gelen tepe değerlerden ve yüksek frekanslı gürültülerden korunması gerekir. İlâveten performans limiti yani maksimum pitch hızına ve ivmelenmesine erişilebilmesi için bilinmelidir. /12/

## BÖLÜM 12

### RÜZGAR TURBİNİ KONSTRUKSIYONU

#### 12.1. KABULLER

YILDIZ Teknik Univ. Kampüsünün Rakımı, ( $h_o$ )	.....	: 101 (m)	
Kule Yüksekliği, ( $h$ )	.....	: 50 (m)	*
Rüzgar Ortalama Hızı, ( $V$ )	.....	: 4,5 (m/s)	*
Güç Katsayısı, ( $C_p$ ) [Optimum Değer]	.....	: 0,35	*
Atmosferik Sıcaklık, ( $T_o$ )	.....	: 288,5 (K)	*
Atmosferik Basıncı, ( $P_o$ )	.....	: 1,013 (bar)	*
Gaz Sabitesi, ( $R$ )	.....	: 0,287 (kJ/kgK)	*
Rüzgar Türbini Gücü, ( $P$ )	.....	: 700 (kW)	

\* : Kabul

Ortalama rüzgar hızı, Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü verilerinden alınmıştır.

YILDIZ Teknik Üniversitesi'nin 2 (aylık) elektrik enerjisi tüketiminin bedeli 580,128,000 (TL)'dir. Güç değerini hesaplarken bu tüketimi 1 (ay)'da gerçekleştirdiğini kabul edeceğiz. Aralık 1993 itibarıyla 1(kWh) elektrik enerjisinin bedeli 1259 (TL)'dir ( Bu değer T.E.K'ten alınmıştır ve iş yerleri için geçerlidir).

1 (ay)'lık Tüketim,

$$580,128,000 \text{ (TL)} / 1259 \text{ (TL/kWh)} = 444,897 \text{ (kWh)}$$

$$1 \text{ (ay)} = 30 \text{ (gün)} \cdot 24 \text{ (saat/gün)} = 720 \text{ (h)}$$

$$444,897 / 720 = 617,913 \text{ (kW/h)} \cong 700 \text{ (kW)/h}$$

## 12.2. KONSTRİKTİF HESAPLAR

İdeal Gazlar Denklemince Havanın Özgül Kütleşi,

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

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

$$\rho = 1,2237 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

(Standart Atmosferik şartlar için geçerlidir.)

101 (m) Yükseklikte Havanın Yoğunluğu,

$$P_{101} = P_{\text{Atm}} - (h / 10,5) = 760 - (101 / 10,5)$$

$$P_{101} = 750,380 \text{ (mmHg)}$$

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

$$\rho = P_0 / (R \cdot T_0)$$

$$\rho = (750,380 \cdot 1,333 \cdot 10^{-3} \cdot 10^5) / (0,287 \cdot 288,5 \cdot 10^3)$$

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

Rotor Yarıçapı,

$$R = \sqrt{\frac{2 \cdot P}{\pi \cdot \rho \cdot C_p \cdot V^3}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 700 \cdot 1000}{\pi \cdot 1,208 \cdot 0,35 \cdot 4,5^3}}$$

$$R = 107,548 \text{ (m)}$$

107 (m) yarıçaplı rotor dizayn etmek mühendislik açısından uygun değildir, pratikte de mümkün olmayacaktır. Deneme yoluyla uygun bir rotor çapı hesaplandıktan sonra işlemlere devam edilecektir.

350 (kW)'lık 2 adet rüzgar türbini kullanıldığında rotor yarıçapı, 75,558 (m) olmaktadır ki bu değer de uygun değildir. 5 adet 150 (kW)'lık rüzgar türbini kullanıldığında ihtiyaç duyulan güç karşılanabilir ama rotor yarıçapı 49,484 (m) olmaktadır, buda yeteri kadar uygun bir değer değildir.

İhtiyaç duyulan gücün karşılanmasında 7 adet 100 (kW)'lık rüzgar türbini kullanılacaktır. Bu değere göre rotor yarıçapı,

$$R = \sqrt{\frac{2 \cdot 100 \cdot 1000}{\pi \cdot 1,208 \cdot 0,35 \cdot 4,5^3}}$$

$$R = 40,649 \text{ (m)}$$

Rotor Çapı,

$$D = 2 \cdot R = 2 \cdot 40,649$$

$$D = 81,298 \text{ (m)}$$

Rotor Kesit Alanı,

$$A = \pi \cdot D^2 / 4 = \pi \cdot 81,298^2 / 4$$

$$A = 5190,983 \text{ (m}^2\text{)}$$

Kütlesel Debi (Rotorsuz durumda),

$$\bar{m} = \rho \cdot A \cdot V = 1,208 \cdot 5190,983 \cdot 4,5$$

$$\bar{m} = 28218,183 \text{ (kg/s)}$$

İki kanatlı rotorlarda güç katsayısının maksimum değeri  $\lambda$ 'nın 6 ile 8 değerleri arasında elde edilmektedir. Bu nedenle  $\lambda = 7$  seçilmiştir.

Uç Hız Oranı ( $\lambda$ )	Kanat Sayısı ( N )
1	6 - 20
2	4 - 12
3	3 - 8
4	3 - 5
5 - 8	2 - 4
8 - 15	1 - 2

Tablo 12.1 : Uç hız oranlarına göre kanat sayısı

( Bu tablo, Jack Park'ın Wind Power Book, 1981 adlı kitabından alınmıştır. )

Tablo 12.1'den  $\lambda$ 'nın 7 değeri için kanat sayısı  $N = 2$  bulunur.

Rotorun Açısız Hızı,

$$\Omega = ( \lambda \cdot V ) / R = ( 7 \cdot 4,5 ) / 40,849$$

$$\Omega = 0,774 \text{ (1/s)}$$

Toplam Rotor Alanı,

$$A_T = N \cdot A = 7 \cdot 5190,983$$

$$A_T = 36336,881 \text{ (m}^2\text{)}$$

Rotor Devri,

$$n = ( 30 \cdot \Omega ) / \pi = ( 30 \cdot 0,774 ) / \pi$$

$$n = 7,391 \text{ (dev/dak)}$$

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

Elektrik Frekansının Açısız Hızı,

$$\omega = ( 2 \cdot \pi ) / f = ( \pi \cdot n_g ) / 30$$

Jeneratör Devri,

$$n_g = 60 \cdot f = 60 \cdot 50$$

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

Dişli Kutusundaki Çevrim Oranı,

$$i = n_d / n = 3000 / 7,391$$

$$i = 405,899$$

Türbin Rotorunun Gücü,

$$N_o = 0,000198 \cdot V^3 \cdot D^2 = 0,000198 \cdot 4,5^3 \cdot 81,298^2$$

$$N_o = 118,046 \text{ (BG)}$$

Türbin Rotorunun Gücü,

$$N_o = 0,000145 \cdot V^3 \cdot D^2 = 0,000145 \cdot 4,5^3 \cdot 81,298^2$$

$$N_o = 87,330 \text{ (kW)}$$

Betz'e göre Türbin Rotorunun Gücü,

$$N_o = 0,000214 \cdot V^3 \cdot D^2 = 0,000214 \cdot 4,5^3 \cdot 81,298^2$$

$$N_o = 128,887 \text{ (kW)}$$

Noetzlin'e göre Türbin Rotorunun Gücü,

$$N_o = 0,000185 \cdot V^3 \cdot D^2 = 0,000185 \cdot 4,5^3 \cdot 81,298^2$$

$$N_o = 111,421 \text{ (kW)}$$

Rüzgarın Getirdiği Güç,

$$P = 1/2 \cdot \bar{m} \cdot V^2 = 1/2 \cdot 28218,163 \cdot 4,5^2$$

$$P = 285709,100 \text{ (W)}$$

Faydalı Güç,

$$Pr_{max} = 8/27 \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 = 8/27 \cdot 1,208 \cdot 5190,983 \cdot 4,5^3$$

$$Pr_{max} = 189309,100 \text{ (W)}$$

Rotorlu Durumda Kütleli Debi,

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

$$V_v = V / 3 = 4,5 / 3 = 1,5 \text{ (m/s)}$$

$$V_d = (V + V_v) / 2 = (4,5 + 1,5) / 2 = 3 \text{ (m/s)}$$

$$\bar{m} = 1,208 \cdot 5190,983 \cdot 3$$

$$\bar{m} = 18812,122 \text{ (kg/s)}$$

Yüksek  $\lambda$  'lı rüzgar türbinlerinde en çok kullanılan kanat profilleri NACA 23012 ve NACA 4415 'tir. Her iki profilinde

$(C_L / C_D)_{max}$  'ları birbirine yakın olup 125 civarındadır.

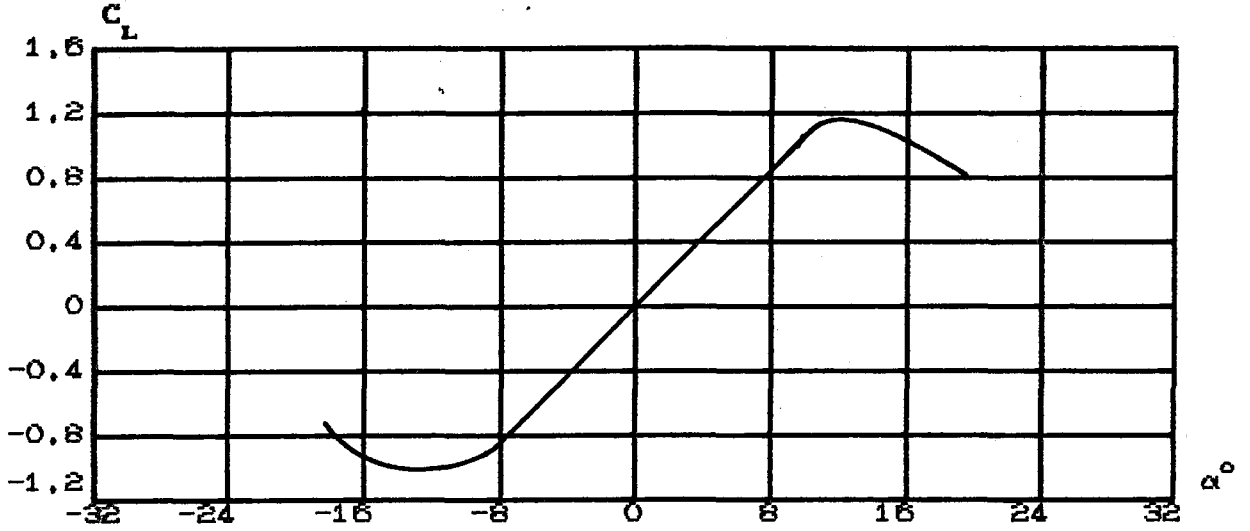
İmalat kolaylığı açısından kalınlık oranı daha fazla olan

NACA 4415 profili seçilmiştir.  $\alpha = 6^\circ$  ,  $C_L = 1$  ,  $C_D = 0,008$

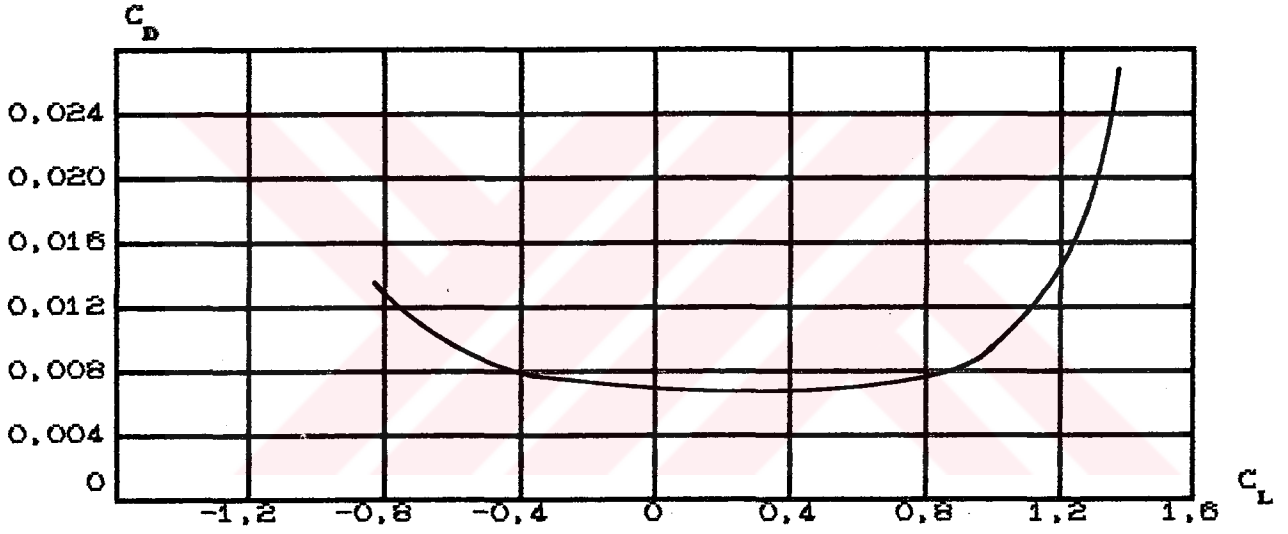
Rotor Ucunda Çevresel Hız,

$$U = (\pi \cdot D \cdot n) / 30 = \Omega \cdot D = 0,774 \cdot 81,298$$

$$U = 62,924 \text{ (m/s)}$$



Grafik 12.1 :NACA 4415 Profili C<sub>L</sub>-α eğrisi



Grafik 12.2 :NACA 4415 C<sub>L</sub> - C<sub>D</sub> eğrisi

API Rüzgar Kuvveti,

$$y = h_0 + (h / 2) = 101 + (50 / 2) = 126 \text{ (m)}$$

$$y / 10 = 126 / 10 = 1,26$$

Grafik 7.1 'den faydalanılarak yükseklik faktörü (  $x=1/8$ ,  
sakin rüzgar için ),

$$(y / 10)^x = 1,13 \quad \text{bulunur.}$$

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

$$C_s = 0,5 \quad (\text{Silindirik bölgelerde, 1 nolu referanstan alınmıştır})$$

$$V = V_{10} \cdot (y / 10)^x = 4,5 \cdot 1,13$$

$$V = 5,085 \text{ (m/s)}$$

$$F = 0,0473 \cdot 5,085^2 \cdot 0,5 \cdot 5190,983$$

$$F = 3174,407 \text{ (N)}$$

ABS Rüzgar Kuvveti,

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

$$V_k = V = 4,5 \text{ (m/s)}$$

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

$$C_a = 0,5 \text{ (Şekil Katsayısı)}$$

( $C_h$  ve  $C_a$  katsayıları 1 nolu referanstan alınmıştır.)

$$F = 0,0623 \cdot 4,5^2 \cdot 1,43 \cdot 0,5 \cdot 5190,983$$

$$F = 4662,402 \text{ (N)}$$

DNW Rüzgar Kuvveti,

$$F = 1/2 \cdot \rho \cdot V_{yt}^2 \cdot C \cdot A \cdot \sin \alpha$$

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

$$\alpha = 1,00 ; \beta = 1,50 \text{ (1 nolu referanstan alınmıştır.)}$$

$$V_{yt} = 1,00 \cdot 4,5 \cdot 1,26^{1,50}$$

$$V_{yt} = 6,364 \text{ (m/s)}$$

$$C = k \cdot C' = 0,7 \cdot 0,62 = 0,43$$

Hücum açısının ( $\alpha$ ),  $60^\circ$  olduğu kabul edilmiştir.

$$F = 0,5 \cdot 1,208 \cdot 6,364^2 \cdot 0,43 \cdot 5190,983 \cdot \sin 60$$

$$F = 7430,461 \text{ (N)}$$

İlerleme Hız Oranı,

$$J = V / (n \cdot D) = 4,5 / (7,391 \cdot 61,298)$$

$$J = 0,007$$

Daha önce hesaplanan havanın kütlelesel debisinden faydalanılarak girişim faktörü hesaplanabilir.

Girişim Faktörü,

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

$$C = V = 4,5 \text{ (m/s)} ; r = R = 40,649 \text{ (m)}$$

$$16812,122 = 1,208 \cdot \pi \cdot 40,649^2 \cdot 4,5 \cdot (1-a)$$

$$(1-a) = 0,666$$

$$a = 1 - 0,666 = 0,334 \text{ (Zaten } a < 1 \text{ olmalıdır)}$$

Trast (Tek bir kanat için),

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

$$T = 2 \cdot \pi \cdot 40,649^2 \cdot 1,208 \cdot 4,5^2 \cdot 0,334 \cdot (1 - 0,334)$$

$$T = 56492,690 \text{ (N)}$$

Moment (Tek bir kanat için),

$$Q = T \cdot R = 56492,690 \cdot 40,649$$

$$Q = 2296371,400 \text{ (Nm)}$$

Verim,

$$\eta = (T \cdot V) / (Q \cdot \Omega) = (58492,890 \cdot 4,5) / (2296371,400 \cdot 0,774)$$

$$\eta = 0,143$$

Güç Katsayısı,

$$P / (\rho \cdot V^3 \cdot D^2) = 100 \cdot 1000 / (1,208 \cdot 4,5^3 \cdot 81,289^2)$$

$$= 0,137$$

Grafik 3.1'den faydalanılarak teorik verim,güç katsayısının 0,137 değerine karşılık yaklaşık 0,93 civarında bulunur.Hesaplamalar sonucunda rotora ait teorik verim, 0,143 civarında çıkmıştır.

Trast Katsayısı ( Tek bir kanat için ),

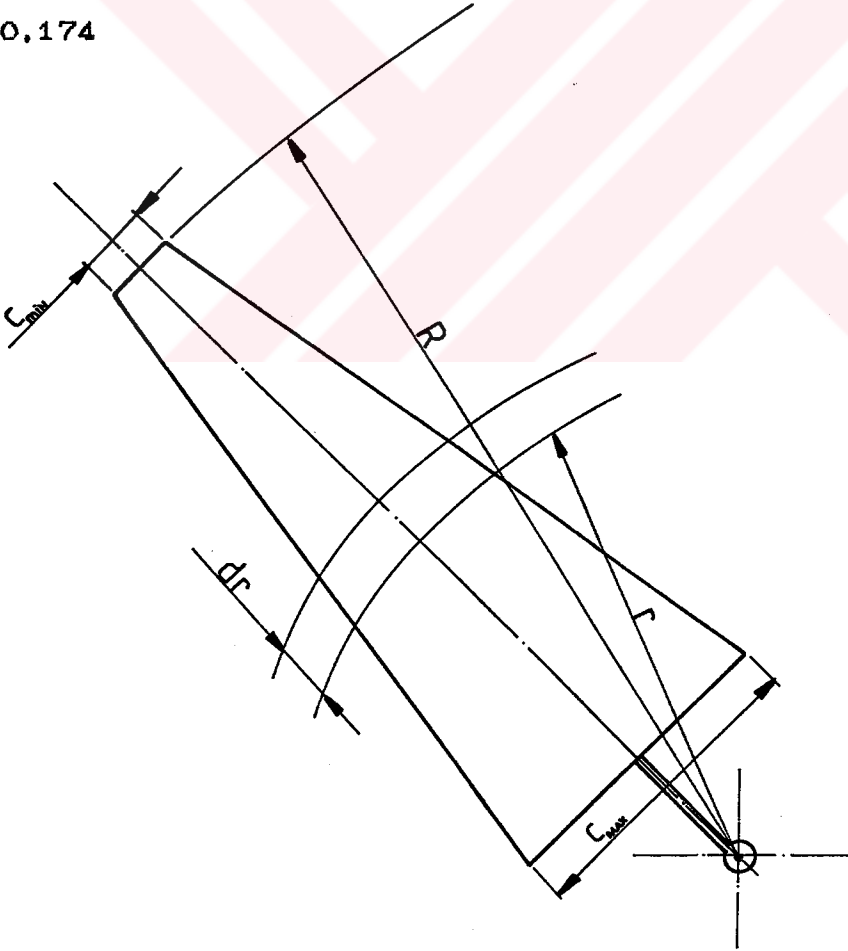
$$T_c = T / (\rho \cdot V^2 \cdot D^2) = 58492,890 / (1,208 \cdot 4,5^2 \cdot 81,289^2)$$

$$T_c = 0,349$$

Moment Katsayısı ( Tek bir kanat için ),

$$Q_c = Q / (\rho \cdot V^2 \cdot D^3) = 2296371,400 / (1,208 \cdot 4,5^2 \cdot 81,289^3)$$

$$Q_c = 0,174$$



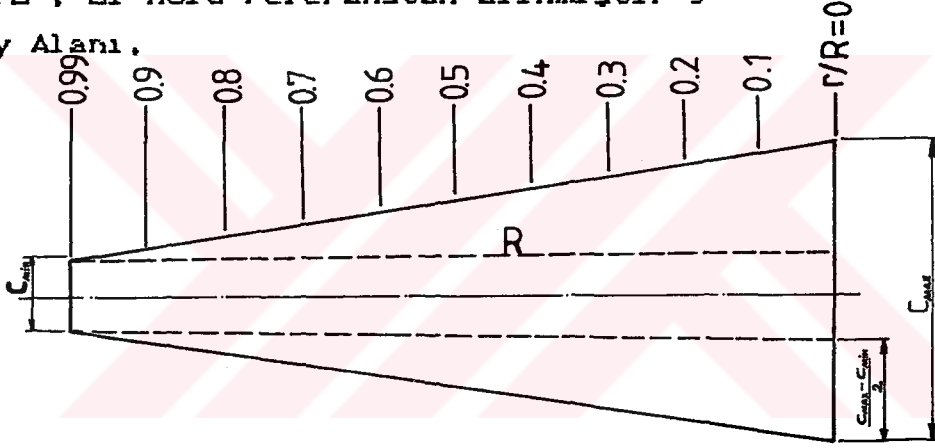
Sekil 12.1 :Kanat Elemanı

$r/R$	$i$ ( $^{\circ}$ )	$c/R$	$c_{max} \cdot c_{min}$ (m)
0,20	17,8	0,211	8,576
0,30	11,1	0,163	6,625
0,40	7,2	0,130	5,284
0,50	4,8	0,106	4,308
0,60	3,1	0,089	3,617
0,70	1,9	0,075	3,048
0,80	1,0	0,061	2,479
0,90	0,4	0,044	1,788
0,99	-0,1	0,014	0,569

Tablo 12.2 :Kanat açıklığı boyunca Burulma açısı,Veter değişimi ve Kord uzunluğu

( Tablo 12.2 , 21 nolu referanstan alınmıştır )

Kanat Yüzey Alanı,



Sekil 12.2 :Kanat yüzeyi

$$S = c_{min} \cdot R + 2 \cdot 1/2 \cdot R \cdot [ ( c_{max} - c_{min} ) / 2 ]$$

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

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

$$S_{0,2} = 0,569 \cdot 40,649 + 1/2 \cdot 40,649 \cdot ( 8,576 - 0,569 )$$

$$S_{0,2} = 185,867 \text{ (m}^2\text{)}$$

Toplam Trast ( Rotor için ),

$$T_T = N \cdot T = 2.58492,690$$

$$T_T = 112985,38 \text{ (N)}$$

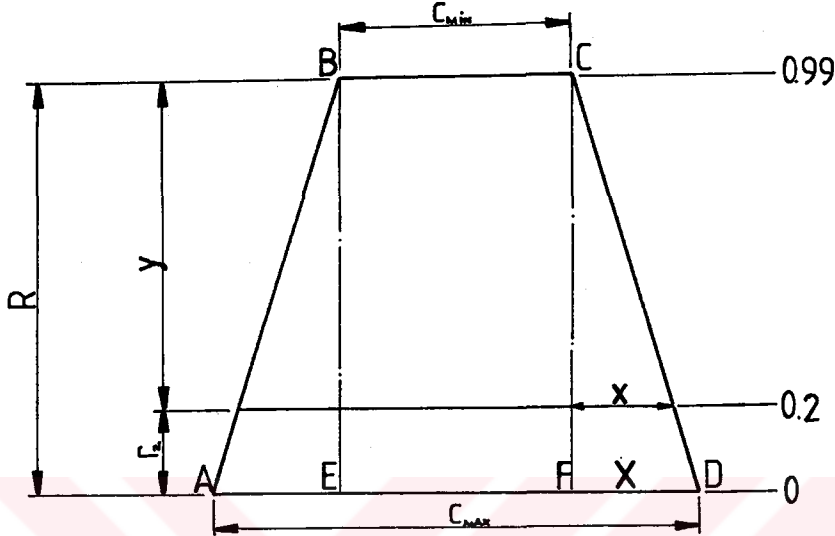
Toplam Moment ( Rotor için ),

$$Q_T = N.Q = 2.2296371,400$$

$$Q_T = 4592742,800 \text{ (Nm)}$$

Toplam Trast Katsayısı,

$$(T_c)_T = N.T_c = 2.0,349 = 0,698$$



Sekil 12.3 : Kanat yüzey hesabı

$$r/R = 0,2 \text{ için } c_{\max} = 8,576 \text{ (m)}$$

$$r/R = 0,99 \text{ için } c_{\min} = 0,569 \text{ (m)}$$

$$R = 40,649 \text{ (m)}$$

$$r/R = 0,2 \text{ için}$$

$$r_2 = 0,2.R = 0,2.40,649 = 8,129 \text{ (m)}$$

$$y = R - r_2 = 40,649 - 8,129 = 32,52 \text{ (m)}$$

$$c_{\max} = c_{\min} + 2.x$$

$$x = (c_{\max} - c_{\min}) / 2 = (8,576 - 0,569) / 2$$

$$x = 4,003 \text{ (m)}$$

CDF üçgenindeki benzerlik teoreminden faydalanabiliriz.

$$(y / R) = (x / X)$$

$$(32,52 / 40,649) = (4,003 / X)$$

$$X = 5,003 \text{ (m)}$$

$$r/R = 0 \text{ için } c_{\max}$$

$$c_{\max} = \overline{AD} = c_{\min} + 2.X = 0,569 + (2.5,003)$$

$$c_{\max} = 10,575 \text{ (m)}$$

Kanat Yüzeyi,

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

$$S = 0,589 \cdot 40,649 + 1/2 \cdot 40,649 \cdot (10,575 - 0,589)$$

$$S = 226,496 \text{ (m}^2\text{)}$$

Rotor Yüzey Alanı,

$$S_T = N \cdot S = 2 \cdot 226,496 = 452,992 \text{ (m}^2\text{)}$$

Toplam Moment Katsayısı,

$$(C_{D_c})_T = N \cdot C_{D_c} = 2 \cdot 0,174 = 0,348$$

Kaldırma Kuvveti,

$$L = 1/2 \cdot C_L \cdot \rho \cdot W^2 \cdot S$$

$$W = V = 4,5 \text{ (m/s)} \quad ; \quad S = S_T = 452,992 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$L = 1/2 \cdot 1 \cdot 1,208 \cdot 4,5^2 \cdot 452,992$$

$$L = 5540,545 \text{ (N)}$$

Sürüklenme Kuvveti,

$$D = 1/2 \cdot C_D \cdot \rho \cdot W^2 \cdot S = 1/2 \cdot 0,006 \cdot 1,208 \cdot 4,5^2 \cdot 452,992$$

$$D = 44,324 \text{ (N)}$$

Dinamik Basıncı,

$$q = 1/2 \cdot \rho \cdot V^2 = 1/2 \cdot 1,208 \cdot 4,5^2$$

$$q = 12,231 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

Eksenel Trast,

$$F_x = \rho \cdot A_r \cdot C^2 \cdot (1-a) \cdot b$$

$$b = 2 \cdot a = 2 \cdot 0,334 = 0,668$$

$$C = V = 4,5 \text{ (m/s)} \quad ; \quad A_r = A = 5190,983 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$F_x = 1,208 \cdot 5190,983 \cdot 4,5^2 \cdot (1 - 0,334) \cdot 0,668$$

$$F_x = 56492,691 \text{ (N)}$$

Havanın Kinetik Enerjisi,

$$E_k = 1/2 \cdot \rho \cdot V^3 \cdot \pi \cdot R^2 = 1/2 \cdot 1,208 \cdot 4,5^3 \cdot \pi \cdot 40,649^2$$

$$E_k = 285709,110 \text{ (W)}$$

Kanat yarıçap oranlarına göre eksenel trast ve yüzey gerilmeleri,

1)  $r/R = 0,2$  için,

$$r_1 = 0,2 \cdot R = 0,2 \cdot 40,649 = 8,129 \text{ (m)}$$

Tek Bir Kanadın Kanat Yüzey Alanı,

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

$$c_{\max} = 10,575 \text{ (m)} \quad (r/R = 0 \text{ için})$$

$$c_{\min} = 8,576 \text{ (m)} \quad (r/R = 0,2 \text{ için})$$

(Tablo 12.2 'den faydalanılmıştır.)

$$A_1 = 8,576 \cdot 8,129 + 1/2 \cdot 8,129 \cdot (10,575 - 8,576)$$

$$A_1 = 77,839 \text{ (m}^2\text{)}$$

Toplam Kanat Yüzey Alanı,

$$A_T = N \cdot A_1 = 2 \cdot 77,839 = 155,678 \text{ (m}^2\text{)}$$

Rotor Alanı,

$$A_r = \pi \cdot r_1^2 = \pi \cdot 8,129^2 = 207,598 \text{ (m}^2\text{)}$$

Eksenel Trast,

$$(F_{x_1}) = \rho \cdot A_r \cdot C^2 \cdot (1-a) \cdot b = 1,208 \cdot 207,598 \cdot 4,5^2 \cdot (1 - 0,334) \cdot 0,868$$

$$(F_{x_1}) = 2259,257 \text{ (N)}$$

Yüzey gerilmesi,

$$P = F/A$$

$$F = F_x \quad ; \quad A = A_r$$

$$P_1 = (F_{x_1}) / A_1 = 2259,257 / 207,598$$

$$P_1 = 10,882 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

2)  $r/R = 0,3$  için,

$$r_2 = 0,3 \cdot R = 0,3 \cdot 40,649 = 12,194 \text{ (m)}$$

$$c_{\max} = 10,575 \text{ (m)} \quad ; \quad c_{\min} = 8,625 \text{ (m)}$$

$$A_2 = 8,625 \cdot 12,194 + 1/2 \cdot 12,194 \cdot (10,575 - 8,625)$$

$$A_2 = 104,868 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$A_T = 2 \cdot 104,868 = 209,736 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$A_r = \pi \cdot r_2^2 = \pi \cdot 12,194^2 = 467,288 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$(F_{x_2}) = 1,208 \cdot 467,288 \cdot 4,5^2 \cdot (1 - 0,334) \cdot 0,868$$

$$(F_{x_2}) = 5085,425 \text{ (N)}$$

$$P_2 = 5085,425 / 467,288 = 10,882 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

3)  $r/R = 0,4$  için,

$$r_3 = 0,4 \cdot R = 0,4 \cdot 40,649 = 16,259 \text{ (m)}$$

$$c_{\max} = 10,575 \text{ (m)} \quad ; \quad c_{\min} = 5,284 \text{ (m)}$$

$$A_r = \pi \cdot 16,259^2 = 830,495 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$A_3 = 5,284 \cdot 16,259 + 1/2 \cdot 16,259 \cdot (10,575 - 5,284)$$

$$A_3 = 118,024 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$A_T = 2 \cdot 118,024 = 236,048 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$(F_{x_3}) = 1,208 \cdot 830,495 \cdot 4,5^2 \cdot (1 - 0,334) \cdot 0,868$$

$$(F)_{x_3} = 9038,152 \text{ (N)}$$

$$P_3 = 9038,152 / 830,495 = 10,882 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

4)  $r/R = 0,5$  için.

$$r_4 = 0,5.R = 0,5.40,649 = 20,324 \text{ (m)}$$

$$c_{\max} = 10,575 \text{ (m)} \quad ; \quad c_{\min} = 4,308 \text{ (m)}$$

$$A_4 = 4,308.20,324 + 1/2.20,324.(10,575 - 4,308)$$

$$A_4 = 151,241 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$A_T = 2.151,241 = 302,482 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$A_r = \pi.20,324^2 = 1297,681 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$(F)_{x_4} = 1,208.1297,681.4,5^2.(1 - 0,334).0,668$$

$$(F)_{x_4} = 14122,468 \text{ (N)}$$

$$P_4 = 14122,468 / 1297,681 = 10,882 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

5)  $r/R = 0,6$  için.

$$r_5 = 0,6.R = 0,6.40,649 = 24,389 \text{ (m)}$$

$$c_{\max} = 10,575 \text{ (m)} \quad ; \quad c_{\min} = 3,617 \text{ (m)}$$

$$A_5 = 3,617.24,389 + 1/2.24,389.(10,575 - 3,617)$$

$$A_5 = 173,064 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$A_T = 2.173,064 = 346,128 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$A_r = \pi.24,389^2 = 1868,753 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$(F)_{x_5} = 1,208.1868,753.4,5^2.(1 - 0,334).0,668$$

$$(F)_{x_5} = 20337,359 \text{ (N)}$$

$$P_5 = 20337,359 / 1868,753 = 10,882 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

6)  $r/R = 0,7$  için.

$$r_6 = 0,7.R = 0,7.40,649 = 28,454 \text{ (m)}$$

$$c_{\max} = 10,575 \text{ (m)} \quad ; \quad c_{\min} = 3,048 \text{ (m)}$$

$$A_6 = \pi.28,454^2 = 2543,581 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$A_6 = 3,048.28,454 + 1/2.28,454.(10,575 - 3,048)$$

$$A_6 = 193,814 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$A_T = 2.193,814 = 387,628 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$(F)_{x_6} = 1,208.2543,581.4,5^2.(1 - 0,334).0,668$$

$$(F)_{x_6} = 27681,411 \text{ (N)}$$

$$P_6 = 27681,411 / 2543,581 = 10,882 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

7)  $r/R = 0,8$  için.

$$r_7 = 0,8.R = 0,8.40,649 = 32,519 \text{ (m)}$$

$$c_{\max} = 10,575 \text{ (m)} \quad ; \quad c_{\min} = 2,479 \text{ (m)}$$

$$A_7 = 2,479.32,519 + 1/2.32,519.(10,575 - 2,479)$$

$$A_7 = 212,251 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$A_T = 2.212,251 = 424,503 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$A_r = \pi.32,519^2 = 3322,188 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$(F_x)_7 = 1,208.3322,188.4,5^2.(1 - 0,334).0,668$$

$$(F_x)_7 = 36154,875 \text{ (N)}$$

$$P_7 = 36154,875 / 3322,188 = 10,882 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

8)  $r/R = 0,9$  için,

$$r_8 = 0,9.R = 0,9.40,649 = 36,584 \text{ (m)}$$

$$c_{\max} = 10,575 \text{ (m)} \quad ; \quad c_{\min} = 1,788 \text{ (m)}$$

$$A_8 = 1,788.36,584 + 1/2.36,584.(10,575 - 1,788)$$

$$A_8 = 226,144 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$A_T = 2.226,144 = 452,287 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$A_r = \pi.36,584^2 = 4204,673 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$(F_x)_8 = 1,208.4204,673.4,5^2.(1 - 0,334).0,668$$

$$(F_x)_8 = 45758,827 \text{ (N)}$$

$$P_8 = 45758,827 / 4204,673 = 10,882 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

9)  $r/R = 0,99$  için,

$$r_9 = 0,99.R = 0,99.40,649 = 40,242 \text{ (m)}$$

$$c_{\max} = 10,575 \text{ (m)} \quad ; \quad c_{\min} = 0,589 \text{ (m)}$$

$$A_9 = 0,589.40,242 + 1/2.40,242.(10,575 - 0,589)$$

$$A_9 = 224,228 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$A_T = 2.224,228 = 448,456 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$A_r = \pi.40,242^2 = 5087,553 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$(F_x)_9 = 1,208.5087,553.4,5^2.(1 - 0,334).0,668$$

$$(F_x)_9 = 55367,077 \text{ (N)}$$

$$P_9 = 55367,077 / 5087,553 = 10,882 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

Mil Çapı,

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{9}{0,2 \cdot \tau_{em}} \cdot Mt}$$

Mil malzemesi : St 70 ,kamalı mil

Mil malzemesi için burulma gerilmesi emniyet değeri 600 ile 800 (daN/cm<sup>2</sup>) arasındadır.

$$M_t = Q_T = 4592742,800 \text{ (Nm)}$$

$$\tau_{em} = 700 \text{ (daN/cm}^2\text{)} \text{ kabul edildi.}$$

$$1 \text{ (N)} = 0,1 \text{ (daN)} \quad , \quad 1 \text{ (cm)} = 100 \text{ (cm)}$$

$$M_t = 4592742,8 \cdot 0,1 \cdot 100 = 45927428 \text{ (daNcm)}$$

$$d_{min} = \sqrt[3]{\frac{45927428}{0,2 \cdot 700}}$$

$$d_{min} = 68,968 \text{ (cm)} = 689,680 \text{ (mm)}$$

( Mil çapı hesabı, Prof. M. Suat ÇAKMAK 'ın Makine Parçalarının Mukavemet Hesapları, 1988 adlı kitabından alınmıştır.)

r/R	Kanat Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> )	Top. Kanat Yüz. Alanı (m <sup>2</sup> )	Rotor Alanı (m <sup>2</sup> )	Eksenel Trast (N)	Yüzey Gerilmesi (N/m <sup>2</sup> )
0,2	77,839	155,678	207,598	2259,257	10,862
0,3	104,868	209,736	467,268	5085,425	10,862
0,4	118,024	236,048	630,495	9038,152	10,862
0,5	151,241	302,482	1297,661	14122,468	10,862
0,6	173,064	346,128	1868,753	20337,359	10,862
0,7	193,814	387,628	2543,581	27681,411	10,862
0,8	212,251	424,503	3322,188	36154,875	10,862
0,9	226,144	452,287	4204,673	45758,827	10,862
0,99	224,228	448,456	5087,553	55367,077	10,862

Kanat Profil Çizimi :

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

X ve Y,kord (c) uzunluğuna bağlı,yüzde olarak verilmiştir.

( Yukarıdaki tablo, 21 nolu referanstan alınmıştır.)

1)  $r/R = 0$  için,

$r/R = 0$  değeri için  $c = 10,575$  (m)

Ust Yüzey

Alt Yüzey

$$x = 0. c/100$$

$$y = 0. c/100$$

$$y = 0. c/100$$

$$x = 0. 10,575/100$$

$$y = 0. 10,575/100$$

$$y = 0. 10,575/100$$

$$x = 0$$
 (m)

$$y = 0$$
 (m)

$$y = 0$$
 (m)

$$x = 1,25. c/100$$

$$y = 3,07. c/100$$

$$y = -1,79. c/100$$

$$x = 1,25. 10,575/100$$

$$y = 3,07. 10,575/100$$

$$y = -1,79. 10,575/100$$

$$x = 0,132$$
 (m)

$$y = 0,324$$
 (m)

$$y = -0,189$$
 (m)

$$\begin{array}{lll}
x = 2,5 \cdot c/100 & y = 4,17 \cdot c/100 & y = -2,48 \cdot c/100 \\
x = 2,5 \cdot 10,575/100 & y = 4,17 \cdot 10,575/100 & y = -2,48 \cdot 10,575/100 \\
x = 0,264 \text{ (m)} & y = 0,440 \text{ (m)} & y = -0,262 \text{ (m)} \\
\\
x = 5,0 \cdot c/100 & y = 5,74 \cdot c/100 & y = -3,27 \cdot c/100 \\
x = 5,0 \cdot 10,575/100 & y = 5,74 \cdot 10,575/100 & y = -3,27 \cdot 10,575/100 \\
x = 0,528 \text{ (m)} & x = 0,607 \text{ (m)} & x = -0,345 \text{ (m)}
\end{array}$$

Yukarıdaki işlemlere devam edilerek  $r/R = 0$  değeri için kanat profili çizilebilir. Sonuçlar aşağıda tablo şeklinde verilmiştir.

<u>x (m)</u>	<u>y (m), Üst Yüzey</u>	<u>y (m), Alt Yüzey</u>
0	0	0
0,132	0,324	-0,189
0,264	0,440	-0,262
0,528	0,607	-0,345
0,793	0,730	-0,392
1,057	0,829	-0,420
1,586	0,980	-0,442
2,115	1,083	-0,438
2,643	1,154	-0,420
3,172	1,189	-0,396
4,230	1,189	-0,343
5,287	1,113	-0,287
6,345	0,983	-0,228
7,402	0,806	-0,163
8,460	0,586	-0,108
9,517	0,325	-0,060
10,048	0,176	-0,038
10,575	0	0

2)  $r/R = 0,1$  için.

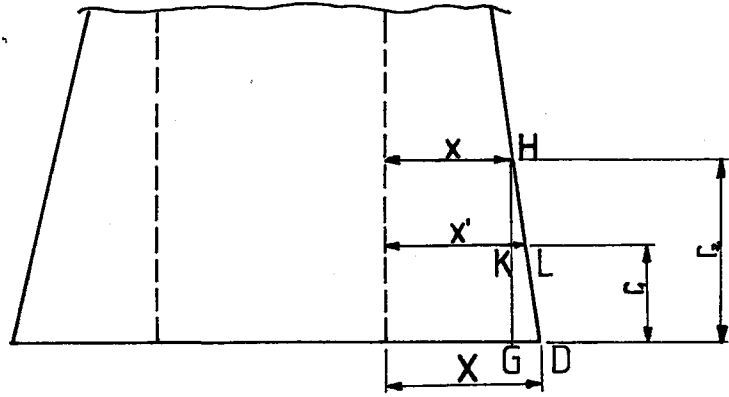
$$r_1 = 4,084 \text{ (m)}$$

$$r/R = 0,2 \text{ için } r_2 = 8,129 \text{ (m)} ; e = 8,576 \text{ (m)} ; x = 4,003 \text{ (m)}$$

$$r/R = 0 \text{ için } r_0 = 0 \text{ (m)} ; e = 10,575 \text{ (m)} ; x = 5,003 \text{ (m)}$$

$$c_{\max} = 10,575 \text{ (m)}$$

$$c_{\min} = 0,569 \text{ (m)}$$



Sekil 12.4 :  $r/R = 0,1$  için kord uzunluğunun bulunması

$$|KL| = x' - x = x' - 4,003$$

$$|GD| = x - x' = 5,003 - 4,003 = 1,000 \text{ (m)}$$

DGH üçgeninden faydalanılarak benzerlik teoremi

kurulabilir.

$$(r_2 - r_1) / r_2 = |KL| / |GD|$$

$$(8,129 - 4,064) / 8,129 = (x' - 4,003) / 1,000$$

$$x' = 4,503 \text{ (m)}$$

$r_2$  yarıçapında  $c$  değeri,

$$c = c_{\min} + 2 \cdot x' = 0,569 + (2 \cdot 4,503)$$

$$c = 9,575 \text{ (m)}$$

<u>x (m)</u>	<u>y (m), Üst Yüzey</u>	<u>y (m), Alt Yüzey</u>
0	0	0
0,119	0,293	-0,171
0,239	0,399	-0,237
0,478	0,549	-0,313
0,718	0,681	-0,355
0,957	0,750	-0,381
1,436	0,867	-0,400
1,915	0,981	-0,397
2,393	1,045	-0,381
2,872	1,077	-0,359
3,630	1,101	-0,311
4,787	1,008	-0,260
5,745	0,890	-0,204
6,702	0,730	-0,148
7,660	0,531	-0,098
8,617	0,294	-0,054
9,096	0,159	-0,034
9,575	0	0

3)  $r/R = 0,2$  için  $c = 8,576$  (m)

<u>x (m)</u>	<u>y (m), Ust Yüzey</u>	<u>y (m), Alt Yüzey</u>
0	0	0
0.107	0.263	-0.153
0.214	0.357	-0.212
0.428	0.492	-0.280
0.643	0.592	-0.318
0.857	0.672	-0.341
1.286	0.794	-0.358
1.715	0.879	-0.355
2.144	0.938	-0.341
2.572	0.964	-0.321
3.430	0.964	-0.278
4.288	0.903	-0.233
5.145	0.797	-0.183
6.003	0.654	-0.132
6.860	0.475	-0.080
7.718	0.264	-0.048
8.147	0.143	-0.030
8.576	0	0

4)  $r/R = 0,3$  için  $c = 8,625$  (m)

<u>x (m)</u>	<u>y (m), Ust Yüzey</u>	<u>y (m), Alt Yüzey</u>
0	0	0
0.082	0.203	-0.118
0.165	0.276	-0.164
0.331	0.380	-0.218
0.496	0.457	-0.245
0.662	0.519	-0.263
0.993	0.614	-0.278
1.325	0.679	-0.274
1.656	0.723	-0.263
1.987	0.745	-0.248
2.650	0.745	-0.215
3.312	0.697	-0.180
3.975	0.616	-0.141
4.637	0.505	-0.102
5.300	0.367	-0.068
5.962	0.204	-0.037
6.293	0.110	-0.023
6.625	0	0

5)  $r/R = 0,4$  için  $c = 5,284$  (m)

<u>x (m)</u>	<u>y (m), Ust Yüzey</u>	<u>y (m), Alt Yüzey</u>
0	0	0
0,086	0,162	-0,094
0,132	0,220	-0,131
0,264	0,303	-0,172
0,396	0,385	-0,198
0,528	0,414	-0,210
0,792	0,489	-0,220
1,056	0,541	-0,219
1,321	0,577	-0,210
1,585	0,594	-0,198
2,113	0,594	-0,171
2,642	0,556	-0,143
3,170	0,491	-0,113
3,698	0,403	-0,081
4,227	0,293	-0,054
4,755	0,162	-0,030
5,019	0,086	-0,019
5,284	0	0

6)  $r/R = 0,5$  için  $c = 4,308$  (m)

<u>x (m)</u>	<u>y (m), Ust Yüzey</u>	<u>y (m), Alt Yüzey</u>
0	0	0
0,053	0,132	-0,077
0,107	0,179	-0,106
0,215	0,247	-0,140
0,323	0,297	-0,159
0,403	0,337	-0,171
0,646	0,399	-0,180
0,681	0,441	-0,178
1,077	0,470	-0,171
1,292	0,484	-0,161
1,723	0,484	-0,140
2,154	0,453	-0,117
2,584	0,400	-0,092
3,015	0,328	-0,066
3,446	0,239	-0,044
3,677	0,132	-0,024
4,092	0,071	-0,015
4,308	0	0

7)  $r/R = 0,6$  için  $c = 3,617$  (m)

<u>x (m)</u>	<u>y (m), Ust Yüzey</u>	<u>y (m), Alt Yüzey</u>
0	0	0
0,045	0,111	-0,064
0,090	0,150	-0,069
0,180	0,207	-0,118
0,271	0,249	-0,134
0,361	0,283	-0,143
0,542	0,335	-0,151
0,723	0,370	-0,150
0,904	0,394	-0,143
1,085	0,408	-0,135
1,446	0,408	-0,117
1,808	0,380	-0,098
2,170	0,338	-0,077
2,531	0,275	-0,056
2,893	0,200	-0,037
3,255	0,111	-0,020
3,436	0,060	-0,013
3,617	0	0

8)  $r/R = 0,7$  için  $c = 3,048$  (m)

<u>x (m)</u>	<u>y (m), Ust Yüzey</u>	<u>y (m), Alt Yüzey</u>
0	0	0
0,036	0,093	-0,054
0,076	0,127	-0,075
0,152	0,174	-0,099
0,228	0,210	-0,113
0,304	0,236	-0,121
0,457	0,262	-0,127
0,609	0,312	-0,126
0,762	0,332	-0,121
0,914	0,342	-0,114
1,219	0,342	-0,099
1,524	0,302	-0,082
1,828	0,263	-0,065
2,133	0,232	-0,047
2,436	0,169	-0,031
2,743	0,093	-0,017
2,895	0,050	-0,010
3,048	0	0

9)  $r/R = 0,8$  için  $c = 2,479$  (m)

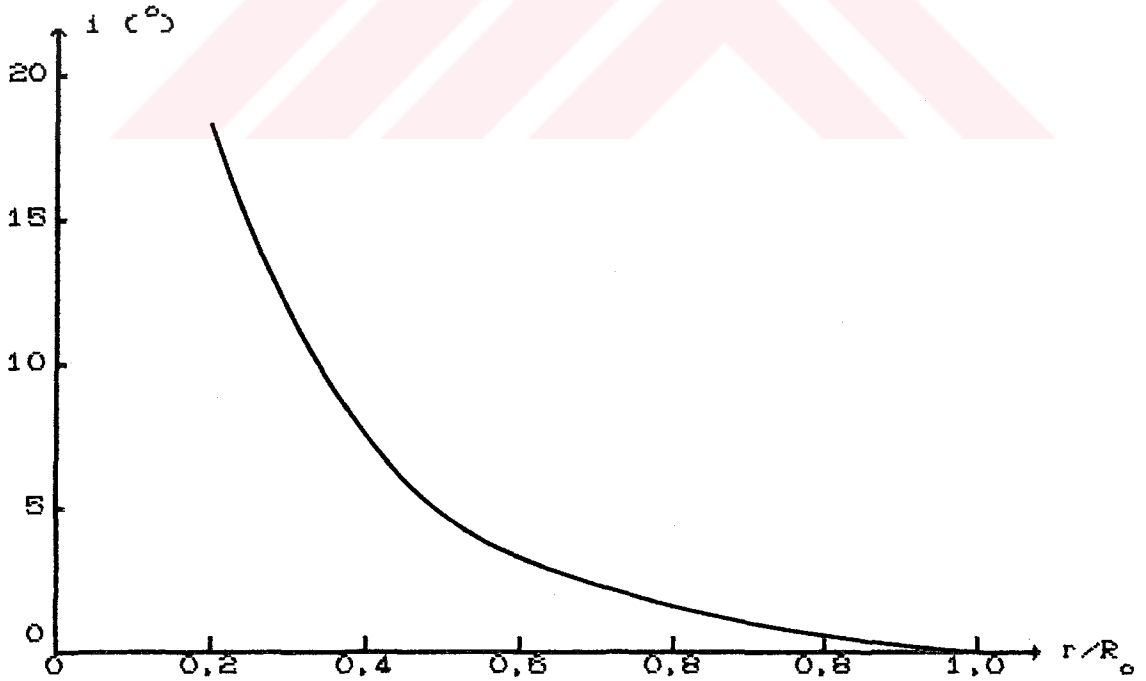
<u>x (m)</u>	<u>y (m), Ust Yüzey</u>	<u>y (m), Alt Yüzey</u>
0	0	0
0,030	0,076	-0,044
0,061	0,103	-0,061
0,123	0,142	-0,061
0,185	0,171	-0,091
0,247	0,194	-0,098
0,371	0,229	-0,103
0,495	0,254	-0,102
0,619	0,270	-0,098
0,743	0,278	-0,092
0,861	0,278	-0,080
1,239	0,261	-0,067
1,487	0,230	-0,053
1,735	0,189	-0,038
1,983	0,137	-0,025
2,231	0,076	-0,014
2,355	0,041	-0,008
2,479	0	0

10)  $r/R = 0,9$  için  $c = 1,788$  (m)

<u>x (m)</u>	<u>y (m), Ust Yüzey</u>	<u>y (m), Alt Yüzey</u>
0	0	0
0,026	0,054	-0,032
0,044	0,074	-0,044
0,089	0,102	-0,058
0,134	0,123	-0,066
0,178	0,140	-0,071
0,268	0,165	-0,074
0,357	0,183	-0,074
0,447	0,195	-0,071
0,536	0,201	-0,067
0,715	0,201	-0,058
0,894	0,188	-0,042
1,072	0,168	-0,038
1,251	0,136	-0,027
1,430	0,099	-0,018
1,609	0,055	-0,010
1,698	0,029	-0,006
1,788	0	0

11)  $r/R = 0,99$  için  $c = 0,569$  (m)

$x$ (m)	$y$ (m), Ust Yüzey	$y$ (m), Alt Yüzey
0	0	0
0,007	0,017	-0,010
0,014	0,023	-0,014
0,028	0,032	-0,018
0,042	0,039	-0,021
0,056	0,044	-0,022
0,085	0,052	-0,023
0,113	0,058	-0,023
0,142	0,062	-0,022
0,170	0,064	-0,021
0,227	0,064	-0,018
0,284	0,059	-0,015
0,341	0,052	-0,012
0,398	0,043	-0,008
0,455	0,031	-0,005
0,512	0,017	-0,003
0,540	0,009	-0,002
0,569	0	0



Grafik 12.3 : Kanattaki burulma açısının değişimi

## PITCH Açısı'nın Hesabı

Rüzgar türbini rotoru 4,5 (m/s)'lik ortalama rüzgar hız değeri için dizayn edilmiştir. Rüzgar hızının 2 (m/s) ile 8 (m/s)'lik değerler arasında değiştiğini kabul edersek, rotorun açısal hızını 0,774 (1/s) değerinde sabit tutabilmek için kanat yüzey alanındaki değişiklikleri hesaplamamız gerekir. Bu açısal hız 4,5 (m/s)'lik rüzgar hızında geçerlidir.

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

$$F = 3174 \text{ (ND)} \quad \text{( API 'ya göre Rüzgar Kuvveti )}$$

$$F = 4682 \text{ (ND)} \quad \text{( ABS 'ye " " " )}$$

$$F = 7430 \text{ (ND)} \quad \text{( DNW 'ye " " " )}$$

Ortalama rüzgar kuvveti 6000 (ND) alınmıştır.

Aerodinamik Kuvvet,

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

Projeksiyon Alanı,

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

$$C_D = C_S = 0.5$$

( Şekil katsayısı yada aerodinamik direnç )

$$A = 6000 / ( 1/2 \cdot 1,208 \cdot 0,5 \cdot V^2 )$$

$$A = 19867,549 / V^2 \quad \text{(m}^2\text{)}$$

$V = V_{\text{ort}} = 4,5 \text{ (m/s)}$  ortalama hız değeri için pitch açısını hesaplayalım.

$$A = 19867,549 / ( 4,5^2 )$$

$$A = 981,113 \quad \text{(m}^2\text{)}$$

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

$$R = \sqrt{ ( A / \pi ) }$$

$$R = \sqrt{ ( 981,113 / \pi ) }$$

$$R = 17,671 \text{ (m)}$$

$$r/R = 0 \quad \text{için} \quad c/R = 0,260$$

$$c_{\max} = 0,260 \cdot 17,671 = 4,594 \text{ (m)}$$

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

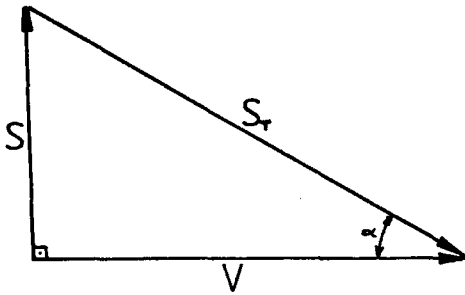
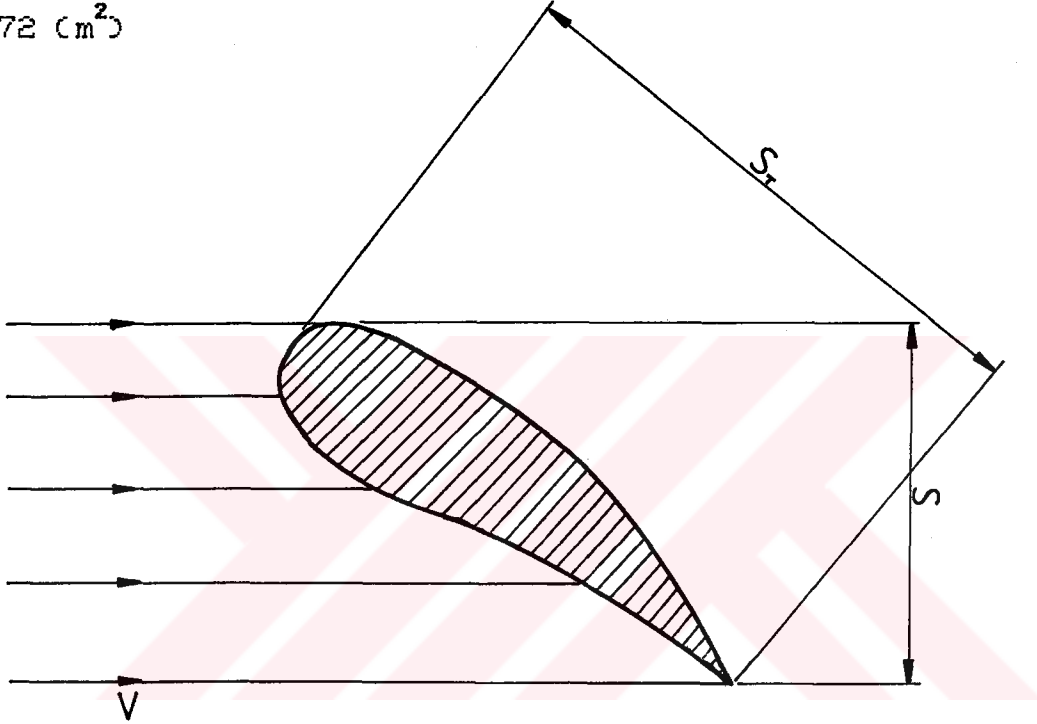
$$c_{\min} = 0,014 \cdot 17,671 = 0,247 \text{ (m)}$$

Kanat Yüzey Alanı,

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

$$S = 0,247 \cdot 17,671 + 1/2 \cdot 17,671 \cdot (4,594 - 0,247)$$

$$S = 42,772 \text{ (m}^2\text{)}$$



Şekil 12.4 : Pitch açısının kanat profili üzerinde gösterilmesi

Pitch Açısı,

$$\sin \alpha = S / S_T$$

$$\alpha = \text{ArcSin} ( S / S_T )$$

$$\alpha_{4,5} = \text{ArcSin} ( 42,772 / 226,496 )$$

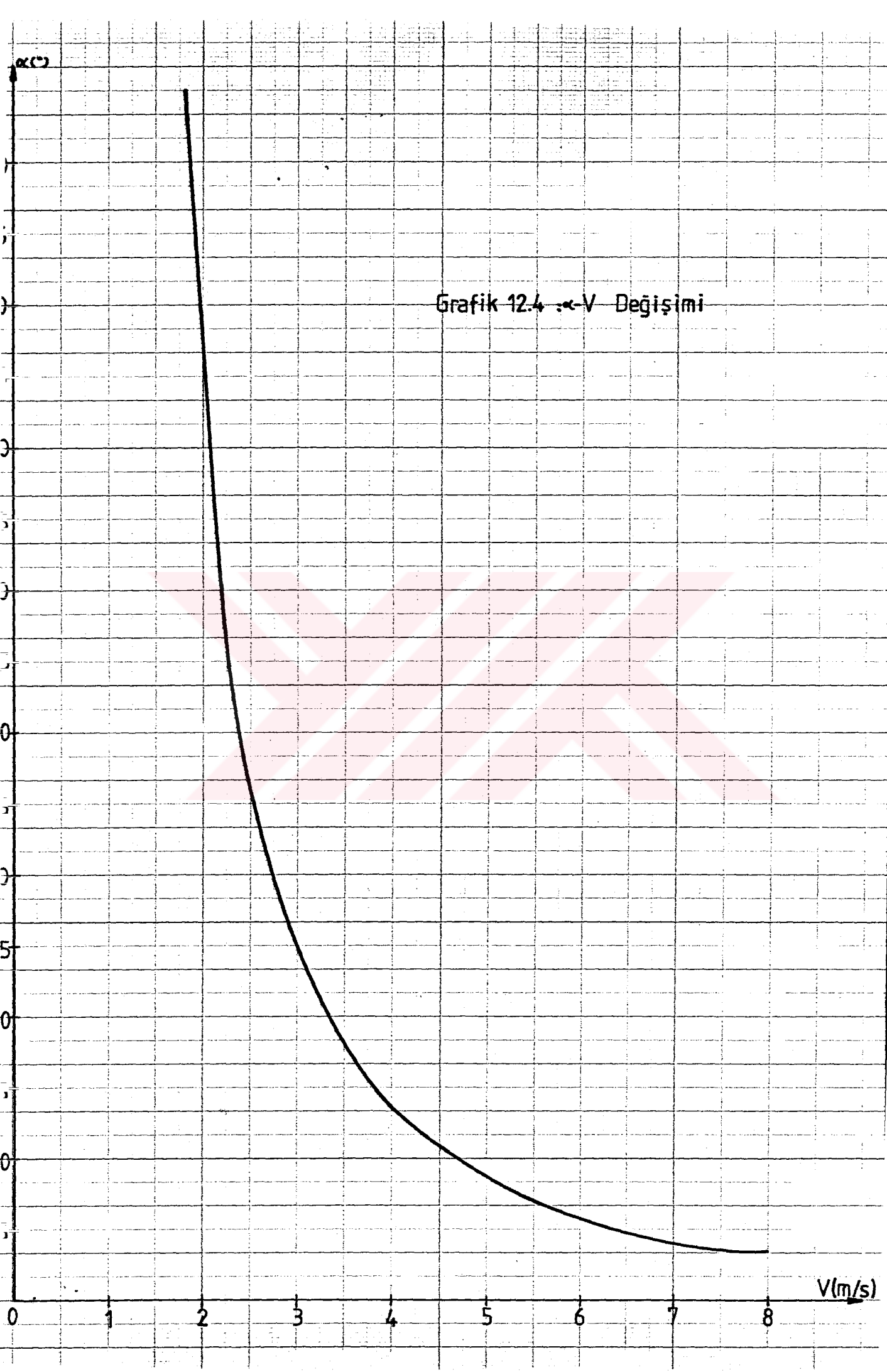
$$\alpha_{4,5} = 10,885 (^\circ)$$

(  $S_T$ , Tek bir kanadın yüzey alanıdır ve daha önce hesaplanmıştır.)



<u>Rüzgar Hızı (m/s)</u>	<u>Pitch Açısı (°)</u>
2	72,999
2,25	49,077
2,50	37,736
2,75	30,385
3,00	25,152
3,25	21,232
3,50	18,195
3,75	15,784
4,00	13,831
4,25	12,226
4,50	10,888
4,75	9,760
5,00	8,801
5,25	7,977
5,50	7,264
5,75	6,643
6,00	6,099
6,25	5,619
6,50	5,194
6,75	4,815
7,00	4,477
7,25	4,173
7,50	3,899
7,75	3,651
8,00	3,426

Rüzgar hızının değişimine bağlı olarak pitch açısında meydana gelen değişiklikler, yukarıda tablo halinde verildiği gibi grafiğide çizilmiştir.



Grafik 12.4  $\alpha$ -V Değişimi

```

M RÜZGAR TÜRBİNİ DİZAYNI
INPUT "RÜZGAR TÜRBİNİ GÜCÜ P (kW) 'yi GİRİNİZ :";P
INPUT "TÜRBİN SAYISINI GİRİNİZ :";NN
INPUT "GÜÇ KATSAYISI Cp 'yi GİRİNİZ :";CP
INPUT "ORTALAMA RÜZGAR HIZI V(m/s) 'yi GİRİNİZ :";V
INPUT "RÜZGAR TÜRBİNİ TESİS EDİLECEK YERİN RAKIMINI ho(m) GİRİNİZ :";HO
INPUT "UÇ HIZ ORANI'nı GİRİNİZ :";LA
INPUT "UÇ HIZ ORANI'na BAĞLI OLAN KANAT SAYISINI GİRİNİZ :";N
s=.287
T=288.5
PHO=760-(HO/10.5)
DK=.001333
RO=(PHO*DK*100)/(RS*T)
OMS=2*P*1000
OLC=3.14314*RO*CP*V*V*V
OOO=OMS/OLC
R=SQR(OOO)
PRINT "ROTOR YARIÇAPI (m) : ";R
INPUT "KULE YÜKSEKLİĞİ h (m)'ı GİRİNİZ :";H
D=2*R
A=(3.14314*D*D)/4
MM=RO*A*V
OM=(LA*V)/R
AT=NN*A
NNN=(30*OM)/3.14314
I=3000/NNN
NEBG=.000196*V*V*V*D*D
NEKW=.000145*V*V*V*D*D
NEBT=.000214*V*V*V*D*D
NENO=.000185*V*V*V*D*D
RGP=.5*MM*V*V
FRG=8/27*RO*A*V*V*V
VW=V/3
VD=(V+VW)/2
MMRD=RO*A*VD
U=(3.14314*D*NNN)/30
Y=HO+(H/2)
YY=Y/10
PRINT "y/10 Değeri :";YY
INPUT "GRAFİK 7.1'den FAYDALANARAK YÜKSEKLİK FAKTÖRÜNÜ GİRİNİZ :";YF
INPUT "ŞEKİL KATSAYISI Cs'i GİRİNİZ :";CS
VV=V*YF
FAPI=.0473*VV*VV*CS*A
INPUT "YÜKSEKLİK KATSAYISI Ch'ı GİRİNİZ :";CH
FABS=.0623*V*V*CH*CS*A
J=V/(NNN*D)
AA=MMRD/(RO*3.14314*R*R*V)
AAA=1-AA
TTEK=2*3.14314*R*R*RO*V*V*AAA*(1-AAA)
QTEK=TTEK*R
ETA=(TTEK*V)/(QTEK*OM)
TC=TTEK/(RO*V*V*D*D)
QC=QTEK/(RO*V*V*D*D*D)
INPUT "r/R=0 İÇİN KORD/YARIÇAP ( c/R ) ORANINI GİRİNİZ :";CRA
INPUT "r/R=0,1 İÇİN KORD/YARIÇAP ( c/R ) ORANINI GİRİNİZ :";CRB
INPUT "r/R=0,2 İÇİN KORD/YARIÇAP ( c/R ) ORANINI GİRİNİZ :";CRC
INPUT "r/R=0,3 İÇİN KORD/YARIÇAP ( c/R ) ORANINI GİRİNİZ :";CRD
INPUT "r/R=0,4 İÇİN KORD/YARIÇAP ( c/R ) ORANINI GİRİNİZ :";CRE
INPUT "r/R=0,5 İÇİN KORD/YARIÇAP ( c/R ) ORANINI GİRİNİZ :";CRF
INPUT "r/R=0,6 İÇİN KORD/YARIÇAP ( c/R ) ORANINI GİRİNİZ :";CRG
INPUT "r/R=0,7 İÇİN KORD/YARIÇAP ( c/R ) ORANINI GİRİNİZ :";CRH
INPUT "r/R=0,8 İÇİN KORD/YARIÇAP ( c/R ) ORANINI GİRİNİZ :";CRI
INPUT "r/R=0,9 İÇİN KORD/YARIÇAP ( c/R ) ORANINI GİRİNİZ :";CRJ

```

```

640 INPUT"r/R=0,99 İÇİN KORD/YARIÇAP ( c/R ) ORANINI GİRİNİZ :";CRK
650 CA=CRA*R
660 CB=CRB*R
670 CC=CRC*R
680 CD=CRD*R
690 CE=CRE*R
700 CF=CRF*R
710 CG=CRG*R
720 CH=CRH*R
730 CI=CRI*R
740 CJ=CRJ*R
750 CK=CRK*R
760 TT=N*TTEK
770 QT=N*QTEK
780 TTK=N*TC
790 TMK=N*QC
800 ST=(CK*R)+( .5*R*(CA-CK) )
810 STT=N*ST
820 INPUT"KALDIRMA KATSAYISI CL'yi GİRİNİZ :";CL
830 INPUT"SÜRÜKLEME KATSAYISI CD'yi GİRİNİZ :";CDD
840 L= .5*CL*RO*V*V*STT
850 DD= .5*CDD*RO*V*V*STT
860 Q= .5*RO*V*V
870 B=2*AAA
880 FX=RO*A*V*V*(1-AAA)*B
890 EK= .5*RO*V*V*V*3.14314*R*R
900 R1= .1*R:A1=(CB*R1)+( .5*R1*(CA-CB) ):ATZ1=N*A1:AR1=3.14314*R1*R1:FX1=RO*AR1*V
V*(1-AAA)*B:P1=FX1/AR1
910 R2= .2*R:A2=(CC*R2)+( .5*R2*(CA-CC) ):ATZ2=N*A2:AR2=3.14314*R2*R2:FX2=RO*AR2*V
V*(1-AAA)*B:P2=FX2/AR2
920 R3= .3*R:A3=(CD*R3)+( .5*R3*(CA-CD) ):ATZ3=N*A3:AR3=3.14314*R3*R3:FX3=RO*AR3*V
V*(1-AAA)*B:P3=FX3/AR3
930 R4= .4*R:A4=(CE*R4)+( .5*R4*(CA-CE) ):ATZ4=N*A4:AR4=3.14314*R4*R4:FX4=RO*AR4*V
V*(1-AAA)*B:P4=FX4/AR4
940 R5= .5*R:A5=(CF*R5)+( .5*R5*(CA-CF) ):ATZ5=N*A5:AR5=3.14314*R5*R5:FX5=RO*AR5*V
V*(1-AAA)*B:P5=FX5/AR5
950 R6= .6*R:A6=(CG*R6)+( .5*R6*(CA-CG) ):ATZ6=N*A6:AR6=3.14314*R6*R6:FX6=RO*AR6*V
V*(1-AAA)*B:P6=FX6/AR6
960 R7= .7*R:A7=(CH*R7)+( .5*R7*(CA-CH) ):ATZ7=N*A7:AR7=3.14314*R7*R7:FX7=RO*AR7*V
V*(1-AAA)*B:P7=FX7/AR7
970 R8= .8*R:A8=(CI*R8)+( .5*R8*(CA-CI) ):ATZ8=N*A8:AR8=3.14314*R8*R8:FX8=RO*AR8*V
V*(1-AAA)*B:P8=FX8/AR8
980 R9= .9*R:A9=(CJ*R9)+( .5*R9*(CA-CJ) ):ATZ9=N*A9:AR9=3.14314*R9*R9:FX9=RO*AR9*V
V*(1-AAA)*B:P9=FX9/AR9
990 R10= .99*R:A10=(CK*R10)+( .5*R10*(CA-CK) ):ATZ10=N*A10:AR10=3.14314*R10*R10:F
0=RO*AR10*V*V*(1-AAA)*B:P10=FX10/AR10
1000 INPUT"MiL MALZEMESİNİN EMNİYETLİ BURULMA GERİLMESİ (daN/cm2) GİRİNİZ :";E
1010 MT=QT*10
1020 DMN=(MT/(.2*EM))^(1/3)
1030 CLS
1040 PRINT" SEÇİLEN NACA PROFİLİNE GÖRE SIRASIYLA KORD (c) UZUNLUĞUNA B
LI,YÜZDE OLARAK VERİLEN X,Y (Üst Yüzey) VE Y (Alt Yüzey) KORDİNATLARINI GİRİN
"
1050 PRINT"*****"
*****"
1060 INPUT"X EKSENİNİN KORDİNATINI (% c) GİRİNİZ :";XA
1070 INPUT"X EKSENİNİN KORDİNATINI (% c) GİRİNİZ :";XB
1080 INPUT"X EKSENİNİN KORDİNATINI (% c) GİRİNİZ :";XC
1090 INPUT"X EKSENİNİN KORDİNATINI (% c) GİRİNİZ :";XD
1100 INPUT"X EKSENİNİN KORDİNATINI (% c) GİRİNİZ :";XE
1110 INPUT"X EKSENİNİN KORDİNATINI (% c) GİRİNİZ :";XF

```



X9=XJ\*CA/100:PY9=UYJ\*CA/100:NY9=AYJ\*CA/100  
X10=XK\*CA/100:PY10=UYK\*CA/100:NY10=AYK\*CA/100  
X11=XL\*CA/100:PY11=UYL\*CA/100:NY11=AYL\*CA/100  
X12=XM\*CA/100:PY12=UYM\*CA/100:NY12=AYM\*CA/100  
X13=XN\*CA/100:PY13=UYN\*CA/100:NY13=AYN\*CA/100  
X14=XO\*CA/100:PY14=UYO\*CA/100:NY14=AYO\*CA/100  
X15=XP\*CA/100:PY15=UYP\*CA/100:NY15=AYP\*CA/100  
X16=XR\*CA/100:PY16=UYR\*CA/100:NY16=AYR\*CA/100  
X17=XS\*CA/100:PY17=UYS\*CA/100:NY17=AYS\*CA/100  
PRINT "\*\*\*\*\*"  
\*\*\*\*\*"  
X19=XA\*CB/100:PY19=UYA\*CB/100:NY19=AYA\*CB/100  
X20=XB\*CB/100:PY20=UYB\*CB/100:NY20=AYB\*CB/100  
X21=XC\*CB/100:PY21=UYC\*CB/100:NY21=AYC\*CB/100  
X22=XD\*CB/100:PY22=UYD\*CB/100:NY22=AYD\*CB/100  
X23=XE\*CB/100:PY23=UYE\*CB/100:NY23=AYE\*CB/100  
X24=XF\*CB/100:PY24=UYF\*CB/100:NY24=AYF\*CB/100  
X25=XG\*CB/100:PY25=UYG\*CB/100:NY25=AYG\*CB/100  
X26=XH\*CB/100:PY26=UYH\*CB/100:NY26=AYH\*CB/100  
X27=XI\*CB/100:PY27=UYI\*CB/100:NY27=AYI\*CB/100  
X28=XJ\*CB/100:PY28=UYJ\*CB/100:NY28=AYJ\*CB/100  
X29=XK\*CB/100:PY29=UYK\*CB/100:NY29=AYK\*CB/100  
X30=XL\*CB/100:PY30=UYL\*CB/100:NY30=AYL\*CB/100  
X31=XM\*CB/100:PY31=UYM\*CB/100:NY31=AYM\*CB/100  
X32=XN\*CB/100:PY32=UYN\*CB/100:NY32=AYN\*CB/100  
X33=XO\*CB/100:PY33=UYO\*CB/100:NY33=AYO\*CB/100  
X34=XP\*CB/100:PY34=UYP\*CB/100:NY34=AYP\*CB/100  
X35=XR\*CB/100:PY35=UYR\*CB/100:NY35=AYR\*CB/100  
X36=XS\*CB/100:PY36=UYS\*CB/100:NY36=AYS\*CB/100  
PRINT "\*\*\*\*\*"  
\*\*\*\*\*"  
X39=XA\*CC/100:PY39=UYA\*CC/100:NY39=AYA\*CC/100  
X40=XB\*CC/100:PY40=UYB\*CC/100:NY40=AYB\*CC/100  
X41=XC\*CC/100:PY41=UYC\*CC/100:NY41=AYC\*CC/100  
X42=XD\*CC/100:PY42=UYD\*CC/100:NY42=AYD\*CC/100  
X43=XE\*CC/100:PY43=UYE\*CC/100:NY43=AYE\*CC/100  
X44=XF\*CC/100:PY44=UYF\*CC/100:NY44=AYF\*CC/100  
X45=XG\*CC/100:PY45=UYG\*CC/100:NY45=AYG\*CC/100  
X46=XH\*CC/100:PY46=UYH\*CC/100:NY46=AYH\*CC/100  
X47=XI\*CC/100:PY47=UYI\*CC/100:NY47=AYI\*CC/100  
X48=XJ\*CC/100:PY48=UYJ\*CC/100:NY48=AYJ\*CC/100  
X49=XK\*CC/100:PY49=UYK\*CC/100:NY49=AYK\*CC/100  
X50=XL\*CC/100:PY50=UYL\*CC/100:NY50=AYL\*CC/100  
X51=XM\*CC/100:PY51=UYM\*CC/100:NY51=AYM\*CC/100  
X52=XN\*CC/100:PY52=UYN\*CC/100:NY52=AYN\*CC/100  
X53=XO\*CC/100:PY53=UYO\*CC/100:NY53=AYO\*CC/100  
X54=XP\*CC/100:PY54=UYP\*CC/100:NY54=AYP\*CC/100  
X55=XR\*CC/100:PY55=UYR\*CC/100:NY55=AYR\*CC/100  
X56=XS\*CC/100:PY56=UYS\*CC/100:NY56=AYS\*CC/100  
PRINT "\*\*\*\*\*"  
\*\*\*\*\*"  
X58=XA\*CD/100:PY58=UYA\*CD/100:NY58=AYA\*CD/100  
X59=XB\*CD/100:PY59=UYB\*CD/100:NY59=AYB\*CD/100  
X60=XC\*CD/100:PY60=UYC\*CD/100:NY60=AYC\*CD/100  
X61=XD\*CD/100:PY61=UYD\*CD/100:NY61=AYD\*CD/100  
X62=XE\*CD/100:PY62=UYE\*CD/100:NY62=AYE\*CD/100  
X63=XF\*CD/100:PY63=UYF\*CD/100:NY63=AYF\*CD/100  
X64=XG\*CD/100:PY64=UYG\*CD/100:NY64=AYG\*CD/100  
X65=XH\*CD/100:PY65=UYH\*CD/100:NY65=AYH\*CD/100  
X66=XI\*CD/100:PY66=UYI\*CD/100:NY66=AYI\*CD/100  
X67=XJ\*CD/100:PY67=UYJ\*CD/100:NY67=AYJ\*CD/100

X68=XK\*CD/100:PY68=UYK\*CD/100:NY68=AYK\*CD/100  
X69=XL\*CD/100:PY69=UYL\*CD/100:NY69=AYL\*CD/100  
X70=XM\*CD/100:PY70=UYM\*CD/100:NY70=AYM\*CD/100  
X71=XN\*CD/100:PY71=UYN\*CD/100:NY71=AYN\*CD/100  
X72=XO\*CD/100:PY72=UYO\*CD/100:NY72=AYO\*CD/100  
X73=XP\*CD/100:PY73=UYP\*CD/100:NY73=AYP\*CD/100  
X74=XR\*CD/100:PY74=UYR\*CD/100:NY74=AYR\*CD/100  
X75=XS\*CD/100:PY75=UYS\*CD/100:NY75=AYS\*CD/100  
PRINT "\*\*\*\*\*"  
\*\*\*\*\*"  
X77=XA\*CE/100:PY77=UYA\*CE/100:NY77=AYA\*CE/100  
X78=XB\*CE/100:PY78=UYB\*CE/100:NY78=AYB\*CE/100  
X79=XC\*CE/100:PY79=UYC\*CE/100:NY79=AYC\*CE/100  
X80=XD\*CE/100:PY80=UYD\*CE/100:NY80=AYD\*CE/100  
X81=XE\*CE/100:PY81=UYE\*CE/100:NY81=AYE\*CE/100  
X82=XF\*CE/100:PY82=UYF\*CE/100:NY82=AYF\*CE/100  
X83=XG\*CE/100:PY83=UYG\*CE/100:NY83=AYG\*CE/100  
X84=XH\*CE/100:PY84=UYH\*CE/100:NY84=AYH\*CE/100  
X85=XI\*CE/100:PY85=UYI\*CE/100:NY85=AYI\*CE/100  
X86=XJ\*CE/100:PY86=UYJ\*CE/100:NY86=AYJ\*CE/100  
X87=XK\*CE/100:PY87=UYK\*CE/100:NY87=AYK\*CE/100  
X88=XL\*CE/100:PY88=UYL\*CE/100:NY88=AYL\*CE/100  
X89=XM\*CE/100:PY89=UYM\*CE/100:NY89=AYM\*CE/100  
X90=XN\*CE/100:PY90=UYN\*CE/100:NY90=AYN\*CE/100  
X91=XO\*CE/100:PY91=UYO\*CE/100:NY91=AYO\*CE/100  
X92=XP\*CE/100:PY92=UYP\*CE/100:NY92=AYP\*CE/100  
X93=XR\*CE/100:PY93=UYR\*CE/100:NY93=AYR\*CE/100  
X94=XS\*CE/100:PY94=UYS\*CE/100:NY94=AYS\*CE/100  
PRINT "\*\*\*\*\*"  
\*\*\*\*\*"  
X96=XA\*CF/100:PY96=UYA\*CF/100:NY96=AYA\*CF/100  
X97=XB\*CF/100:PY97=UYB\*CF/100:NY97=AYB\*CF/100  
X98=XC\*CF/100:PY98=UYC\*CF/100:NY98=AYC\*CF/100  
X99=XD\*CF/100:PY99=UYD\*CF/100:NY99=AYD\*CF/100  
X100=XE\*CF/100:PY100=UYE\*CF/100:NY100=AYE\*CF/100  
X101=XF\*CF/100:PY101=UYF\*CF/100:NY101=AYF\*CF/100  
X102=XG\*CF/100:PY102=UYG\*CF/100:NY102=AYG\*CF/100  
X103=XH\*CF/100:PY103=UYH\*CF/100:NY103=AYH\*CF/100  
X104=XI\*CF/100:PY104=UYI\*CF/100:NY104=AYI\*CF/100  
X105=XJ\*CF/100:PY105=UYJ\*CF/100:NY105=AYJ\*CF/100  
X106=XK\*CF/100:PY106=UYK\*CF/100:NY106=AYK\*CF/100  
X107=XL\*CF/100:PY107=UYL\*CF/100:NY107=AYL\*CF/100  
X108=XM\*CF/100:PY108=UYM\*CF/100:NY108=AYM\*CF/100  
X109=XN\*CF/100:PY109=UYN\*CF/100:NY109=AYN\*CF/100  
X110=XO\*CF/100:PY110=UYO\*CF/100:NY110=AYO\*CF/100  
X111=XP\*CF/100:PY111=UYP\*CF/100:NY111=AYP\*CF/100  
X112=XR\*CF/100:PY112=UYR\*CF/100:NY112=AYR\*CF/100  
X113=XS\*CF/100:PY113=UYS\*CF/100:NY113=AYS\*CF/100  
PRINT "\*\*\*\*\*"  
\*\*\*\*\*"  
X115=XA\*CG/100:PY115=UYA\*CG/100:NY115=AYA\*CG/100  
X116=XB\*CG/100:PY116=UYB\*CG/100:NY116=AYB\*CG/100  
X117=XC\*CG/100:PY117=UYC\*CG/100:NY117=AYC\*CG/100  
X118=XD\*CG/100:PY118=UYD\*CG/100:NY118=AYD\*CG/100  
X119=XE\*CG/100:PY119=UYE\*CG/100:NY119=AYE\*CG/100  
X120=XF\*CG/100:PY120=UYF\*CG/100:NY120=AYF\*CG/100  
X121=XG\*CG/100:PY121=UYG\*CG/100:NY121=AYG\*CG/100  
X122=XH\*CG/100:PY122=UYH\*CG/100:NY122=AYH\*CG/100  
X123=XI\*CG/100:PY123=UYI\*CG/100:NY123=AYI\*CG/100  
X124=XJ\*CG/100:PY124=UYJ\*CG/100:NY124=AYJ\*CG/100  
X125=XK\*CG/100:PY125=UYK\*CG/100:NY125=AYK\*CG/100

X126=XL\*CG/100:PY126=UYL\*CG/100:NY126=AYL\*CG/100  
X127=XM\*CG/100:PY127=UYM\*CG/100:NY127=AYM\*CG/100  
X128=XN\*CG/100:PY128=UYN\*CG/100:NY128=AYN\*CG/100  
X129=XO\*CG/100:PY129=UYO\*CG/100:NY129=AYO\*CG/100  
X130=XP\*CG/100:PY130=UYP\*CG/100:NY130=AYP\*CG/100  
X131=XR\*CG/100:PY131=UYR\*CG/100:NY131=AYR\*CG/100  
X132=XS\*CG/100:PY132=UYS\*CG/100:NY132=AYS\*CG/100  
PRINT"\*\*\*\*\*"

\*\*\*\*\*"  
X134=XA\*CH/100:PY134=UYA\*CH/100:NY134=AYA\*CH/100  
X135=XB\*CH/100:PY135=UYB\*CH/100:NY135=AYB\*CH/100  
X136=XC\*CH/100:PY136=UYC\*CH/100:NY136=AYC\*CH/100  
X137=XD\*CH/100:PY137=UYD\*CH/100:NY137=AYD\*CH/100  
X138=XE\*CH/100:PY138=UYE\*CH/100:NY138=AYE\*CH/100  
X139=XF\*CH/100:PY139=UYF\*CH/100:NY139=AYF\*CH/100  
X140=XG\*CH/100:PY140=UYG\*CH/100:NY140=AYG\*CH/100  
X141=XH\*CH/100:PY141=UYH\*CH/100:NY141=AYH\*CH/100  
X142=XI\*CH/100:PY142=UYI\*CH/100:NY142=AYI\*CH/100  
X143=XJ\*CH/100:PY143=UYJ\*CH/100:NY143=AYJ\*CH/100  
X144=XK\*CH/100:PY144=UYK\*CH/100:NY144=AYK\*CH/100  
X145=XL\*CH/100:PY145=UYL\*CH/100:NY145=AYL\*CH/100  
X146=XM\*CH/100:PY146=UYM\*CH/100:NY146=AYM\*CH/100  
X147=XN\*CH/100:PY147=UYN\*CH/100:NY147=AYN\*CH/100  
X148=XO\*CH/100:PY148=UYO\*CH/100:NY148=AYO\*CH/100  
X149=XP\*CH/100:PY149=UYP\*CH/100:NY149=AYP\*CH/100  
X150=XR\*CH/100:PY150=UYR\*CH/100:NY150=AYR\*CH/100  
X151=XS\*CH/100:PY151=UYS\*CH/100:NY151=AYS\*CH/100  
PRINT"\*\*\*\*\*"

\*\*\*\*\*"  
X153=XA\*CI/100:PY153=UYA\*CI/100:NY153=AYA\*CI/100  
X154=XB\*CI/100:PY154=UYB\*CI/100:NY154=AYB\*CI/100  
X155=XC\*CI/100:PY155=UYC\*CI/100:NY155=AYC\*CI/100  
X156=XD\*CI/100:PY156=UYD\*CI/100:NY156=AYD\*CI/100  
X157=XE\*CI/100:PY157=UYE\*CI/100:NY157=AYE\*CI/100  
X158=XF\*CI/100:PY158=UYF\*CI/100:NY158=AYF\*CI/100  
X159=XG\*CI/100:PY159=UYG\*CI/100:NY159=AYG\*CI/100  
X160=XH\*CI/100:PY160=UYH\*CI/100:NY160=AYH\*CI/100  
X161=XI\*CI/100:PY161=UYI\*CI/100:NY161=AYI\*CI/100  
X162=XJ\*CI/100:PY162=UYJ\*CI/100:NY162=AYJ\*CI/100  
X163=XK\*CI/100:PY163=UYK\*CI/100:NY163=AYK\*CI/100  
X164=XL\*CI/100:PY164=UYL\*CI/100:NY164=AYL\*CI/100  
X165=XM\*CI/100:PY165=UYM\*CI/100:NY165=AYM\*CI/100  
X166=XN\*CI/100:PY166=UYN\*CI/100:NY166=AYN\*CI/100  
X167=XO\*CI/100:PY167=UYO\*CI/100:NY167=AYO\*CI/100  
X168=XP\*CI/100:PY168=UYP\*CI/100:NY168=AYP\*CI/100  
X169=XR\*CI/100:PY169=UYR\*CI/100:NY169=AYR\*CI/100  
X170=XS\*CI/100:PY170=UYS\*CI/100:NY170=AYS\*CI/100  
PRINT"\*\*\*\*\*"

\*\*\*\*\*"  
X171=XA\*CJ/100:PY171=UYA\*CJ/100:NY171=AYA\*CJ/100  
X172=XB\*CJ/100:PY172=UYB\*CJ/100:NY172=AYB\*CJ/100  
X173=XC\*CJ/100:PY173=UYC\*CJ/100:NY173=AYC\*CJ/100  
X174=XD\*CJ/100:PY174=UYD\*CJ/100:NY174=AYD\*CJ/100  
X175=XE\*CJ/100:PY175=UYE\*CJ/100:NY175=AYE\*CJ/100  
X176=XF\*CJ/100:PY176=UYF\*CJ/100:NY176=AYF\*CJ/100  
X177=XG\*CJ/100:PY177=UYG\*CJ/100:NY177=AYG\*CJ/100  
X178=XH\*CJ/100:PY178=UYH\*CJ/100:NY178=AYH\*CJ/100  
X179=XI\*CJ/100:PY179=UYI\*CJ/100:NY179=AYI\*CJ/100  
X180=XJ\*CJ/100:PY180=UYJ\*CJ/100:NY180=AYJ\*CJ/100  
X181=XK\*CJ/100:PY181=UYK\*CJ/100:NY181=AYK\*CJ/100  
X182=XL\*CJ/100:PY182=UYL\*CJ/100:NY182=AYL\*CJ/100

X183=XM\*CJ/100:PY183=UYM\*CJ/100:NY183=AYM\*CJ/100  
X184=XN\*CJ/100:PY184=UYN\*CJ/100:NY184=AYN\*CJ/100  
X185=XO\*CJ/100:PY185=UYO\*CJ/100:NY185=AYO\*CJ/100  
X186=XP\*CJ/100:PY186=UYP\*CJ/100:NY186=AYP\*CJ/100  
X187=XR\*CJ/100:PY187=UYR\*CJ/100:NY187=AYR\*CJ/100  
X188=XS\*CJ/100:PY188=UYS\*CJ/100:NY188=AYS\*CJ/100  
PRINT"\*\*\*\*\*"

\*\*\*\*\*  
X190=XA\*CK/100:PY190=UYA\*CK/100:NY190=AYA\*CK/100  
X191=XB\*CK/100:PY191=UYB\*CK/100:NY191=AYB\*CK/100  
X192=XC\*CK/100:PY192=UYC\*CK/100:NY192=AYC\*CK/100  
X193=XD\*CK/100:PY193=UYD\*CK/100:NY193=AYD\*CK/100  
X194=XE\*CK/100:PY194=UYE\*CK/100:NY194=AYE\*CK/100  
X195=XF\*CK/100:PY195=UYF\*CK/100:NY195=AYF\*CK/100  
X196=XG\*CK/100:PY196=UYG\*CK/100:NY196=AYG\*CK/100  
X197=XH\*CK/100:PY197=UYH\*CK/100:NY197=AYH\*CK/100  
X198=XI\*CK/100:PY198=UYI\*CK/100:NY198=AYI\*CK/100  
X199=XJ\*CK/100:PY199=UYJ\*CK/100:NY199=AYJ\*CK/100  
X200=XK\*CK/100:PY200=UYK\*CK/100:NY200=AYK\*CK/100  
X201=XL\*CK/100:PY201=UYL\*CK/100:NY201=AYL\*CK/100  
X202=XM\*CK/100:PY202=UYM\*CK/100:NY202=AYM\*CK/100  
X203=XN\*CK/100:PY203=UYN\*CK/100:NY203=AYN\*CK/100  
X204=XO\*CK/100:PY204=UYO\*CK/100:NY204=AYO\*CK/100  
X205=XP\*CK/100:PY205=UYP\*CK/100:NY205=AYP\*CK/100  
X206=XR\*CK/100:PY206=UYR\*CK/100:NY206=AYR\*CK/100  
X207=XS\*CK/100:PY207=UYS\*CK/100:NY207=AYS\*CK/100  
PRINT"\*\*\*\*\*"

\*\*\*\*\*  
PRINT"TÜRBİN GÜCÜ (kW).....";P  
PRINT"HAVANIN YOĞUNLUĞU (kg/m3).....";RO  
PRINT"ROTOR YARIÇAPI (m).....";R  
PRINT"ROTOR ÇAPI (m).....";D  
PRINT"ROTOR ALANI (m2).....";A  
PRINT"ROTORSUZ DURUMDA KÜTLESEL DEBİ (kg/s).....";MM  
PRINT"UÇ HIZ ORANI.....";LA  
PRINT"KANAT SAYISI.....";N  
PRINT"ROTORUN AÇISAL HIZI (1/s).....";OM  
PRINT"KULLANILAN RÜZGAR TÜRBİNİ SAYISI.....";NN  
PRINT"TOPLAM ROTOR ALANI (m2).....";AT  
PRINT"ROTOR DEVRİ (dev/dak).....";NNN  
PRINT"DIŞLI KUTUSUNDAKİ ÇEVİRİM ORANI.....";I  
PRINT"TÜRBİN GÜCÜ (BG).....";NEBG  
PRINT"TÜRBİN GÜCÜ (kW).....";NEKW  
PRINT"TÜRBİN GÜCÜ, BETZ'e GÖRE (kW).....";NEBT  
PRINT"TÜRBİN GÜCÜ, NOETZLIN'e GÖRE (kW).....";NENO  
PRINT"RÜZGARIN GETİRDİĞİ GÜÇ (W).....";RGP  
PRINT"FAYDALI RÜZGAR GÜCÜ (W).....";FRG  
PRINT"ROTORLU DURUMDA KÜTLESEL DEBİ (kg/s).....";MMRD  
PRINT"ÇEVRESEL HIZ (m/s).....";U  
PRINT"API'ya GÖRE RÜZGAR KUVVETİ (N).....";FAPI  
PRINT"ABS'ye GÖRE RÜZGAR KUVVETİ (N).....";FABS  
PRINT"İLERLEME HIZ ORANI.....";J  
PRINT"GİRİŞİM FAKTÖRÜ.....";AAA  
PRINT"TEK BİR KANADA AİT TRAST (N).....";TTEK  
PRINT"TEK BİR KANADA AİT MOMENT (Nm).....";QTEK  
PRINT"ROTOR VERİMİ.....";ETA  
PRINT"TRAST KATSAYISI.....";TC  
PRINT"MOMENT KATSAYISI.....";QC  
PRINT"TOPLAM TRAST (N).....";TT  
PRINT"TOPLAM MOMENT (Nm).....";QT  
PRINT"TOPLAM TRAST KATSAYISI.....";TTK

```
PRINT"TOPLAM MOMENT KATSAYISI.....": ;TMK
PRINT"KANADIN YÜZEY ALANI (m2).....": ;ST
PRINT"TOPLAM KANAT YÜZEY ALANI (m2).....": ;STT
PRINT"KALDIRMA KUVVETİ (N).....": ;L
PRINT"SÜRÜKLEME KUVVETİ (N).....": ;DD
PRINT"DİNAMİK BASINÇ (N/m2).....": ;Q
PRINT"EKSENEL TRAST (N).....": ;FX
PRINT"HAVANIN KİNETİK ENERJİSİ (W).....": ;EK
PRINT"MINİMUM MİL ÇAPI (cm).....": ;DMIN
PRINT"r/R=0,1 İÇİN KANAT YÜZEY ALANI (m2).....": ;A1
PRINT"r/R=0,1 İÇİN TOPLAM KANAT YÜZEY ALANI (m2).....": ;ATZ1
PRINT"r/R=0,1 İÇİN ROTOR ALANI (m2).....": ;AR1
PRINT"r/R=0,1 İÇİN EKSENEL TRAST (N).....": ;FX1
PRINT"r/R=0,1 İÇİN YÜZEY GERİLMESİ (N/m2).....": ;P1
PRINT"r/R=0,2 İÇİN KANAT YÜZEY ALANI (m2).....": ;A2
PRINT"r/R=0,2 İÇİN TOPLAM KANAT YÜZEY ALANI (m2).....": ;ATZ2
PRINT"r/R=0,2 İÇİN ROTOR ALANI (m2).....": ;AR2
PRINT"r/R=0,2 İÇİN EKSENEL TRAST (N).....": ;FX2
PRINT"r/R=0,2 İÇİN YÜZEY GERİLMESİ (N/m2).....": ;P2
PRINT"r/R=0,3 İÇİN KANAT YÜZEY ALANI (m2).....": ;A3
PRINT"r/R=0,3 İÇİN TOPLAM KANAT YÜZEY ALANI (m2).....": ;ATZ3
PRINT"r/R=0,3 İÇİN ROTOR ALANI (m2).....": ;AR3
PRINT"r/R=0,3 İÇİN EKSENEL TRAST (N).....": ;FX3
PRINT"r/R=0,3 İÇİN YÜZEY GERİLMESİ (N/m2).....": ;P3
PRINT"r/R=0,4 İÇİN KANAT YÜZEY ALANI (m2).....": ;A4
PRINT"r/R=0,4 İÇİN TOPLAM KANAT YÜZEY ALANI (m2).....": ;ATZ4
PRINT"r/R=0,4 İÇİN ROTOR ALANI (m2).....": ;AR4
PRINT"r/R=0,4 İÇİN EKSENEL TRAST (N).....": ;FX4
PRINT"r/R=0,4 İÇİN YÜZEY GERİLMESİ (N/m2).....": ;P4
PRINT"r/R=0,5 İÇİN KANAT YÜZEY ALANI (m2).....": ;A5
PRINT"r/R=0,5 İÇİN TOPLAM KANAT YÜZEY ALANI (m2).....": ;ATZ5
PRINT"r/R=0,5 İÇİN ROTOR ALANI (m2).....": ;AR5
PRINT"r/R=0,5 İÇİN EKSENEL TRAST (N).....": ;FX5
PRINT"r/R=0,5 İÇİN YÜZEY GERİLMESİ (N/m2).....": ;P5
PRINT"r/R=0,6 İÇİN KANAT YÜZEY ALANI (m2).....": ;A6
PRINT"r/R=0,6 İÇİN TOPLAM KANAT YÜZEY ALANI (m2).....": ;ATZ6
PRINT"r/R=0,6 İÇİN ROTOR ALANI (m2).....": ;AR6
PRINT"r/R=0,6 İÇİN EKSENEL TRAST (N).....": ;FX6
PRINT"r/R=0,6 İÇİN YÜZEY GERİLMESİ (N/m2).....": ;P6
PRINT"r/R=0,7 İÇİN KANAT YÜZEY ALANI (m2).....": ;A7
PRINT"r/R=0,7 İÇİN TOPLAM KANAT YÜZEY ALANI (m2).....": ;ATZ7
PRINT"r/R=0,7 İÇİN ROTOR ALANI (m2).....": ;AR7
PRINT"r/R=0,7 İÇİN EKSENEL TRAST (N).....": ;FX7
PRINT"r/R=0,7 İÇİN YÜZEY GERİLMESİ (N/m2).....": ;P7
PRINT"r/R=0,8 İÇİN KANAT YÜZEY ALANI (m2).....": ;A8
PRINT"r/R=0,8 İÇİN TOPLAM KANAT YÜZEY ALANI (m2).....": ;ATZ8
PRINT"r/R=0,8 İÇİN ROTOR ALANI (m2).....": ;AR8
PRINT"r/R=0,8 İÇİN EKSENEL TRAST (N).....": ;FX8
PRINT"r/R=0,8 İÇİN YÜZEY GERİLMESİ (N/m2).....": ;P8
PRINT"r/R=0,9 İÇİN KANAT YÜZEY ALANI (m2).....": ;A9
PRINT"r/R=0,9 İÇİN TOPLAM KANAT YÜZEY ALANI (m2).....": ;ATZ9
PRINT"r/R=0,9 İÇİN ROTOR ALANI (m2).....": ;AR9
PRINT"r/R=0,9 İÇİN EKSENEL TRAST (N).....": ;FX9
PRINT"r/R=0,9 İÇİN YÜZEY GERİLMESİ (N/m2).....": ;P9
PRINT"r/R=0,99 İÇİN KANAT YÜZEY ALANI (m2).....": ;A10
PRINT"r/R=0,99 İÇİN TOPLAM KANAT YÜZEY ALANI (m2).....": ;ATZ10
PRINT"r/R=0,99 İÇİN ROTOR ALANI (m2).....": ;AR10
PRINT"r/R=0,99 İÇİN EKSENEL TRAST (N).....": ;FX10
PRINT"r/R=0,99 İÇİN YÜZEY GERİLMESİ (N/m2).....": ;P10
PRINT"KANAT PROFİL KORDİNATLARI"
PRINT"r/R=0 İÇİN KORDİNATLAR"
```







```
PRINT"X EKSENİ=";X183;:PRINT"Y,ÜST YÜZEY=";PY183;:PRINT"Y,ALT YÜZEY=";NY183
PRINT"X EKSENİ=";X184;:PRINT"Y,ÜST YÜZEY=";PY184;:PRINT"Y,ALT YÜZEY=";NY184
PRINT"X EKSENİ=";X185;:PRINT"Y,ÜST YÜZEY=";PY185;:PRINT"Y,ALT YÜZEY=";NY185
PRINT"X EKSENİ=";X186;:PRINT"Y,ÜST YÜZEY=";PY186;:PRINT"Y,ALT YÜZEY=";NY186
PRINT"X EKSENİ=";X187;:PRINT"Y,ÜST YÜZEY=";PY187;:PRINT"Y,ALT YÜZEY=";NY187
PRINT"X EKSENİ=";X188;:PRINT"Y,ÜST YÜZEY=";PY188;:PRINT"Y,ALT YÜZEY=";NY188
PRINT"r/R=0,99 İÇİN KORDİNATLAR"
PRINT"X EKSENİ=";X190;:PRINT"Y,ÜST YÜZEY=";PY190;:PRINT"Y,ALT YÜZEY=";NY190
PRINT"X EKSENİ=";X191;:PRINT"Y,ÜST YÜZEY=";PY191;:PRINT"Y,ALT YÜZEY=";NY191
PRINT"X EKSENİ=";X192;:PRINT"Y,ÜST YÜZEY=";PY192;:PRINT"Y,ALT YÜZEY=";NY192
PRINT"X EKSENİ=";X193;:PRINT"Y,ÜST YÜZEY=";PY193;:PRINT"Y,ALT YÜZEY=";NY193
PRINT"X EKSENİ=";X194;:PRINT"Y,ÜST YÜZEY=";PY194;:PRINT"Y,ALT YÜZEY=";NY194
PRINT"X EKSENİ=";X195;:PRINT"Y,ÜST YÜZEY=";PY195;:PRINT"Y,ALT YÜZEY=";NY195
PRINT"X EKSENİ=";X196;:PRINT"Y,ÜST YÜZEY=";PY196;:PRINT"Y,ALT YÜZEY=";NY196
PRINT"X EKSENİ=";X197;:PRINT"Y,ÜST YÜZEY=";PY197;:PRINT"Y,ALT YÜZEY=";NY197
PRINT"X EKSENİ=";X198;:PRINT"Y,ÜST YÜZEY=";PY198;:PRINT"Y,ALT YÜZEY=";NY198
PRINT"X EKSENİ=";X199;:PRINT"Y,ÜST YÜZEY=";PY199;:PRINT"Y,ALT YÜZEY=";NY199
PRINT"X EKSENİ=";X200;:PRINT"Y,ÜST YÜZEY=";PY200;:PRINT"Y,ALT YÜZEY=";NY200
PRINT"X EKSENİ=";X201;:PRINT"Y,ÜST YÜZEY=";PY201;:PRINT"Y,ALT YÜZEY=";NY201
PRINT"X EKSENİ=";X202;:PRINT"Y,ÜST YÜZEY=";PY202;:PRINT"Y,ALT YÜZEY=";NY202
PRINT"X EKSENİ=";X203;:PRINT"Y,ÜST YÜZEY=";PY203;:PRINT"Y,ALT YÜZEY=";NY203
PRINT"X EKSENİ=";X204;:PRINT"Y,ÜST YÜZEY=";PY204;:PRINT"Y,ALT YÜZEY=";NY204
PRINT"X EKSENİ=";X205;:PRINT"Y,ÜST YÜZEY=";PY205;:PRINT"Y,ALT YÜZEY=";NY205
PRINT"X EKSENİ=";X206;:PRINT"Y,ÜST YÜZEY=";PY206;:PRINT"Y,ALT YÜZEY=";NY206
PRINT"X EKSENİ=";X207;:PRINT"Y,ÜST YÜZEY=";PY207;:PRINT"Y,ALT YÜZEY=";NY207
```

TÜRBİN GÜCÜ (kW).....	100
HAVANIN YOĞUNLUĞU (kg/m <sup>3</sup> ).....	1.208048
ROTOR YARIÇAPI (m).....	40.63855
ROTOR ÇAPI (m).....	81.2771
ROTOR ALANI (m <sup>2</sup> ).....	5190.87
ROTORSUZ DURUMDA KÜTLESEL DEBİ (kg/s).....	28218.69
UÇ HIZ ORANI.....	7
KANAT SAYISI.....	2
ROTORUN AÇISAL HIZI (1/s).....	7751261
KULLANILAN RÜZGAR TÜRBİNİ SAYISI.....	7
TOPLAM ROTOR ALANI (m <sup>2</sup> ).....	36336.69
ROTOR DEVRİ (dev/dak).....	7.398265
DIŞLI KUTUSUNDAKI ÇEVİRİM ORANI.....	405.5005
TÜRBİN GÜCÜ (BG).....	117.9859
TÜRBİN GÜCÜ (kW).....	87.28546
TÜRBİN GÜCÜ, BETZ'e GÖRE (kW).....	128.8213
TÜRBİN GÜCÜ, NOETZLIN'e GÖRE (kW).....	111.3642
RÜZGARIN GETİRDİĞİ GÜÇ (W).....	285714.3
FAYDALI RÜZGAR GÜCÜ (W).....	169312.2
ROTORLU DURUMDA KÜTLESEL DEBİ (kg/s).....	18812.46
ÇEVRESEL HIZ (m/s).....	63
API'ya GÖRE RÜZGAR KUVVETİ (N).....	3174.388
ABS'ye GÖRE RÜZGAR KUVVETİ (N).....	4682.3
İLERLEME HIZ ORANI.....	7.4836E-03
GİRİŞİM FAKTÖRÜ.....	3333333
TEK BİR KANADA AIT TRAST (N).....	56437.39
TEK BİR KANADA AIT MOMENT (Nm).....	2293534
ROTOR VERİMİ.....	1428571
TRAST KATSAYISI.....	3492378
MOMENT KATSAYISI.....	1746189
TOPLAM TRAST (N).....	112874.8
TOPLAM MOMENT (Nm).....	4587067
TOPLAM TRAST KATSAYISI.....	6984755
TOPLAM MOMENT KATSAYISI.....	3492378
KANADIN YÜZEY ALANI (m <sup>2</sup> ).....	226.2544
TOPLAM KANAT YÜZEY ALANI (m <sup>2</sup> ).....	452.5088
KALDIRMA KUVVETİ (N).....	5534.855
SÜRÜKLEME KUVVETİ (N).....	44.27855
DİNAMİK BASINÇ (N/m <sup>2</sup> ).....	12.23149
EKSENEL TRAST (N).....	56437.39
HAVANIN KİNETİK ENERJİSİ (W).....	285714.3
MİNİMUM MİL ÇAPI (cm).....	68.93965
r/R=0,1 İÇİN KANAT YÜZEY ALANI (m <sup>2</sup> ).....	40.87443
r/R=0,1 İÇİN TOPLAM KANAT YÜZEY ALANI (m <sup>2</sup> ).....	81.74885
r/R=0,1 İÇİN ROTOR ALANI (m <sup>2</sup> ).....	51.90871
r/R=0,1 İÇİN EKSENEL TRAST (N).....	564.374
r/R=0,1 İÇİN YÜZEY GERİLMESİ (N/m <sup>2</sup> ).....	10.87244
r/R=0,2 İÇİN KANAT YÜZEY ALANI (m <sup>2</sup> ).....	77.78526
r/R=0,2 İÇİN TOPLAM KANAT YÜZEY ALANI (m <sup>2</sup> ).....	155.5705
r/R=0,2 İÇİN ROTOR ALANI (m <sup>2</sup> ).....	207.6348
r/R=0,2 İÇİN EKSENEL TRAST (N).....	2257.496
r/R=0,2 İÇİN YÜZEY GERİLMESİ (N/m <sup>2</sup> ).....	10.87244
r/R=0,3 İÇİN KANAT YÜZEY ALANI (m <sup>2</sup> ).....	104.7872
r/R=0,3 İÇİN TOPLAM KANAT YÜZEY ALANI (m <sup>2</sup> ).....	209.5743

r/R=0,3 için ROTOR ALANI (m <sup>2</sup> ).....	467.1783
r/R=0,3 için EKSENEL TRAST (N).....	5079.365
r/R=0,3 için YÜZEY GERİLMESİ (N/m <sup>2</sup> ).....	10.87244
r/R=0,4 için KANAT YÜZEY ALANI (m <sup>2</sup> ).....	128.8164
r/R=0,4 için TOPLAM KANAT YÜZEY ALANI (m <sup>2</sup> ).....	257.6327
r/R=0,4 için ROTOR ALANI (m <sup>2</sup> ).....	830.5393
r/R=0,4 için EKSENEL TRAST (N).....	9029.983
r/R=0,4 için YÜZEY GERİLMESİ (N/m <sup>2</sup> ).....	10.87244
r/R=0,5 için KANAT YÜZEY ALANI (m <sup>2</sup> ).....	151.1115
r/R=0,5 için TOPLAM KANAT YÜZEY ALANI (m <sup>2</sup> ).....	302.223
r/R=0,5 için ROTOR ALANI (m <sup>2</sup> ).....	1297.717
r/R=0,5 için EKSENEL TRAST (N).....	14109.35
r/R=0,5 için YÜZEY GERİLMESİ (N/m <sup>2</sup> ).....	10.87244
r/R=0,6 için KANAT YÜZEY ALANI (m <sup>2</sup> ).....	172.9112
r/R=0,6 için TOPLAM KANAT YÜZEY ALANI (m <sup>2</sup> ).....	345.8224
r/R=0,6 için ROTOR ALANI (m <sup>2</sup> ).....	1868.713
r/R=0,6 için EKSENEL TRAST (N).....	20317.46
r/R=0,6 için YÜZEY GERİLMESİ (N/m <sup>2</sup> ).....	10.87244
r/R=0,7 için KANAT YÜZEY ALANI (m <sup>2</sup> ).....	193.6374
r/R=0,7 için TOPLAM KANAT YÜZEY ALANI (m <sup>2</sup> ).....	387.2748
r/R=0,7 için ROTOR ALANI (m <sup>2</sup> ).....	2543.526
r/R=0,7 için EKSENEL TRAST (N).....	27654.32
r/R=0,7 için YÜZEY GERİLMESİ (N/m <sup>2</sup> ).....	10.87244
r/R=0,8 için KANAT YÜZEY ALANI (m <sup>2</sup> ).....	212.0516
r/R=0,8 için TOPLAM KANAT YÜZEY ALANI (m <sup>2</sup> ).....	424.1031
r/R=0,8 için ROTOR ALANI (m <sup>2</sup> ).....	3322.157
r/R=0,8 için EKSENEL TRAST (N).....	36119.93
r/R=0,8 için YÜZEY GERİLMESİ (N/m <sup>2</sup> ).....	10.87244
r/R=0,9 için KANAT YÜZEY ALANI (m <sup>2</sup> ).....	225.9241
r/R=0,9 için TOPLAM KANAT YÜZEY ALANI (m <sup>2</sup> ).....	451.8481
r/R=0,9 için ROTOR ALANI (m <sup>2</sup> ).....	4204.604
r/R=0,9 için EKSENEL TRAST (N).....	45714.28
r/R=0,9 için YÜZEY GERİLMESİ (N/m <sup>2</sup> ).....	10.87244
r/R=0,99 için KANAT YÜZEY ALANI (m <sup>2</sup> ).....	223.9918
r/R=0,99 için TOPLAM KANAT YÜZEY ALANI (m <sup>2</sup> ).....	447.9837
r/R=0,99 için ROTOR ALANI (m <sup>2</sup> ).....	5087.572
r/R=0,99 için EKSENEL TRAST (N).....	55314.28
r/R=0,99 için YÜZEY GERİLMESİ (N/m <sup>2</sup> ).....	10.87244

KANAT PROFİL KORDİNATLARI

r/R=0 için KORDİNATLAR

X=0	Y=0	Y=0
X=.1320753	Y=.3243769	Y=-.1891318
X=.2641506	Y=.4406032	Y=-.2620374
X=.5283012	Y=.6064897	Y=-.345509
X=.7924517	Y=.7301121	Y=-.3919994
X=1.056602	Y=.8283763	Y=-.4205278
X=1.584903	Y=.9794704	Y=-.4416598
X=2.113205	Y=1.083017	Y=-.43849
X=2.641506	Y=1.15381	Y=-.4205278
X=3.169807	Y=1.1886678	Y=-.3962259
X=4.22641	Y=1.1886678	Y=-.3433958
X=5.283012	Y=1.112602	Y=-.2873958
X=6.339614	Y=.9826401	Y=-.2261129
X=7.396216	Y=.8061876	Y=-.1637733

X=8.452819	Y=.5864143	Y=-.10883
X=9.509421	Y=.3254335	Y=-6.022633E-02
X=10.03772	Y=.1764526	Y=-3.803769E-02
X=10.56602	Y=0	Y=-1.690564E-02

r/R=0,1 İÇİN KORDINATLAR

X=0	Y=0	Y=0
X=.1193757	Y=.2931868	Y=-.1709461
X=.2387515	Y=.3982375	Y=-.2368415
X=.477503	Y=.5481734	Y=-.312287
X=.7162545	Y=.6599091	Y=-.3543072
X=.9550059	Y=.7487247	Y=-.3800924
X=1.432509	Y=.8852905	Y=-.3991925
X=1.910012	Y=.9787811	Y=-.3963275
X=2.387515	Y=1.042866	Y=-.3800924
X=2.865018	Y=1.074382	Y=-.3581272
X=3.820024	Y=1.074382	Y=-.310377
X=4.77503	Y=1.005621	Y=-.2597616
X=5.730036	Y=.8881555	Y=-.2043713
X=6.689042	Y=.7286695	Y=-.01481617
X=7.640048	Y=.5300283	Y=-9.836561E-02
X=8.595052	Y=.2941418	Y=-5.443534E-02
X=9.072556	Y=.159486	Y=-3.438021E-02
X=9.550059	Y=0	Y=-1.528009E-02

r/R=0,2 İÇİN KORDINATLAR

X=0	Y=0	Y=0
X=.1071842	Y=.2632443	Y=-.1534877
X=.2143684	Y=.3575664	Y=-.2126534
X=.4287367	Y=.4921897	Y=-.2803938
X=.643105	Y=.5925141	Y=-.3181226
X=.8575734	Y=.6722591	Y=-.3412744
X=1.28621	Y=.7948778	Y=-.3584238
X=1.714947	Y=.8789102	Y=-.3558515
X=2.143684	Y=.9363609	Y=-.3412744
X=2.57242	Y=.9646576	Y=-.3215525
X=3.429894	Y=.9646576	Y=-.2786789
X=4.287367	Y=.9029195	Y=-.2332328
X=5.14484	Y=.7974503	Y=-.1834993
X=6.002314	Y=.6542522	Y=-.1329084
X=6.859787	Y=.4758978	Y=-8.831976E-02
X=7.717261	Y=.2641018	Y=-4.887598E-02
X=8.145997	Y=.1431981	Y=-3.086904E-02
X=8.574734	Y=0	Y=-1.371957E-02

r/R=0,3 İÇİN KORDINATLAR

X=0	Y=0	Y=0
X=8.280105E-02	Y=.2033594	Y=-.1185711
X=.1656021	Y=.2762243	Y=-.1642773
X=.3301042	Y=.3802224	Y=-.2166075
X=.4968063	Y=.4577242	Y=-.2457535
X=.6624084	Y=.5193282	Y=-.2636383
X=.9936125	Y=.6140526	Y=-.2768867
X=1.324817	Y=.6789686	Y=-.2748995
X=1.656021	Y=.72335	Y=-.2636385
X=1.987225	Y=.7452093	Y=-.2484031
X=2.649634	Y=.7452093	Y=-.2152827

X=3.312042	Y=.697516	Y=-.1801751
X=3.97445	Y=.6160398	Y=-.1417554
X=4.636859	Y=.5054176	Y=-.1026733
X=5.299267	Y=.3676367	Y=-6.822806E-02
X=5.961675	Y=.2040218	Y=-3.755728E-02
X=6.29288	Y=.1106222	Y=-.0238467
X=6.624083	Y=0	Y=-1.659853E-02

r/R=0,4 İÇİN KORDINATLAR

X=0	Y=0	Y=0
X=6.603765E-02	Y=.1621885	Y=-9.456591E-02
X=.1320753	Y=.2203016	Y=-.1310187
X=.2641506	Y=.3032448	Y=-.1727545
X=.3962259	Y=.3650561	Y=-.1959997
X=.5382012	Y=.4141881	Y=-.2102639
X=.7924517	Y=.4897352	Y=-.2208299
X=1.056602	Y=.5415087	Y=-.219245
X=1.320753	Y=.5769048	Y=-.2102639
X=1.584903	Y=.5943388	Y=-.1981129
X=2.113205	Y=.5943388	Y=-.1716979
X=2.641506	Y=.5563011	Y=-.1436979
X=3.169807	Y=.4913201	Y=-.1130565
X=3.698108	Y=.4039938	Y=-8.188667E-02
X=4.22641	Y=.2932072	Y=-5.441502E-02
X=4.75471	Y=.1627168	Y=-3.011317E-02
X=5.0188861	Y=8.822629E-02	Y=-1.901884E-02
X=5.283012	Y=0	Y=-8.452819E-03

r/R=0,5 İÇİN KORDINATLAR

X=0	Y=0	Y=0
X=5.384608E-02	Y=.132246	Y=-7.710758E-02
X=.1076922	Y=.1796305	Y=-.1068306
X=.2153843	Y=.2472612	Y=-.1408613
X=.3230765	Y=.2976611	Y=-.1598152
X=.4307686	Y=.3377226	Y=-.1714459
X=.646153	Y=.3993226	Y=-.1800613
X=.8615382	Y=.4415379	Y=-.178769
X=1.076922	Y=.4703994	Y=-.1714459
X=1.292306	Y=.4846148	Y=-.1615382
X=1.723074	Y=.4846148	Y=-.1399998
X=2.153843	Y=.4535994	Y=-.1171691
X=2.584612	Y=.4006149	Y=-9.218448E-02
X=3.01538	Y=.3286765	Y=-6.676914E-02
X=3.446149	Y=.2390766	Y=-4.436917E-02
X=3.876918	Y=.1326767	Y=-2.455381E-02
X=4.092302	Y=7.193837E-02	Y=-1.550767E-02
X=4.307687	Y=0	Y=-6.892298E-02

r/R=0,6 İÇİN KORDINATLAR

X=0	Y=0	Y=0
X=4.521039E-02	Y=.1110367	Y=-6.474128E-02
X=9.042078E-02	Y=.1508219	Y=-8.969741E-02
X=.1808416	Y=.2076061	Y=-.1182704
X=.2712623	Y=.249923	Y=-.1341844
X=.3616831	Y=.2835596	Y=-.1439499
X=.5425246	Y=.3352803	Y=-.1511835
X=.7233663	Y=.3707252	Y=-.1500985

X=.9042078	Y=.394958	Y=-.1439499
X=1.085049	Y=.4068935	Y=-.1356312
X=1.446733	Y=.4068935	Y=-.117547
X=1.808416	Y=.3808523	Y=-9.837781E-02
X=2.170099	Y=.3363653	Y=-7.740019E-02
X=2.531782	Y=.2759642	Y=-5.606088E-02
X=2.893465	Y=.2007341	Y=-3.725336E-02
X=3.255148	Y=.1113984	Y=-2.061594E-02
X=3.43599	Y=6.040108E-02	Y=-1.302059E-02
X=3.616831	Y=0	Y=-5.78693E-03

r/R=0,7 İÇİN KORDİNATLAR

X=0	Y=0	Y=0
X=3.809865E-02	Y=9.357026E-02	Y=-5.455726E-02
X=7.619729E-02	Y=.1270971	Y=-7.558771E-02
X=.1523946	Y=.174949	Y=-9.966604E-02
X=.2285919	Y=.2106093	Y=-.1130768
X=.3047892	Y=.2389547	Y=-.1213061
X=.4571837	Y=.2825936	Y=-.1274019
X=.6055783	Y=.3124089	Y=-.1264875
X=.7619728	Y=.3328298	Y=-.1213061
X=.9143674	Y=.3428878	Y=-.1142959
X=1.219157	Y=.3428878	Y=-9.905648E-02
X=1.523946	Y=.320943	Y=-8.290264E-02
X=1.828735	Y=.2834539	Y=-6.522488E-02
X=2.133524	Y=.2325541	Y=-4.724232E-02
X=2.438313	Y=.169158	Y=-3.139328E-02
X=2.743102	Y=9.387506E-02	Y=-1.737298E-02
X=2.895497	Y=5.089978E-02	Y=-1.097241E-02
X=3.047891	Y=0	Y=-4.876626E-03

r/R=0,8 İÇİN KORDİNATLAR

X=0	Y=0	Y=0
X=.0309869	Y=7.610381E-02	Y=-4.437323E-02
X=6.197379E-02	Y=.1033723	Y=-.061478
X=.1239476	Y=.1422918	Y=-8.106171E-02
X=.1859214	Y=.1712956	Y=-.0919691
X=.2478952	Y=.1943498	Y=-9.866228E-02
X=.3718428	Y=.2297988	Y=-.1036202
X=.4957903	Y=.2540925	Y=-.1028765
X=.6197379	Y=.2707015	Y=-9.860228E-02
X=.7436855	Y=.2788821	Y=-9.296069E-02
X=.9915806	Y=.2788821	Y=-8.056593E-02
X=1.239476	Y=.2610336	Y=-6.742749E-02
X=1.487371	Y=.2305425	Y=-5.304957E-02
X=1.735266	Y=.189144	Y=-3.842375E-02
X=1.983161	Y=.1375818	Y=-.0255332
X=2.231057	Y=.0763517	Y=-1.413002E-02
X=2.355004	Y=4.039849E-02	Y=-8.924226E-03
X=2.478952	Y=0	Y=-3.966322E-03

r/R=0,9 İÇİN KORDİNATLAR

X=0	Y=0	Y=0
X=.0223512	Y=5.489455E-02	Y=-3.200692E-02
X=4.470221E-02	Y=7.456361E-02	Y=-4.434479E-02
X=8.940481E-02	Y=.1026367	Y=-5.847075E-02
X=.1341072	Y=.1235574	Y=-6.633837E-02

X=.1788096	Y=.1401867	Y=-7.116623E-02
X=.2682144	Y=.1657565	Y=-7.474241E-02
X=.3576193	Y=.1832799	Y=-.074206
X=.4471245	Y=.1955478	Y=-.071012
X=.5364289	Y=.2011608	Y=-6.705361E-02
X=.7152385	Y=.2011608	Y=-5.811313E-02
X=.8940481	Y=.1882865	Y=-4.263622E-02
X=1.072858	Y=.166293	Y=-3.826526E-02
X=1.251667	Y=.1364317	Y=-2.724523E-02
X=1.430477	Y=9.923934E-02	Y=-1.841739E-02
X=1.609287	Y=9.507336E-02	Y=-1.019215E-02
X=1.698691	Y=2.986121E-02	Y=-6.437147E-03
X=1.788096	Y=0	Y=-2.860954E-03

r/R=0,99 İÇİN KORDİNATLAR

X=0	Y=0	Y=0
X=7.111746E-03	Y=1.746645E-02	Y=-1.018402E-02
X=1.422349E-02	Y=2.372479E-02	Y=-1.410971E-02
X=2.844698E-02	Y=3.265714E-02	Y=-1.860433E-02
X=4.267048E-02	Y=3.931373E-02	Y=-2.110766E-02
X=5.689397E-02	Y=4.460488E-02	Y=-.0226438
X=8.534096E-02	Y=5.274071E-02	Y=-2.378168E-02
X=.1137879	Y=5.831632E-02	Y=-.023611
X=.1422349	Y=6.212822E-02	Y=-.0226438
X=.1706819	Y=6.400571E-02	Y=-2.133524E-02
X=.2275759	Y=6.400571E-02	Y=-1.849054E-02
X=.2844699	Y=5.990935E-02	Y=-1.547516E-02
X=.3413638	Y=5.291139E-02	Y=-1.217531E-02
X=.3982578	Y=.0434101	Y=-8.818565E-03
X=.4551518	Y=3.157615E-02	Y=-5.860078E-03
X=.5120457	Y=1.752334E-02	Y=-3.242956E-03
X=.5404927	Y=9.501292E-03	Y=-2.048113E-03
X=.5689397	Y=0	Y=-9.103034E-04

## SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Rüzgar türbininin dizaynında,yeterli miktarda teorik bilgi verildiği gibi oldukça hassas bir şekilde de rotor dizaynı ve mukavemet hesapları yapılmıştır.Temel bilgilerin yanında türbinin kontrolü ile ilgili kontrol sistemlerinden bahsedilmiştir.Kontrol sistemlerinin incelenmesi sonucunda anlaşılmıştırki türbin kontrol sistemlerinin dizaynı,türbin dizaynından çok daha zor olduğu gibi karmaşıktırda.

Konunun anlaşılabilmesi için yeterli miktarda formülasyon, grafik,şekil ve tablo verilmiştir.

Rüzgardan elde edilebilecek enerji potansiyelinin sonsuz olduğu bilindiğine göre bu konunun üzerinde daha fazla durulmalı ve özelliklede kontrol sistemleri üzerinde daha fazla çalışma yapılmalıdır.

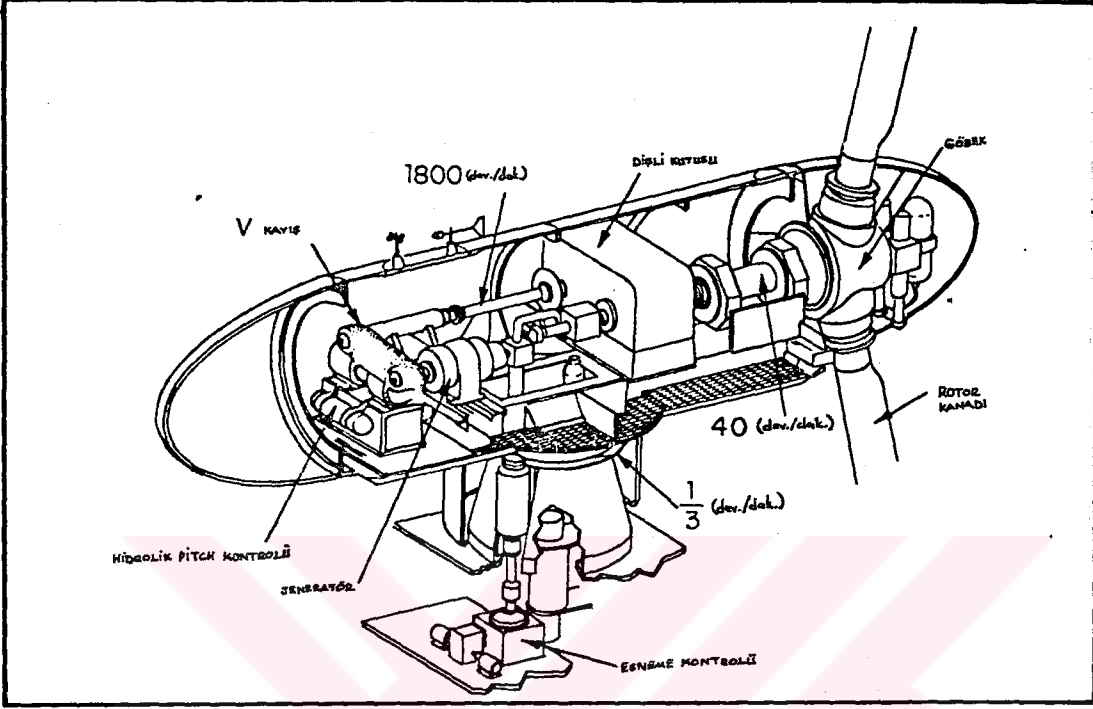
Yaptığım çalışmanın,bu konu üzerine yapılacak diğer çalışmalara faydalı olmasını dilerim.

## REFERANSLAR

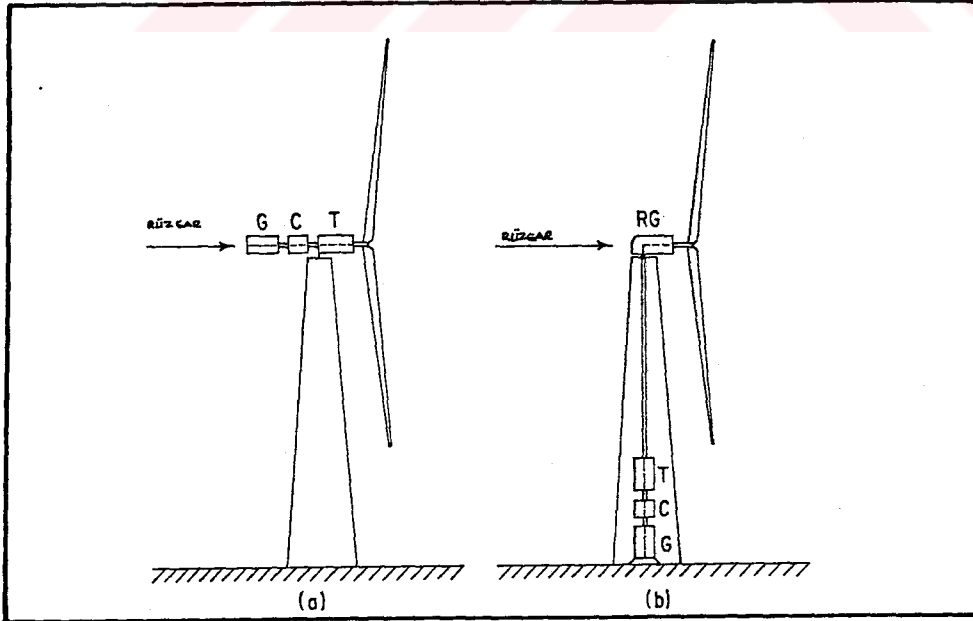
- 1) APPLIED OFFSHORE STRUCTURAL ENGINEERING  
Teng H. HSU  
Gulf Publishing Company , 1984
- 2) ENERGY TECHNOLOGY HANDBOOK  
Douglas M. CONSIDINE , P.E.  
McGraw - Hill Book Company , 1979
- 3) HANDBOOK OF THE ENGINEERING SCIENCES  
James H. POTTER  
Volume 3 , The Applied Sciences
- 4) ENERGY CONVERSION SYSTEMS  
Harry A. SORENSEN  
Washington State University
- 5) MARKS' STANDART HANDBOOK FOR MECHANICAL ENGINEERS  
Eugene A. AVOLLONE , Theodore BAUMEISTER 3  
Ninth Edition
- 6) STANDART HANDBOOK FOR MECHANICAL ENGINEERS  
Theodore BAUMEISTER (Editor-in-Chief) , Eugena A. AVOLLONE  
(Associate Editor) , Theodore BAUMEISTER (Associate Editor)  
Eighth Edition
- 7) STANDART HANDBOOK OF ENGINEERING CALCULATIONS  
Tyler G. HICKS  
Second Edition , 1986
- 8) THEORETICAL AERODYNAMICS  
L. M. MILNE - THOMSON , C.B.E.  
Fourth Edition , Newyork , 1966
- 9) HANDBOOK OF SOLAR AND WIND ENERGY  
Floyd HICKOK  
A Cahners Special Report , 1975
- 10) WIND ENERGY CONVERSION 1991  
D. C. QUARTON , V. C. FENTON  
1991
- 11) NINTH ASME WIND ENERGY SYMPOSIUM  
D. E. BERG  
Vol. 9 , 1990

- 12) WIND ENERGY CONVERSION 1990  
T. D. DAVIES , J. A. HALLIDAY , J. P. PALUTIKOF
- 13) FURTHER AERODYNAMICS FOR ENGINEERING STUDENTS  
E. L. HOUGHTON and R. P. BOSWELL  
London , 1969
- 14) ENERGY SOURCES - THE WEALTH OF THE WORLD  
Eugene AYRES , Charles A. SCARLOTT  
1952
- 15) JOURNAL OF FLUID MECHANICS  
Prof. G. K. BATCHELOR  
Cambridge University Press , February 1986
- 16) ENERGY TECHNOLOGY HANDBOOK  
Douglas M. CONSIDINE , P. E.  
McGraw - Hill Book Company , 1979
- 17) ENCYCLOPEDIA OF ENERGY  
Daniel N. LAPEDES  
3rd Edition , 1971
- 18) APPLIED WING THEORY  
Elliott G. POID , B.S. , U.S. , Ae.E.  
First Edition
- 19) RÜZGAR ENERJİSİ  
YILDIZ Univ. Fen Bilimleri Ens. , Yüksek Lisans Tezi  
Mak.Müh. Aydın CÖTEN , İstanbul - 1989
- 20) RÜZGAR KARAKTERİSTİKLERİNİN AEROJENERATÖR TASARIMINA ETKİLERİ  
YILDIZ Univ. Fen Bilimleri Ens. , Yüksek lisans Tezi  
Mak.Müh. Tuncer KANER , İstanbul - 1990
- 21) RÜZGAR GÜCÜNDEN YARARLANMADA TÜRKİYE RÜZGAR GÜCÜ POTANSİYELİ VE  
RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN TEORİK ÇALIŞMA ESASLARI  
YILDIZ Univ. Fen Bilimleri Ens. , Yüksek Lisans Tezi  
Mak.Müh. Bülent DEHİNİ , İstanbul - 1985
- 22) ULTRA MAGAZİN  
Bilim , Teknoloji , Uzun Yaşam..... ve Ötesi  
Sayı 3 , Mayıs 1992

## EKLER

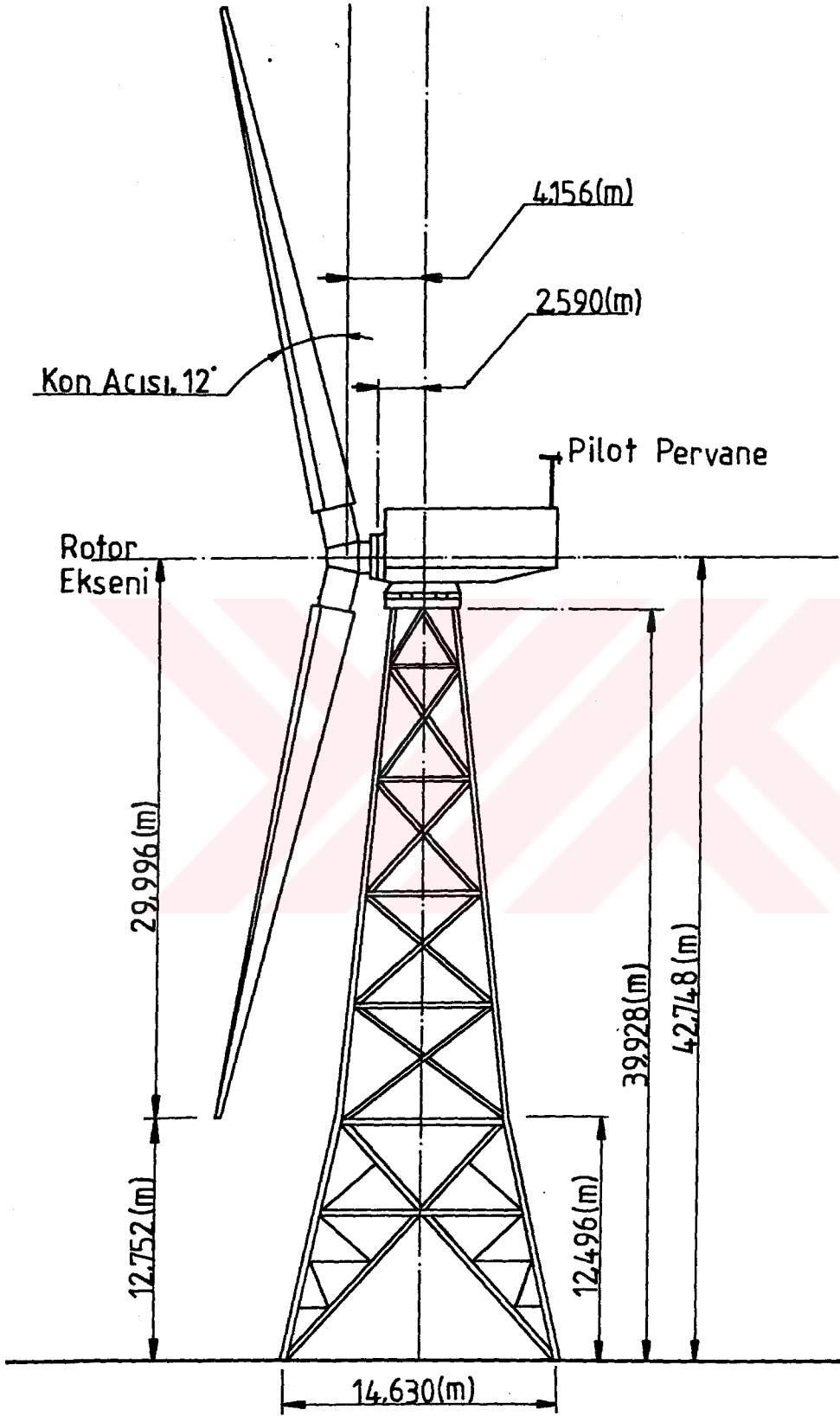


Şekil E-1 : 0,1(MW) Rüzgar Türbini./16/

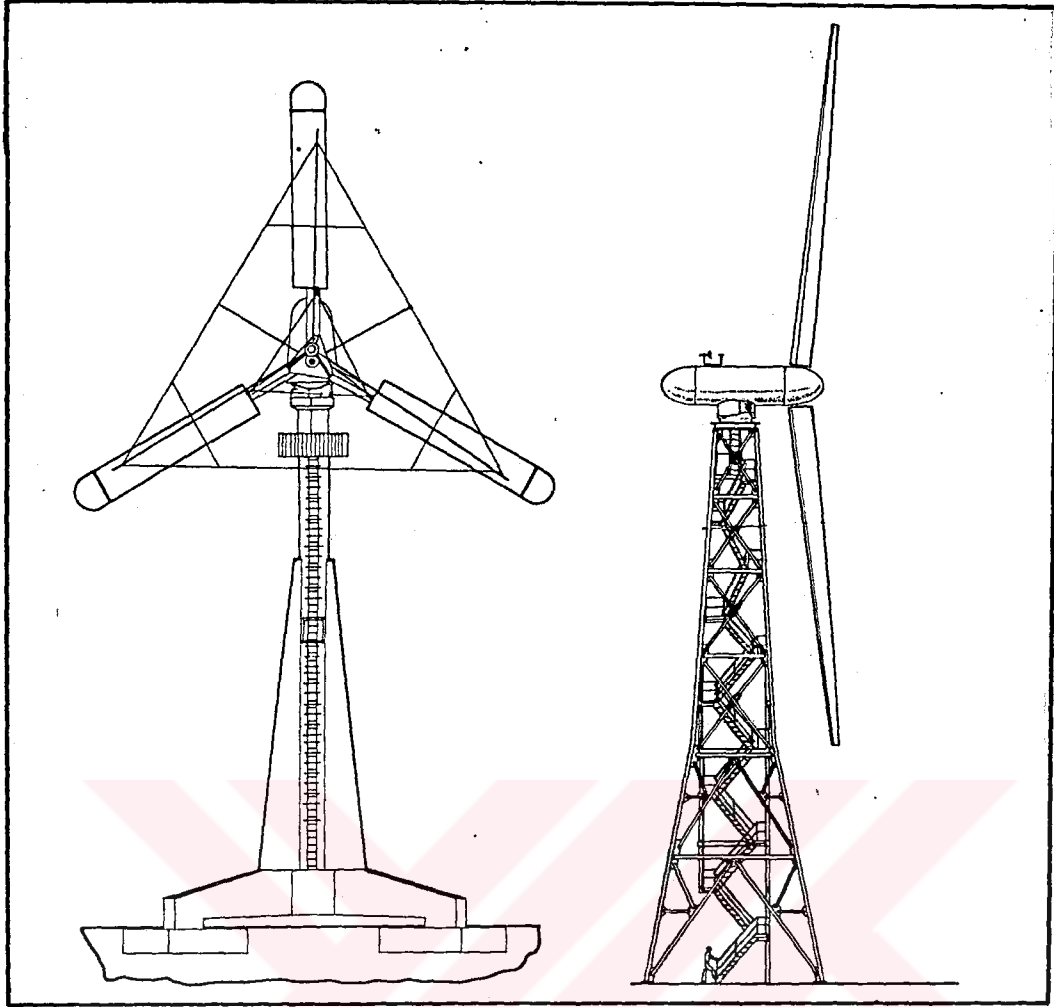


Şekil E-2 :Rüzgar Türbini Parçaları./16/

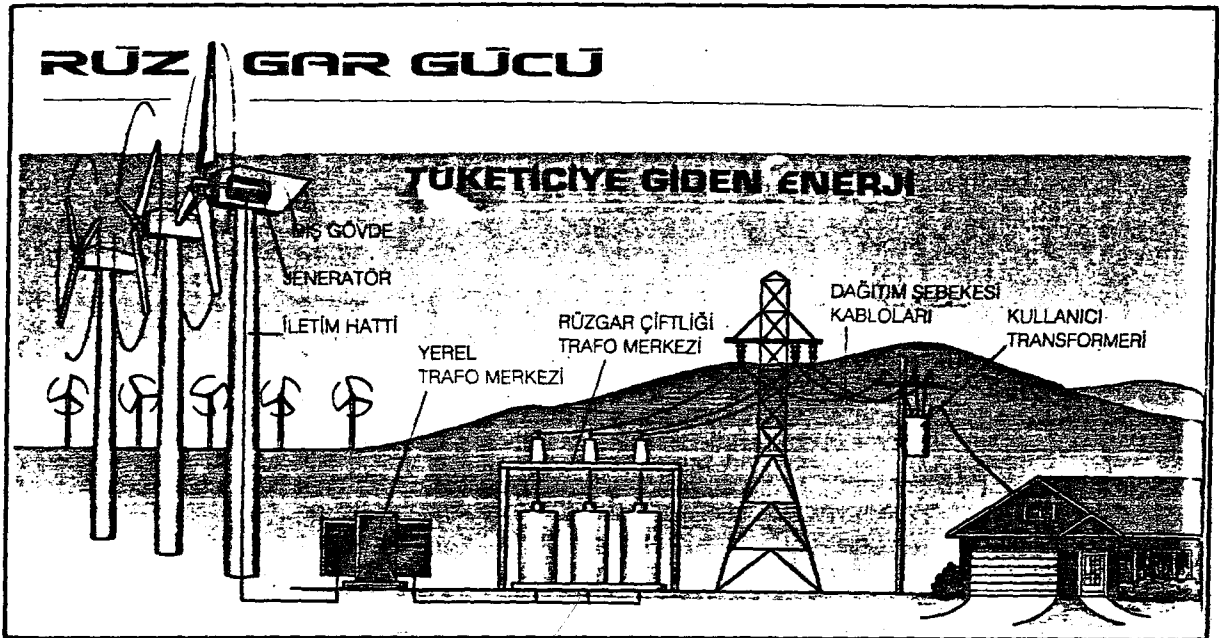
T: Transmisyon, C: Kontrol, G: Jeneratör  
RG: Konik Dişli



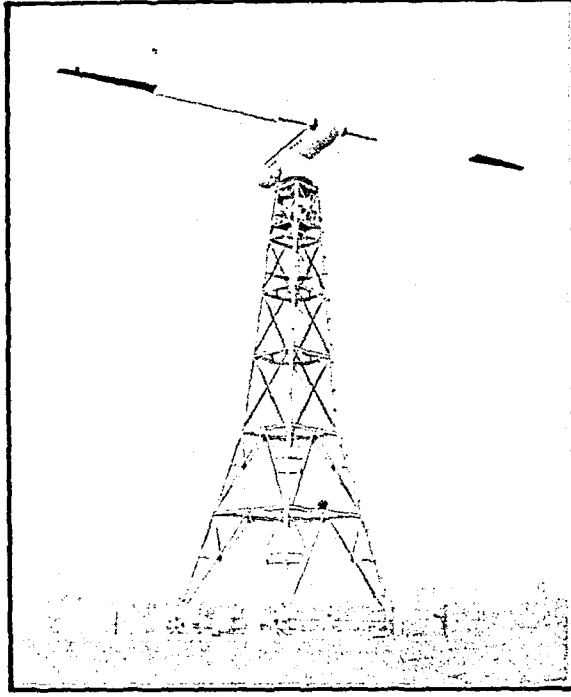
Şekil E-3: Rüzgar türbini, 2 (MW). / 20 /



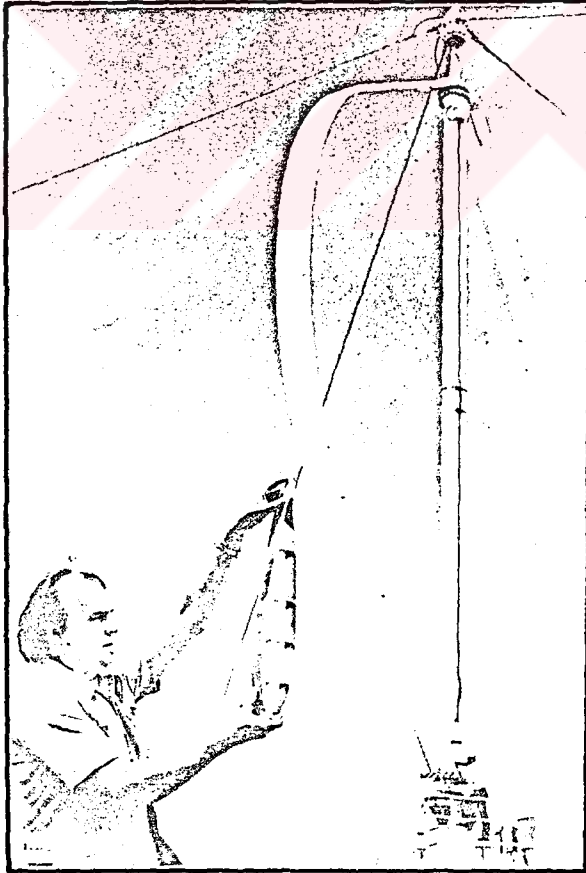
Şekil E-4 : 0.2 ve 0.1 (MW) gücünde Rüzgar türbin'leri. /16/



Şekil E-5: Elektrığın Dağıtımı. /22/



Şekil 8.4: 100 (kW)'lık Rüzgar türbini./4/



Şekil 8.5: Darrieus Rotor./4/

## NACA PROFİL TABLOLARI

NACA 2412

<u>Apsis</u>	<u>Üst Yüzey Ordinat</u>	<u>Alt Yüzey Ordinat</u>
0	....	0
1,25	2,15	-1,65
2,5	2,99	-2,27
5,0	4,13	-3,01
7,5	4,95	-3,46
10	5,63	-3,75
15	6,61	-4,10
20	7,26	-4,23
25	7,67	-4,22
30	7,88	-4,12
40	7,80	-3,80
50	7,24	-3,34
60	6,36	-2,76
70	5,18	-2,14
80	3,75	-1,50
90	2,08	-0,82
95	1,14	-0,48
100	(0,13)	(-0,13)
100	....	0

NACA 2415

<u>Apsis</u>	<u>Üst Yüzey Ordinat</u>	<u>Alt Yüzey Ordinat</u>
0	....	0
1,25	2,71	-2,06
2,5	3,71	-2,86
5,0	5,07	-3,84
7,5	6,06	-4,47
10	6,83	-4,90
15	7,97	-5,42
20	8,70	-5,66
25	9,17	-5,70
30	9,38	-5,62
40	9,25	-5,25
50	8,57	-4,67
60	7,50	-3,90
70	6,10	-3,05
80	4,41	-2,15
90	2,45	-1,17
95	1,34	-0,68
100	(0,16)	(-0,16)
100	....	0

NACA 2418

<u>Apsis</u>	<u>Üst Yüzey Ordinat</u>	<u>Alt Yüzey Ordinat</u>
0	....	0
1,25	3,28	-2,45
2,5	4,45	-3,44
5,0	6,03	-4,68
7,5	7,17	-5,48
10	8,05	-6,03
15	9,34	-6,74
20	10,15	-7,09
25	10,65	-7,18
30	10,88	-7,12
40	10,71	-6,71
50	9,89	-5,99
60	8,65	-5,04
70	7,02	-3,97
80	5,08	-2,80
90	2,81	-1,53
95	1,55	-0,87
100	(0,18)	(-0,18)
100	....	0

NACA 2421

<u>Apsis</u>	<u>Üst Yüzey Ordinat</u>	<u>Alt Yüzey Ordinat</u>
0	....	0
1,25	3,87	-2,82
2,5	5,21	-4,02
5,0	7,00	-5,51
7,5	8,29	-6,48
10	9,28	-7,16
15	10,70	-8,05
20	11,59	-8,52
25	12,15	-8,67
30	12,38	-8,62
40	12,16	-8,16
50	11,22	-7,31
60	9,79	-6,17
70	7,94	-4,87
80	5,74	-3,44
90	3,18	-1,88
95	1,76	-1,06
100	(0,22)	(-0,22)
100	....	0

## NACA 4412

<u>Apsis</u>	<u>Ust Yüzey Ordinat</u>	<u>Alt Yüzey Ordinat</u>
0	0	0
1,25	2,44	-1,43
2,5	3,39	-1,95
5,0	4,73	-2,49
7,5	5,76	-2,74
10	6,59	-2,88
15	7,89	-2,88
20	8,80	-2,74
25	9,41	-2,50
30	9,76	-2,26
40	9,80	-1,80
50	9,19	-1,40
60	8,14	-1,00
70	6,89	-0,65
80	4,89	-0,39
90	2,71	-0,22
95	1,47	-0,16
100	(0,13)	(-0,13)
100	.....	0

## NACA 4415

<u>Apsis</u>	<u>Ust Yüzey Ordinat</u>	<u>Alt Yüzey Ordinat</u>
0	.....	0
1,25	3,07	-1,79
2,5	4,17	-2,48
5,0	5,74	-3,27
7,5	6,91	-3,71
10	7,84	-3,98
15	9,27	-4,18
20	10,25	-4,15
25	10,92	-3,98
30	11,25	-3,75
40	11,25	-3,25
50	10,53	-2,72
60	9,30	-2,14
70	7,63	-1,55
80	5,55	-1,03
90	3,08	-0,57
95	1,67	-0,36
100	(0,16)	(-0,16)
100	.....	0

## NACA 4418

<u>Apsis</u>	<u>Ust Yüzey Ordinat</u>	<u>Alt Yüzey Ordinat</u>
0	.....	0
1,25	3,76	-2,11
2,5	5,00	-2,99
5,0	6,75	-4,06
7,5	8,06	-4,67
10	9,11	-5,06
15	10,66	-5,49
20	11,72	-5,56
25	12,40	-5,49
30	12,76	-5,26
40	12,70	-4,70
50	11,85	-4,02
60	10,44	-3,24
70	8,55	-2,45
80	6,22	-1,67
90	3,46	-0,93
95	1,89	-0,55
100	(0,19)	(-0,19)
100	.....	0

## NACA 4421

<u>Apsis</u>	<u>Ust Yüzey Ordinat</u>	<u>Alt Yüzey Ordinat</u>
0	.....	0
1,25	4,45	-2,42
2,5	5,64	-3,48
5,0	7,82	-4,75
7,5	9,24	-5,62
10	10,35	-6,15
15	12,04	-6,75
20	13,17	-6,96
25	13,88	-6,92
30	14,27	-6,76
40	14,16	-6,16
50	13,18	-5,34
60	11,60	-4,40
70	9,50	-3,35
80	6,91	-2,31
90	3,65	-1,27
95	2,11	-0,74
100	(0,22)	(-0,22)
100	.....	0

## NACA 23012

<u>Apsis</u>	<u>Ust Yüzey</u> <u>Ordinat</u>	<u>Alt Yüzey</u> <u>Ordinat</u>
0	....	0
1,25	2,67	-1,23
2,5	3,61	-1,71
5,0	4,91	-2,26
7,5	5,80	-2,61
10	6,43	-2,92
15	7,19	-3,50
20	7,50	-3,97
25	7,80	-4,28
30	7,55	-4,46
40	7,14	-4,48
50	6,41	-4,17
60	5,47	-3,67
70	4,36	-3,00
80	3,08	-2,16
90	1,68	-1,23
95	0,92	-0,70
100	(0,13)	(-0,13)
100	....	0

## NACA 23015

<u>Apsis</u>	<u>Ust Yüzey</u> <u>Ordinat</u>	<u>Alt Yüzey</u> <u>Ordinat</u>
0	....	0
1,25	3,34	-1,54
2,5	4,44	-2,25
5,0	5,89	-3,04
7,5	6,90	-3,61
10	7,64	-4,09
15	8,52	-4,84
20	8,92	-5,41
25	9,08	-5,78
30	9,05	-5,96
40	8,59	-5,92
50	7,74	-5,50
60	6,61	-4,81
70	5,25	-3,91
80	3,73	-2,83
90	2,04	-1,59
95	1,12	-0,90
100	(0,16)	(-0,16)
100	....	0

## NACA 23018

<u>Apsis</u>	<u>Ust Yüzey</u> <u>Ordinat</u>	<u>Alt Yüzey</u> <u>Ordinat</u>
0	....	0
1,25	4,09	-1,83
2,5	5,29	-2,71
5,0	6,92	-3,80
7,5	8,01	-4,60
10	8,83	-5,22
15	9,86	-6,18
20	10,36	-6,86
25	10,56	-7,27
30	10,55	-7,47
40	10,04	-7,37
50	9,05	-6,81
60	7,75	-5,94
70	6,18	-4,82
80	4,40	-3,48
90	2,39	-1,94
95	1,32	-1,09
100	(0,19)	(-0,19)
100	....	0

## NACA 23021

<u>Apsis</u>	<u>Ust Yüzey</u> <u>Ordinat</u>	<u>Alt Yüzey</u> <u>Ordinat</u>
0	....	0
1,25	4,87	-2,08
2,5	6,14	-3,14
5,0	7,93	-4,52
7,5	9,13	-5,55
10	10,03	-6,32
15	11,19	-7,51
20	11,80	-8,30
25	12,05	-8,76
30	12,06	-8,95
40	11,49	-8,83
50	10,40	-8,14
60	8,90	-7,07
70	7,09	-5,72
80	5,05	-4,13
90	2,76	-2,30
95	1,53	-1,30
100	(0,22)	(-0,22)
100	....	0

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mehmet SAYINDI

Doğum Tarihi : 27 Mart 1968

Doğum Yeri : Tokat

### Öğrenim Kronolojisi

1975 - 1980 : Emin Ali Yaşın ilkokulu

1980 - 1983 : Koca Mustafa Paşa Lisesi ( Orta okul kısmı)

1983 - 1986 : Pertevniyal Lisesi

Yukarıda belirtilen yıllar arasında belirtilen okulları bitirdikten sonra,

1987 - 1991 : Yıldız Üniversitesi Makina Mühendisliği bölümünü bitirdim.

1991 yılında yüksek lisans okumaya hak kazandıktan sonra bir yıl hazırlık eğitimi alıp,normal mesleki eğitimime devam ettim.