

FIRAT ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RÜZGAR ENERJİSİNİN MEKANİK ENERJİYE DÖNÜŞTÜRÜLMESİ

Firat Üniversitesi
Merkez Kütüphanesi



0069794

255.07.02.03.00.00/08/0069794

TME YL/34

(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

Mak. Müh. Cumali İLKILIÇ

Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi

Makina Eğitimi Bölümü

T. C.

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
TEKNİK EĞİTİM FAKÜLTESİ
Öğrenim Kaynakları

Demirbaş No :

Tez Yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. Asaf VAROL

ELAZIĞ

HAZİRAN 1990

Okuduğum ve jüriye sunulmasını uygun gördüğüm bu tez,
bir Yüksek Lisans (MS) tezinde bulunması gereken tüm nite-
likleri taşımaktadır.

Yrd.Doç.Dr. Asaf VAROL

.....

Tez Yöneticisi

Tez Jürisi

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Jüri Başkanı

.....

Bu tez Yüksek Lisans (MS) tezi olarak onaylanmıştır.

ÖZET

Rüzgar enerjisi, yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olup diğer enerji kaynakları arasında önemli bir yeri vardır. Bir çok enerji kaynakları zamanla tükendiği halde rüzgar enerjisi kaynağı, dünya ve güneş durduğu müddetçe tükenmeyecek bir enerji kaynağıdır. Mekanik ve elektrik enerjisi elde etmede yararlanılan rüzgar enerjisi, çok eski çağlardan beri bilinmektedir. Yel değirmenleri ve yelkenli kayıklar buna birer örnektir. Günümüzde gelişmiş ve gelişmekte olan bir çok ülkede, rüzgar enerjisinden yararlanma yollarının araştırılması ve bu enerjinin çeşitli amaçlarla kullanılması gerekir. Bu çalışmada rüzgar enerjisinin mekanik enerjiye dönüştürülmesi incelenmiş ve özellikle bu mekanik enerjinin arttırılması amaçlanmıştır. Bunun için, asıl pervane çevresine yöneltici kanatlar konulmuştur.

Birinci bölümde rüzgar enerjisi genel olarak tanıtılmış, kullanım şekilleri ele alınmış ve memleketimizde bu enerjiden yararlanma imkânı olan yerler belirtilmiştir. Sonraki bölümde, rüzgar enerji sistemleri ve kullanım şekli hakkında bilgi verilerek faydalanılabilecek rüzgar enerjisi oranı bulunmuştur. Ayrıca, rüzgar pervane dizaynı ve konum açıları ele alınmıştır.

Üçüncü bölüm, çalışmanın esasını teşkil eden kısım olup yöneltici kanatlar kullanılarak, rüzgar pervane hızının arttırılması için akış girdabının oluşturulması anlatılmıştır. Akışın girdap ile hızlandırılması sonucu, asıl pervanenin bu girdabın içine yerleştirilmesi durumu incelenerek deney-

lerin yapılması için deney seti dizaynı anlatılmıştır.

Son bölümde, deney setinde yapılan deneyler sonuçları ile çıkarılmıştır. Yöneltilici kanatların oluşturdukları girdaplar sonucunda çeşitli hızlarda asıl pervane üzerindeki etkisi görülmüştür.

ABSTRACT

Wind energy, which is one of the renewable energy sources, has an important place among them. Many of the energy sources are exhausted by time, but the wind energy will not end as the world and the sun exist. It can be used to obtain mechanical and electrical energy and has been known for long ages. Windmills and sailing ships are examples. It is necessary to research the ways for making use of this energy. In this study, transformation of wind energy into mechanical energy is investigated and especially making this mechanical energy increase is aimed. For this purpose, concentrating blades are placed around the main windmill.

In the first section, wind energy is introduced generally, the ways of use are proposed, and possibilities of making use of this energy in our country are stated. The second section, gives information about wind energy systems and benefitable wind energy rates. Windmill design and position angles are also considered.

The third section, which consists the main part of the study, explains the formation of flow vortex in order to improve the windmill rates by using the concentration blades. As a result of making the flow faster by vortex, replacing the main mill into this vortex is examined and the design of experimental set up is explained.

In the last section, experiments made in the set up is outlined with the results. The rates obtained by concentration blades is measured and the effects on the main mill is monitored.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın önerilmesi, sürdürülmesi ve tamamlanmasında her türlü yardımını esirgemeyen, çalışmalarım sırasında çeşitli kurum ve kuruluşlarla yazışma imkânı sağlayan ve çalışmalarım ile yakından ilgilenen Sayın Hocam Yrd.Doç.Dr. Asaf VAROL'a ve çeşitli konularda her türlü yardımını esirgemeyen Metalurji Eğitimi Bölüm Başkanı Doç.Dr. Muhammed Mustafa YILDIRIM'a, ayrıca Makina Eğitimi Bölüm Başkan Vekili Öğr.Gör. Yaşar BİÇER'e teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Ayrıca, çalışmalarım da bana yardımcı olan ve çalışmalarımı destekleyen mesai arkadaşlarıma ayrı ayrı teşekkür ederim.

Cumali İLKİLİÇ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
Özet	111
Abstract	v
Teşekkür	vi
İçindekiler	vii
Tablolar.....	x
Şekiller	xi
Semboller	xiv
1. RÜZGAR ENERJİSİ	1
1.1. Genel	1
1.2. Rüzgar Enerjisi Sistemlerinin Dünyadaki Gelişimi	3
1.3. Rüzgar Kaynakları	4
1.4. Rüzgar Enerjisinin Özellikleri	5
1.5. Rüzgar Enerjisi Kullanımı	7
1.6. Rüzgar Enerjisinden Yararlanılacak Yerlerin Seçimi	9
1.7. Türkiye'nin Rüzgar Enerjisi Kullanımı	12
1.7.1. Türkiye'nin Rüzgar Enerjisi Potansiyeli	13
2. RÜZGAR ENERJİSİ TEKNOLOJİSİ	21
2.1. Rüzgar Enerji Sistemlerinin Çeşitleri	21
2.1.1. Yatay Eksenli Rüzgar Enerji Makinaları.	21
2.1.2. Düşey Eksenli Rüzgar Enerji Makinaları.	21
2.2. Faydalanılabilir Rüzgar Enerjisi Hesabı	22
2.3. Aerodinamik Güç ve Eğrisi	28
2.4. Fiili ve Sürme Rüzgar Hızları	29
2.5. Rüzgar Pervanesinin Aerodinamik Özellikleri ..	32

2.5.1. Rüzgar Pervanesi Kanatlarının Maruz Kaldığı Kuvvetler	36
2.5.2. Kanat Eğim Açıları	42
2.6. Rüzgar Enerjisinin Su Pompalamada Kullanılması	44
3. RÜZGAR PERVANESİ ve TOPLAYICI (KONSANTRATÖR) SİSTEMİ	48
3.1. Girdap Basınç Yoğunlaştırıcılı Rüzgar Türbin Sistemi	49
3.1.1. Rüzgarın Bir Funele Akıtılması	49
3.1.2. Rüzgarın Girdap Akışı ile Hızlanması .	50
3.1.3. Akışkan Akışının Manyetik Bobini ile Karşılaştırılması	51
3.1.4. Tabiatla Bir Girdap Bobininin Oluşumu.	55
3.1.5. Girdap Vada Konsantratör Teorisi	57
3.1.6. Girdap Bobini Kullanarak Rüzgar Hızının Arttırılması Teorisi	60
3.2. Yöneltilici Kanatlı Rüzgar Türbininin Gelişmesi	62
3.2.1. Yöneltilici Kanatların Fonksiyonları	63
3.2.2. Konsantratörlü Rüzgar Türbin Santralleri	65
3.2.3. Konsantratörlü Sistemin Çok Rotorlu Olması	66
4. DENEY SETİNİN DİZAYNI ve ÖLÇÜLERİ	67
4.1. Konsantratör Sisteminin Özellikleri	71
4.2. Rüzgar Pervanesi	73
5. DENEYLER ve SONUÇLARI	75
5.1. Ortalama Rüzgar Hızları ve Ortalama Devir Sayıları Arasındaki Eğrilerin Çizimi	82
5.1.1. Konsantratörsüz Durumdaki Değerler ve Eğrisi	82

5.1.2. Yöneltilci Kanatların Sıfır Konumu Değerleri ve Eğrisi	84
5.1.3. Yöneltilci Kanatların 10° Konumundaki Değerler	85
5.1.4. Yöneltilci Kanatların 20° Konumundaki Değerler	86
5.1.5. Yöneltilci Kanatların 30° Konumundaki Değerler	87
5.2. Rüzgar Hızı ve Pervane Devir Sayısı	88
6. SONUÇ ve ÖNERİLER	90
KAYNAKLAR	93

TABLÖLAR

Sayfa

Tablo 1.1.	Bölgelerimizin Ortalama Rüzgar Hızları ve Ortalama Rüzgar Gücü Yoğunluğu	13
Tablo 1.2.	Yörelere Ortalama Rüzgar Hızları ve Rüzgar Gücü Yoğunluğu	14
Tablo 5.1.	Yöneltici Kanatlar Kullanılmadan Alınan Rüzgar Hızları ile Milde Elde Edilen Devir Sayıları	77
Tablo 5.2.	Yöneltici Kanatların Sıfır Derece Konumu İtibarı ile Rüzgar Hızları ve Milde Elde Edilen Devir Sayıları	78
Tablo 5.3.	Yöneltici Kanatların Konumunun 10° Değiş- mesi Sonucu Alınan Rüzgar Hızları ile Milde Elde Edilen Devir Sayıları	79
Tablo 5.4.	Yöneltici Kanatların Konumunun 20° Değişti- rilmesi Sonucu Alınan Rüzgar Hızları ile Milde Elde Edilen Devir Sayıları	80
Tablo 5.5.	Yöneltici Kanatların Konumunun 30° Değişti- rilmesi Sonucu Alınan Rüzgar Hızları ile Milde Elde Edilen Devir Sayıları	81

ŞEKİLLER

Sayfa

Şekil 1.1.	Engebe Üzerinde Hızın Artışını Gösteren Hız Profili	11
Şekil 1.2.	Türkiye'nin Yıllık Ortalama Rüzgar Hızı Yoğunluğu	15
Şekil 1.3.	Türkiye'de Seçilmiş 10 Bölgede Rüzgar Hızındaki Aylık Değişme	18
Şekil 2.1.	Bir Rüzgar Mili Etrafındaki Aerodinamik Akış	29
Şekil 2.2.	Hava Akımına Paralel Bir Plakanın Etrafındaki Paralel Akım Çizgileri	32
Şekil 2.3.	Hava Akımına Dik Bir Plakanın Etrafındaki Akım Çizgileri	33
Şekil 2.4.	Hava Akımına Meyilli Bir Plakadaki Akım Çizgilerinin Durumu	33
Şekil 2.5.	Plaka Üzerine Etki Eden Kuvvetler	34
Şekil 2.6.	Pervane Kanadındaki Kuvvetlerin Durumu	36
Şekil 2.7.	Rüzgar Pervane Kanadının Yapısı	42
Şekil 2.8.	Kanadın Eğim ve Kalınlık Profilinin Dağılımı	43
Şekil 2.9.	Su Çıkarmada Kullanılan Bir Türbin Kanadı .	44
Şekil 2.10.	Rüzgar Türbini ile Su Pompasını Çalıştırma Prensibi	45
Şekil 2.11.	İleri-Geri Hareket Veren Aktarma Düzeni ...	46
Şekil 3.1.	Rüzgar Türbini İlaveli Difüzör	50
Şekil 3.2.	Magnetik ve Girdap Bobinleri	52
Şekil 3.3.	Keyfi Şekillendirilmiş Akım Çizgisinde Akım Alanı ve Keyfi Kıvrılmış İletken Teldeki Elektromanyetik Alan	52
Şekil 3.4.	İki Akım Çizgisinin Bir Noktada Tutulması ile Ortaya Çift Kıvrım Çıkar	53

Şekil 3.5.	Bir Kuşun Kanadındaki Kenar Girdabı Oluşumu	54
Şekil 3.6.	Birbirlerine Sarılan İki Girdap	55
Şekil 3.7.	Girdap Akışının Fiziksel Modeli	56
Şekil 3.8.	Yarık Kuş Kanadının Rüzgar Konsantratörüne Dönüştürülmesi	56
Şekil 3.9.	Girdap Vidasından Girdap Elemanı ds'nin Dikkate Alınmasına Ait Kesit	57
Şekil 3.10.	İki Girdaplı Bobinin Teorik Akış Dağılımı .	61
Şekil 3.11.	Yöneltici Kanatların Bir Fonksiyonu	64
Şekil 3.12.	Yöneltici Kanatların İki Fonksiyonu	65
Şekil 4.1.	Yöneltici Kanatların Yerleştirileceği Sekizgen Fanı	67
Şekil 4.2.	Sekizgen Fanın Bir Kenarı ve Ölçüleri	68
Şekil 4.3.	Yöneltici Kanadı ve Ölçüleri	69
Şekil 4.4.	Yöneltici Kanatların Oluşturduğu Konsantratör Sistemi	70
Şekil 4.5.	Rüzgar Pervanesinin Bir Kanadı ve Ölçüleri.	73
Şekil 4.6.	Rüzgar Pervane Sistemi	74
Şekil 5.1.	Yöneltici Kanatlar Kullanılmadan Elde Edilen Devir Sayıları ile Rüzgar Hızı Arasındaki Eğri	83
Şekil 5.2.	Sıfır Konumunda Yöneltici Kanatlardaki Hız ve Devir Sayıları Arasındaki Eğri	84
Şekil 5.3.	10° Konumunda Yöneltici Kanatlar Kullanılarak Elde Edilen Devir Sayıları ile Rüzgar Hızları Arasındaki Eğri	85
Şekil 5.4.	Yöneltici Kanatların Konumu 20°'de İken Elde Edilen Devir Sayıları ile Rüzgar Hızları Arasındaki Eğri	86

Şekil 5.5.	Yöneltici Kanatların Konumu 30° İken Elde Edilen Devir Sayıları ile Rüzgar Hızları Arasındaki Eğri	87
Şekil 5.6.	Bulunan Eğrilerin Düzlemlerinin Birbirleri ile Çakıştırılarak Aynı Düzlemde Gösteril- mesi	90

SEMBOLLER

A_T	Pervanenin süpürme alanı (m^2)
b	Kanat genişliği (m)
C_a	Çalıştırma katsayısı (-)
C_L	Konsantratör katsayısı (-)
C_W	Direnç katsayısı (-)
C	Bileşke hız (m/s)
d	Konsantratör kanatları açıklığı çapı (m)
D	Konsantratör sistemi çapı (m)
E	Birim zamanda elde edilebilecek enerji miktarı (kW.h)
e	Yöneltici kanadın kalınlığı (m)
E_k	Kinetik enerji (W)
F	Pervaneye uygulanan kuvvet veya çalıştırma kuvveti (N)
g	Yerçekimi ivmesi (m/s^2)
H	Manyetik alan
I	Elektriksel akım
k	Yükseklikle ilgili bir katsayı (-)
l	Kanat uzunluğu (m)
n	Yüzey pürüzlülük katsayısı (-)
n_d	Devir sayısı (1/dak)
P	Pervane kanatları tarafından harcanan güç (W)
P_e	Elde edilecek güç (W)
P_{max}	Elde edilebilecek maksimum güç (W)
m_A	Rüzgarın kütleli debisi (kg/s)
R	Girdap kuvvet bobini yarıçapı (m)
S	Hareket doğrultusuna dik kuvvetlerin toplamı (N)
S_1	Çalıştırma kuvvetinin yatay bileşeni (N)

S_2	Direnç kuvvetinin yatay bileşeni (N)
T	Hareket doğrultusundaki kuvvetlerin toplamı (N)
T_1	Çalıştırma kuvvetinin dikey bileşeni (N)
T_2	Direnç kuvvetinin dikey bileşeni (N)
t	Birim zaman (h)
U	Çevresel hız (m/s)
V_0	Serbest rüzgar hızı (m/s)
V	Sürme rüzgar hızı (m/s)
v	Vektörel rüzgar hızı (m/s)
V_1	Pervanenin ilerisindeki rüzgar hızı (m/s)
V_2	Pervanenin gerisindeki rüzgar hızı (m/s)
V_T	Pervane arasındaki rüzgar hızı (m/s)
V_h	Yerden h yüksekliğindeki rüzgar hızı (m/s)
V_h	h_1 yüksekliğindeki rüzgar hızı (m/s)
V_h	h_2 yüksekliğindeki rüzgar hızı (m/s)
V	Konsantratör vidası ortasındaki hız (m/s)
W	Dinamik direnç kuvveti (N)
Z	Kanat sayısı
Q	Rüzgarın hacimsel debisi (m^3/s)
P_s	Yer basıncı (Pa)
r	Serbest akım ışınlı
Γ	Sirkülasyonlu alan hızı (m^2/s)
α	Eğim veya hücum açısı ($^\circ$)
β	Girdap eğim açısı ($^\circ$)
φ	Girdap dönel eğim açısı ($^\circ$)
ρ	Havanın yoğunluğu (kg/m^3)
μ	0,4 değerinde olan bir sabit

1. RÜZGAR ENERJİSİ

1.1 Genel

Rüzgar enerjisi çok eski çağlardan beri bilinen bir enerji çeşididir. Bu enerji türü yeryüzündeki düzensizliklerden ve atmosferin farklı ısınmasından ileri gelir. Atmosferin farklı ısınması, alçak ve yüksek basınç alanlarının oluşmasını sağlar. Alçak ve yüksek basınç alanlarının basınç farkından dolayı, yüksek basınç alanından alçak basınç alanına doğru bir hava akımı meydana gelir ki, bu hava akımı rüzgar olarak bilinir.

Akış halinde bulunan bir akışkanın bir enerjiye sahip olduğu bilinen bir gerçektir. Bu akış enerjisine sebep olan güneş enerjisinin küçük bir kısmı rüzgar enerjisini oluştururken toplam miktar son derece büyüktür. Bu enerji tabiatta belli bölgelerde yoğunlaşır. Bir çok bölgelerdeki rüzgar enerjisi yoğunluğu ortalama güneş enerjisinin yoğunluğuna eşit veya daha fazla olabilir.

Rüzgar enerjisi atmosferde serbest halde bulunur. Taşıma sorunu bulunmaz ve kullanımı da yüksek teknoloji gerektirmez. Diğer enerji kaynakları karşısında hiç bitmeyecek olan enerji, güneş ve rüzgar enerjisidir. Bir rüzgar sistemiyle elde edilebilecek güç, rüzgar hızının kübü ile orantılıdır. Rüzgar hızını iki katına çıkarmak, gücü sekiz kat arttırmak demektir. Ortalama bölgesel rüzgar hızı, rüzgar sistemlerinin ekonomisinde önemli bir faktördür.

Rüzgar enerjisinden yararlanmak yeni bir olay değildir. Rüzgar enerjisinden iki farklı şekilde yararlanılır.

Bunlardan biri, çok eskilerden beri bilinen rüzgar enerjisinin mekanik enerjiye dönüştürülmesidir. Yel değirmenleri, yelkenli kayıklar buna bir örnek olarak verilebilir. Mısırda M.Ö. 3000 yıllarında bile rüzgar çarkları kurulmuştur. Rüzgar enerjisinin mekanik enerjiye dönüştürülmesi yöntemi ile rüzgardan herhangi bir şekilde elde edilen mekanik enerji, çeşitli biçimlerde kullanılmaktadır. Bunlardan biri olan rüzgar çarkları, XI. yüzyılda Ortadoğu'da çok yaygın bir şekilde kullanılıyordu. 3000 yıl önce kullanılan yel değirmenlerinin yapısı, bu gün Akdeniz yörelerinde kullanılanlardan pek farklı olmadığı tespit edilmiştir.

Rüzgar enerjisinin ikinci tür kullanış şekli, rüzgar enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi, yani elektrik enerjisi üretimidir. Bu yöntem, rüzgar enerjisinin indirekt kullanımı yöntemi olarak bilinir. Bu yöntemde, rüzgar türbini yardımıyla rüzgar enerjisi hareket enerjisine çevrilmekte ve daha sonra jeneratör yardımıyla elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Rüzgar türbinlerinin ideal tipi, 1891 yılında Danimarka'da bir Fransız tarafından belirlenmiş ve çalıştığı okulun aydınlatılmasını yaptığı sistemle gerçekleştirmiştir. Yine 20. yüzyılda elektrik jeneratörlerini çalıştıran ilk modern rüzgar türbinleri Fransa'da ortaya çıkmıştır. Günümüzde rüzgar enerjisinden, elektrik enerjisi üretiminde kullanılan ve Rüzgar Türbin Generatör Sistemleri olarak isimlendirilen bu sistemler, çok çeşitli güç ve özelliklerde imal edilerek piyasaya sürülmektedir.

1973'teki petrol krizinden sonra ucuz petrol döneminin sona ermesiyle A.B.D., Danimarka, Hollanda, İngiltere,

Belçika ve İtalya gibi birçok ülke, bu konuda yoğun araştırma ve geliştirme programları üzerinde çalışmalara başladı - lar. Bu çalışmalar sonunda bir kaç yüz kilowatt gücünde Rüzgar Türbin Generatör Sistemleri üretildiği gibi, 3 ile 5 MW gücünde sistemlerin üretimi de gerçekleştirilmiştir. Geçen 10-15 yıllık zaman döneminde dünyanın ilgisi bu jeneratörler üzerine toplanmıştır. Bu konuda önemli projeler başlatılmış ve birkaç MW'lık sistemler üretilmiştir.

1.2. Rüzgar Enerji Sistemlerinin Dünyadaki Gelişimi

Amerika Birleşik Devletlerinde ilk büyük rüzgar jeneratörü 1941 yılında kuruyuştur. Sekiz ton ağırlığındaki iki kanada sahip olan bu rüzgar sisteminin kanat uzunluğu 26,75 m ve kule yüksekliği 33 m'dir. Nominal gücü 1250 kW olarak 4 yıl enerji üretiminde kullanılmıştır. Daha sonra malzeme yorulmasından dolayı kanadı koparak hizmet dışı kalmıştır. Amerika Birleşik Devletlerinde, rüzgar sistemleri üzerinde hala çalışmalar yapılmaktadır.

Fransa'da 1958'den sonra birçok rüzgar enerji sistemleri kurularak çalıştırılmıştır. Nominal gücü 800 kW olan 3 kanatlı rüzgar sisteminin kanat uzunluğu 16,5 m, toplam ağırlığı 160 ton ve kule yüksekliği 33 m olarak yapılmıştır. Bundan sonra da çalışmalara devam edilmektedir /6/.

Almanya'da rüzgardan enerji elde etme çalışmaları 1950 yılından sonra başlatılmıştır. 100 kW gücünde olan rüzgar enerji sisteminin kanat malzemesi cam elyafı plastiktir. Bu türbinin kanat çapı 34 m'dir. Almanya'da rüzgar enerji sistemleri konusunda çalışmalar devam etmektedir.

Bu çalışmalar daha ziyade iki kanatlı sistemler üzerindedir. İleride anlatılacak ve bu çalışmanın en önemli konularından biri olan konsantratörlü rüzgar sistemleri üzerindeki çalışmalar sürdürülmektedir /15/.

İsveçte 1979 yılında 2,5 MW gücünde bir rüzgar enerji sistemi kurulmuştur. Yıllık üretim 6×10^6 kW.h kadardır. yine burada 10 m/s'lik rüzgar hızında 60 kW gücünde türbinler yapılmaktadır /2 /.

Ruslar 1931 yılında Karadeniz kıyısında 100 kW'lık rüzgar türbinleri kurmuşlardır. Bu rüzgar çarklarının çapı 30 m, kule yüksekliği 30 m ve kanat sayısı 3 olarak yapılmıştır. İngiltere de benzer şekilde 1940'tan sonra ve Kanada da 1976'dan sonra rüzgar türbin çalışmalarına başlamışlardır / 6 /.

1.3. Rüzgar Kaynakları

Rüzgar enerjisi kaynağı zaman ve yer olarak çok değişimler gösterir. Bu değişimler saniyeler, dakikalar, günler ve aylar süresince olabilir. Bu değişebilirlik durumu rüzgar enerjisinden eniyi şu durumlarda faydalanılabilir.

1. Küçük bir dizelden büyük bir enerji sistemine kadar değişen diğer güç kaynaklarına bağlanarak yararlanılır.

2. Bataryalar veya pompalı hidroelektrik sistemler gibi herhangi bir enerji deposuna bağlı olarak yararlanılır.

3. Enerji kullanımının nispeten zamana bağlı olmadığı uygulamalarda, son ürünün depo edilebildiği durumlarda yararlanılır.

Enerji talebinin ve rüzgarın varlığının istatistiksel olarak çakıştığı bölgeler ve uygulamalar da vardır. Bir çok yerde rüzgar öğleden sonraları ve akşamları eser. Bu anlar, normal olarak enerji talebinin maksimum olduğu zamanlardır. Soğuk iklimlerdeki ısınma talebiyle uyuşan rüzgarlar veya düşük su rezervi seviyeleriyle uyuşan yüksek hızlı ilkbahar ve Sonbahar rüzgarları da rüzgar enerjisinin değerini arttıran uyumluluklardır. Bununla birlikte herhangi bir andaki rüzgarı tahmin etme yeteneği sınırlıdır ve bu belirsizlik ekonomik hesaplarda, rezerv sınırlarında ve depolamada dikkate alınmalıdır.

Rüzgar hızındaki büyük değişmeler, yer şekillerinin etkilerine ve yer yüzünün düzgün olmayan ısınmasına bağlı olarak nispeten küçük uzaklıklarda görülebilir. Yer yüzündeki bu farklılık rüzgar enerjisi için bir engel olduğu kadar avantajı da vardır. Bunun için rüzgar kuvvetinin tabiatı hem yararı olduğu gibi zararı da mevcuttur. Rüzgarın saniyelik değişimlerinde fırtınalar meydana gelir /17 /.

1.4. Rüzgar Enerjisinin Özellikleri

İyi rüzgarlı bölgelere, yararlanılan enerjide önemli bir artışla yüksek enerji yoğunluklu merkezler kurmak suretiyle büyük ekonomik yararlar sağlanır. Rüzgar hızı genelde yükseklikle artar ve bu nedenle rüzgar sistemi için tepeler aranır veya yüksek kuleler yapılır.

Rüzgar enerjisinin özellikleri genel olarak şu şekilde sıralanır.

1. Rüzgar enerjisi hızının kübüyle orantılı olarak değişir,
2. Rüzgar enerjisi yoğunluğu düşüktür,
3. Rüzgar enerjisinin depolanması için başka bir enerji türüne dönüştürülmesi lazımdır,
4. Çevre kirliliği olmadan temiz bir enerji olarak faydalanılır,
5. Atmosferde bol ve serbest olarak bulunur,
6. Güneş ve dünya var olduğu müddetçe tükenmeyen bir kaynak olarak faydalanılabilir,
7. Elde edilmesi kolay ve parasızdır.

Rüzgar enerjisi geleneksel olarak bir çok bölgede teknik ve mali olarak verimli olan çok az yenilenebilir enerji türlerinden birisidir. Rüzgar enerjisinin sahip olduğu bir potansiyel vardır. Bu potansiyel doğal potansiyel, teknik potansiyel ve ekonomik potansiyel olarak üç şekilde ifade edilebilir. Doğal potansiyel, rüzgarın doğal olarak sahip olduğu kinetik enerjisi olarak bilinir. Bu potansiyelin mevcut teknolojiye ve bilinen fiziksel kanunlar yardımı ile enerjiye dönüştürülebilen kısmına teknik potansiyel denilir. Teknik potansiyelin diğer kaynaklara nazaran ekonomik olarak kullanılabilen kısmına ise ekonomik potansiyel denilir. Ekonomik potansiyel kısmına, ekonomik olarak kullanılabilen rüzgar enerjisi potansiyeli adı verilir.

1.5. Rüzgar Enerjisi Kullanımı

1973'ten beri rüzgar türbinleri yoğun bir gelişmeye uğramıştır. Rüzgar enerjisi sistemleri genellikle rüzgar hızının yüksek olduğu yerlerde kullanılır.

Kırsal kesimlerde su pompalamada rüzgar enerjisinden yararlanılır. Rüzgarın 3 - 3,5 m/s'lik düşük hızlarında bile yararlanılabilir. Burada su pompalayıcı doğrudan çalışan makinaya bağlıdır. Bir çok durumlarda su, rüzgar estiği zaman kullanılmak üzere bir tankta depo edilir. Rüzgar pervanesinin pompa karakteristiğine dikkatle uyumlandırılması önemlidir. Burada pervane, pompa ve depo bir sistem olarak ele alınmalıdır.

Tümüyle metal rüzgar pervaneleri ve yel değirmenlerinin gelişmiş tipleri Kolombiya, Etiyopya, Hindistan ve Hollanda gibi dünyanın bir çok yerinde normal çiftçinin isteklerini karşılamak için geliştirilmiştir. Köy atelyelerinde imal edilen bu çarklar iki yılda bir kanatları değiştirilen ticari çarklardan daha ucuzdur. Bu tür çarklar bir çok yerde yapılmış olup yeterli gelişme ve büyütme servislerinin olmayışı yüzünden bu teknolojiler yaygınlık kazanmamıştır /6/.

Rüzgar enerjisi, enerji depo sistemleri veya dizel makinalarla birlikte evlere veya uzak yerlere elektrik sağlamakta kullanılır. Rüzgar enerjisinden, gerek kırsal kesimde elektrik enerjisinin yerel üretim - tüketim amacı ile ve gerekse bir sistemi beslemek amacıyla elektrik enerjisi üretiminde yararlanılmaktadır.

Rüzgar enerji sistemlerinin özellikle adalar, deniz kıyısı ve dağlık bölgeler gibi uzak yerlere elektrik sağlamakta önemli bir rolü olacaktır. Bu uygulama az rüzgarlı dönemlerde enerjiyi garantilemek amacıyla dizel yedeği veya bir tür enerji depolama sistemi ile birlikte rüzgar makineleriyle 10 - 100 kW'lık güç talepleri karşılanabilir. Ulusal elektrik şebekesine bağlanarak orta ve yüksek güçteki rüzgar enerji sistemleri önemli derecede petrol ve kömür tasarrufuna neden olabilir. Böyle uygulamalar günümüzde rüzgar hızının 6 m/s ve daha yüksek oluşu durumlarından yararlanılır.

Seyrek kanatlı, kanat hızının rüzgar hızına oranı yüksek olan makineler esas olarak 10 kW üzerindeki bütün uygulamalarda kullanılır. Daha büyük miktarlardaki güç için çok büyük rüzgar türbinleri yerine bir çok türbini birbirine bağlayarak elde edilir. Bu konuda yapılan ön çalışmalar aşırı aerodinamik girişimlerin önlenmesi için yan yana çalışan türbin aralıklarının en az rotor çapının 10 katı olması gerektiğini ortaya koymuştur.

Rüzgar enerjisinin kullanıldığı alanlar şunlardır;

1. Su pompalama işlerinde,
2. Doğrudan ısı elde etme işlerinde,
3. Sıkıştırılmış hava depolama işlerinde,
4. Elektrik enerjisi üretiminde.

Bunların içinde en çok yaygın olan kullanım alanları su pompalama ve elektrik enerjisi üretme alanlarıdır.

Rüzgardan elektrik enerjisi üretiminde üç şekilde yararlanılabilir.

1. Ulusal şebekeden bağımsız bir şekilde,
2. Ulusal şebekeye bağlanarak,
3. Depolamalı sistemlere depo edilerek.

Rüzgardan elde edilen enerji dört şekilde depo edilir.

1. Bataryalı depolama,
2. Volanlı depolama,
3. Hidrojen depolamalı (H_2O 'un H_2 'i ayrılır.),
4. Su depolamalı (barajlarda su biriktirilir).

1.6. Rüzgar Enerjisinden Yararlanılacak Yerlerin Seçimi

Bu yerlerin seçiminde bölgenin coğrafik ve topoğrafik özellikleri gözönünde bulundurulur. Bu özellikler o bölgede esecek olan rüzgarın şiddet ve sürekliliğinde önemli rol oynar.

Deniz kenarında kara ve denizlerin farklı ısınmasından dolayı meltem rüzgarları oluşmaktadır. Kara ile deniz üzerindeki sıcaklık farkı ne kadar büyük olursa rüzgarın şiddeti de o derecede büyük olur. Yine benzer şekilde deniz ve kara yüzeyinin büyüklüğüne bağlı olarak esme süresi de değişmektedir. Genellikle bu rüzgarların etkisi sahilden 30 - 50 km uzaklara kadar görülür. Bu rüzgarlar ekseri sabah saat 8.30 ile akşam 7.00'ye kadar olan aralıklarda eserler. Bölgenin coğrafik konumlarına göre 5 - 18 m/s arasında değişen hızlarda eserler.

Günlük sıcaklık farkının sebep olduğu bir diğer rüzgar sistemi, vadi rüzgarları olarak bilinir. Bu rüzgarların hızları 5 - 10 m/s arasında değiştiği için vadi bölgeleri de rüzgar enerjisi için uygun olan yerlerdir. Hava kütlelerinin kararlı veya kararsız oluşundan dolayı rüzgar hızı yer seviyesinden yükseldikçe artar. Yapılan çalışmalarda günün sabah ve gece yarısı saatlerinde rüzgarın tepeden aşağı doğru, akşam ve öğlen saatlerinde ise yerden tepeye doğru estiği tespit edilmiştir.

Yukarıda belirtildiği gibi rüzgarın hızı yükseklikle orantılı olarak artar. Meteorolojik çalışmalar sonucu bazı amprik bağıntılar geliştirilmiştir. Havanın kararlı duruma gelmesi halinde belli bir yükseklikteki rüzgarın hızı,

$$V_h = \frac{P_s}{\mu \varrho} \ln \frac{h}{n}$$

bağıntısından hesaplanır /3/.

V_h : yerden h yüksekliğindeki rüzgar hızı (m/s).

P_s : Yer basıncı (Pa).

ϱ : Havanın yoğunluğu (kg/m^3),

μ : 0,4 olan bir sabit,

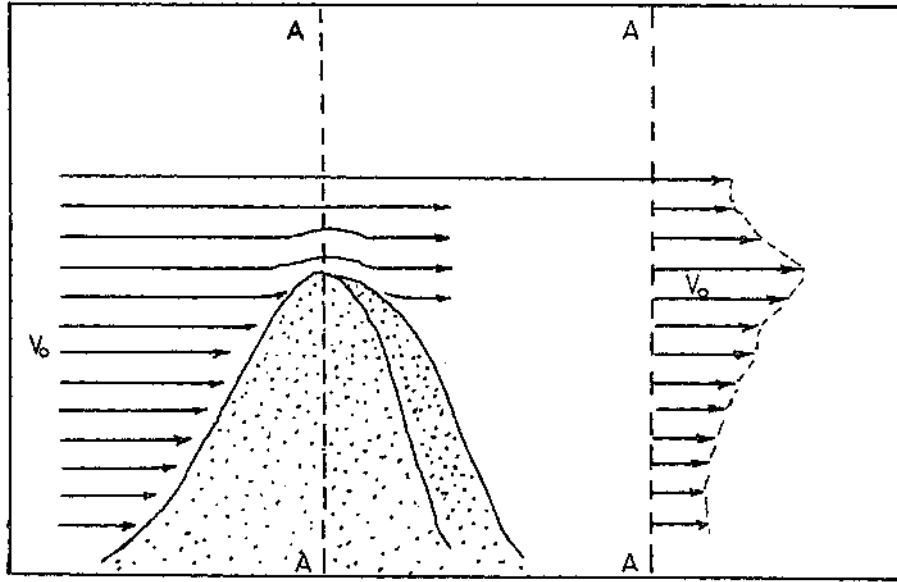
n : 0,1 - 0,4 arasında yüzey pürüzlülük sabiti.

Yere yakın izotermal bir tabaka için de hız aşağıdaki bağıntıdan hesaplanır.

$$V_h = \frac{P_s}{\varrho} \left(\frac{h}{n} \right)^k$$

k : 0,25 - 0,35 arasında değişen bir sabittir / 3 /.

Rüzgar şiddetinin değişmesine yol açan diğer bir faktör yeryüzündeki engebelerdir. Engobenin alt kesiminde hız normal iken üst tarafındaki hız ise normalin üstünde olur.



Şekil 1.1. Engebe üzerinde hızın artışı gösteren hız profili.

Rüzgar enerjisinden istifade edilecek bölgede, rüzgar yatay dağılımı, düşey dağılımı ve esme sıklığı dağılımı tespit edilmelidir. Yatay ve düşey dağılımlar bulunduğundan sonra işlem; seçilen bir yüksekliğe kadar çeşitli seviyeler için tekrarlanarak bölgedeki rüzgar şiddetinin üç boyutlu dağılımı bulunur. Aynı bölge üzerinde rüzgarın hangi şiddette ve ne sıklıkta estiğinin de tespit edilmesi gerekir. İstatistik veriler kullanılarak bir grid ağı dağılımı bulunur, sonra interpolasyonla rüzgar şiddetleri grid düzlemine indirgenir. Bu incelemelerden sonra rüzgar enerjisi üretecek tesisin yeri optimum bir çözümle belirlenir.

1.7. Türkiye'nin Rüzgar Enerjisi Kullanımı

Yurdumuzda rüzgar enerjisinde yararlanma konusunda arzu edilen düzeyde bir çalışma yoktur. Genellikle Marmara bölgesinin güneyinde ve Ege bölgesinde ilkel araçlarla yapılmış rüzgar çarklarında su çıkarmada faydalanılmaktadır. İlkel ve modern yapıdaki rüzgar kuvvet makinalarının sayısı yeterli miktarda bulunmamaktadır. Yurdumuzda halen rüzgar araçları ve bunlara ait yedek parçaların imaline ait bir sanayi olmadığı için kullanılanlar genelde ithal malıdır. Şiddetli rüzgar esen bölgelerimizde öncelikle tarımsal sektöre elektrik enerjisi temin etmek, sulama pompalarının çalıştırılmasında rüzgar enerjisinden yararlanma çok faydalı olacaktır.

Yurdumuzda rüzgar gücünden yararlanmak için araştırma plan ve programların işlerlik kazanması gerekir. Öncelikle kırsal alanlarda rüzgar enerjisinden yararlanma yolları aranmalıdır. Çünkü uzak kırsal bölgelerimizde enerji ihtiyacının küçük ölçüde olduğu bilinmektedir. Bu yöreler enerji merkezlerinde uzak oldukları için, buraları besleyecek elektrik iletim hatları fazla masraf gerektirmektedir. Buna karşılık verim de istenen düzeyde olmamaktadır. Rüzgar enerjisi makinaları basit yapıda ve küçük güçte oldukları gözönüne alınırsa fazla yatırım gerektirmediği gibi işletilmesi de kolay olacaktır.

Rüzgar enerjisinin ekonomikliği, üretilecek enerjinin fiyatına bağlı olacaktır. Yakıt giderleri olmadığı için rüzgar enerjisinin yalnız yatırım ve işletme masrafları söz konusu olur. Bunun için elektrik enerjisi tüketimi az olan

köylerimizde rüzgar türbinleri kurulursa, yani bu yolla daha az yatırımla enerji üretme imkânı sağlanırsa bu konudaki yatırım yükü başka yörelere kaydırılabilir. Bu avantajlardan başka, bu tür araçların geliştirilmesi halinde yurdumuz için yeni bir enerji kaynağı ortaya çıkmış olur.

1.7.1. Türkiye'nin Rüzgar Enerjisi Potansiyeli

Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü ile Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğünün ortak çalışmaları sonuçlarına göre, Türkiye'nin yıllık ortalama rüzgar hızının 2,54 m/s ve rüzgar gücü yoğunluğunun 24 W/m^2 olduğu tespit edilmiştir. Türkiye'nin rüzgar enerjisi potansiyeli bölgelere göre incelendiğinde aşağıdaki tablo ortaya çıkar /4/.

Tablo 11. Bölgelerimizin Ortalama Rüzgar Hızları ve Ortalama Rüzgar Gücü Yoğunluğu

Bölge Adı	Ortalama Rüzgar Gücü Yoğunluğu (W/m^2)	Ortalama Rüzgar Hızı(m/s)
Akdeniz Bölgesi	21,36	2,45
İçanadolu Bölgesi	20,14	2,46
Ege Bölgesi	23,47	2,65
Karadeniz Bölgesi	21,31	2,38
Doğu Anadolu Böl.	13,19	2,12
Güneydoğu Anadolu	29,33	2,69
Marmara Bölgesi	51,91	3,29

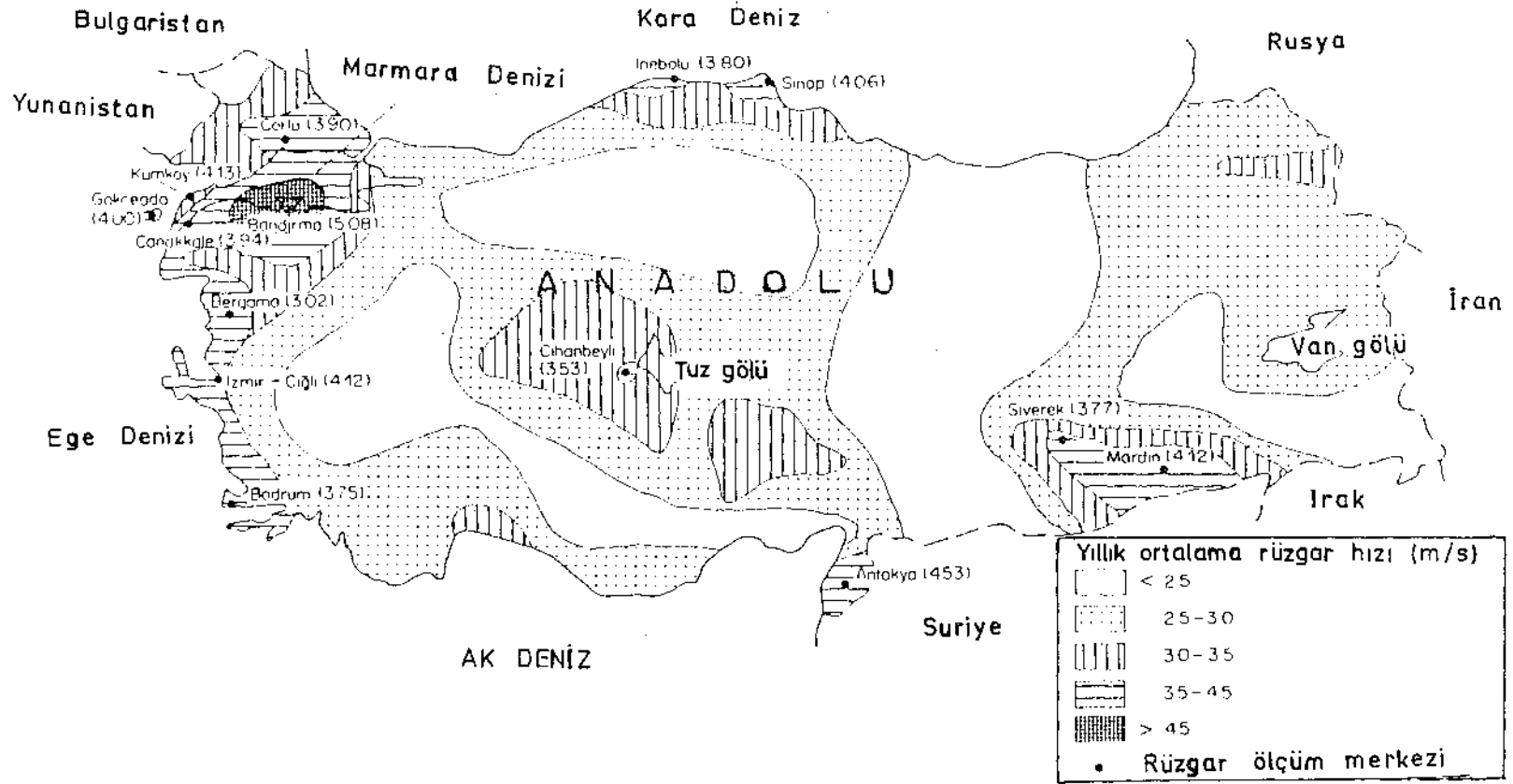
Tabloda Marmara Bölgesi ile Güneydoğu Anadolu Bölgesinin rüzgar gücü yoğunluğunun diğer bölgelere göre daha fazla olduğu görülmektedir. Rüzgar hızları da yine bu iki bölgemizde daha yüksektir. Ege Bölgesi rüzgar gücü yoğunluğu

ve ortalama rüzgar hızı bakımından üçüncü sırada yer almaktadır. Bölgelerin ortalama değerleri yanında yörelerin rüzgar potansiyeli aşağıdaki tabloda ele alınmıştır / 4 /.

Tablo 1.2.Yörelerin Ortalama Rüzgar Hızları ve Rüzgar Gücü Yoğunluğu

Yöre Adı	Rüzgar Gücü Yoğunluğu (W/m^2)	Ortalama Rüzgar Hızı (m/s)
Bandırma	152,6	5,1
Antakya	108,9	4,5
Kumköy	82,0	4,1
Sinop	77,9	4,1
Mardin	81,4	4,1
Gökçeada	74,5	4,0
Çorlu	72,3	4,0
Çanakkale	71,2	3,9

Türkiye'nin rüzgar enerjisi potansiyeli çalışmalarının esas amacı, ölçmeleri mevcut rüzgar hızı kullanılarak rüzgar güç makinalarının büyük bir kısmını en iyi rüzgar alan yerlere yerleştirmektir. Gerçekten her bir ölçme için belirli sürelerde bir yerin rüzgar karakteristiğini verir. Bununla beraber komşu bir bölgenin üzerinde rüzgar hızının ne kadar olacağına dair çeşitli tahminler vardır. Bu tahminleri yapan aletlerin biri interpolasyon tekniği yardımı ile rüzgar hız eğrilerini çizer. Bu gerçekten kullanılabilir bir tekniktir ve bazı istisnalarına rastlanılmasına rağmen oldukça düzgün hassasiyet derecesine erişilebilir. Mesela rüzgar enerjisinin analizlerinin ölçülecek yerlerde orijinal haritası çıkarılmış noktalar tespit edilmesi gerekir. Bu yerler klasik meteoroloji istasyonlarıdır.



Şekil 1.2. Türkiye'nin Yıllık Ortalama Rüzgar Hızı Yoğunluğu /18/.

Bu istasyonların yerleri böyle çalışmalara uygun değildir. Bundan başka rüzgar akış örnekleri ölçme yapılan bir kaç kilometre uzaktaki bir yerde, mahalli topoğrafik durumlara bağlılık kuvvetinden dolayı önemli farklar olabilir. Rüzgar hızlarının tespitindeki bu güçlüklerle rağmen faydalı bilgi rüzgar hız eğrileri haritalarından çıkarılabilir.

117 istasyondan kayıt edilen saatlık verilerin uzun süreli ortalamaları, meydana getirilen rüzgar hız eğrilerini elde etmek için kullanılmıştır. Bu eğriler aynı değerler ile, iki istasyon arasında çizilmiş veya bunlar arasında interpolasyon orantılıdır. Ülkemizdeki rüzgar hızının aylık ortalamasının coğrafi dağılışı rüzgar hız eğrileri boyunca meteorolojik haritalarda gösterilmiştir.

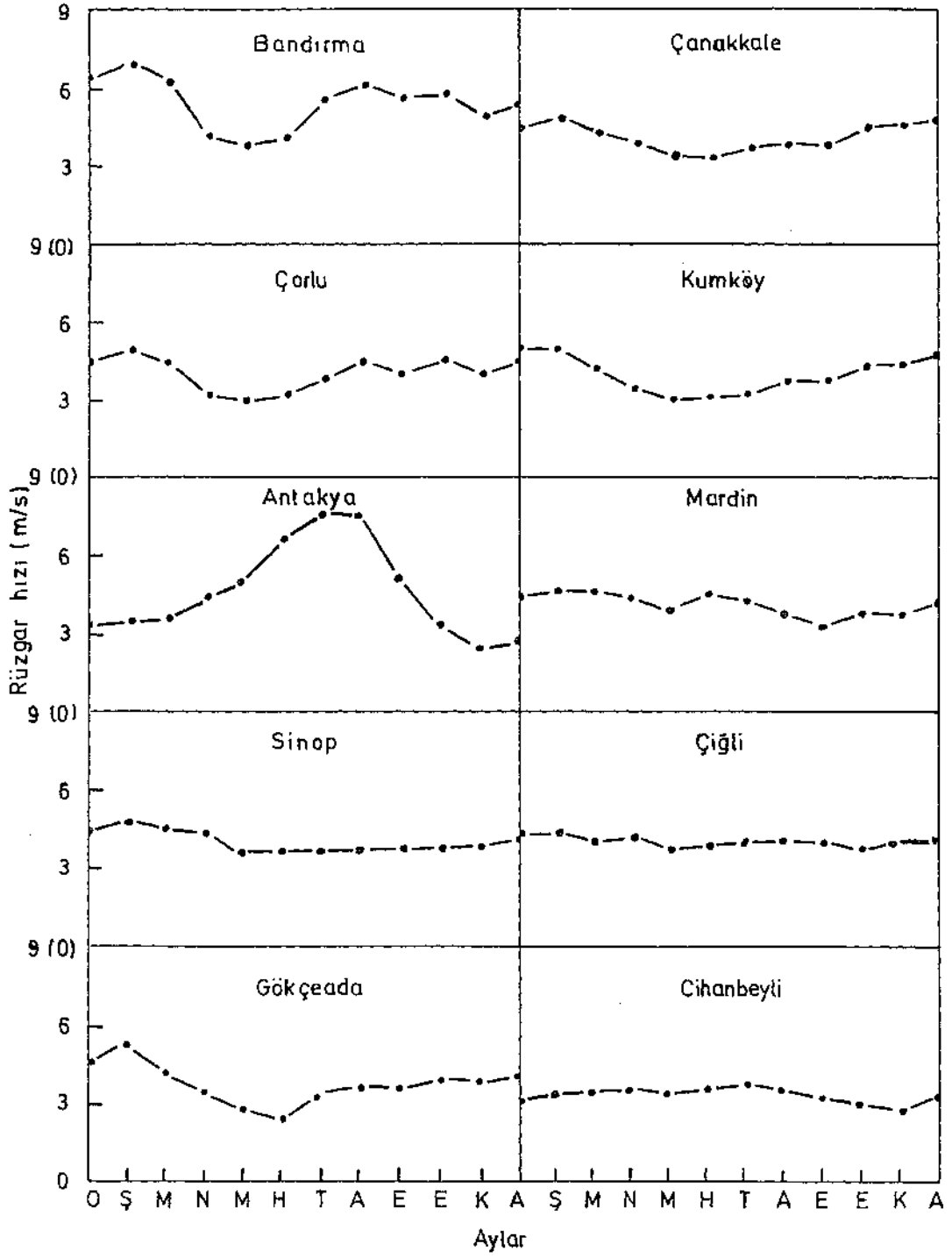
117 merkezin 88'i ülkenin her tarafına dağılmış olup yıllık rüzgar hızı ortalaması oralarda 3 m/s'den daha az kaydedilmiştir. 3 ve 3,5 m/s arasında değişen rüzgar hızında 15 merkez vardır ve diğer 7 merkez 3,5 ve 4 m/s arasındadır. Yıllık maksimum ortalama (4 m/s'den daha büyük) hızlar sadece geriye kalan 7 merkezde gözlenmiştir /18/.

Rüzgar hız eğrilerinin hazırlanmasında kullanılan aynı bilgilerin esası, ülkedeki rüzgar merkezlerini içine alan yıllık ortalama rüzgar hız eğrileri haritalarının çizilmesidir. Bu haritalar ülkemizdeki mevcut rüzgar enerjisi bakımından zengin olan bölgeleri gösterir. Rüzgar enerjisi açısından zengin olan 6 bölgemizi Şekil 2'deki harita göstermektedir. Marmara Denizi kıyıları ve bölgenin iç kesimleri, Güneydoğu Akdeniz kıyı bölgesi, Anadolu'nun güneydoğusu,

Karadeniz kıyı merkezi, Ege Denizi kıyısı ve güney batı kesimi ve Anadolu merkezinde Tuz Gölünün güney kesimleri bu bölgeleri kapsar. Rüzgar hızının aylık değişimi Bandırma, Çanakkale, Çorlu ve Kumköy birinci bölgededir. İkinci bölgede Antakya, üçüncü bölgede Mardin, dördüncü bölgede Sinop, beşinci bölgede Çiğli (İzmir) ve Gökçeada ve altıncı bölgede Cihanbeyli gibi merkezler yer almaktadır.

Ülkemizde en ümit verici yerler ilk iki bölge olduğu görülmektedir. Kabaca 3,5 ve 5 m/s arasında çeşitli rüzgar hızları, Marmara Denizi etrafında, Boğaziçi ve Çanakkale Boğazı ile boğazların bitiminde sınırlanmıştır. Bundan anlaşılıyor ki hava akımı, kara ve deniz arasında günlük sıcaklık farkını yıl olarak da muhafaza etmektedir. Bundan dolayı rüzgar enerjisi yıllık olarak da devamlı hissedilir. Ortak bir özellik bu bölgenin istasyonlarında gözlenmiştir. Yani Bandırma, Çanakkale, Çorlu ve Kumköy istasyonlarının hepsinde zengin hava akımları şubat ayında görülmüştür. Martten sonra akış oranı hazirana kadar azalmış ve daha sonra yeniden artmaya başlamıştır Türkiye'deki diğer istasyonların karşılaştırılmasında en yüksek yıllık ortalama rüzgar hızı Bandırma'da kaydedilmiştir.

Güneydoğu Akdeniz kıyı bölgesi (Antakya), Temmuz ve Ağustos ortalamaları 7 m/s'yi aştığı diğer zengin bir rüzgar bölgesidir. Antakya Akdenize açık bir vadide bulunur. Aralıksız hava akımına, yer ve denizin mevsimlik olarak farklı ısınması sebep olur. Hava akımı vadiler arasında geçince hızı artar.



Şekil 1.3. Türkiye'de seçilmiş 10 bölgede rüzgar hızındaki aylık değişme.

Yalnız herhangi bir yer ve yükseklikte tahmin edilebilen mevcut rüzgar gücünü rüzgar akış modelleri sınırlamıştır. Bu maksat için Weibull dağıtımı denilen bir yöntem kullanılarak Weibull parametreleri ile farklı yükseklik ve engebe kategorileri için her bölgenin ortalama kinetik enerjileri bulunur. Toplam elde edilebilir güç, verilen durumlar için hesaplanır. Türkiye'nin yükseklik ile elde edilebilir gücü incelendiği zaman, rüzgarlı bölgelerde rüzgar potansiyeli ortalaması yerden 10 m yükseklikteki bir yerde 1000 - 3000 kWh/m²yıl arasında değiştiği görülür. 200 m de 3500 - 5500 kWh/m²yıl civarına ulaştığı görülür.

Mevcut araştırmalar, Türkiye'nin nispeten yüksek hızlı bölgelerinde yapılmıştır. Bunlar 10 m yükseklikte 5 m/s hızdan yüksek 3,5 m/s'lik hızdan düşük 6 bölge olarak sınıflandırılmıştır. Rüzgar hızındaki mevsimlik değişimler bu bölgelerde farklıdır, mesela Akdeniz'in güneydoğu kıyısında rüzgar hızı yaz boyunca en yüksek değerlere ulaşır. Burada hız maksimum iken Marmara Bölgesi'nde kış ve ilkbahar mevsimleri arasında bir ara değer yer almaktadır. Bir çok uygulamalar ve ekonomik düşünceler için, sadece rüzgar hızının yıllık ortalaması 5 m/s'den büyük veya eşit olan yerler ekonomiktir. Bunun da sadece birinci bölgedeki yer olan Bandırma olduğu görülür.

Bandırma'da tesis yeri olarak, konum itibarı ile Marmara denizine açılan engebeli ve kuzey doğu yönü, bölgenin hakim rüzgar yönüne tamamen açık ve kuzeybatı ile güneydoğu yönleri dağ ve tepelerle kaplı bir ova üzerinde

kurulmuş bulunan Tarım ve Köyişleri Bakanlığı'na bağlı Koyunculuk Araştırma Enstitüsü arazisi seçilmiştir /7/.

Yapılan araştırmalar önceki hesaplardan ayrı olmayıp ülkenin bütün kara alanının %2'sinde elektrik üretiminde yararlanılabilir. Halbuki küçük ölçüde rüzgar uygulamaları için bütün karanın dörtte birinden yararlanılabilir. Ülke-mizin üç tarafının denizlerle çevrili olması, özellikle deniz kenarlarında, tepelerde ve denize açılan vadilerin ağzında gerek çok kanatlı türbinlerin ve gerekse küçük güçteki rüzgar jeneratörlerinin enerji üretimi amacıyla kullanılması mümkün görülmektedir.

Rüzgar enerjisi sistemleri hakkındaki araştırmalar, üniversitelerin bazılarında master veya doktora çalışması olarak yapılmaktadır. Bunun için, ülkemizde rüzgar enerjisinden yararlanarak çok az sayıda elektrik enerjisi üretmek için küçük güçte kurulu güce dayalı tesislere rastlanılır. Çok sayıda küçük çapta su pompalama ve tahıl öğütme amaçları için rüzgar enerjisinden yararlanma yoluna gidilmiştir.

Türkiye'nin faydalanılabilir rüzgar enerjisi dağılımlarından hareketle rüzgar enerjisi kullanılacak sahalara, geniş ölçekli olarak ortaya çıkar. Bölgenin topoğrafik ve termik yapısı ile rüzgar enerjisinin bölgedeki yatay ve düşey değişimi yararlanabilme imkânı üzerinde önemli rol oynar. Ülkemizin şartlarına uygun teknolojiler, rüzgar sistemlerinin kurulacağı bölgelerin tespit edilmesi gerekir. Kurulacak yüksek güçteki tesisler, önemli ölçüde petrol ve kömür tasarrufuna sebep olabilirler.

2. RÜZGAR ENERJİSİ TEKNOLOJİSİ

2.1. Rüzgar Enerji Sistemlerinin Çeşitleri

Rüzgar enerji sistemleri çalışma eksenlerine göre ikiye ayrılır.

2.1.1. Yatay Eksenli Rüzgar Enerji Makinaları

Bu tip rüzgar türbinleri kanat sayısına ve çarkı taşıyan kulenin önünde veya arkasında bulunması durumlarına göre çeşitleri vardır. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin çeşitleri şunlardır:

1. Tek kanatlı,
2. Çift kanatlı,
3. Üç kanatlı,
4. Dört kanatlı,
5. Çok kanatlı,
6. Kulenin önünde kuyruk dümenli,
7. Kulenin gerisinde kendi kendine yönelen,
8. Çok çarklı,
9. Yelken kanatlı,
10. Çapraz akışlı Savonius türbinleri.

2.1.2. Düşey Eksenli Rüzgar Enerji Makinaları

Bu tip rüzgar enerji sistemlerinin dönme eksenleri düşey konumdadır. Bunların çeşitleri şunlardır:

1. Savonius tipi,
2. Paletli tip,
3. Kepçeli tip,
4. Çapraz akışlı türbin tipi.

Yukarıda sayılan rüzgar türbin çeşitleri dışında da bir çok çeşitleri bulunmaktadır. Bunların birleştirilmiş şekilleri vardır. Fakat elektrik enerjisi üretiminde en çok kullanılanları çift ve üç kanatlı sistemlerdir. Son senelerde üç kanatlı veya iki kanatlı dev rüzgar enerji sistemleri kurulmuştur. Ayrıca su pompalama işlerinde çok kanatlı rüzgar enerji sistemlerinden yararlanılır.

2.2 Faydalanılabilir Rüzgar Enerjisi Hesabı

Rüzgar pervaneleri hakkında ilk çalışmalar Betz tarafından yapılmıştır. Pervanenin sonsuz kanatlı ve göbeksiz olduğunu kabul etmiştir. Bundan başka pervane boyunca rüzgar hızının aksenal ve pervanenin süpürdüğü alan boyunca düzgün olduğu varsayılmıştır.

Pervanenin önünde ve pervaneden yeteri kadar uzaktaki serbest rüzgar hızı $V_1 = V_0$ olur. Pervaneye yaklaştıkça rüzgar hızı azalır ve enerjisinin bir kısmını pervaneye bıraktıktan sonra yoluna devam eder. Ancak pervanenin gerisinde minimum bir değere (V_2) ulaştıktan sonra pervaneden yeteri kadar uzakta tekrar V_0 serbest rüzgar hızına ulaşır.

Euler teoremine göre pervaneye uygulanan kuvvet;

$$F = \rho A_T \cdot V_T (V_1 - V_2) \quad (2.1)$$

A_T : pervanenin süpürdüğü alan (m^2),

V_T : pervanenin arasındaki rüzgar hızı (m/s),

ρ : havanın yoğunluğu (kg/m^3),

V_1 : pervanenin ilerisindeki rüzgar hızı (m/s),

V_2 : pervanenin gerisindeki rüzgar hızı (m/s).

Pervanenin kanatları tarafından harcanan güç ise, pervaneye uygulanan kuvvet ile pervane arasındaki hızın çarpımına eşit olur.

$$P = FV_T = \rho A_T V_T (V_1 - V_2) V_T \quad (2.2)$$

$$P = \rho A_T V_T^2 (V_1 - V_2) \quad (2.3)$$

Bu bağıntıya göre harcanan enerji rüzgarın kinetik enerjisinden alınmaktadır. Kinetik enerjisindeki değişme miktarı hesaplanırken rüzgarın pervaneye girmeden önceki kinetik enerjisi, pervaneyi terkettikten sonraki kinetik enerjisinden büyük olacaktır. Buna göre $Ek_1 > Ek_2$ olur.

$$Ek_1 = \frac{1}{2} m_A V_1^2 \quad (2.4)$$

$$Ek_2 = \frac{1}{2} m_A V_2^2 \quad (2.5)$$

m_A , akış halindeki rüzgarın kütleli debisi (kg/s) olup değeri ise;

$$m_A = \rho A_T V_T \quad (2.6)$$

eşitliği ile belirlenir.

Kinetik enerji değişimi,

$$\Delta Ek = Ek_1 - Ek_2 = \frac{1}{2} m_A V_1^2 - \frac{1}{2} m_A V_2^2 \quad (2.7)$$

$$\Delta Ek = \frac{1}{2} m_A (V_1^2 - V_2^2) \quad (2.8)$$

(2.6) değeri (2.8)'de yerine yazılırsa;

$$\Delta Ek = \frac{1}{2} \rho A_T V_T (V_1^2 - V_2^2) \quad (2.9)$$

elde edilir.

Pervanenin kanatları tarafından yutulan güç, aynı zamanda kinetik enerji değişimine eşit olur. O halde,

$$P = \Delta E_k \quad (2.10)$$

yazılabilir.

(2.3) ve (2.9) değerleri (2.10)'da yerine yazılır.

$$\varphi A_T V_T^2 (V_1 - V_2) = \frac{1}{2} \varphi A_T V_T (V_1^2 - V_2^2) \quad (2.11)$$

Denklemin her iki tarafı $\varphi A_T V_T$ için sadeleştirilirse,

$$V_T (V_1 - V_2) = \frac{1}{2} (V_1^2 - V_2^2) \quad (2.12)$$

elde edilir.

Denklemin yani (2.12) ifadesinin sağ tarafı çarpanlarına ayrılabilir.

$$V_T (V_1 - V_2) = \frac{1}{2} (V_1 + V_2)(V_1 - V_2) \quad (2.13)$$

(2.13) ifadesinin her iki tarafı $(V_1 - V_2)$ ile sadeleştirirse;

$$V_T = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (2.14)$$

elde edilir.

Elde edilen (2.14) değeri yukarıdaki kuvvet (2.1) denkleminde yerine yazılırsa;

$$F = \varphi A_T V_T (V_1 - V_2) = \varphi A_T \left(\frac{V_1 + V_2}{2} \right) (V_1 - V_2) \quad (2.15)$$

$$F = \frac{1}{2} \varphi A_T (V_1^2 - V_2^2) \quad (2.16)$$

elde edilir.

Güç (2.3) ifadesinde de V_T yani (2.14) değeri yerine yazılırsa,

$$P = q A_T V_T^2 (V_1 - V_2) = q A_T \left(\frac{V_1 - V_2}{2} \right) (V_1 - V_2) \quad (2.17)$$

$$P = \frac{1}{4} q A_T (V_1^2 - V_2^2) (V_1 - V_2) \quad (2.18)$$

bulunur.

V_2 'nin hangi değerlerinde maksimum güç elde edilebileceğini belirlemek için, $V_1 = V_0$ alıp güç (2.18) ifadesinde yerine yazarak V_2 'ye göre türevinin alınması gerekir.

$$P = \frac{1}{4} q A_T (V_0^2 - V_2^2) (V_0 - V_2) \quad (2.19)$$

$$P = \frac{1}{4} q A_T (V_0^3 - V_0^2 V_2 - V_0 V_2^2 - V_2^3) \quad (2.20)$$

$$\frac{dP}{dV_2} = \frac{1}{4} q A_T (V_0^2 - 2V_0 V_2 - 3V_2^2) \quad (2.21)$$

$$\frac{dP}{dV_2} = \frac{1}{4} q A_T (V_0 - V_2) (V_0 - 3V_2) \quad (2.22)$$

Bulunan bu denklemde $\frac{dP}{dV} = 0$ için iki çözümü vardır.

$V_0 - V_2 = 0$ eşitliğinden $V_2 = -V_0$ bulunur ki, burada (-) işaretinin fiziksel bir anlamı olmadığı için bu değer kullanılmaz.

$V_0 - 3V_2 = 0$ eşitliğinde $V_2 = \frac{V_0}{3}$ değeri maksimum gücün elde edildiği değerdir. Buna göre $V_1 = V_0$ ve $V_2 = \frac{V_0}{3}$ değerleri (2.18) ifadesinde yerine yazılarak maksimum güç

ifadesi, V_0 rüzgar hızına göre bulunur.

$$P_{\max} = \frac{1}{4} \varrho A_T (V_0^2 - \frac{V_0^2}{9})(V_0 + \frac{V_0}{3}) \quad (2.23)$$

$$P_{\max} = \frac{1}{4} \varrho A_T (\frac{8V_0^2}{9})(\frac{4V_0}{3}) \quad (2.24)$$

$$P_{\max} = \frac{8}{27} \varrho A_T V_0^3 \quad (2.25)$$

Havanın yoğunluğu sıcaklığa göre değişir. Hangi sıcaklıkta çalışılıyorsa o sıcaklıktaki havanın yoğunluk değeri maksimum güç bağıntısında yerine yazılır. (Normal şartlarda ve 20°C sıcaklıkta $\varrho = 1,2045 \text{ kg/m}^3$ alınır.)

$$P_{\max} = 0,356 A_T V_0^3 \quad (2.26)$$

P : elde edilecek güç (Watt)

$P_{\max}$: elde edilebilecek maksimum güç (Watt)

V_0 : normal rüzgar hızı (m/s)

A_T : pervanenin süpürdüğü alan (m^2)

ϱ : havanın yoğunluğu (kg/m^3)

Herhangi bir pervane konulmadan V_0 hızındaki rüzgarın A_T alanını geçerken birim zamanda toplam kinetik enerjisi;

$$E_k = \frac{1}{2} m_A V_0^2 \quad (2.27)$$

eşitliği ile bulunur. Bu eşitliğe (2.6) değeri m_A yerine taşınırsa;

$$E_k = \frac{1}{2} \varrho A_T V_T V_0^2 \quad (2.28)$$

elde edilir. Pervane olmadığı için $V_T = V_0$ kabul edilebilir.

V_o rüzgar hızı (2.27) ifadesinde yerine yazılarak,

$$E_k = \frac{1}{2} \rho A_T V_o^2 \quad (2.29)$$

$$E_k = \frac{1}{2} \rho A_T V_o^3 \quad (2.30)$$

elde edilir.

Maksimum güç denklemi ile pervanesiz A_T alanından geçen rüzgarın güç denklemi taraf tarafa oranlanırsa;

$$\frac{P_{max}}{E_k} = \frac{\frac{8}{27} \rho A_T V_o^3}{\frac{1}{2} \rho A_T V_o^3} = \frac{16}{27} = 0,5926 \quad (2.31)$$

değeri bulunur.

Betz limiti denilen bu değerim anlamı, bir rüzgar pervanesiyle ideal bir şekilde mevcut rüzgar enerjisinin ancak 0,5926 kadarını faydalı enerji haline dönüştürmek mümkündür.

Rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretiminde verilen bir zamanda elde edilecek enerji miktarı,

$$E = \frac{1}{2} \rho A_T V_o^3 t \quad (2.32)$$

bağıntısı ile bulunur.

E: elde edilecek enerji miktarı (kW.h)

t: birim zaman (saat)

Belli bir yükseklikte ölçülmüş bulunan rüzgar hızlarının çevresel faktörler gözönüne alınarak başka yüksekliğe taşınmasında, uzun dönem uygulamalarda iyi sonuç verdiği

bilinen aşağıdaki şu bağıntı gerçekleştirilmiştir /7/.

$$V_{h_2} = V_{h_1} \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^n$$

V_{h_2} : h_2 yüksekliğindeki rüzgar hızı (m/s)

V_{h_1} : h_1 yüksekliğindeki rüzgar hızı (m/s)

n : 0,10 - 0,40 arasında çevre yüzey pürüzlülük sabitesidir.

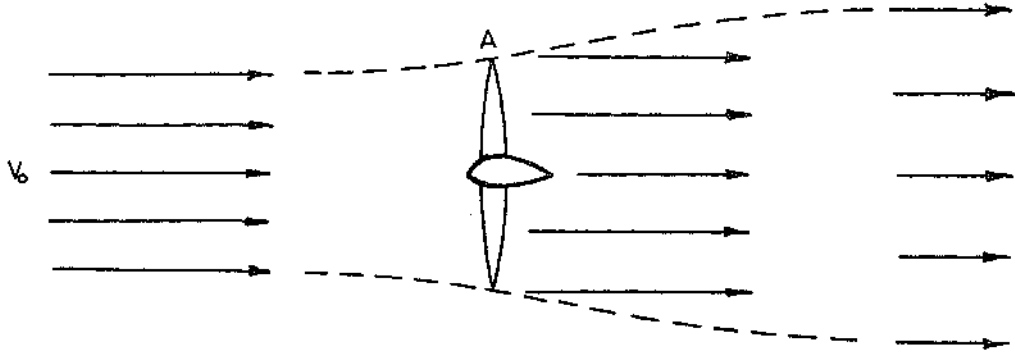
2.3. Aerodinamik Güç ve Eğrisi

Aerodinamik hesaplamalarda güç eğrisi aşağıdaki şekilde tanımlanır. Rüzgar milinin akış yönüne karşı uygun bir mesafede, V_0 hızındaki rüzgar yukarıda belirtildiği gibi rotora enerji vererek akıp gidecektir. Rotora girdikten sonra hızının bir kısmını kaybederek yoluna devam edecektir. Bu durumda güç eğrisi, bozulmamış bu rüzgar hızı V_0 ile oluşan güç P , arasında ilişki olarak görülür. Fakat bu tanım, tabii havadaki bir rüzgar mili için çok şüpheli değerler alır/8,9/.

Burada temel zorluk yüksek derecede homogen ve simetrik olan düzgün bir laminar akış ele alınmasıdır. Fakat tabiat- ta çevre bu durumu kaçınılmaz bir şekilde saptırabilir.

Yer yüzeyi rüzgara karşı direnerek düzey bir rüzgar hızı gradyanı oluşturacaktır. Tepe, vadi, ağaç, bina vs. gibi engeller rüzgar milinin dışında bile rüzgarın düz bir hat halinde olmasını engellemektedir. Bu durum neticede rüzgar hızının yatay gradyanlarını da oluşturarak odaklaşma etkileri meydana getirir. Türbülansın en güçlüsü, pürüzlü yüzey

ve termal etkilerle oluşturulur. Bu türbülans, aynı zamanda düzlemdeki iki noktada tabii bir şekilde eşit olmayan bölgesel türbülansların oluşmasına yol açar /10/.



Şekil 2.1. Bir rüzgar mili etrafındaki aerodinamik akış /3/.

2.4. Fiili ve Sürme Rüzgar Hızları

Bu arada değişik bir görüş kabul etmek gerekir. Yukarıdaki şekil (2.1) de görüldüğü gibi rotor rüzgar alanını saptırmaktadır. Böylece rotor düzlemindeki rüzgar alanı, bir güç eğrisi tanımında referans olarak pek ilginç değildir. Akış yönündeki hız, gerçekten rüzgar mili hareket ettirildiği taktirde rotor düzlemindeki hız serbest alan hızının yerine seçilebilir. Bu fiili rüzgar hızı, buradaki rüzgarda olduğu gibi bir bölgenin kaynaklarını belirleyen ilgili hızdır. Bu durumda bile, serbest alan hızının rotor düzlemi üzerinde sabit olmadığı hatırlanmalıdır. Bu durumda rüzgar hızı bir vektör fonksiyonu $v(r)$ olarak tanımlanır. Rüzgar milini çeviren rüzgar, rotor alanı üzerinde uygun bir ortalama olabilir. Bu ortalamanın rotor eksenine boyunca

$\hat{n}$ bileşenini ele alırsak sürme rüzgar hızı şu şekilde bulunur/3,19/.

$$V = \int_A v(r) \hat{n} dA \quad (2.33)$$

Lineer rüzgar kayması ve ihmal edilebilir türbülanslı durumda, sürme rüzgar hızı pervane göbeği yüksekliğindeki fiili hıza eşittir.

Bu ortalama hız tabiiki tahminidir ve pratikte kullanışlı değildir, fakat durumun anlaşılmasına çalışılırken teorik olarak kullanışlıdır. Pratikte daha emin bir durumda, uygun bir mesafede bir direk üzerine anemometre yerleştirilirse ölçülen rüzgar hızı V_0 , sürme hızı v 'nin iyi bir karşılığı kabul edilirse rüzgar mili gücü P , v 'nin bir fonksiyonu olur. Yani $P = p(v)$ 'dir. Eğer v iyi seçilmişse $V_0 = v$ durumunda gerçek güç eğrisi $P(V_0)$ 'nin $p(v)$ olduğu kabul edilebilir.

Rüzgar milini çeviren fiili rüzgar hızı tasarımı rotor merkezindeki bir fiili hızın daha basit bir formda olacak şekildedir. Fiili rüzgar hızı iki bakımdan kullanışlıdır. Birincisi, bir bölgede performans tahminleri yaparken makina olmadan bir direk üzerindeki rüzgar hızlarının ölçümleri ile başlanır, yani fiili serbest alan rüzgar hızı ölçülür, daha sonra performans hesaplanabilir.

$P(v)$ güç eğrisinde v ile P 'nin ani ve arka arkaya dayanması gerekir. Fakat türbülansın dolaylı çok büyük zorluklar ortaya çıkar. Rüzgar esmesinin alternatif bir tanımı olan türbülans, sürme hızı ile normal rüzgar hızının tam uygun olmayan karışıklıkların oluşmasıyla ölçümlerde

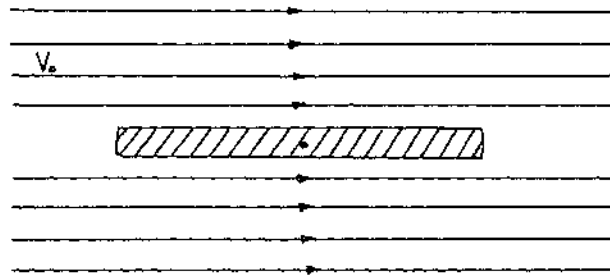
belirsizliklere yol açar. Bir rüzgar türbininin önünde belli bir mesafeye yerleştirilen bir anemometre ele alırsak büyük bir girdap toplam rotor alanı ve rüzgar uyarısıyla belirlenen yavaş bir çalkalanmaya sebep olur. Bu çalkalanma yani yüksek frekans önce rüzgar uyarıcısı ve D/v saniye sonra rotorun sadece bir kısmında görülür. Bu olay rüzgar uyarısını atlayarak rotora çarpabilir veya rotora gelmeden etkisini kaybedebilir. Bu durum uygunsuzluğa sebep olduğu gibi güç eğrisindeki yayılmayı da artırır /10,13/.

Türbülansın iki farklı etkisi bulunur. Burada bahsedilen türbülans, kanada çarpan rüzgarın hız ve yönü oldukça hızlı bir şekilde değiştirmeye sebep olur. Bu olay güç eğrisiyle tanımlandığı gibi rüzgar hızı değişimleri güç üretimini değiştireceği muhakkaktır. Güç eğrisi ölçümlerinde ana problem anemometredeki rüzgar hızının benzer değişimleri sürme rüzgar hızı ile tam uyum içinde olmaması ve dolayısıyla güç eğrisi dağılmasına sebep olmasıdır. Güç eğrisi için aerodinamik temelin bu tarzda anlaşılması kanatlar etrafında laminar bir akış farzedilebilir. Bu akışın türbülanslı dağınıklığı, aerodinamik kuvvetleri ve güç eğrisini değiştirir. Güç eğrisinin türbülansla değişimi hakkında çok az şey bilinmektedir. Bu yüzden, bu ihtimal için bir belirsizlik elemanı tanımlanamaz /3,11/.

2.5. Rüzgar Pervanesinin Aerodinamik Özellikleri

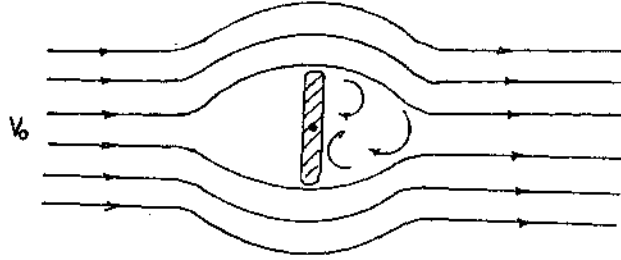
Rüzgar pervanesi, hareket halindeki havanın kinetik enerjisini mekanik enerjiye çeviren rüzgar türbininin en önemli kısmıdır. Bunun için pervanenin, rüzgar kuvvet makinelerinde en etken parçası olduğu bilinmektedir. Yukarıda da anlatıldığı gibi bu pervanelerin yapı özellikleri, rüzgar kuvvet makinelerinin tipine göre değişiklik göstermektedir. Rüzgar pervanesi bez, tahta, çelik, alüminyum sac, fiberglas ve benzeri malzemelerden yapılmış kanatlardan oluşmaktadır /13, 20/.

Bazı aerodinamik olayların daha iyi açıklanabilmesi için hava akımının bir çok akım çizgilerinden oluştuğu kabul edilir. Gerçekte bu akım çizgileri görülmez, ama var olduğu kabul edilir. Rüzgar bir cisim üzerine etki ettiği zaman, bir takım kuvvetlerin ve momentlerin oluşmasına sebep olur. Rüzgarın, eksenî etrafında dönebilecek şekilde yataklanmış bir düz, dikdörtgen şeklindeki bir plaka üzerine etki ettiği düşünülerek plakanın çeşitli konumlarına bağlı olarak belirecek olaylar incelenir.



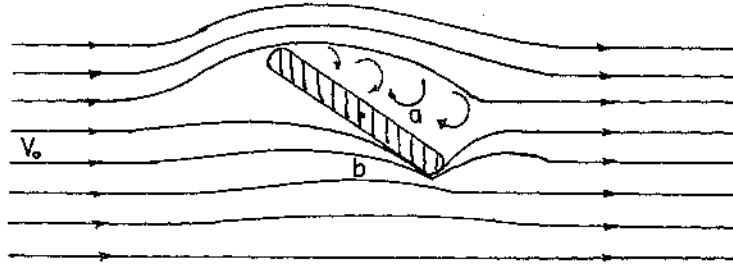
Şekil 2.2. Hava akımına paralel bir plakanın etrafındaki paralel akım çizgileri.

Yukarıdaki şekilde akım çizgileri levhanın etrafında paralel ve simetrik bir durumda yoluna devam edecektir. Burada dönebilmesi söz konusu değildir.



Şekil 2.3. Hava akımına dik bir plakanın etrafındaki akım çizgileri.

Şekilde görüldüğü gibi plaka akım çizgilerine dik ise, akım çizgilerinde bir yığılma olur ve sonuçta bir kuvvet ortaya çıkar. Fakat plaka yerinde dönmez.



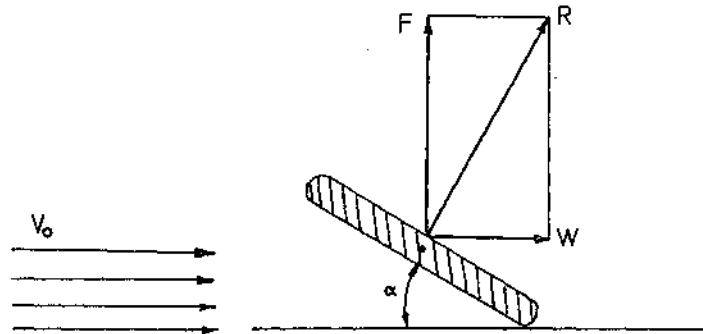
a = Alçak basınç bölgesi

b = Yüksek basınç bölgesi

Şekil 2.4. Hava akımına meyilli bir plakadaki akım çizgilerinin durumu.

Şekil 2.4.'te görülen levha hava akımına meyilli olduğu için plaka stabil yatay konuma gelinceye kadar bir dönme-momentini etkisi altında kalır.

Dönme momenti etkisi altında kalan plaka bu durumda simetrik olmayan bir basınç etkisi altında kalır. Yığılma noktasında akım çizgileri sık, diğer yerlerde daha seyrek-
tir. Akım çizgilerinin sık olması halinde daha büyük basınç, seyrek akması halinde de küçük bir basınç ortaya çıkmaktadır. Bunun için levhanın akım tarafı yüksek basınç, diğer tara-
fı alçak basınç etkisinde kalır. Ekseni etrafında kolayca dönebilen bir plaka üzerine basıncın farklı olarak dağılı-
şı, dönme momentinin doğmasına sebep olur. Bu plakanın dönme eksenini ile orta eksenini bir arada bulunmaz. Bunun için plaka bir yönelme açısına sahip olur. Bu açıdan dolayı plaka üzerine bir çok kuvvet etki eder.



Şekil 2.5. Plaka üzerine etki eden kuvvetler.

Yukarıdaki şekilde belirtildiği gibi, plaka üzerine etki eden bütün kuvvetlerin R bileşkesi, birbirine dik olan iki bileşene yani F ve W 'ye ayrılabilir. Bu bileşenlerden F yukarıya yönelmiş olan çalıştırma kuvveti, diğeri ise dinamik direnç kuvvetidir. Rüzgar doğrultusuna dik olan F kuvveti, plakanın alt tarafında bir yüksek

basınç bölgesi, üst tarafında ise bir alçak basınç bölgesi oluşmaktadır. Direç kuvveti, plakanın rüzgara karşı hareketi yani kanadın rüzgara karşı ileri geri hareket yapmadan sabit tutulması yönünden gerekli bir kuvvettir.

Bu kuvvetlerin oranı, α yönelme veya hücum açısına ve yüzeyin şekline bağlıdır. Rüzgar pervanelerinde akım çizgilerinin yoğunlaşmasına ve kuvvetli girdapların oluşmasına sebep olduğundan bu oran düz bir plakada yetersiz olur.

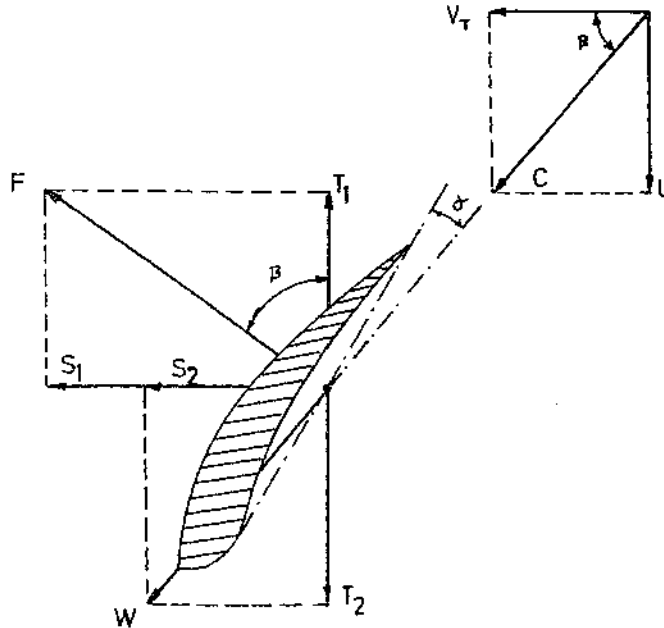
Rüzgar pervane kanatlarının profil şekillendirilmesi yapılırken kanat profilinin rüzgara karşı gösterdiği direncin gözönünde bulundurulması gerekir. Hava zerreciklerinin kanat üst yüzeyine sürtünmesinden üst yüzey direnci oluşur. Bu direncin değeri, yüzeyin cinsine bağlı olarak değişir. Rüzgarın etki ettiği yüzeyin büyüklüğüne göre profil direnci ortaya çıkar. Buradaki sürtünme ile basınç dirençlerini küçültmek için kanatların akım çizgilerine uygun biçimlendirilmesi gerekir. Belirli bir kanat uzunluğunda kanadın alt tarafı ile üst tarafı arasındaki basınç farkının dengelenmesi sırasında basıncın yüksek olduğu taraftan kanadın üst tarafına doğru bir akış görülmektedir. Bu durum, çalıştırma kuvvetinin kanadın son tarafına doğru azalmasına sebep olmaktadır.

2.5.1. Rüzgar Pervanesi Kanatlarının Maruz Kaldığı Kuvvetler

Rüzgar pervane kanatlarının arasına aksenal yönde girmekte ve kanatları eksene dikey olarak hareket ettirmektedir. Rüzgar, dönen kanatlar arasında hızının bir kısmını kaybeder. Yani pervane hızın belli bir miktarını frenler. Normal rüzgar hızı V_0 ile gösterildiğine göre, en iyi çalışma sırasında,

$$V_T = \frac{2}{3} V_0 \quad (2.35)$$

eşitliğine göre V_T dönen pervane tarafından frenlenen rüzgar hızıdır. Rüzgar hızı ile harekete geçen pervane kanadının herhangi bir noktasının çevresel hızı U ile gösterilirse, aynı noktaya U hızına dik olarak V_T hızı da etki eder.



Şekil 2.6. Pervane Kanadındaki Kuvvetlerin Durumu

Şekil (2.5.)'te gösterildiği gibi V_r ile U hızlarının bileşkesi alınabilir. Bu bileşke hız C ile gösterilirse, bu bileşke hızla eksen doğrultusu arasındaki açısı için bazı trigonometrik bağıntılar yazılabilir.

$$\sin\beta = \frac{U}{C} \quad (a), \quad \cos\beta = \frac{V_r}{C} \quad (b), \quad \tan\beta = \frac{U}{V_r} \quad (c).$$

Kanadın her noktada en uygun bir eğim veya yönelme açısına sahip olacak şekilde projelendirilmesi durumunda, kanadın her noktasında etkili olacak çalıştırma ve direnç kuvveti aşağıdaki eşitliklerden yararlanılarak bulunabilir.

$$F_r = \frac{1}{2} \rho f C_a C^2 \quad (2.36)$$

$$W_r = \frac{1}{2} \rho f C_w C^2 \quad (2.37)$$

Bu eşitliklerde:

F_r : çalıştırma kuvveti (N),

W_r : direnç kuvveti (N),

ρ : havanın yoğunluğu (kg/m^3),

C : bileşke hız (m/s),

f : söz konusu yerdeki kanat parçasının alanı (m^2),

C_a : çalıştırma katsayısı (-),

C_w : direnç katsayısıdır (-).

Yukarıdaki şekil (2.5)'te gösterilen çalıştırma ve direnç kuvvetleri yatay ve dikey bileşenlerine ayrılabilir. Bu bileşenlerin değerleri şu şekilde yazılabilir (11,12).

$$T_1 = F_r \cos\beta \quad (d), \quad T_2 = W_r \sin\beta \quad (e)$$

$$S_1 = F_r \sin \beta \quad (f), \quad S_2 = W_r \cos \beta \quad (g)$$

Burada T_1 , kanat hareketi yönünde ve T_2 de, kanat hareketinin zıt yönündedir. Hareket doğrultusundaki kuvvetlerin toplamı,

$$T = F_r \cos \beta - W_r \sin \beta \quad (2.38)$$

şeklinde yazılabilir.

Hareket doğrultusuna dik olan kuvvetlerin toplamı da,

$$S = F_r \sin \beta + W_r \cos \beta \quad (2.39)$$

olarak yazılabilir.

Direnç kuvveti, çalıştırma kuvveti yanında çok küçük olduğu için ihmal edilebilir. Direnç kuvvetleri ihmal edildikten sonra kalan S ve T kuvvetleri taraf tarafa oranlanır.

$$\frac{S}{T} = \frac{F_r \sin \beta}{F_r \cos \beta} = \tan \beta \quad (2.40)$$

$$\tan \beta = \frac{U}{V_r} \quad \text{olduğu yukarıda (c) gösterilmiştir. (2.40)}$$

ile (c) birbirlerine eşittir. Bu eşitlik,

$$\tan \beta = \frac{S}{T} = \frac{U}{V_r} \quad (2.41)$$

şeklinde gösterilebilir.

Yapılan bu kuvvet ve hız analizleri, f büyüklüğündeki kanat parçacığı içindir. Halbuki bütün kanat çok küçük parçacıklardan meydana gelmiştir. Her parçaya ait kuvvetler toplanarak tüm kanada etki eden kuvvetler bulunabilir.

Kanadın uzunluğu l , genişliği de b ile gösterilirse, kanadın tamamına etki eden çalıştırma kuvveti,

$$F_r = \frac{1}{2} \rho l b C_a C^2 \quad (2.42)$$

şeklinde olur.

Pervaneden dolayı süpürme alanı içinde geçen havaya etki eden $S = F_r \sin \beta$ kuvveti, kanatlardan dolayı büyüdüğünde Z kanat sayısı ile çarpmak gerekir.

$$S = Z F_r \sin \beta \quad (2.43)$$

Yukarıdaki (a) ve (2.42) değerleri (2.43) eşitliğinde yerine yazılırsa,

$$S = Z \frac{1}{2} \rho l b C_a C^2 \frac{U}{C} = \frac{1}{2} Z \rho l b U C_a C \quad (2.44)$$

elde edilir /20/.

S kuvveti, $2 \pi r l$ alanındaki daire yüzeyi içinden geçen havaya etki eder. Bu alan da pervanenin süpürdüğü alan olarak bilinir. Pervanenin süpürdüğü alan içerisinden geçen hava miktarı,

$$Q = 2 \pi r l V_T \quad (2.45)$$

eşitliği ile hesaplanır.

Pervanenin arasında geçen hava miktarının hızı, S kuvvetinin yardımı ile her saniyede pervanenin önünde esen rüzgarın hızı V_1 ve pervanenin arkasına geçen rüzgarın hızı da V_2 olduğuna göre V_1 'den V_2 'ye düşürülmektedir. Buna göre pervanenin kanatları bir miktar gücü frenler.

Hız düşüşünden dolayı süpürme alanı içerisinde rüzgarın yapmış olduğu basınç kuvveti (2.1) bağıntısına göre bulunabilir. Bu bağıntı hacimsel debiye göre yeniden düzenlenerek,

$$F = \rho Q(V_1 - V_2) \quad (2.46)$$

şeklinde yazılabilir.

Pervaneden dolayı süpürme alanı içerisinde geçen havaya etki eden (2.44) kuvveti ile süpürme alanı içerisinde rüzgarın pervaneye uyguladığı kuvvetler (2.46) birbirine eşit olur. Buna göre (2.44) ifadesi ile (2.46) ifadesi birbirine eşitlenebilir.

$$\frac{1}{2} \rho Z U C_a l b C = 2 \rho \pi r l V_T (V_1 - V_2) \quad (2.47)$$

Eşitliğin her iki tarafında ρ ve l değerleri sadeleştirilebilir. Pervanenin arasındaki hızın değeri olan (2.14) ifadesi V_2 'ye göre düzenlenerek,

$$V_2 = 2V_T - V_1 \quad (2.48)$$

elde edilir. Bulunan bu değer (2.47) ifadesinde yerine yazılır.

$$\frac{1}{2} Z U C b C_a = 2 \pi r V_T (V_1 - 2V_T - V_1) \quad (2.49)$$

Bulunan bu son ifadede V_T yerine (2.35)'teki değeri yazılarak gerekli kısaltmalar yapılarak, kanat genişliği olan b 'ye göre en son düzenlemeler yapıldığı zaman aşağıdaki ifade elde edilir.

$$b = \frac{2\pi r}{Z} \cdot \frac{8}{9 C_a} \cdot \frac{V_1}{U_0} \quad (2.50)$$

En uygun kanat genişliğini veren bu bağıntıda, $\frac{2\pi r}{Z}$ terimi kanatlar arasındaki mesafeyi göstermektedir. C_a çalıştırma katsayısı, hızlı devirli rüzgar türbinlerinde 0,7 ve düşük devirli türbinlerde ise 0,8 alınır.

Pervanenin merkezden r uzaklığında bulunan bir noktanın çizgisel hızı,

$$U = \frac{2\pi r n}{60} \quad (2.51)$$

bağıntısı ile bulunabilir. Pervanenin merkezden en uzak noktasındaki çevresel hız ise, R yarıçapı göstermek sureti ile,

$$U = \frac{2\pi R n}{60} \quad (2.52)$$

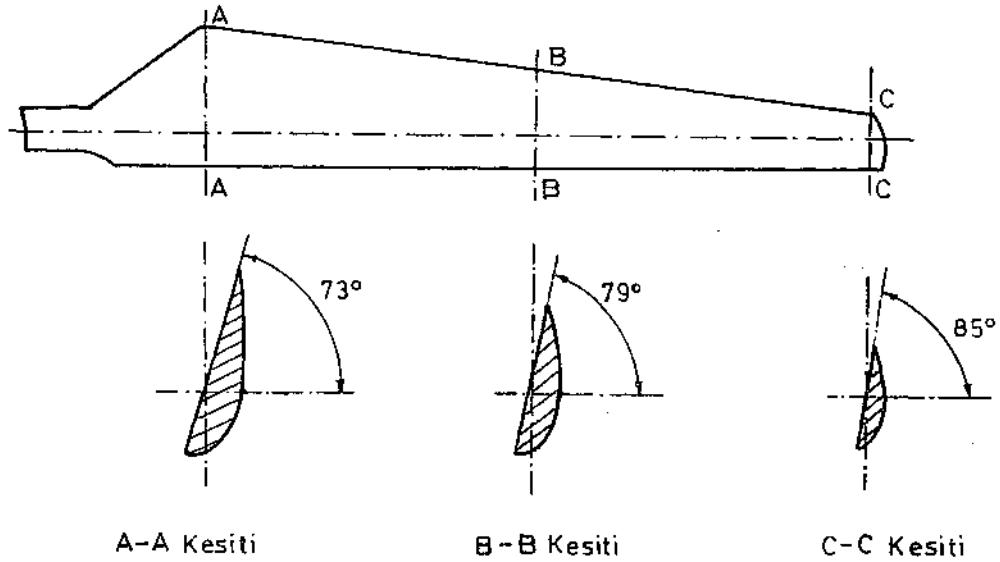
bağıntısı yardımı ile bulunabilir.

Çeşitli rüzgar hızlarında merkezden en uzak noktanın sahip olduğu çevresel hızın, o andaki rüzgarın hızına oranına göre rüzgar enerji sistemleri üç grupta toplanmaktadır. Düşük devirli sistemlerde bu oran 1,5'tan küçük, orta devirli sistemlerde 1,5'tan büyük, 3,5'tan küçük ve yüksek devirli sistemlerde ise 3,5'tan büyüktür.

Düşük devirli türbinlerin kanat sayısı 12 ile 24 arasındadır. Buna karşılık yüksek devirli sistemlerde ise kanat sayıları sınırlı olup 2 ile 4 arasındadır.

2.5.2. Kanat Eğim Açıları

Rüzgar enerji tesislerinde pervane kanatları, uçak pervanesinin kanatlarına benzer şekilde profilli olarak yapılır. Bahsedilen bu tesisler yüksek devirli sistemlerdir. Aşağıdaki şekilde, rüzgar pervane kanadının karşıdan görünüş resmi ile dış, orta ve uç kısmında alınmış kesitler görülmektedir.



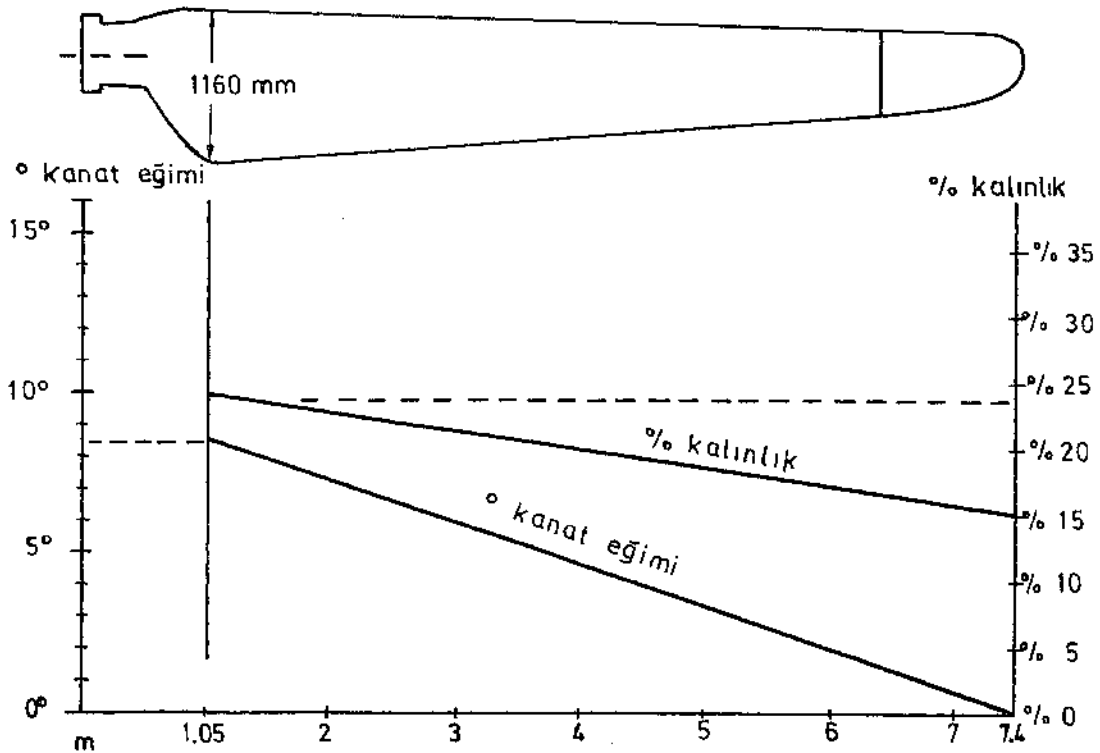
Şekil 2.7. Rüzgar pervane kanadının yapısı

Pervane kanatlarının eğim açıları, kanadın ucundan itibaren merkeze doğru artmaktadır. Bu açının ortalama değeri 10° ile 20° arasında bulunmalıdır. İdeal kanatların eğim açıları 16° ile 17° arasında yapılır.

Kanadın merkezinden uca doğru eğim açısı azalır ve buna benzer şekilde kalınlığı da uç tarafa doğru azalmaktadır. Bu incelmeye kanadın hareketinde önemli rol oynar.

Kanat eğimi ile uzunluğunun değişimi arasındaki ilişki incelendiği vakit, lineer olarak değiştiği görülür. Buna bağlı olarak uzunluk ile kalınlık arasındaki değişim de lineerdir. Sert bir yapı, kanadı tamamen ağırlaştırır. Kanadın kalınlığı ile eğim dağılımları çeşitli uygulamalar için bir optimum nokta tespit edilmiştir. Bu konuda birçok ölçümler yapılmış, kanadın eğim ve uzunluk durumu arasındaki ilişkiler incelenmiş olup bu lineer değişim deneysel olarak Danimarka'daki bir firma tarafından tespit edilmiştir.

Bu çalışmaya açıklık getirmesi düşüncesiyle Danimarka da yapılan çalışma sonucunda kanadın eğimi ile kalınlık profilinin değişim ilişkileri aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. Bu şekil, 15,2 m rotor çapına sahip bir pervane kanadı için çizilmiştir. Buradaki kanadın uzunluğu 7,4 m ve ağırlığı ise 360 kg olarak imal edilmiştir.

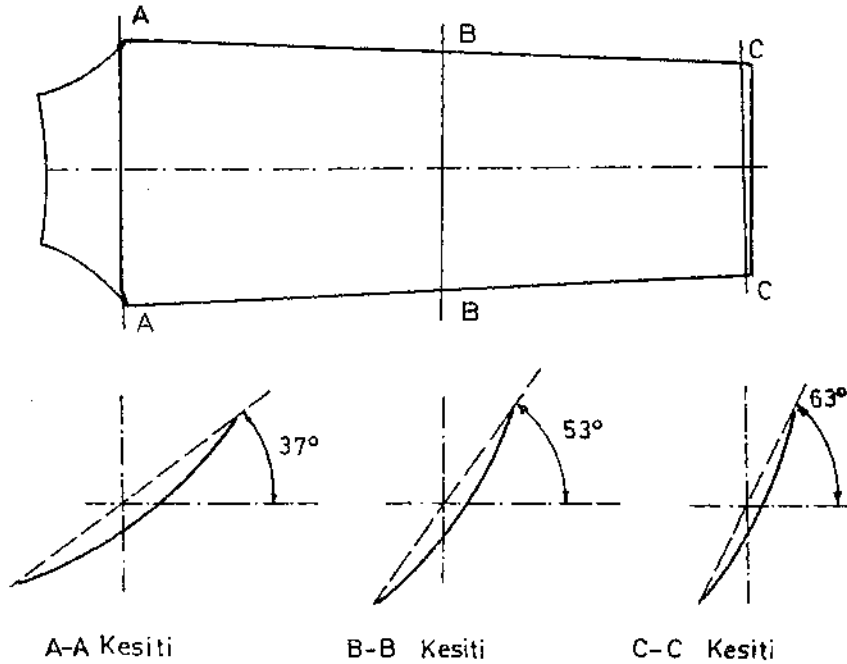


Şekil 2.8. Kanadın eğim ve kalınlık profilinin dağılımı /13/.

2.6. Rüzgar Enerjisinin Su Pompalamada Kullanılması

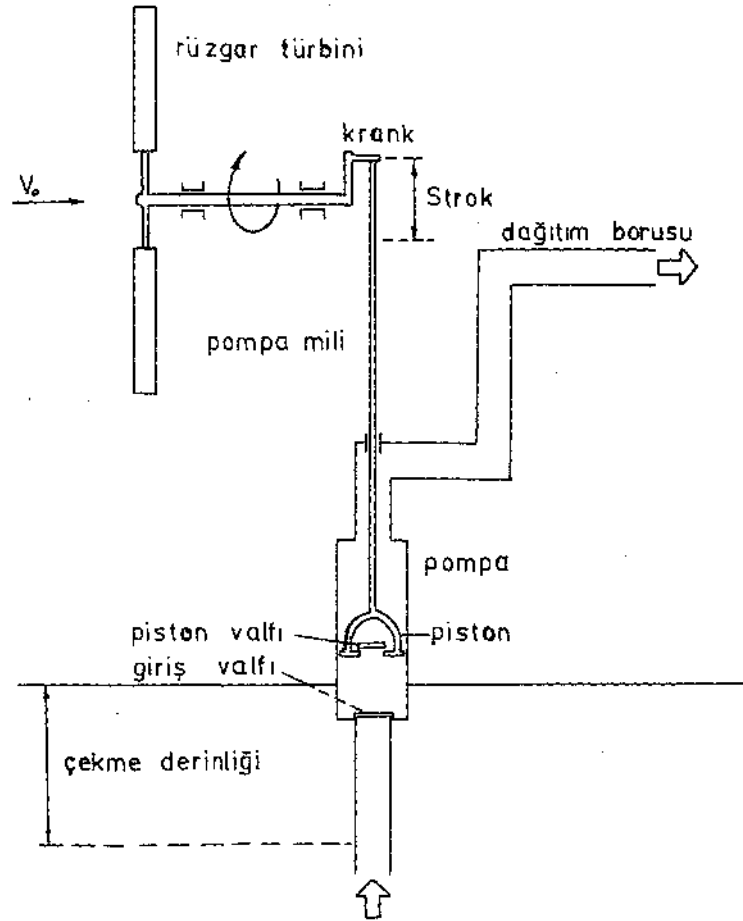
Rüzgar enerjisi, kırsal bölgelerde sulama, hayvancılık ve diğer ihtiyaçlar için su pompalamada önemli rol oynar. Rüzgar enerjisi sulama sistemlerinde kullanıldığı vakit, ya doğrudan veya elektrik enerjisine dönüştürülmek suretiyle kullanılır. Küçük çaplı sulama sistemlerinde rüzgar enerjisi bölgenin yıllık ortalama rüzgar hızı 3 ile 3,5 m/s arasında bile kullanılabilir.

Türbinlerin pervane kanatlarında çoğunlukla sac malzeme kullanılır. Çelik sac malzeme bükülerek kanat yapımı yoluna gidilir. Çelik sac malzemesinden başka, bez ve tahta malzeme de kanat olarak kullanılabilir. Kanat sayısı 20'ye kadar olabilir. Hatta son zamanlarda dünyada, normal 6-20 arasında veya daha fazla sayıda kanadı bulunan döner pervaneli rüzgar türbin tesisleri yapılmaktadır.



Şekil 2.9. Su çıkarmada kullanılan bir türbin kanadı.

Rüzgar enerjisi değişken olduğu için, yeterli olduğu zamanlarda su depo edilerek diğer zamanlarda kullanılır. Bu amaç için su depoları veya havuzlardan yararlanılır. Su çıkarmada kullanılan rüzgar türbin tesisleri için çeşitli su çıkarma araçları kullanılır. Bunların arasında en çok yaygın olanı pistonlu pompalardır. Rüzgar enerji sistemi direkt olarak pompaya bağlanır.



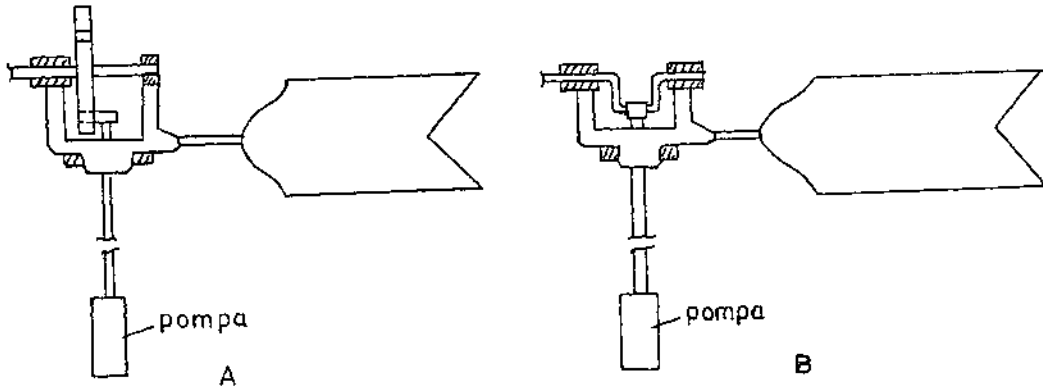
Şekil 2.10. Rüzgar türbini ile su pompasını çalıştırma prensibi/6/.

Rüzgar pervanesinin dönme hareketi, bir krank mekanizması yolu ile ileri-geri hareketine çevrilir. Pompa pistonu üst noktada iken, piston valfi kapalıdır ve giriş valfi

açıktır. Kuyunun içinde pompaya su emilmiş olup, pompa su ile doludur. Piston alt noktaya doğru indiği zaman, piston valfi suyun basıncından dolayı açılır, buna karşılık giriş valfi de kapanır. Bu esnada su, açık olan piston valfinden geçerek dağıtım borusuna gider. Piston aşağıdan yukarıya hareket ederken pompaya su dolar, yukarıdan aşağıya hareketinde ise pompadaki su dağıtım borusuna geçer. Bu hareket, rüzgar estiği müddetçe tekrarlanır ve sonucunda kuyudan su çıkarılır.

Pistonun hareketi krank açısına göre de açıklanabilir. Piston üst pozisyonda, yani üst ölü noktada iken krank açısı 0° olur. Pistonun aşağı doğru hareketinde yani alt ölü noktada iken krank açısı 180° 'ye varır ve tekrar üst ölü noktada yani son pozisyonda krank açısı 360° 'ye varmaktadır.

Dönen rüzgar pervanesinin dönme hareketi, pistonlu pompaya ileri-geri hareketi verecek şekilde iletilmesi için ya eksantrikli veya kranklı düzenler kullanılır.



Şekil 2.11. İleri-geri hareket veren aktarma düzeni.

Eksantrikli aktarma düzeninde (Şekil 2.10. A), eksantrikliği sağlayacak olan disk üzerinde merkeze uzaklıkları farklı olan birkaç delik açılır. Aktarma mili bu deliklere bağlanır. Bu delikler yardımı ile çeşitli rüzgar hız periyotlarındaki pompa stroku, yüksek verim elde edilecek şekilde ayarlanabilir.

Kranklı aktarma düzeninde (Şekil 2.10.B), krank milinin eksantrik oluşundan yararlanılır.

Su çıkarma işleminde pistonlu pompa dışında, helezonlardan da yararlanılır. Helezonların pompaya göre verimleri düşük olduğu için az sayıda kullanılır.

Çeşitli yönlerde esen rüzgardan yararlanabilmek için, dönen pervanenin her zaman rüzgar doğrultusuna dikey konumda olması gerekir. Bu konum için, ya pervane düzlemine dikey olan büyük yüzeyli bir dümen veya yardımcı bir pervane kullanılır. Yardımcı pervanenin düzlemi, ana pervanenin düzlemine dikey duruma getirilir. Rüzgar doğrultusu değiştiği zaman, yardımcı pervane herhangi bir yönde dönerek dişliler yardımı ile ana pervaneyi rüzgar doğrultusuna dikey konuma getirir. Bu yöneltme düzeni, büyük güçlü rüzgar tesislerinde kullanılır.

Pompa çalıştıran rüzgar türbin tesislerinde, rüzgar pervane çapı, kuyunun toplam derinliği ve çıkarılan su debisi arasındaki ilişkiler incelenerek birçok karakteristik eğriler ortaya çıkarılmıştır. Piston çapı debiye bağlı olarak değişir. Bir kuyunun kapasitesi, bir sabit akış oranı (m^3/h) ile belirlenebilir.

3. RÜZGAR PERVANESİ ve TOPLAYICI (KONSANTRATÖR) SİSTEMİ

Rüzgar ve güneş daima yenilenebilir enerji kaynakları oldukları yukarıda anlatılmıştır. Eğer bunların enerjilerinden yararlanılmak istenirse, bunların enerji yoğunluğuna sahip olmaları sebebiyle büyük çalışma yüzeyleri gerekir. Bunun için, enerjinin dönüştürülmesinden önce yoğunlaştırılması gerekir. Bu durum güneşte basit bir ayna sistemiyle gerçekleştirilebilmektedir. Rüzgar enerjisinin yoğunluğu için akım tekniği açısından bir çok güçlükler ortaya çıkmaktadır. Bunun için bir çok yardımcı bağıntılardan yararlanılabilir. Mesela, Otto ve Gustaw geçen yüzyılda Berlin'de uçuş sanatının temelini oluşturan kuş uçuşunu incelemişlerdir. Bu araştırmanın sonucunda gelen teknoloji aktarımı bugün de geçerliliğini sürdürmektedir. Yine Berlin'de kuş kanadı esasında hareketle girdap kanadı konsantratörü yani toplayıcısı geliştirilmiştir.

Taşıyıcı kanadın kenar girdabı içine bir rüzgar pervanesi monte etme fikri Amerika'da gelmektedir. Böyle bir kenar girdabı, kanat yüzeyi ile kanadın alt tarafı arasında oluşan basınç farkından doğup akış enerjisini toplayabilmektedir. Bir rotorun kenar girdabındaki enerji yoğunluğunun diğer taraflara oranla daha fazla olduğu yapılan araştırmalar sonucunda bulunmuştur.

Benzetme yolu ile yapılan günlük gözlemlerde akım enerjisinin konsantrasyonunda girdabın kullanılması fikrinin bitmediği bir gerçektir.

3.1. Girdap Basıncı Yoğunlaştırıcılı Rüzgar Türbin Sistemi

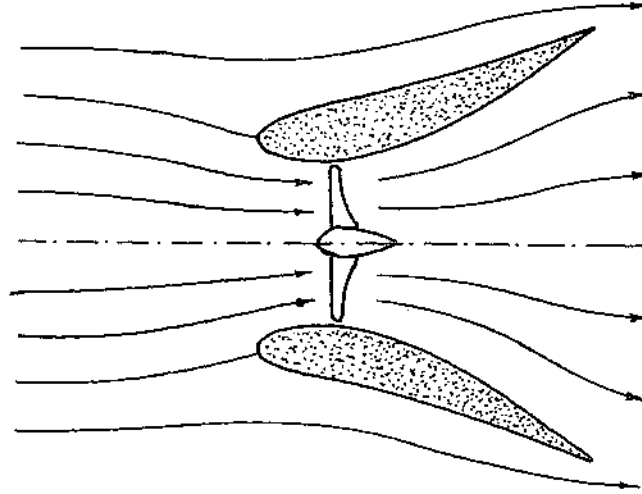
Modern rüzgar sistemlerinde yüksek dönme hızı elde etmek için iki veya üç kanat kullanılır. İlk defa Amerika'da 1870 yılında su pompalamak için çok kanatlı düşük rüzgar mili kullanılmıştır. Bu rüzgar sistemi artık önemini yitirmiştir. Rüzgar mili önüne konan rüzgar toplayıcı sistemi de çok kanatlı rüzgar miline benzemektedir. Fakat burada bu kanatlar dönmeyecektir. Aynı zamanda kanatlar yerinde sabit kalır. Kuvvet, kanat fazının merkezine yerleştirilen üç kanatlı küçük bir rotor tarafından üretilir. Öndeki sabit kanat dizaynının fonksiyonu, tabii havayı hızlandırmaktır. Dönmeyen bu yöneltici kanatlar olmayınca üretilen gücün önemli miktarda düştüğü görülmüştür.

3.1.1. Rüzgarın Bir Funele Akıtılması

Araştırmacılar uzun zamandan beri tabii rüzgarı kuvvetlendirme problemini düşünmüşlerdir. Bu düşünceler sonunda ortaya çıkan en basit fikir, yapısı huniye benzeyen basit bir funel kullanmaktır. Fakat bu funel pek verimli sayılmaz. Rüzgarın ayrıca rotor tarafından bloke edilmiş funelin küçük aralığından girmesine gerek yoktur. Rüzgar funel etrafında bir daire çizecektir. Çoğu uygulamalar funel dizaynına dayanmaktadır. İşin ilginç tarafı bunların çoğu çalışmamaktadır.

Bazen şaşırtıcı bir etki ile karşılaşmak mümkündür. Funel döndürüldüğü vakit iyi çalışır. Ters çevrilmiş funelin çalışma prensibinde, funelin duvarına yüksek bir hava engeli verildiğini düşünelim. Profilin üst tarafı funelin iç

tarafına yerleştirilirse, kanadın üstündeki düşük basınç rüzgarı deliğin içine çeker. Bu yolla, rotor hızlanan rüzgar hızı ile hareketlenir. Bu şekilde tutulan kayıtlar hareketin dört kat arttığını göstermiştir.



Şekil 3.1. Rüzgar türbini ilaveli difüzör.

3.1.2. Rüzgarın Girdap Akışı ile Hızlanması

Girdap akışının, tabii rüzgar enerjisine konsantrasyonu faydalı kılan değişik görüş ve incelemeler vardır. Bu görüş ve incelemelerden biri suni bir kasırga oluşturarak türbini onun içine yerleştirme görüşüdür. Bu suni fırtına veya girdaptan enerji elde etmek için, kanat tipi üzerinde bazı deneyler yapılmıştır. Bir uçağın kanadının arkasındaki kuvvetli girdap, arka tarafta küçük bir uçak büyük uçağı takip ediyorsa kazaya sebep olabilir. Bu girdabın çok enerji yoğunlaştıracağı bir gerçektir. Bu akışın, kanat uçları etrafına gitmesine ve kuvvetli girdaplar oluşmasına sebep, uçak kanadının alt tarafında yüksek basınç ve üst tarafında

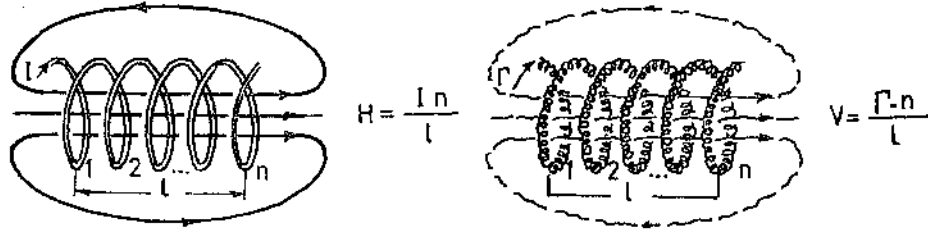
alçak basınç oluşumudur. İnce kanatlar uçlarında daha zayıf girdaplar oluştururlar. Yine benzer şekilde, düşük görünüş oranlı derin bir kanat daha zayıf girdap oluşturur. Yüksek bir delta kanadının çok kuvvetli girdap oluşturduğu aerodinamikte bilinmektedir. Delta kanatları kullanılarak 3 MW gücünde rüzgar santralleri kurulmuştur. Burada iki rotor kenar girdaplarının içine yerleştirilmiştir. Fakat bu delta kanatlı rüzgar sistemindeki kanat modelleri üzerinde yapılan deneyler sadece 1,7 defa fazla maksimum güç verdiğini göstermiştir. Bu da, bu konuda hayal kırıcı bir sonuçtur.

3.1.3. Akışkan Akışının Manyetik Bobini ile Karşılaştırılması

Bir sonu olmayan girdap kavramı, akışkan akışını konsantre edebilmek için daha çok yeni bir imkânı gösteren bir teoridir. Bir girdap etrafındaki hız alanı, Biot ve Savart denklemleriyle verilir. Aynı denklem, elektrikte bir bakır tel etrafındaki manyetik alanın tanımında da geçerlidir. Manyetik alanın kuvvetini arttırmak için, bakır telin bir bobin halinde sarılması gerçeği herkes tarafından bilinmektedir. Bunun aynısı bir girdap vida adımı ile yapılırsa, neticede ilgili hız denkleminin bir büyütülmüş hali olduğu görülür. Manyetik bobin ve girdap bobini matematiğe göre aynıdır /14/.

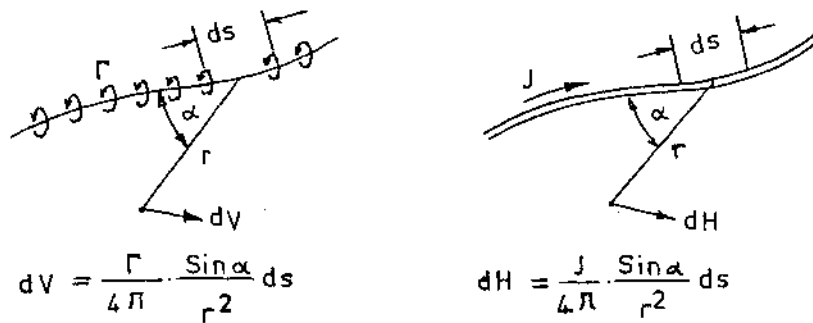
Rüzgarın girdap vidasının etkisi, manyetik alanın konsantrasyonuna yarayan akım geçen bir tel sargı ile aynıdır. I akımı geçirilen silindirik bir sargı, manyetik alan H' 'yi oluşturur. Buna eşdeğer olarak bir vida çizgisi şeklinde

sarılmış Γ sirkülasyonlu girdap iplikçığı, vida sargı çekirdeğinde V_0 hızını oluşturur.



Şekil 3.2. Magnetik ve girdap bobinleri.

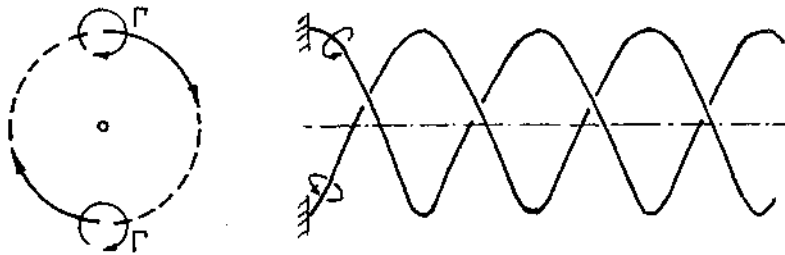
Keyfi şekillendirilmiş akım çizgisinde akım alanı ve keyfi eğilmiş tel şeklindeki iletkende elektromanyetik alan için aynı yasanın geçerli olduğu yukarıda anlatılmıştır. Akımın geçtiği iletkenin bir sargı tarafından çevrelenebileceği ve böylece manyetik alan şiddetinin konsantre edilebileceği bilinmektedir. Hız artışı dV ve manyetik alan artışı dH , her defasında ds ve r düzlemlerinin oluşturduğu düzleme dik olarak dururlar.



Şekil 3.3. Keyfi şekillendirilmiş akım çizgisinde akım alanı ve keyfi kıvrılmış iletken teldeki elektromanyetik alan.

Akımın geçtiği iletken, bir sargı tarafından çevrelendiğinde manyetik alanın konsantre edilebileceği gibi, hız da sirkülasyonlu girdap çizgisinin bir sargı ile sarılması sonucu konsantre edilebilir. Bir girdabın bir vida konsantrasyonuna dönüştürülebilme imkânları araştırılırsa, birçok aynı yönde dönen girdaplar düzenlendiği taktirde vida şeklinde girdaplar elde edilir. Bu girdapların eksenleri aynı çember üzerinde bulunurlar. Karşılıklı etkilenme ile bu girdaplar çemberin orta noktasına dönerler. İki girdap çizgisi aynı yerde bir araya getirilirse, çiftli bir vida akışına dönüştürülmüş olur.

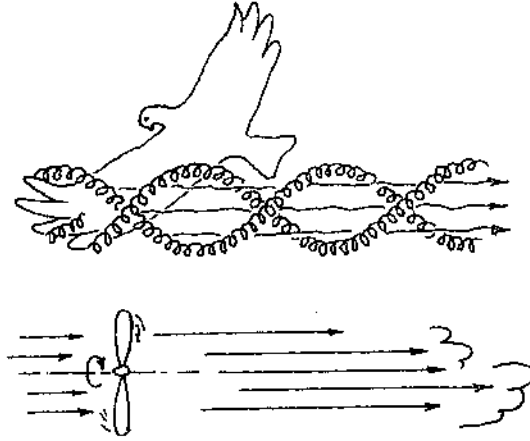
İkiden fazla girdap çizgisi eksenleri aynı daireye isabet edecek şekilde düzenlenirse, karşılıklı etkileme büyür. Sarma hızı yükselerek girdap çizgileri sık bir şekilde yan yana duran yüksük girdapları şeklinde yaklaşır. Bu yüksük girdabı, iç kısımlarında hız alanını etkiler ve hedeflenen konsantrasyon etkisi oluşturulmuş olur.



Şekil 3.4. İki akım çizgisinin bir noktada tutulması ile ortaya çift kıvrım çıkar.

Buradaki akım, fiziksel olaylara uygun olarak bir girdap vidası etkisini gösterir. Bu durum kabarmış kanatlı

süzülen bir yırtıcı kuşun durumuna benzetilir. Kuşun her kanat teleği izole edilmiş bir kenar girdabı oluşturur.



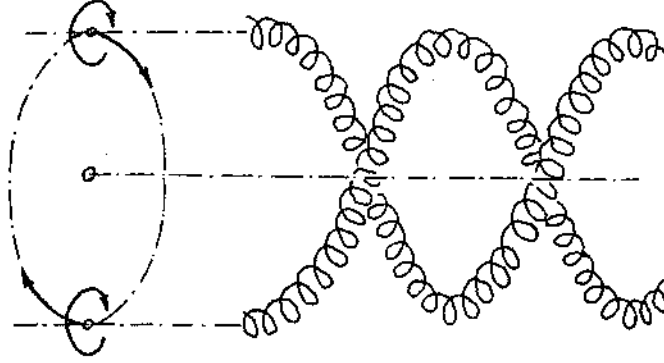
Şekil 3.5. Bir kuşun kanadındaki kenar girdabı oluşumu.

Akım yönü incelenirse, girdap eksenleri ileri ve geri azalan kanat teleği uzunluğu sebebiyle yaklaşık olarak bir daire yayı şeklinde olur. Karşılıklı etkileşme ile çok kademeli girdap vidası oluşur. Vida çekirdeğinde ortaya çıkan üst hız, tahrik mekanizması tarafından oluşturulmuş gibi düşünülebilir.

Direnç olarak kaybedilen kenar girdabı enerjisi, kısmen kayma olarak yeniden kazanılır. Rüzgar enerjisini toplayan yüzeylerin düzeltilmesi gerekir. Dışarı çıkan kenar girdabının farklı yoğunluğundan dolayı, yukarıda örnek verilen kuşun kanatları kabarmış gibi görünür. Aynı yoğunlukta girdap taşıyıcı yüzeyi bir daire şeklinde üst üste getirmekle bu kabarma etkisi ortadan kaldırılabilir.

Bir girdabı bir tarafa doğru estirmek için, iki veya daha çok girdap oluşturmak gerekir. Oluşan bu girdaplar bu işi otomatik olarak yaparlar. Tek bir girdap hattı bundan

dolayı doğrusal formda kalır. Fakat iki veya daha fazla girdap varsa, bunlar aşağı akış yönünde dönmeye başlar ve neticede birbirlerini çevresel yönde iterler. Bu olay aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.

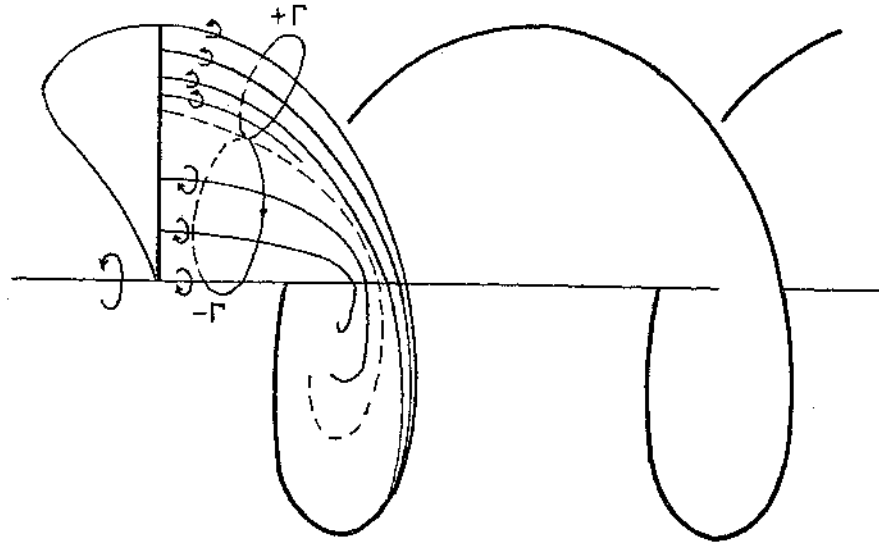


Şekil 3.6. Birbirlerine sarılan iki girdap /15/.

3.1.4. Tabiatda Bir Girdap Bobininin Oluşumu

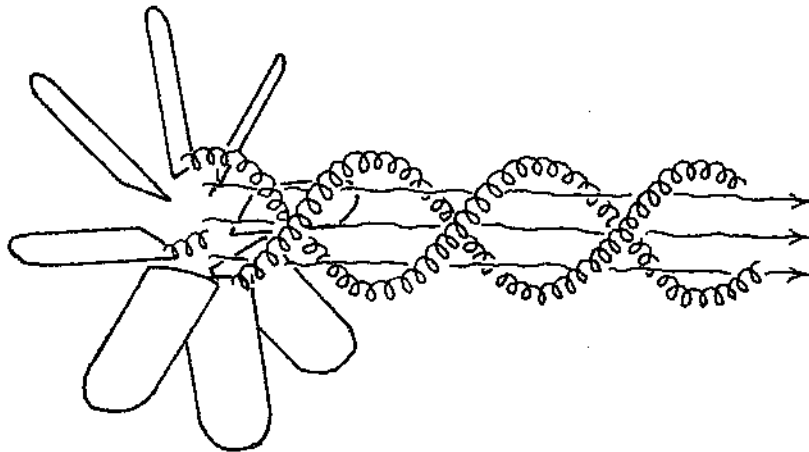
Milyonlarca yıl önce, yani insanların akışkan dinamiğini düşünmesinden önce akışın hızlandığı girdap bobini yukarıda basedilen kuşun kanatları yardımıyla bulunmuştu. Çoğu kuşların kanat uçlarının yarık olduğu, her kanat teleğinin bir girdap oluşturduğu, bu girdapların birbirini iterek dönmeye başladıkları ve neticede vidaya benzer bir akış olduğu yukarıda anlatılmıştır. Bu girdap vidasının içinde boş rüzgar hızlanır. Buna benzer şekilde akışı hızlandıran bir pervane itme yapmaktadır. Bazı durumlarda girdap bobini itme oluşturur. Sonuç olarak, girdap bobini enerji açığa çıkaran bir araç olarak görev yapar.

Rüzgarı hızlandıran yarık kuş kanadı örneği, bir rüzgar türbininde enerji konsantrasyonunu sağlamak için kullanılabilir.



Şekil 3.7. Girdap akışının fiziksel modeli /1/.

Yukarıda bahsedilen kuş kanadı örneğine benzer şekilde rüzgar pervanesi üzerinde enerji yoğunluğunu sağlamak için, birkaç yüksek kanat dairesel bir fan üzerine yerleştirilir. Bu kanat sayıları 8 ile 18 arasında bulunabilir. Fanın açık olan merkezinde, her kanatta bir girdap oluşur. Girdapların birleşmesi yukarıda bahsedilen spirali oluşturur. Girdap spiralinin orta boşluğuna rotor yerleştirilir.



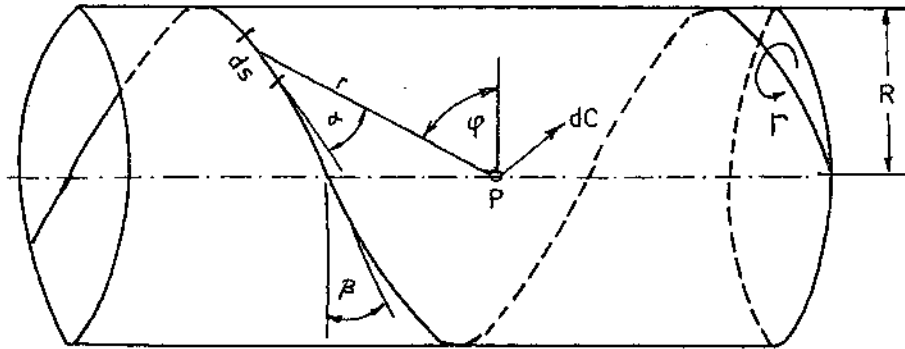
Şekil 3.8. Yarık kuş kanadının rüzgar konsantratörüne dönüştürülmesi.

3.1.5. Girdap Vida Konsantratör Teorisi

Bir paralel akımda vida ekseni verilmiş olsun. Girdap vidası, çekirdekte arttırılmış hızlı akım profilini etkiler. Konsantratör etkisi için orta hız V_m kullanılır. Girdap çizgisi elemanı ds , P noktasında vida ekseni eksenine dC 'ye yol açar. Biot yasasına göre dC , r ve ds 'nin oluşturduğu yüzeye dik olarak bulunur ve değeri,

$$dC = \frac{\Gamma}{4\pi r^2} \sin \alpha \, ds \quad (3.1)$$

bağıntısı ile ifade edilir.



Şekil 3.9. Girdap vidasından girdap elemanı ds 'nin dikkate alınmasına ait kesit.

Burada önemli olan aksenal bileşen dV , yani hız bileşenidir. Bu hız bileşeninin değeri,

$$dV = \frac{\Gamma}{4\pi R} \cot \beta \frac{\cos \beta \cos \varphi}{\sqrt{1 - \sin^2 \beta \sin^2 \varphi}} dC \quad (3.2)$$

bağıntısı ile bulunur.

Bütün hız değerlerinin toplamı yani integrasyonu, φ açısının integrasyon değişkeninin seçimi için uygun bir büyüklük olduğunu göstermektedir. Geometrik açıdan bakıldığında φ dönel eğim açısı olup, serbest ışın r 'nin vida eksenini ile vida çizgisi boyunca oluşturduğu açıdır. Bunun için gerekli bağıntılar aşağıya çıkarılmıştır.

$$r = \frac{R}{\cos \varphi} \quad (3.3)$$

$$\sin \alpha = \sqrt{1 - \sin^2 \beta \cdot \sin^2 \varphi} \quad (3.4)$$

$$ds = \frac{R}{\sin \beta \sin^2 \varphi} d\varphi \quad (3.5)$$

Yukarıdaki (3.3), (3.4) ve (3.5) eşitlikleri (3.1) bağıntısında yerlerine yazılır ve gerekli işlemler yapılırsa dV hız bileşeni bağıntısı,

$$dV = \frac{\Gamma}{4 \pi R} \cot \beta \cos \varphi \cdot d\varphi \quad (3.6)$$

şekline gelir.

Sonsuz uzunluktaki bir girdap vidası için orta hız V değeri de (3.6) bağıntısının integrasyonu ile bulunur.

$$V = \frac{\Gamma}{4 \pi R} \cot \beta \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos \varphi d\varphi \quad (3.7)$$

$$V = \frac{\Gamma}{4 \pi R} \cot \beta \quad (3.8)$$

Bir çok girdabın karşılıklı etkileşiminde dönme hızının hesabı için, bir girdap vidası oluşması sözkonusudur. R yarıçaplı bir dairede eş aralıklı uzaklıklar olan, alan içerisinde n sayıda potansiyel girdap bulunur. β açısı boyunca döndürülen girdap ekseninin etkilediği girdap dairelerinde oluşan çevresel hız U'nun büyüklüğü,

$$U = (n-1) \frac{\Gamma}{4 \pi R} \sin \beta \quad (3.9)$$

bağıntısı ile bulunur /15/.

Aranan eğim açısı β kinematik olarak aşağıdaki bağıntı ile bulunur.

$$\cot \beta = \frac{\text{Girdap çizgilerinin çevresel hızı}}{\text{Girdap çizgilerinin dönüşüm hızı}}$$

Bu güne kadar girdap çizgisinin dönüşüm hızı bir formülle ifade edilememiştir. Bunun için deneme amacı ile akım hızı V_∞ kullanılmıştır.

$$\cot \beta = \frac{(n-1) \Gamma \sin \beta}{4 \pi R V_\infty} \quad (3.10)$$

Ayrıca $\cot \beta$ değeri, $\sin \beta$ olmaksızın aşağıdaki formülle bulunabilir /15/.

$$\cot \beta = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \left[\frac{(n-1)}{2 \pi R V_\infty} \right]^2} - 1 \quad (3.11)$$

Burada, V_∞ girdap akım hızıdır.

Burada sirkülasyonlu alan hızı Γ için de aşağıdaki bağıntı yazılır /15/.

$$\Gamma = \frac{1}{2} C_a \cdot e \cdot V_\infty \quad (3.12)$$

Bu bağıntıda C_a , bir kat sayı ve e ise, yöneltici kanadın mm. olarak kalınlığıdır.

Ayrıca, n basamaklı girdap vidasının n defa hız oluşturduğu gözönünde bulundurulursa, hız artımı $V_\infty + V_o$, girdap vida ortasındaki hız olan V_∞ 'a oranlanmış değer olarak aşağıdaki formülü verir /16/.

$$\frac{V_\infty + V_o}{V_\infty} = 1 + \frac{n \cdot C_a \cdot e}{4\sqrt{2} \pi R} \sqrt{\sqrt{1 + \frac{(n-1)C_a \cdot e}{4 \cdot \pi \cdot R}} - 1} \quad (3.13)$$

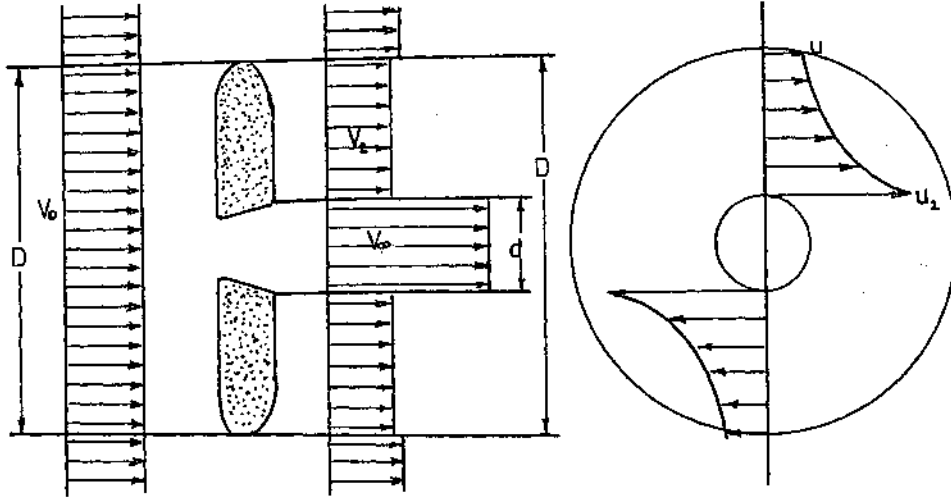
Büyük eğimli girdap vidasında $\beta \approx \frac{\pi}{2}$ için, yaklaşık olarak aşağıdaki bağıntı kullanılır /16/.

$$\frac{V_\infty + V_o}{V_\infty} = 1 + \frac{n(n-1) C_a^2}{32 \cdot \pi^2} \left(\frac{e}{R}\right)^2 \quad (3.14)$$

3.1.6. Girdap Bobini Kullanarak Rüzgar Hızının Arttırılması Teorisi

Normal bir rüzgar mili teorisi aşağıdaki varsayımlara dayanmaktadır. Rotor diski, sonsuz sayıda bölünemeyecek kadar küçük kanatlar yerine konmuştur. Bu uygulama matematiksel işlemleri basitleştirmek için yapılır. Aynı uygulama Almanya'da Ingo Rechenberg tarafından girdap bobiniyle

yapılmıştır. Sonsuz sayıda bölünemeyecek kanatlar, bobini oluşturan sonsuz sayıda bölünemeyecek girdaplar ürettiğini ispat etmiştir. Yöneltilici kanatlarının iki ucunun bulunduğu bir gerçektir. Bunun için yöneltilici kanat bir iç, bir de dış girdap bobini oluşturacaktır. İç girdap bobini rüzgarı hızlandırır. Buna karşılık dış girdap bobini, rüzgarı yavaşlatır. Buradaki gerçek olay, dış girdap spiralinin içtekilerle aynı yönde olmasıdır. Fakat dış girdapların dönme yönü içtekilerin tersidir. Bu ise, dış girdap bobininin rüzgarı yavaşlattığı sonucunu verir.



Şekil 3.10. İki girdaplı bobinin teorik akış dağılımı.

Süreklilik denkleminin uyuşması için, yukarıda bahsedilen her iki akış dağılımı da gereklidir. Uygun bir güç yoğunluğu elde etmek için, Z yöneltilici kanat sayısı ve C_L de kaldırma katsayısı olmak suretiyle güç katsayısı aşağıdaki formül ile bulunur /15/.

$$K = \left[1 - \left(\frac{C_L Z \cdot e}{2 \pi d} \right)^2 \left(1 - \frac{d^2}{D^2} \right) \right]^{3/2} \quad (3.15)$$

Konsantratörlü sistemler için geçerli olan bu formülde d yöneltici kanatların rotor eksenindeki açıklık çapıdır. Bu da yaklaşık olarak pervanenin çapına eşittir. D ise yöneltici kanatların meydana getirdiği sistemin dış çapıdır.

3.2 Yöneltici Kanatlı Rüzgar Türbininin Gelişmesi

Yukarıda anlatılan hususlar üzerinde bir çok çalışmaların yapıldığı gibi, girdap bobini üzerinde rüzgar tüneli deneyleri 1983 yılında Berlin'de Ingo Rechenberg tarafından yapılmıştır. Sistemin optimizasyonundan bir kaç ay sonra aynı şahıs sekiz misli bir güç konsantrasyonu elde etmiştir. Yani kanat fanının merkezine küçük model rotorun yerleştirilmesiyle güç sekiz misli artmıştır. Bu artış, teşvik edici bir sonuç olarak görülmektedir. Bundan sonra bir çok prototipler yapılmıştır. Bu yeni rüzgar türbinine bundan dolayı BERWIAN (BERliner - WIndkraft - ANlage) adı verilmiştir. Bunun anlamı Berlin Rüzgar Kuvveti Tesislerinin kısaltılmış şeklidir.

Rüzgar hızı Berlin'de oldukça az olduğu için, deneyler kıyı bölgesinde yapılmıştır. Deney amacı ile hareketli bir kule yapılarak en uygun rüzgar şartlarını elde edebilecek bir serbestlik kazanılmıştır. 1984 yılında ilk prototiple 4,5'luk bir güç konsantrasyonu elde edilmiştir. Yapılan rüzgar türbini 6 ay süreyle çalışmıştır. Daha sonra kanat profiline fazla eğim vermek suretiyle güç konsantrasyonu 1986

yılında 6'ya ve daha sonra 7'ye çıkarılmıştır. Başka bir prototip 9 kanat yerine 13 yöneltici kanatlı olarak yapılmıştır. Bu prototipte, güç konsantrasyonu 8'e kadar çıkmıştır. 1988'de 13 kanatlı sistem düzenlenerek kısa bir süre için (10 - 30 s) 10'dan büyük bir güç konsantrasyonu elde edilmiştir /15,16/.

Kısa bir süre için bu artışıdaki akış düzensizdir. Aerodinamikte iyi bilinen girdap kırılması olabilir. Bu düzensizliği yenmek için bir çok çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda bir netice alınamayınca 8'lik bir güç konsantrasyonu yeni sistem için üst limiti teşkil etmektedir.

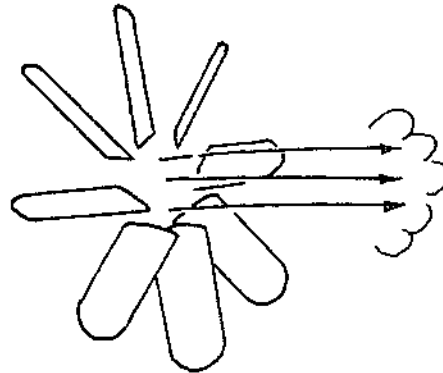
3.2.1. Yöneltici Kanatların Fonksiyonları

Rüzgarın çok şiddetli olması halinde, yöneltici kanatlarının açılması halinde rotora düşük hızda rüzgar esecektir. Bunu rüzgar kendisi otomatik olarak yapabilir. Kanatların arkasına konan yaylar, rüzgar kuvvetini üzerine alırlar. Bu sistemle fırtına esnasındaki eksenel kuvvet, 100 kat düşürülebilir. Güç operasyonu esnasında, konsantratör sistemi aynı çaplı iki kanatlı rüzgar rotoru ile aynı eksenel kuvveti verdiği deneyler sonucu bulunmuştur. Bunu açıklamak için, hızlı dönen iki kanatlı rotorun akış yönünde yüksek aerodinamik kuvveti veren yüksek bir kaldırma kuvveti ürettiği akılda tutulmalıdır.

Yöneltici kanatlardan oluşan konsantratör sistemini rüzgarla aynı hata getirmek için, bu kanatlar iki yolda kullanılır. Bu kanatlar önce rüzgar hızını arttırmaktadır.

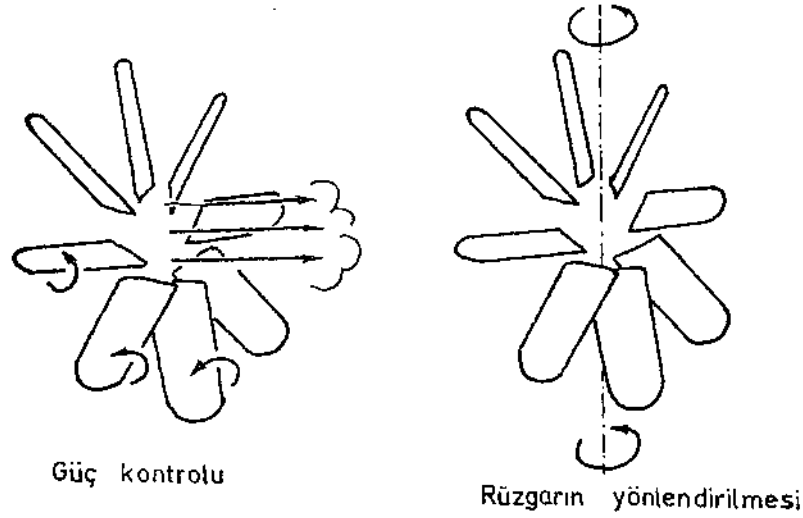
Daha sonra sistemin yönünü rüzgara çevirmek için kuyruk pervaneleri olarak da görev yapmaktadır. Yapılan prototip sabit bir sehpa üzerine yerleştirildiği için böyle bir dönme sözkonusu değildir.

Yöneltici kanatların başka bir görevi de, rüzgar nominal hızı geçerse kanatlar gücü sabit tutmak için kullanılır. Önce iki veya üç kanatlı rüzgar türbinini ele alalım. Rotor, bir uçağın kontrol edilebilir adımli hava vidası ile karşılaştırılabilir. Rüzgar nominal hızı geçerse, nominal güç elde edilebilmesi için rüzgar rotorunun adımının değiştirilmesi gerekir. Konsantratörlü sistemde aynı etkiyi elde etmek için, yöneltici kanatlarının adımı azaltılabilir. Diğer bir deyişle, konsantratörün gücü nominal değeri aşarsa, rüzgarın arttırılmış olması durumunun azalması gerekir. Bu durum, yöneltici kanatlarının geliş açısının azaltılması ile kolayca yapılabilir. Kanatların bu işi kendiliğinden yapabilmesi için, ön yüklenmiş yayların kullanılması gerekir. Yöneltici kanatlar, konumlarına göre üç fonksiyonu yerine getirir.



Rüzgarın arttırılması

Şekil 3.11.Yöneltici kanatların bir fonksiyonu.



Şekil 3.12. Yöneltilici kanatların iki fonksiyonu.

3.2.2. Konsantratörlü Rüzgar Türbin Santralleri

Yöneltilici kanatlara sahip rüzgar enerji sisteminin bazı avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Almanya'da yapılan konsantratörlü rüzgar türbinlerinde sekiz kat fazla güç üretilmiş olması, konsantratörlü rüzgar türbininin normal rüzgar milinden sekiz defa daha büyük olduğu anlamına gelmez. Statorle aynı çaplı tek bir rotor konsantratör sistemiyle karşılaştırıldığında iki kat güç vermektedir. Fakat dikkat edilmesi gereken nokta şudur: Büyük rotor, düşük bir dönme hızına sahiptir. Buna bağlı olarak çok yüksek bir moment verir. Çünkü, moment ile açısal hızın çarpımı gücü verir.

Almanya'da yapılan ve GROWIAN adlı bir rüzgar mili, 18 dev/dak'lık bir dönme hızı vermişti. Bu mil, çok büyük olduğu için çok yüksek bir moment verir. Buna karşılık önceden yapılan değişik rüzgar türbinleri artık yerini yenilere bırakmak zorunda kalmıştır. Burada çıkarılan sonuç şöyle olması gerekir. En son yapılan konsantratörlü rüzgar enerji

sistemlerinde her ne kadar daha yüksek açısal hız elde ediliyorsa da, daha düşük bir moment elde edilir. Çünkü normal rüzgar enerji sisteminde kanatların süpürme alanları belli bir değerdedir. Halbuki konsantratörlü sistemde, bu kanatları iç çapında bırakabilecek yöneltici kanatlara ihtiyaç vardır. Bu kanatları da normal pervane etrafına konulması hem dizayn hem de maliyet açısından zordur.

Bu bakış açılarında konsantratörlü türbin sistemi, modern bir motor gibidir. Gittikçe hızlanan bir akışla çalışan küçük bir rotor, yüksek dönme hızı verir, fakat düşük moment üretir. Ayrıca başka avantajları da vardır. Mesela, yüksek dönme hızından dolayı bir dişliye gerek yoktur. Buna karşılık en büyük rüzgar milinde 1:81 oranında dişliler kullanılarak kuvvetlendirme yapılır.

3.2.3. Konsantratörlü Sistemin Çok Rotorlu Olması

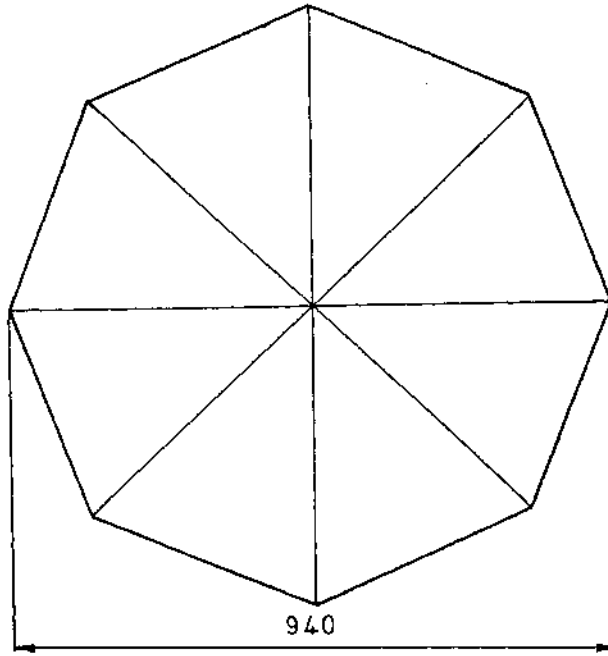
Konsantratörlü sistemlerde, konsantratör çapı 30 m'ye kadar olabilmektedir. Mühendisler, motor konstrüksiyonunda tek silindir sisteminden çok silindirli sisteme geçmişlerdir. Yani çok silindirli motorları bulmuşlardır. Motorun rüzgar enerjisi ile olan benzerliği ancak çok rotorlu rüzgar sistemi sayesinde sağlanabilir. Konsantratörlü rüzgar enerji sistemindeki yapısal şekli, çok sayıda türbin ünitesinin montajına müsaittir.

Rotor diskleri arasındaki açıklık, çok sayıda rotor sistemi için bir avantaj olabilir. Kanat diskleri arasındaki boşluğa rağmen çok rotorlu sistem, tek rotorlu sistemle aynı verime sahiptir.

4. DENEY SETİNİN DİZAYNI VE ÖLÇÜLERİ

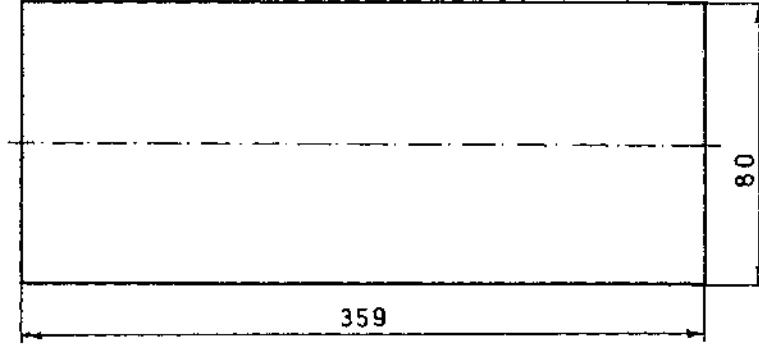
Yukarıda anlatılan girdap oluşumundan sonra rüzgar pervanesinin önüne konulacak yöneltici kanatlarının ölçüleri alınarak bir model yapımına gidilmiştir. Asıl rüzgar pervanesinin oturtulduğu yerin ölçüsüne göre yöneltici kanatlarının üzerine yerleştirileceği sekizgen fanın çapı 94 cm olarak alınmıştır.

Bir sekizgen, sekiz adet ikizkenar üçgenden meydana geldiği için, ikiz kenarların herbiri 47 cm olup tepe açısı 45° olarak bulunur. Üçgenin diğer açılarının toplamı ise, $180^\circ - 45^\circ = 135^\circ$ olarak hesaplanır. Üç açısı ile iki kenarı bilinen bir ikizkenar üçgenin tabanı da bulunabilir. Bundan yararlanılarak tabanın uzunluğu 35,9 cm bulunurki, bu da sekizgen fanın bir kenarıdır.



Şekil 4.1. Yöneltici kanatların yerleştirileceği sekizgen fanı.

Sekizgen fanın bir kenarının uzunluğu bulunduğundan sonra, yöneltici kanatları taşıyabilecek bir şekilde genişliği de uzunluğuna oranla bulunmuştur.

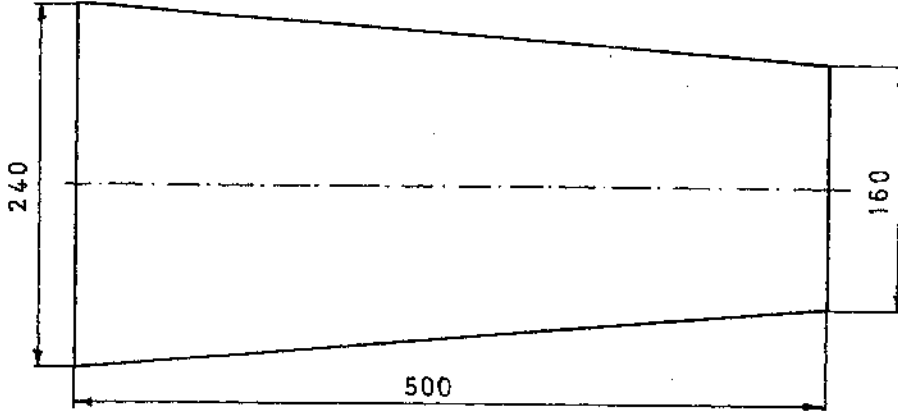


Şekil 4.2. Sekizgen fanın bir kenarı ve ölçüleri.

Ölçüleri belirlenen fan kenar parçaları 3 mm'lik sacdan kesilerek, 135° açı ile 80 mm'lik kenarlarda birbirlerine kaynatılmıştır. Daha büyük tesislerde ekonomik verimliliği geliştirmek için, stator çapı mümkün olduğu kadar azaltılması gerektiği gerçeğinden hareketle stator çapı normal tutulmuştur. Bununla beraber yapılan bir çok çalışmalar, güç faktörünü yükseltmek için yapının ağırlaştırılmasının herhangi bir avantajının olmayışını göstermiştir. Bu çalışma bir prototip çalışması olduğu için böyle bir durum söz konusu değildir.

Asıl pervanenin önüne konulacak yöneltici kanatlar, düz yapılabileceği gibi, önden geniş ve arka kısmı biraz daha daraltılabilir. Burada yöneltici kanatların ön ve arka kenarları arasındaki genişlik oranı $2/3$ olarak alınmıştır. Sekiz yöneltici kanada sahip konsantratörde, her kanat sekizgen kenarlarının tam ortasına yerleştirilebilecek şekilde

hazırlanmıştır. Bu kanatlar, aşağıdaki ölçülere göre 2 mm kalınlığındaki sacdan kesilmiştir.

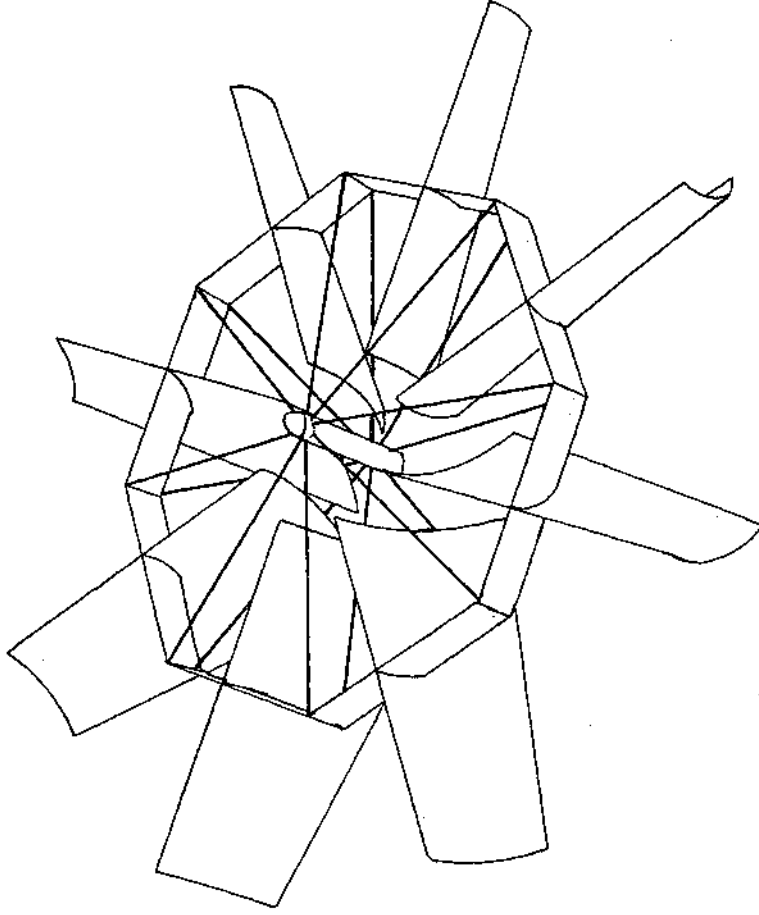


Şekil 4.3. Yöneltici kanadı ve ölçüleri.

Yukarıda ölçüleri verilmiş bir konsantratör veya yöneltici kanada bir eğrilik verilmiştir. Geniş kenarından itibaren 20 cm mesafede sekizgen kenarının ortasına yerleştirilmesi için yöneltici kanadın üzerine bir kanal açılmıştır. Yöneltici kanadın değişik açılarda rüzgar yoğunluğunun denemesi için 0° 'den 45° 'ye kadar değişik açılarda monte etme imkânı üzerinde durulmuştur. Bu suretle kanadın eğrilik yarıçapı değişmeden kanadın konum açısının değiştirilmesi suretiyle optimum rüzgar yoğunluğu elde edilebilir. Kanadın oluklu tarafı rüzgar yönüne çevrilerek ve asıl pervane üzerinde girdap oluşturmak için pervaneye doğru hafif bir meyil verilmiştir.

Yöneltici kanatların titreşimlerini ve rüzgara karşı konumlarını değiştirmemeleri için monte işinde somunlu civata kullanılmıştır. Kanadın arka tarafına kaynatılan bir

parça, kanat ile sekizgen ranın civata ile birleştirilmesine yardımcı olmuştur. Asil pervane konsantratör kanatlarına değmeyecek şekilde yerleştirilmiştir. Bu yerleştirme, aslında yöneltici kanatların oluşturduğu girdapların içinde olması gerekir.



Şekil 4.4. Yöneltici kanatların oluşturduğu konsantratör sistemi.

Meydana getirilen bu konsantratör sisteminde bulunan yöneltici kanatlar, birçok girdabın karşılıklı etkileşmesinden artan bir dönme hızını meydana getirirler. Girdapların dönmelerinden dolayı asıl rüzgar pervanesinin dönme hızı da artacaktır.

4.1. Konsantratör Sisteminin Özellikleri

Rüzgar enerji konsantratörlerinin rüzgarın hızını bir miktar arttırdığı gerçeği, hafif rüzgar sistemleri fikrini ortaya koymuştur. Bu sistemler diğer çok kanatlı rüzgar enerji sistemlerin aksine hızlı bir dönme özelliği göstermektedir. Maksimum gücün, süpürme alanının sabit kalması şartıyla rüzgar hızının kübü ile artacağı yukarıda (2.25) bağıntısı ile belirtilmiştir. Rüzgarca zengin bölgelere kurulan rüzgar enerji sistemleri, konsantratör yanı yöneltici kanatların ilavesi ile asıl pervane üzerine gönderilecek rüzgar hızı arttığı için, elde edilecek gücün miktarı da artacaktır. Benzer şekilde, yarısı kadar olan rüzgar hızlarında büyük bir konsantratörle aynı verime ulaşmak mümkündür. Konsantratör sistemi dört veya beş kat türbin çapında olabilir. Buna karşılık, konsantratör masraflarını azaltmak hafif rüzgar türbinleri için temel gelişme olmuştur.

Ucuz ama aerodinamik açıdan az yeterli olan konstrüksiyon, bir yelken bezi yüzeyi esaslı yöneltici kanatların temelidir. Buna benzer şekilde diğer bir çok malzeme de yöneltici kanat yapımında kullanılabilir.

Konsantratör sisteminin çalışma şekli, kısa süreli rüzgar hızı değişimlerini dengelemeye elverişlidir. Kaldırma gücü olmayan bir potansiyel akım çizgisi profili oluştuğu için, kısa bir gecikmeden sonra hareket sirkülasyonu ve kenar girdapları oluşur. Rüzgarın yön ve hızının değişiminde, toplayıcı kanatlar üzerinde bir yük değişimi meydana gelir. Bu yöneltici kanatlar, bir dengeleme görevi de yapar.

Rüzgar enerji sistemleri ayarlanabildiği ölçüde faydalı olarak görünür. Bu durum, konsantratörlü sistemler içinde geçerlidir. Konsantratör kanatlarının ayarında, kanadın rüzgar alan akım açısı değiştirilmek suretiyle yapılır. Genellikle ayarlama şu üç yöntemle yapılır.

1. Dönen pervane kanatlarının açısı ayarının değişimi,
2. Hareketsiz yöneltici kanatların açısı ayarı değişimi,
3. Yöneltici kanatların açıklığında asıl pervanenin uzunlamasına kaydırılması.

Kanatların kendi kendine, istenen durumda rüzgar yönüne gelebilecek şekilde yapılabilir. Bunun için, konsantrasyon kanadının nötr noktası karşısında bulunan eksen etrafında dönebilmesi gerekir.

Bir rüzgar konsantratörünün aşırı rüzgarlara karşı bir emniyet altında çalışabilmesi için üç çözüm düşünülebilir.

1. Tüm konsantratör kanatları ayarlanabilir ve değişken olarak yataklanmalıdır.

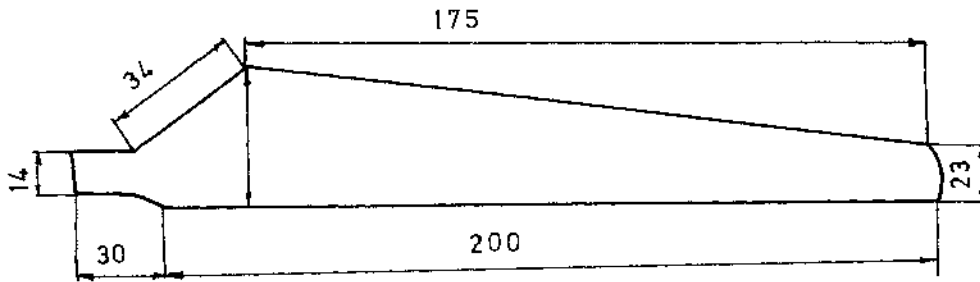
2. Kuleli sistemlerde, kulede uygun bir yönlendirme yataklanması yapılmalıdır. Konsantratör kafesi, aşırı rüzgar hızlarında fırtına konumuna gelebilecek şekilde yapılarak devrilme durumu almalıdır.

3. Bir yelkenli yüzeyinin çalışma teknolojisinden hareket edilerek fırtına sırasında yelkenler toplanır ve yüzey küçültülür.

Büyük konsantratörlü rüzgar türbinlerinde, fırtına zamanındaki emniyeti için yukarıdaki üç şart gereklidir.

4.2. Rüzgar Pervanesi

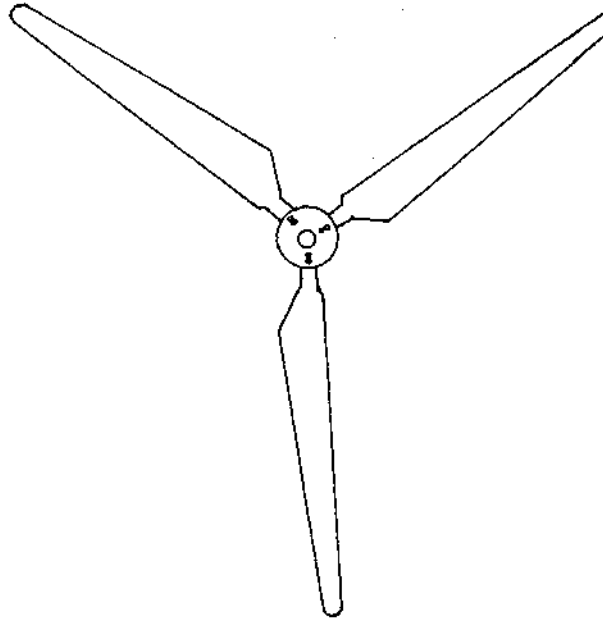
Üç kanatlı rüzgar pervanesinin kanatları yukarıda anlatılan şekilde imal edilmiştir. Yapılan çeşitli kanatlar arasında maksimum devirde dönen kanatlar üzerinde durulmuştur. 12° ve 20° derece arasında eğim verilen çeşitli kanatlar içinde atelyemizin imal şartlarında maksimum devirde dönen kanatların 17° eğimli olanların olduğu görülmüştür. 2 mm kalınlıktaki sacdan yapılan kanatlar, yine aynı kalınlıkta olan bir dairesel parça üzerine civata ve somunla bağlanmıştır. Gerektiğinde sökülüp takılabilen kanatların eğim açısı 17° olarak alınmıştır. Ayrıca pervane takımı somun ile bir mile bağlanmıştır. Bu mil, rulmanlı yataklara yerleştirilmiştir. Rulmanlı yataklar ayrıca düşey iki parça üzerine yataklanmıştır. Kanat fanının merkezi ile konsantratör sisteminin merkezi aynı eksene getirilmiştir. Bu şekilde pervane kanatları, yöneltici kanatların oluşturacağı girdap alanına yerleştirilmiş oluyor. Girdabın etkisi, ancak pervanenin dönme hızından anlaşılabilir.



Şekil 4.5. Rüzgar pervanesinin bir kanadı ve ölçüleri.

Çeşitli kalınlıkta olan sacdan yapılan kanatların çalışması sırasında, hafif olanların yüksek rüzgar hızlarında titreşim frekanslarının yüksek olduğu görülür. Buna karşılık ağır kanatların dönmelerinde bir kararlılık gözlenmiş olmasına rağmen, düşük rüzgar hızlarında hafif olanlara nazaran alçak devirde dönmeleri söz konusudur. En uygun şart, kanatların ağırlık ve titreşim oranlarını en aza indirmek ve istikrarlı bir şekilde dönmesini sağlamaktır.

Rulmanlı yatakların yerleştirildiği düşey ayaklar, vida sistemiyle deney seti tezgahına bağlanmadan önce, konsantrator sistemine olan mesafesi en yüksek dönme hızının elde edildiği şekilde ayarlandıktan sonra sabitleştirilmiştir.



Şekil 4.6. Rüzgar pervane sistemi.

5. DENEYLER ve SONUÇLARI

Hazırlanmış bulunan deney setinin tabii rüzgarlı bir ortamda kullanılması oldukça zordur. Çünkü ilimizin rüzgar potansiyeli düşüktür ve istenilen zamanda çalıştırılması mümkün değildir. Bunun için deneyler bir vantilatörün ürettiği rüzgar ile yapılmıştır. Vantilatörün hız ayarının bulunmayışı ve kanatlarının maksimum rüzgar üretmeye elverişli olmayışı başlıca dezavantajlardır. İmkanların elverdiği ölçüde hazırlanan deney setinde deneylerin yapılması için vantilatör göbeğine sekiz kanatlı bir pervane takılmıştır. Kayış kasnak vasıtasıyla bir elektrik motoruna bağlanarak çalıştırılmıştır.

Motorun bağlandığı vantilatörün çalışması sırasında, titreşimler sonucu vantilatörün yönünün değişerek rüzgar doğrultusunun da değişmesi başka bir dezavantajdır. Bunun için vantilatörün tablası üzerine ağırlıklar konarak çalışma esnasında dönmesi önlenmiştir. Kanatlar ile kayış ve kasnak sisteminin motor ve tezgahdan kolayca sökülebilmesi için bağlantılar civata ve somun yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Rüzgar üreten vantilatör sistemi deney setinden tamamen bağımsızdır. Vantilatör sürekli aynı pozisyonda çalıştığı için, ürettiği rüzgarın hızı da aşağı yukarı aynı kalır. Üretilen rüzgarın hızının değiştirilmesi için, vantilatör ile rüzgar pervanesinin arasındaki mesafenin değiştirilmesi gerekir.

Üretilen rüzgarın hızından ziyade, rüzgar pervanesi ve dolayısıyla konsantratör sisteminin maruz kaldığı rüzgarın

hızı önemlidir. Bu hızın değişmesi sonucu, asıl pervane üzerindeki etkileri gözlenmiştir. Rüzgar hızının azalması pervanenin düşük bir devirde dönmesi, yükselmesi ise yüksek bir devirde dönmesi demektir.

Pervane milinin dönme sayısı takometre ile ölçülmüştür. Bunun için milin kuyruk kısmına takometrenin takılabilmesi için havşa açılmıştır. Vantilatörün asıl pervane üzerine gönderdiği rüzgarın hızı, rüzgar hız anemometresiyle ölçülmüştür. Tabii rüzgarın hızının değişmesi ve devamlı aynı hızda kalmayışına benzer şekilde, üretilen rüzgarın hızı da sürekli değişiklik göstermektedir. Bunun da tabii rüzgara benzemesi bakımından bir avantaj olduğu kabul edilir. Deneylerin gerçeğe daha yakın olması açısından bu durumun önemi ortaya çıkar. Çünkü tabii rüzgarın hızı da aynı değerde kalmaz, ancak bir ortalama değer alınabilir.

Rüzgar hızı ölçümünde, vantilatör belli bir mesafede çalıştırılmış olup konsantratör önündeki rüzgarın hızı ölçülmüştür. Ancak bu hız, bir maksimum ile bir minimum değer arasında sürekli değişir. Burada gerçeğe daha yakın bir değere ulaşmak için, hızın düştüğü en alt değer ile yükseldiği en üst değerlerin yanında ortada da iki orta değer alınmıştır. Alınan bu dört ayrı hız değerlerinin ortalaması gerçeğe daha yakın olan bir rüzgar hız değerini verir.

Rüzgar hızının sürekli değişiklik göstermesi karşısında pervane milindeki dönme sayısı da aynı durumda değişiklik göstermektedir. Bunun için de en düşük devir değeri ile en yüksek devir değeri yanında ikişer tane de orta değer alınarak bu dört değişik değerlerin ortalaması alınmıştır.

Tablo 5.1. Yöneltilici Kanatlar Kullanılmadan Alınan
Rüzgar Hızları ile Milde Elde Edilen Devir
Sayıları

Dny.No	V_a	V_o	V_o	$V_{\bar{u}}$	n_a	n_o	n_o	$n_{\bar{u}}$
1	2,1	2,4	2,6	3,0	58	62	76	80
2	3,2	3,6	3,8	4,1	70	73	85	90
3	3,4	3,5	3,8	4,6	80	88	105	120
4	4,3	4,6	4,7	5,0	96	115	135	141
5	4,5	4,8	5,1	5,4	137	143	147	150
6	5,0	5,2	5,7	6,0	146	165	190	220
7	5,6	5,7	5,9	6,3	201	215	224	240
8	6,8	6,9	7,1	7,2	296	330	342	350
9	7,5	7,6	7,8	7,9	362	372	381	390
10	7,6	7,8	8,0	8,1	375	387	393	415
11	7,7	7,9	8,2	8,3	387	398	425	437
12	8,4	8,5	8,7	9,0	460	462	475	483
13	9,2	9,3	9,8	10,5	497	527	535	548
14	11,2	11,7	11,9	12,2	580	592	607	622

V_a : Anemometrede okunan en (düşük) alt hız (m/s)

V_o : Anemometrede okunan orta hızlar (m/s),

$V_{\bar{u}}$: Anemometrede okunan en üst hız (m/s).

Tablo 5.2. Yöneltilici Kanatların Sıfır Derece Konumu
İtibarı ile Rüzgar Hızları ve Milde Elde
Edilen Devir Sayıları

Dny.No	V_a	V_o	V_o	$V_{\ddot{u}}$	n_a	n_o	n_o	$n_{\ddot{u}}$
1	2,0	2,1	2,8	3,3	71	79	82	90
2	2,7	2,8	3,2	3,5	102	103	109	112
3	3,2	3,6	3,8	3,9	120	132	136	138
4	3,3	3,8	3,9	4,3	147	151	158	164
5	3,6	3,9	4,2	4,5	173	180	187	198
6	5,0	5,2	5,8	6,0	202	210	215	218
7	5,8	6,2	6,3	6,9	251	257	275	310
8	7,2	7,6	7,8	8,0	393	421	442	448
9	8,2	8,6	8,7	9,4	478	486	501	527
10	8,9	9,6	9,7	10,2	558	565	580	596
11	8,9	9,8	10,1	10,5	570	644	650	673
12	9,2	9,9	10,8	11,2	690	738	741	750
13	10,5	10,7	11,2	12,6	860	870	880	916
14	13,5	13,6	13,9	14,0	1018	1050	1105	1128

n_a : Pervane milinde ölçülen en alt (düşük) devir sayısı (1/dak),

n_o : Pervane milinde ölçülen orta devir sayıları (1/dak)

$n_{\ddot{u}}$: Pervane milinde ölçülen en üst devir sayısı (1/dak)

Tablo 5.3. Yöneltilici Kanatların Konumunun 10° Değişmesi
Sonucu Alınan Rüzgar Hızları ile Milde Elde
Edilen Devir Sayıları

Dny.No.	V _a	V _o	V _o	V _ü	n _a	n _o	n _o	n _ü
1	3,0	3,1	3,5	3,6	82	87	96	102
2	3,2	3,3	3,6	3,7	110	118	120	122
3	3,6	3,8	3,9	4,2	158	161	166	169
4	4,3	4,5	4,7	4,8	189	196	198	200
5	4,5	4,6	4,7	5,0	219	220	237	240
6	5,1	5,4	5,8	6,0	235	240	247	260
7	5,0	6,3	6,7	6,9	260	261	273	286
8	7,3	7,6	7,9	8,0	340	342	347	351
9	7,5	7,6	7,9	8,3	348	350	366	367
10	8,5	9,2	9,3	9,6	456	467	477	480
11	9,6	9,8	10,2	10,5	544	547	557	560
12	9,0	10,7	10,8	11,3	676	680	698	700
13	12,6	12,5	12,7	12,8	790	810	816	822
14	12,9	13,1	13,4	13,5	910	912	917	926

Tablo 5.4. Yöneltilici Kanatların Konumunun 20°
Değiştirilmesi Sonucu Alınan Rüzgar Hızları
ile Milde Elde Edilen Devir Sayıları

Dny.No	V_a	V_o	V_o	$V_{\bar{u}}$	n_a	n_o	n_o	$n_{\bar{u}}$
1	3,0	3,2	3,4	3,6	90	97	98	103
2	3,4	3,8	4,1	4,3	99	102	104	107
3	4,0	4,4	4,7	4,8	135	138	145	157
4	4,2	4,7	4,8	5,0	164	170	176	183
5	5,7	6,0	6,3	6,6	191	194	197	210
6	6,2	6,5	6,9	7,0	210	216	217	220
7	6,0	7,3	7,5	7,9	258	260	267	270
8	8,2	8,5	8,7	8,9	347	351	357	362
9	8,5	8,6	9,5	9,7	372	380	384	393
10	9,1	9,6	9,7	10,0	437	440	442	456
11	9,6	9,8	10,3	10,7	565	570	585	597
12	11,0	11,5	11,6	11,9	635	639	667	675
13	12,1	12,3	12,6	12,7	690	705	710	713
14	13,2	13,3	13,6	13,9	775	780	787	794

Tablo 5.5. Yöneltilici Kanatların Konumunun 30°
Değiştirilmesi Sonucu Alınan Rüzgar Hızları
ile Milde Elde Edilen Devir Sayıları

Dny.No	V _a	V _o	V _o	V _ü	n _a	n _o	n _o	n _ü
1	2,5	2,6	2,9	3,0	80	84	88	91
2	3,2	3,6	3,7	3,8	114	119	123	125
3	3,6	3,7	3,9	4,1	158	160	167	170
4	4,5	5,0	5,4	5,5	174	175	176	179
5	5,6	5,7	5,9	6,1	198	200	208	212
6	6,0	6,2	6,5	7,0	240	246	250	255
7	6,9	7,0	7,5	7,8	287	290	303	304
8	7,8	8,2	8,6	8,7	317	320	324	332
9	8,6	8,7	9,0	9,2	402	404	407	416
10	10,0	10,6	10,7	11,0	465	470	478	480
11	11,3	11,6	11,7	12,0	560	562	568	570
12	12,1	12,3	12,4	12,5	610	615	621	632
13	12,5	12,6	12,8	12,9	650	675	705	715
14	13,1	13,4	13,6	14,0	747	759	770	790

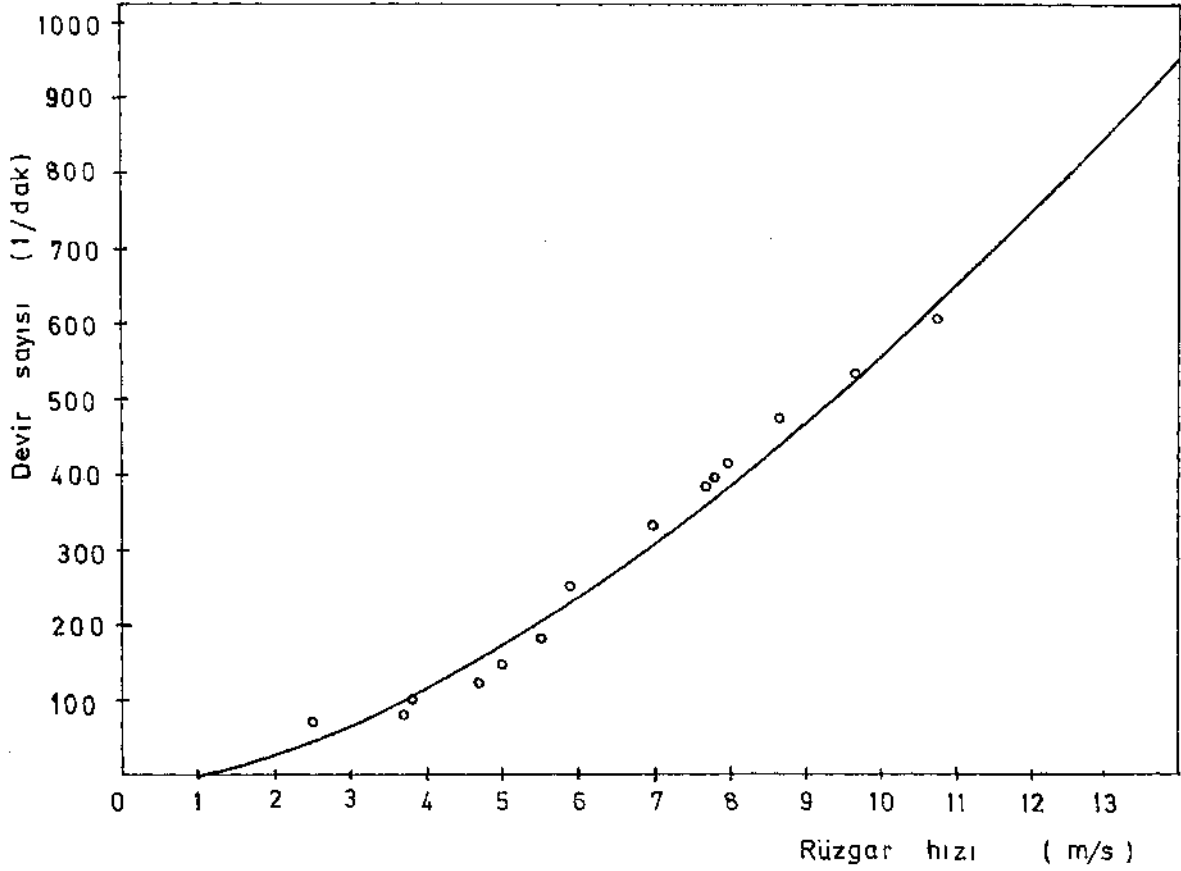
5.1 Ortalama Rüzgar Hızları ve Ortalama Devir Sayıları Arasındaki Eğrilerin Çizimi

Yukarıda elde edilen rüzgar hızı ve mildeki devir sayılarının ortalaması alınarak normal ondört adet değer herbiri için elde edilmiştir. Bu değerler, milimetrik kağıt üzerinde hız değerleri x eksenine, devir değerleri de y eksenine geçirilerek eğriler çizilmiş ve daha sonra buraya aktarılmıştır. Bu eğriler ayrı ayrı ele alınacaktır.

5.1.1. Konsantratörsüz Durumdaki Değerler ve Eğrisi

<u>Dny.No</u>	<u>V_{ort}</u>	<u>n_{ort}</u>	<u>Dny.No</u>	<u>V_{ort}</u>	<u>n_{ort}</u>
1.	2,5	69	8.	7,0	330
2.	3,7	80	9.	7,7	378
3.	3,8	98	10.	7,8	393
4.	4,7	122	11.	8,0	412
5.	5,0	144	12.	8,7	470
6.	5,5	180	13.	9,7	527
7.	5,9	220	14.	11,8	600

Bulunan bu değerler, ortalama değerler olup çizilecek olan eğriler bu değerlere göre olacaktır. Hız eksenini normal x eksenini, devir eksenini ise y eksenini olarak alınacaktır. Bu değerler milimetrik kağıda geçirildikten sonra buraya aktarılacaktır. Normal eğri çiziminde hız eksenindeki hız değerleri sıfırdan itibaren sağa doğru birer birer arttırılıyor. Ara değerler milimetrik kağıtta ara yerlere işaretlenerek yeri belirlendikten sonra buraya aynı şekilde geçirilmiştir. Bu eğrilerin çiziminde hep aynı yol takip edilmiştir.

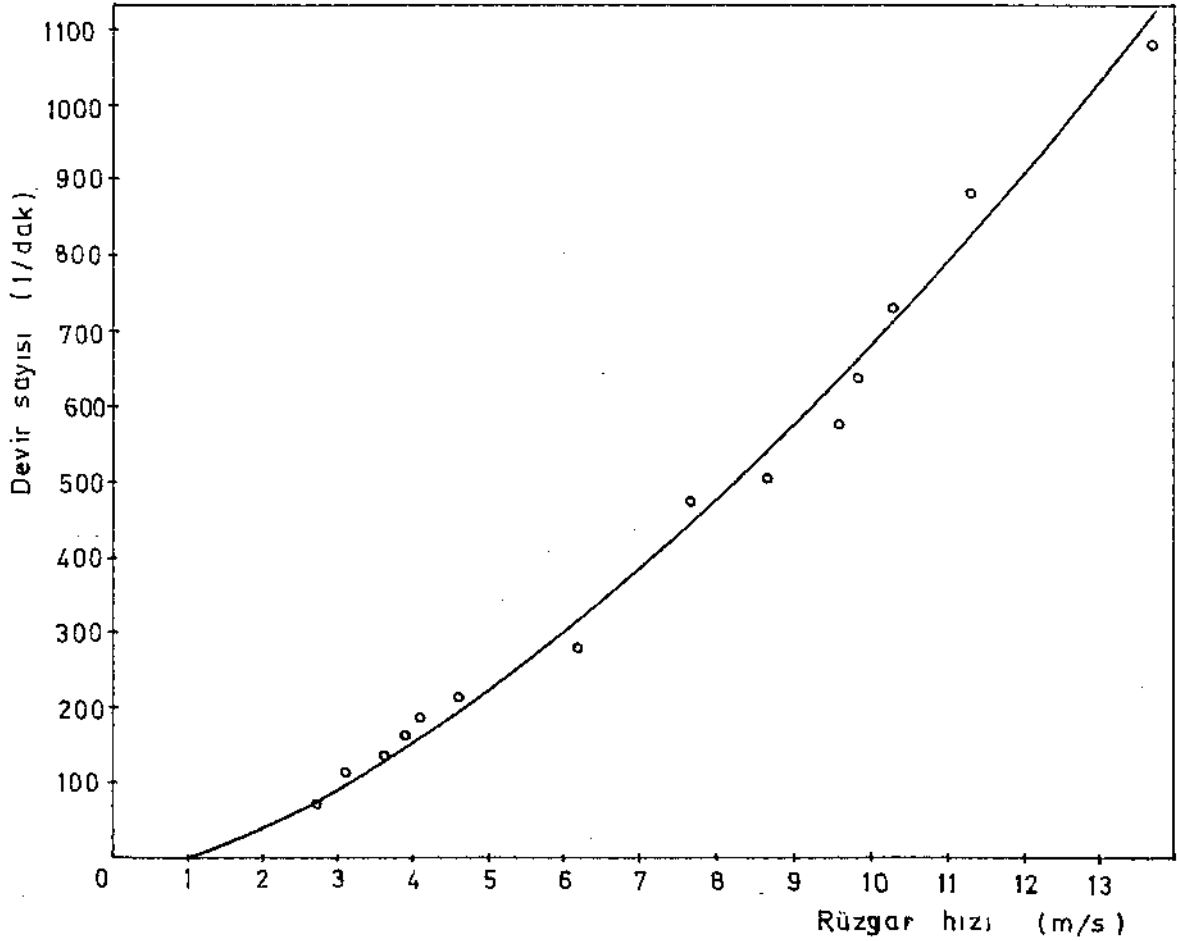


Şekil 5.1. Yöneltilici kanatlar kullanılmadan elde edilen devir sayıları ile rüzgar hızı arasındaki eğri.

Eğri incelendiği zaman, en yüksek rüzgar hızının 12 ile 13 m/s arasında olduğu görülür. Bu hıza karşılık elde edilen devir sayısı 600 (1/dak) olarak ölçülmüştür. Normal olarak eğrinin eksenlerin orijinine doğru olan uzantısı hız ekseninde 1 ile 2 m/s hızlar arasında hız eksenini kestiği görülür. Çünkü rüzgarın hızı belli bir değere ulaşınca kadar pervanenin dönmediği görülmüştür. Bunun için eğri sıfır noktasına kadar uzatılamaz. Eğrinin diğer ucu, rüzgar hızının artması ile hız eksenini arasındaki açı büyüyerek uzanır.

5.1.2. Yöneltilici Kanatların Sıfır Konumu Değerleri ve Eğrisi

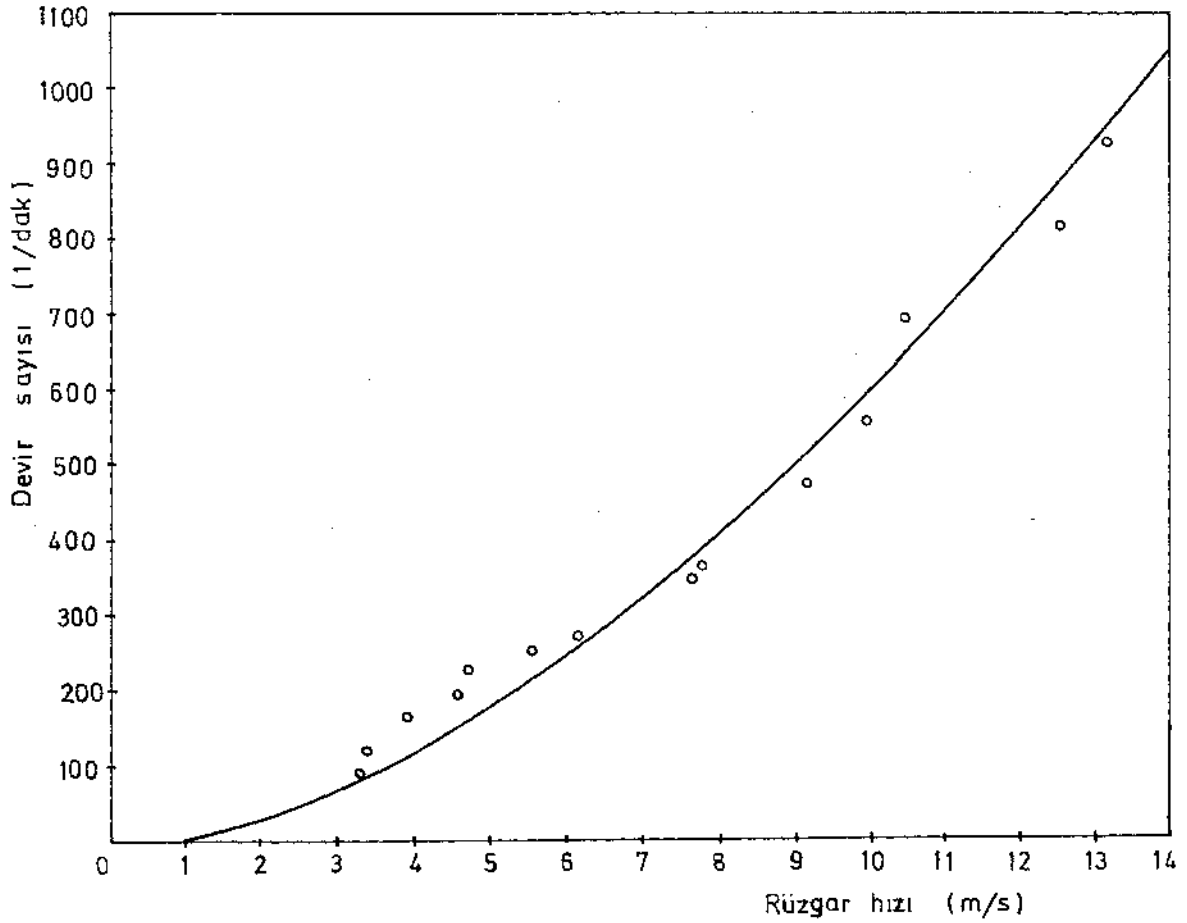
	V_{ort}	n_{ort}		V_{ort}	n_{ort}
1.	2,6	81	8.	7,7	426
2.	3,1	107	9.	8,7	498
3.	3,6	132	10.	9,6	575
4.	3,8	155	11.	9,8	634
5.	4,1	185	12.	10,3	730
6.	5,6	211	13.	11,3	882
7.	6,2	273	14.	13,7	1075



Şekil 5.2. Sıfır konumunda yöneltilici kanatlardaki hız ve devir sayıları arasındaki eğri.

5.1.3. Yöneltilici Kanatların 10° Konumundaki Değerler

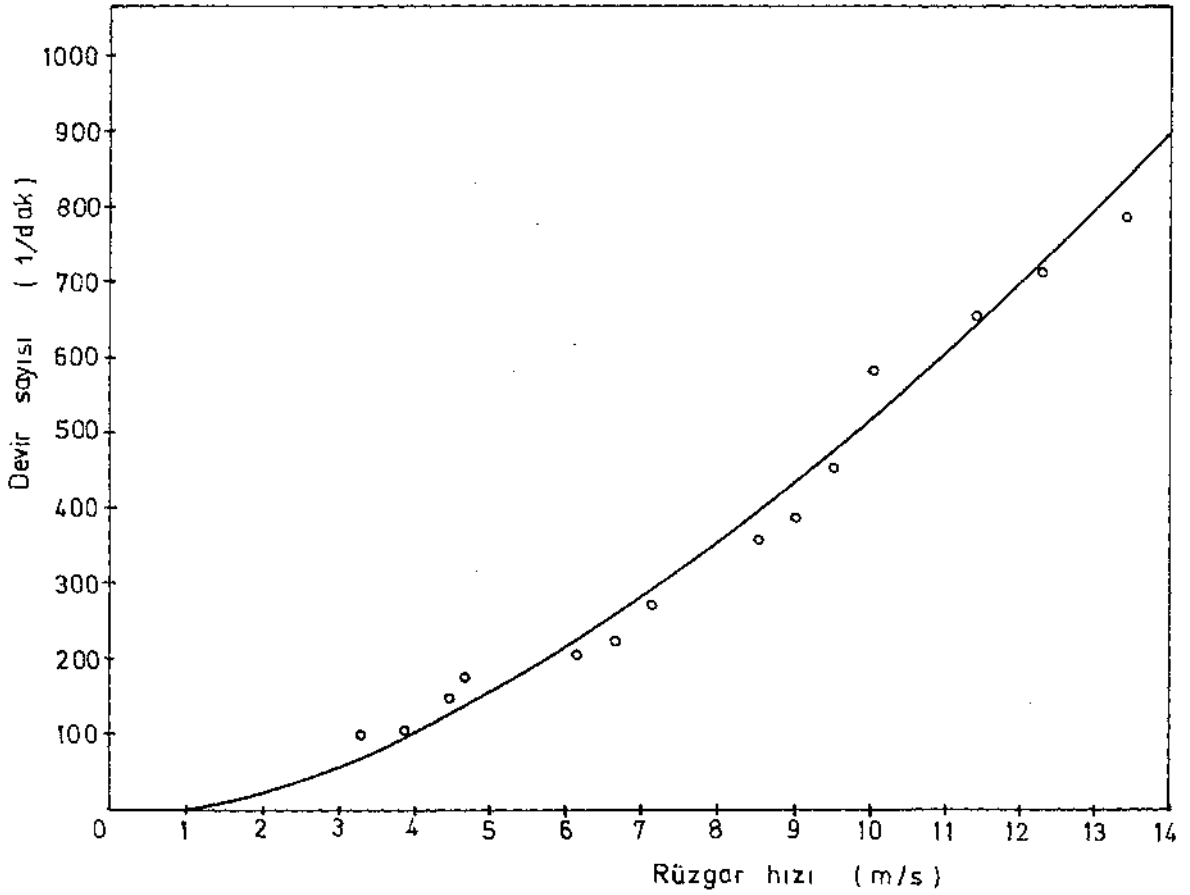
<u>Dny.No</u>	<u>V_{ort}</u>	<u>n_{ort}</u>	<u>Dny.No</u>	<u>V_{ort}</u>	<u>n_{ort}</u>
1.	3,3	92	8.	7,7	345
2.	3,4	118	9.	7,8	358
3.	3,9	164	10.	9,2	470
4.	4,6	196	11.	10,0	552
5.	4,7	229	12.	10,5	689
6.	5,6	246	13.	12,6	810
7.	6,2	270	14.	13,2	916



Şekil 5.3. 10° Konumunda yöneltilici kanatlar kullanılarak elde edilen devir sayıları ile rüzgar hızları arasındaki eğri.

5.1.4. Yöneltilici Kanatların 20° Konumundaki Değerler

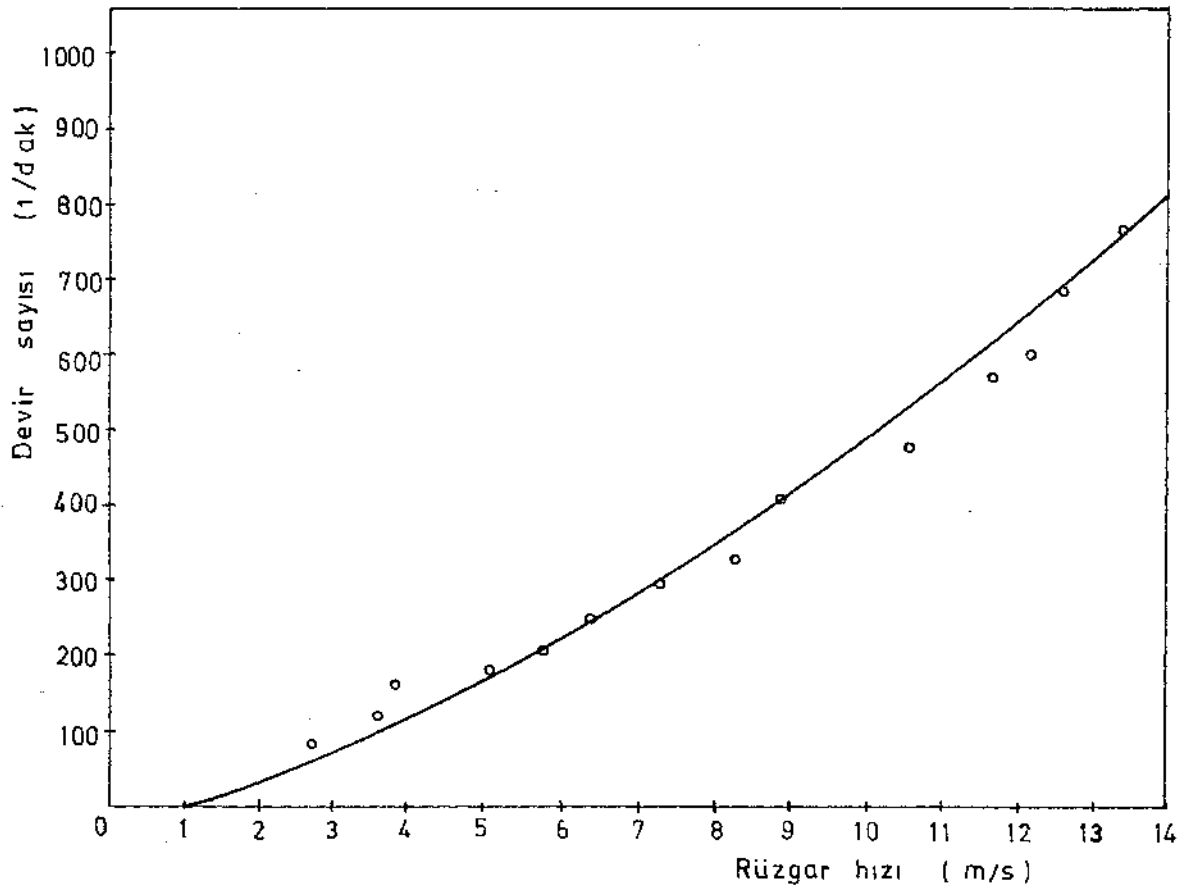
<u>Dny.No</u>	<u>V_{ort}</u>	<u>n_{ort}</u>	<u>Dny.No</u>	<u>V_{ort}</u>	<u>n_{ort}</u>
1.	3,3	97	8.	8,6	354
2.	3,9	103	9.	9,1	382
3.	4,5	144	10.	9,6	444
4.	4,7	173	11.	10,1	579
5.	6,2	198	12.	11,5	654
6.	6,7	216	13.	12,4	705
7.	7,2	264	14.	13,5	784



Şekil 5.4. Yöneltilici kanatların konumu 20° 'de iken elde edilen devir sayıları ile rüzgar hızları arasındaki eğri.

5.1.5. Yöneltilici Kanatların 30° Konumundaki Değerler

<u>Dny.No</u>	<u>V_{ort}</u>	<u>n_{ort}</u>	<u>Dny.No</u>	<u>V_{ort}</u>	<u>n_{ort}</u>
1.	2,7	86	8.	8,3	323
2.	3,6	120	9.	8,9	407
3.	3,8	164	10.	10,6	473
4.	5,1	176	11.	11,7	565
5.	5,8	205	12.	12,3	620
6.	6,4	248	13.	12,7	684
7.	7,3	296	14.	13,5	766



Şekil 5.5. Yöneltilici kanatların konumu 30° 'de iken elde edilen devir sayıları ile rüzgar hızları arasındaki eğri.

5.2. Rüzgar Hızı ve Pervane Devir Sayısı

Konsantratör sistemi yani yöneltici kanatlar kullanılmadan yapılan ölçmelerde en yüksek rüzgar hızına karşılık ölçülen devir sayısının 600 (1/dak) dolaylarında olduğu görülür. Yapılan on dört ölçümün ortalaması alındığı zaman 6,55 m/s'lik bir rüzgar hızına karşılık yaklaşık 287 (1/dak devirlik bir dönme elde edilmiştir.

Elde edilen rüzgar hızı ile devir değerleri eğrisi incelendiği zaman, yöneltici kanatların değişik açılarda değişik devir sayıları oluşturdıkları görülür. Devir sayılarının azalması veya yükselmesi rüzgar hızının azalması ve yükselmesine bağlı kalır. Dönen bir milde elde edilebilecek güç miktarı, moment ve devir sayısının artması ile artar. Eğer rüzgarın hızı artarsa pervaneye uygulanan kuvvet artar. Bu da momente tesir eder. Diğer taraftan rüzgar hızının artması ile mildeki devir sayısı da artar. Bu iki artış da gücün artmasına sebep olur. Yukarıda verilen (2.25) ifadesine göre maksimum güç pevanenin süpürme alanı ile rüzgarın hızına bağlı olarak değişir. Burada pervanenin süpürme alanı değişmediğine göre gücün artışı ancak rüzgar hızının artışı ile mümkün olacaktır. Rüzgar hızının artışı da ancak mildeki devir sayısının artmasına bağlayabiliriz.

Yöneltici kanatlar kullanılmadan hızın artması ile normal devir sayısı orantılı olarak artar. Bu durum ilk çizilen egride açıkça görülmektedir. Fakat yöneltici kanatlar kullanıldıktan sonra eğrinin hız eksenine yaptığı açı büyümektedir. Bu açının büyümesi de devir sayısının

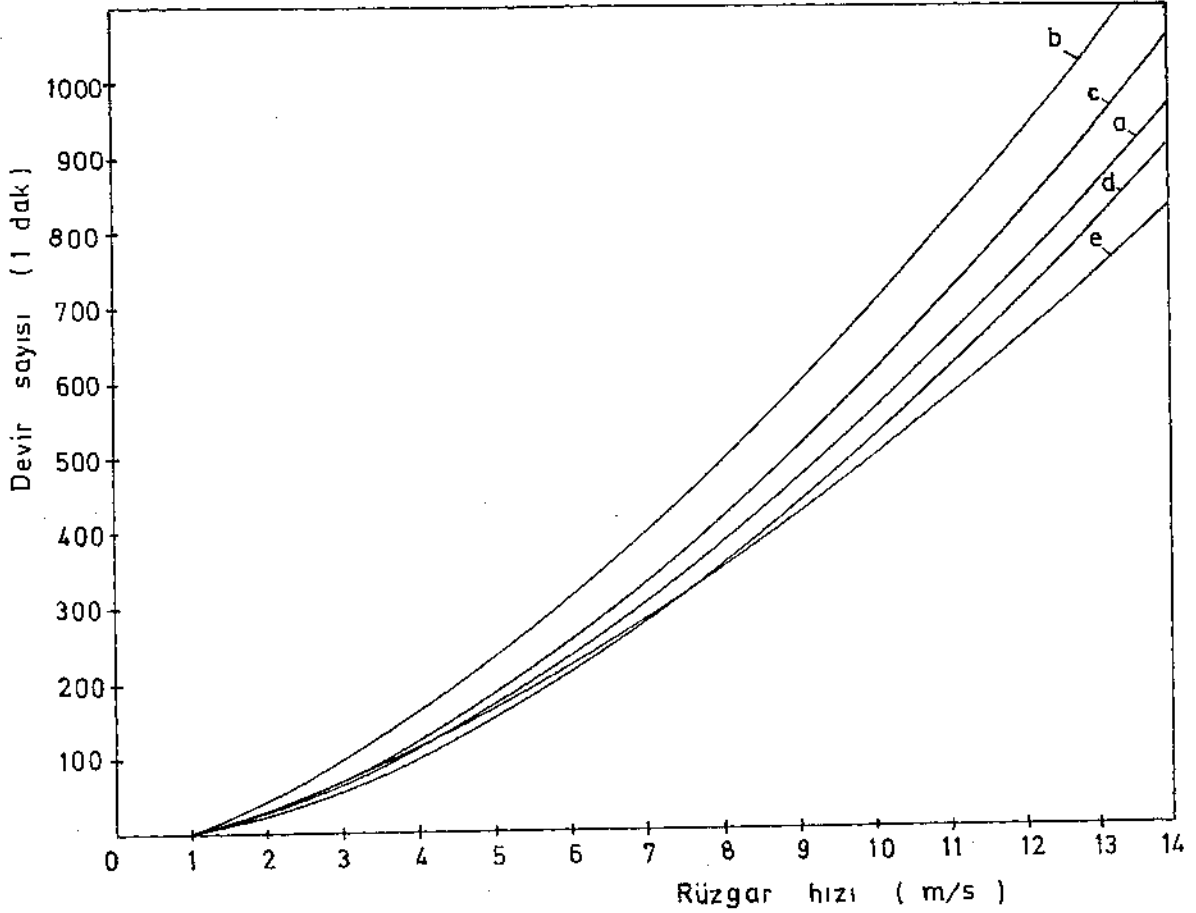
artması demektir. Bu da milde elde edilebilecek gücün artacağını ifade eder.

Yöneltici kanatlar takıldıktan sonra, hız ve devir sayısı arasında çizilen eğrinin kanatsız durumdakinden daha farklı olduğu görülmektedir. Bu durumdaki ortalama hız, 7,15 m/s için milde ölçülen devir sayısı, yani ortalama devir sayısı 430 (1/dak) olarak bulunur. Bir önceki durumla karşılaştırıldığı zaman, 6,55 m/s'lik rüzgar hızı için ortalama 382 (1/dak) bulunur. Bu değer orantı ile bulunan değerdir. Burada aynı rüzgar hızında yöneltici kanatların konulması ile 94 (1/dak)'lık bir devir sayısı fazlalığı görülür. Bu da yöneltici kanatların fonksiyonunu açıkça ortaya koymaktadır. Yöneltici kanatların kullanılması ile devir sayısında ortalama %32'lik bir artış olmuştur.

Pervane milinin dönme sayısına bağlı olarak elde edilecek gücün de %32'lik bir artış göstereceği muhakkaktır. Aynı rüzgar hızında, rüzgar enerji sisteminde yapılacak böyle bir değişiklikle yani asıl pervane önüne yerleştirilecek yöneltici kanatlar yardımı ile en az %32'lik bir güç artışı önemsenmeyecek kadar değildir.

Yöneltici kanatların konum açıları değiştirildiği zaman, kanadın diğer bütün özellikleri aynı kalmaktadır. 54 cm eğrilik yarıçapında olan bu yöneltici kanatların eğriligi değiştirilmemiştir. Yapılan tek değişiklik, rüzgarın yönüne karşı konum açısı üzerinde olmuştur. Değişik konum açılarında alınan bir çok değerler, eğrilik yarıçapı değiştirilmeksizin en yüksek devir sayısının elde edildiği açı bulunmuştur.

Beş ayrı pozisyonda yapılan deneylerde alınan sonuçlara göre çizilen eğrilerin bir düzlemde gösterilmesi ile eğrilerin karşılaştırılması imkânı ortaya çıkar. Aşağıdaki şekilde bu eğrilerin düzlemleri birbirleri üzerine çakıştırılarak eğrilerin durumu gösterilmiştir.



Şekil 5.6. Bulunan eğrilerin düzlemlerinin birbirleri ile çakıştırılarak aynı düzlemde gösterilmesi.

- a : Yöneltilici kanatlar olmadan elde edilen eğri,
- b : Kanatların sıfır konumu eğrisi,
- c : Kanatların 10°'lik konum eğrisi,
- d : Kanatların 20°'lik konum eğrisi,
- e : Kanatların 30°'lik konum eğrisi.

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Yapılan ayrı ayrı deneylerde değişik sonuçlar elde edilmiştir. Burada dikkatli çeken en önemli nokta, yöneltici kanatların kullanılması halinde, pervane milinde elde edilen devir sayısının artması olayıdır. Yöneltici kanatların konumları değiştirildiği zaman, devir sayısında da değişiklik görülmektedir. Bu kanatlar, açılmaya devam edilirse devir sayısında oldukça azalma olur.

Yöneltici kanatların kendi konumunda 10° açılması sonucu ortalama hız 7,32 m/s için, elde edilen ortalama devir sayısı 390 (1/dak)'dır. Bu durum, yöneltici kanat kullanılmayan durumu ile karşılaştırıldığı vakit, yani 6,55 m/s hız için 349 (1/dak) bulunur. Halbuki kanatların sıfır konumu için buna karşılık gelen devir sayısı 382 (1/dak)'dır. Kanatların sıfır konumunun 10° 'lik konumdan daha uygun olduğu görülür.

Yöneltici kanatların 20° açılması sonucu 7,95 m/s hız için elde edilen ortalama devir sayısı 364 (1/dak)'dır. Kanatsız durum ile karşılaştırıldığı zaman, 6,55 m/s'lik ortalama rüzgar hızı için elde edilen ortalama devir sayısı 300 (1/dak) olarak bulunur. Bu devir sayısı da bir öncekine göre daha düşüktür. O halde kanatların 10° açılması konumu da 20° 'lik konumdan daha uygundur.

Yöneltici kanatlar 30° açıldığı zaman, 8,05 m/s ortalama rüzgar hızı için elde edilen ortalama devir sayısı 367 (1/dak)'dır. Bu da, kanatsız durum ile karşılaştırıldığı

vakit, 6,55 m/s 'lik rüzgar hızı için bulunan devir sayısı 298 (1/dak)'dır. Diğer dört pozisyonun yanında en düşük devir sayısı 30°'lik durumda elde edilmiştir.

Kanatların açılması işleminin sürdürülmesi halinde, devir sayısının gittikçe azalacağı görülmektedir. Bu durum ise, yöneltici kanatların takıldığı ilk pozisyonun verimli olduğunu açıkça ortaya koymuştur. Buna karşılık 30°'lik konumun, kanatsız konum ile birbirine yakın devir sayısı verdiği bulunmuştur. Yöneltici kanatlar açılmaya devam edilirse, devir sayısı kanatsız durumdakinin altına düşebilir. Bu da kanatların çok fazla açılması halinde pervanenin durabileceğini göstermektedir.

Yöneltici kanatların fonksiyonu, yapılan deneylerden sonra açık bir şekilde görülmektedir. Yöneltici kanatların devir sayısına etkisini azaltan önemli bir husus, bu kanatların vantilatör tarafından üretilen rüzgarın etki alanından büyük olmasıdır. Üretilen rüzgar, ancak yöneltici kanatların belli bir kısmına etkisinde bırakmaktadır. Bu kanatların hemen hemen dörtte biri rüzgar alanının dışında kalmaktadır.

Devir sayısının çok fazla bir artış göstermemesinin diğer bir nedeni de, vantilatörün ürettiği rüzgarın büyük bir kısmı, konsantratör açıklığında pervane üzerine etki etmesi ile açıklanabilir. Yöneltici kanatların yokluğunda bile aynı etki devam eder. Bundan dolayı yöneltici kanatların fonksiyonu tam olarak görülmez. Halbuki üretilen rüzgarın yöneltici kanatların tamamına aynı yoğunlukta etki etmelidir. O zaman bu kanatların gerçek rolü tam olarak ortaya çıkar.

Girdap vidasının bulunması, doğal bir rüzgar alanının toplanmasına imkân sağlamıştır. Rüzgar kanal ölçüleri bir girdap akışında büyük bir güç konsantrasyonu oluşturmaktadır. Araştırmanın ilk kısımlarındaki hedef, teorik ve sistematik rüzgar kanalı deneyinin en yüksek verimlilikle geliştirilmesi prensipleri belirlemek olmuştur. Bu safhada konsantratör faktörü tek başına durum belirleyen bir faktör değildir. Aynı zamanda konsantratör yüzeyinin küçültülmesi de önemlidir.

Deneyler için suni rüzgar alanında konsantratörlü rüzgar enerji prototipi kurulmuştur. Bu sistemin ana fonksiyonu elemanlarının kolay değiştirilebilmesi veya kolay kolay ayarlanabilecek şekilde dizayn edilmiştir. Doğal rüzgar şartlarında fonksiyon birimlerinin optimizasyonunu gerçekleştirebilmek için, sistem esnek deney malzemesi görevini üstlenecek şekilde düşünülmüştür.

Modern makina mühendisliği felsefesiyle uyushularak rüzgar enerjisinin daha verimli yollarla dönüştürülmesi imkânları üzerinde durulmalıdır. Gelecekte rüzgar enerji makinalarının performansını arttırmak için fazla araştırma yapmanın önemini belirtmek gerekir. konsantratörlü rüzgar enerji sistemlerini daha ekonomik yapmak için, konsantratör fazının yapısının basitleştirilmesi ihtimali üzerinde durulmalıdır. Bunun için, konsantratörün rijit kanalları yerine adi yelkenlerin kullanılabiliirliğini de araştırmak gerekir. Bu tür araştırmalar, ilk maliyetin fiyatını düşürebilmeye yönelik olmalıdır.

K A Y N A K L A R

1. Afjeh, A.A. and Keith, Jr.T.G. A Simplified Free Wake Method for Horizontal-Axis Wind Turbine Performance Prediction. Journal of Fluids Engineering. v.108, (December 1986), pp. 400-406.
2. Atılğan, M. Rüzgar Enerjisi. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Ders Notu, Trabzon: K.T.Ü. Basımevi.
3. Christensen, C.J. and Dragt, J.B. Accuracy of Power Curve Measurements. Roskilde: Risø National Laboratory, (November 1986).
4. EİE. Rüzgar Enerjisi, Broşör, Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü, Ankara. 1986.
5. Kılıç, A. ve Şenhan, M. Türkiye'de Faydalanılabilir Rüzgar Enerjisi Potansiyeli ve Rüzgar Enerjisi Kullanılacak Yerlerin Seçimi. Güneş Enerjisi Konferansı Tebliğleri, (16-18 Mayıs 1984), ss. 241-250.
6. Kocsis, K. Wind Energy Applications for Rural Areas. Roskilde: Risø National Laboratory, (June 1987).
7. Konaklıoğlu, T. 20 kW Gücündeki Rüzgar Türbin Generatör Sistemi Tesisi Projesi ve Enerji Üretimi Tahmini. EİE Bülteni, 140, (Şubat 1989), ss. 11-22.
8. Landsager, P. and Madsen, P.H. Dynamic Modelling of Wind Turbine Drive Trains and Wind/Diesel System. Roskilde: Risø National Laboratory, (June 1986).
9. Larsen, G.C. A Simple Wake Calculation Procedur. Roskilde: Risø National Laboratory, (December 1989).
10. Madsen, P.H. Design Turbulence Loads on Horizontal-Axis Wind Turbine. Roskilde: Risø National Laboratory, (July 1986)

11. Nahas, M.N., Mohamad, A.S., Akyurt, M. and El-Kalay, A.K. Windmills With Articulated Blades. Energy, (September 1987), pp. 499-508.
12. Nahas, M.N., Mohamad, A.S., Akyurt, M. and El-Kalay, A.K. Wind Energy: An Engineering Survey. Energy Sources, v.9, (1987), pp. 137-148.
13. Paulsen, U.S. Aerodynamics of A Full-Scale, Non Rotating Wind Turbine Blade Under Natural Wind Conditions. Roskilde: Risø National Laboratory, (May 1989).
14. Rasmussen, F., Petersen, S.M., Larsen, G.C., Kretz, A. and Andersen, P.D. Investigations of Aerodynamics, Structural Dynamics and Fatigue on Danwin 180 kW. Roskilde: Risø National Laboratory, (June 1988).
15. Rechenberg, I. Development and Operation of A Novel Wind Türbine With Vortex Screw Concentrator. 2nd Joint Sehlesinger Seminar on Energy and Environment, Berlin 1989, pp. 1-11.
16. Rechenberg, I. BERWIÄN Konzentriert den Wind. Sonnen Energie, München, (April 1984), pp. 6-10.
17. Sevimli, S. Rüzgar Enerjisi Teknik Paneli. EİE Bülteni, 103-104, ss. 31-42.
18. Taşdemiroğlu, E. Wind Energy Assessment in Turkey. Energy, v.12, (April 1987), pp. 1-9.
19. Volund, P., Paulsen, U.S., Petersen, S.M. and Pedersen, T.F. Wind Turbine Test Wincon 99 XT Prototyp. Roskilde: Risø National Laboratory, (December 1988).
20. Yavuzcan, G. Tarımda Doğal Enerji Kaynakları. Ankara: Ankara Üniversitesi, 1983.