

ANADOLU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA ANA BİLİM DALI

RÜZGAR ENERJİSİNDEN YARARLANMA VE
ESKİŞEHİR İLİNDE ENERJİ ÜRETİM
OLANAKLARININ ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Danışman
Dr. YAŞAR PANCAR

Hazırlayan
EMEL ERTÜRK

ESKİŞEHİR 1985

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
Önsöz	i
Özet	ii
Summary	iii
Semboller Listesi	iv
Tablolar ve Şekiller Listesi	v
YELDEĞİRMENLERİNİN TARİHİ	1
BÖLÜM 1. RÜZGAR	3
1.1 Rüzgâr Yönü	3
1.2. Rüzgâr Hızının Tayini	4
1.2.A. Dönerli Anemometreler	4
1.2.B. Basıncılı Anemometreler	5
1.2.C. Sıcak Telli Anemometreler ve diğer Yöntemler	8
1.3. Rüzgâr Hızı	9
1.4. Genel Atmosferik Sirkülasyon	11
1.4.A. Güneş Radyasyonu	11
1.4.B. Yerkürenin Dönüşü	12
1.5. Yerküre Yüzeyinde Rüzgârın Coğrafi da- ğılımı	12
1.6. Rüzgâr Hızının periyodik değişkenlikleri.	15
1.6.A. Mevsimsel Değişme	15
1.6.B. Günlük Değişiklikler	15
1.7. Rüzgâr Yönü ve Hızındaki Ani Değişik - likler	16
1.8. Yüksekliğin Etkisi	17
1.9. Yüzey Şekillerinin Etkileri. Sırtlar, Tepe- ler, Uçurum Üzerindeki Hava Akımı. Yer Seçimi	19
1.10. Rüzgârın İstatistik Olarak İncelenmesi..	22
1.11. Teorik Olarak Elde Edilen Rüzgâr Ener- jisi	24
1.11.A. Güç Zaman Eğrisi	24
1.11.B. Enerji Dağılım Eğrisi	25
1.11.C. Rüzgâr Yönünün Bir Fonksiyonu Ola- rak Rüzgâr Enerjisi Dağılımı. Enerji Gülü	25
1.12. Elde Edilen Gerçek Rüzgâr Enerjisi	25
BÖLÜM 2. RÜZGAR MAKİNALARININ GENEL TEORİLERİ, AERO - DİNAMİK TEMEL YASA ve KAVRAMLARI	28
2.1. Betz Teorisi	28
2.2. Kanat. Geometrik ve Aerodinamik nitelikler	30
2.2.A. Tanımlar	31

2.2.B. Durgun Bir Atmosferde Hareket Eden Bir Kanada Uygulanan Aerodinamik Kuvvet	32
2.2.C. Kaldırma ve Sürüklenme Katsayısının Aerodinamik Değişkenliği	34
2.2.C.1° Gelme açısına Göre C_d ve C_l nin Değişkenliği	34
2.2.C.2° Sürüklenme Katsayısına Karşı Kaldırma Katsayısı (Eiffel Kutbu)	34
2.2.C.3° Kiriş ve Diklikle İlgili Aerodinamik Katsayılar	36
2.3. Rotor Aerodinamiği	37
2.3.A. Geometrik Tanımlar	37
2.3.B. Bir Kanat Elemanının Çalışması (Başlangıç Teorisi)	38
2.3.C. İtme, Döndürme ve Güç ile İlgili Genel İfadeler	39
2.4. Benzer Geometrik Rüzgâr Makinalarının Çalışması	40
BÖLÜM 3. YATAY EKSENİLİ RÜZGÂR MAKİNALARININ ÇALIŞMALARI VE TANIMI	47
3.1. Klasik Yatay Eksenli Yeldeğirmeni	47
3.2. Yavaş Çalışan Rüzgâr Türbinleri	47
3.3. Hızlı Çalışan Rüzgâr Türbinleri	50
3.4. Kullanılan Profiller	53
3.5. Uç Hız Oranı λ_0 ile İlgili Olarak Kanatların Nispi Yüzeyinin Değişkenliği	54
3.6. Yönlendirme Sistemleri	54
3.6.A. Kuyruk Kanadı	55
3.6.B. Yardımcı Rüzgâr Çarkları	55
3.6.C. Kendi Kendine Yönlenen Rüzgâr Rotoru	56
3.6.D. Yardımcı Motorla Yönlendirme	56
3.7. Ayarlama Düzenleri	57
3.8. Yatay Eksenli Rüzgâr Makinalarının Diğer Modelleri	58
3.9. Kanat Yapısı	60
BÖLÜM 4. YATAY EKSENİLİ RÜZGÂR TÜRBİNLERİ, KANATLARIN DİZAYNI ve RÜZGÂR GÜCÜ ÜRETİM TESİSİNE ETKİ EDEN KUVVETLERİN SAPTANMASI	61
4.A. Rotorun Aerodinamik Şekli	61
4.A.I. Basitleştirilmiş Yeldeğirmeni Teorisi	62
4.A.I.1. Kanat Kirişini Hesaplamak İçin Temel Bir Bağıntının Saptanması	62
4.A.I.1.a. İlk Değerlendirme	62
4.A.I.1.b. İkinci Değerlendirme	63
4.A.I.2. Önceki Bağıntının Değiştirilmesi Basitleştirme	64

4.A.I.3. Kanat Şeklinin Uygulanması	65
4.A.I.4. Kanat Elemanının Teorik Aerodinamik Verimliliği. En Uygun Gelme Açısı ..	66
4.A.II. Glauert'in Hava Kütlesi Dönüş Teorisi ..	67
4.A.II.1. Bir Rüzgâr Rotorunun Hava Kütlesi Dönme Sistemi	67
4.A.II.2. Benzer Elektrik Devresi ve Kendi - liğinden Meydana Gelen Hızların Saptanması	68
4.A.II.3. Aksial İtme Kuvveti ve Döndürme Momentinin Hesaplanması	72
4.A.II.3.a. İlk Değerlendirme	72
4.A.II.3.b. İkinci Değerlendirme	73
4.A.II.3.c. Sonuç	74
4.A.II.4. Yerel Güç Katsayısı	75
4.A.II.5. Sapma Açısı ve C _{yl} Miktarının en Uygun Değeri	77
4.A.II.6. Rüzgâr Direnci Önemsenmeyecek Kadar Az Olmayan Yetersiz Kanatların Kul - lanılmasıyla Ulaşılabilen Yerel Güç Katsayısı. En Uygun Gelme Açısı ...	80
4.A.II.7. Kanat Sayısının Etkisi	82
4.A.II.8. Kanat Kirişinin ve Kalem Açısının Pratik Olarak Saptanması	82
4.A.III. Rüzgâr Türbini Özelliklerinin Hesaplama - ları	84
4.A.IV. Muhtelif Teorilerle Elde Edilen Sonuçla - rın Karşılaştırılması	87
4.B. Kanat Yapısının Saptanması	89
4.B.1. Normal Çalışmada Ani Rüzgâr Değişiklikleri Nedeniyle Meydana Gelen Eğilme Gerilmele - rinin Saptanması	89
4.B.2. Normal Çalışmada Savurma Kuvvetleriyle Meydana Gelen Gerilmeler.....	91
4.B.3. Normal Çalışmada Savurma Kuvvetleriyle Döndürme Kaybının Karşılanması	92
4.B.4. Jiroskobik Etkiler	93
4.B.5. Titreşimler	98
4.B.6. Rotor Rüzgâra Karşı Durduğu Zaman Bir Fırtına Sırasında Eğilme Gerilmelerinin Saptanması	99
4.B.7. Verilen Bir RÜZGAR Hızında Çalışan Geo - metrik Olarak Benzer Rüzgâr Rotorlarında Görülen Gerilmeler	100
4.B.7.a. Savurma Kuvveti	101
4.B.7.b. Eğilme Momenti	102

4.B.8. Aynı Çapa Sahip Olan Geometrik Açıdan Benzer ve Aynı Uç Hız Oranı İçin Dizayn Edilmiş 2 Kanatlı, 3 Kanatlı ve 4 Kanatlı Rüzgâr Türbinlerinde Meydana Gelen Gerilmelerin Karşılaştırılması.	102
4.B.8.a. İçi Dolu Kesitler.....	103
4.B.8.b. İçi Boş Kesitler	103
4.B.9. Savurma Kuvvetleri, Aynı Çap ve Aynı Kanat Sayısına Sahip Olan Fakat Farklı Oramları İçin Dizayn Edilmiş Rüzgâr Makinalarındaki Eğilme Momenti Nedeniyle Oluşan Normal Çalışmada Gerilmelerin Değişkenliği	105
4.B.9.a. Savurma Kuvvetleri Nedeniyle Olan Gerilme	105
4.B.9.b. Eğilme Momenti Nedeniyle Olan Gerilme	106
4.B.9.c. İtibari Uç Hız Oranının Bir Fonksiyonu Olarak Durma Sırasındaki Gerilmelerin Değişmesi	106
4.C. Tüm Üretim Tesislerine Etki Eden Kuvvetlerin Tanıma	107
4.C.1. Aksial İtme Kuvveti	107
4.C.2. Eğilme Momenti	108
4.C.3. Rotadan Ayrılma Momenti	109
BÖLÜM 5. DIKEY EKSENLİ YELDEĞİRMENLERİNİN ÇALIŞMASI VE TANIMI	110
5.1. Karşı Hava Direncine Göre Değişen Makinalar..	110
5.1.a. Çalışma Prensipleri	110
5.1.b. Yaklaşık Değer Teorisi	111
5.1.c. Panemone	111
5.1.d. Lafond Türbini ,.....	112
5.1.e. Savanius Rotoru	113
BÖLÜM 6. TÜRKİYE'DE RÜZGAR ENERJİSİNİ KULLANMA OLANAKLARI.	117
BÖLÜM 7. 1 kW ENERJİ ÜRETECEK YELDEĞİRMENİ İÇİN GEREKLİ HESAPLAMALAR	142
SONUÇLAR	154
KAYNAKLAR	

ÖNSÖZ

Rüzgâr enerjisi ile ilgili teknoloji, son yıllar içinde hızlı bir gelişme göstermektedir. A.B.D , Danimarka, İsveç, Kanada, Belçika, Almanya ve İngiltere 'yi içine alan birkaç ülkede ya işletilen, yada kurulmakta, yahut genel planlama aşamasında olan ve gücü megawattla ifade edilen sayısız rüzgâr türbinleri vardır.

Yinelenen enerji kaynağı özelliğine sahip olan rüzgâr enerjisi, önemli miktarda bir güç üreticisi olması nedeniyle ticari amaçlı güç üretimini gerçekleştirmeye en yakın olan bir enerji kaynağı olarak bilinmektedir.

Dünyada kamu yararına çalışan birkaç kuruluş, kendi güç sistemlerine bağlı olan rüzgâr türbinlerini ya işletmekte yada işletmeyi planlamaktadırlar. İngiltere rüzgâr enerjisini, bir numaralı yinelenen bir kaynak olarak düşündüğünü son zamanlarda açıklamıştır.

Türkiye 'de rüzgâr enerjisi kullanımına gelince; bugün için kayda değer bir kullanım sahası yoktur. Ayrıca Türkiye 'nin rüzgâr enerjisi potansiyelini, genel enerji birimiyle açıklayan bir araştırmada henüz yayınlanmamıştır.

Bu alanda araştırma konusunu seçerek, çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen ve danışman olarak çalışmalarımı yönlendiren, düzelten ve kontrol eden çok değerli hocam sayın Dr. YAŞAR PANCAR'a teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Ayrıca çalışmalarımda tavsiyelerde bulunan sayın Y. Makina Müh. Mustafa Cavcar 'a, prototip yeldeğirmeni dizaynında atölye çalışmalarında emeği geçen sayın Mak. Müh. Kemalettin İleriye, Takım Tezgahları laboratuvarı ve İmal Usulleri Laboratuvarı mensuplarına, Hidrolik Devreler Laboratuvarından sayın Mak. Müh. İrfan Üreyen ile sayın Necdet Duran 'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Eserin ilgililenenlere faydalı olması dileğiyle.

ÖZET

Bu araştırma, elektrik üretimi veya suyun pompalanması için kullanılan bir rüzgâr rotorunun makina tipi ne olursa olsun; (yatay eksenli veya dikey eksenlidi olabilir) ölçü ve özelliklerini saptamak için önemli temel kuramları içerir.

Uygulama bölgesi olarak Eskişehir ili alınarak, 3 kanadı olan ve 8 m/sn lik rüzgâr hızında 1 kW lık güç üretmesi beklenen yatay eksenli bir yeldeğirmeni dizaynı planlanmıştır.

Kanatların profili NACA 23012 profilinden seçilmiştir ve kanat hesapları yapılmıştır.

Tezde, Rüzgâr Enerjisini Elektrik Enerjisine çeviren yüksek verimli ve memleketimiz şartları altında kolayca imâl edilebilir bir rüzgâr makinasının geliştirilmesi için çalışmalar anlatılmış ve imâlat için düşük maliyetli ve kolay bulunur parçalardan faydalanılmıştır.

SUMMARY

This research includes some important basic rules which confirm the measurements and properties of a Wind Motor used to produce electricity or to pump water, and not depend on the machine. (It may be horizontal axis or vertical axis)

Application area is Eskişehir. An horizontal axis Windmill is planned which can produce 1 kW power by using 8 m/s wind - speed and which has three wings. The profile of wings are as NACA 23012 and calculations are made for this.

In this passage, studies which are based on changing Wind energy into electrical energy with an high out-put wind machine. This machine can be set up by using our national conditions. All necessary materials can be found easily and bought cheaply.

SEMBOLLER LİSTESİ

- D: Çap
R: Yarıçap
r: Eksene olan uzaklık
 α : Kalem açısı veya hücum açısı
I: Sapma açısı
i: Gelme açısı
l: Kiriş uzunluğu
 λ : İtibari uç hız oranı
 λ : r yarıçapındaki uç hız oranı
b: Kanat sayısı
 C_m : Döndürme katsayısı
 C_p : Güç katsayısı
V: H yüksekliğindeki rüzgâr hızı
 V_o : H_o (m) deki rüzgâr hızı
H: Yükseklik
E: Enerji
P: Güç
S: Alan
 ρ : Havanın özgül kütlesi ($1,25 \text{ kg/m}^3$)
 C_r : Toplam aerodinamik katsayı
 C_d : Sürükleme katsayısı
 C_l : Kaldırma katsayısı
 F_d : Sürükleme kuvveti
 F_l : Kaldırma kuvveti
M: Aerodinamik moment
 η : Verim
N: Devir sayısı
u: Çevresel hız
W: Açısal hız (dönme hızı)
F: Aksial itme kuvveti
 dR_l : Kaldırma kuvveti
 dR_d : Sürükleme kuvveti
 ξ^d : dR ve dR_l arasındaki açıdır
m: Kütle
H: r yarıçapındaki disk alanı içinde elde edilen manyetik alan
 Γ : Dönen hava kütlelerinin sirkülasyonu
 I_o : Kanat ucundaki sapma açısı
 Ω : Dikey eksen etrafında rotor milinin yönlendirme hızı
Ix: Atalet momenti
Mf: Eğilme momenti
R : Eğilme gerilmesi
 C_1 ve C_2 sabit kabul edilen iki katsayı
C: Sabit bir katsayı C: 1,33

TABLÖLAR ve ŞEKİLLER LİSTESİ

Tablo	Sayfa
1. Farklı yerlerdeki muhtemel rüzgâr yön frekansları	121
2. Ortalama rüzgâr hızları	124
3. Eskişehir için en hızlı rüzgâr ve yönü.....	139
4. Hakim rüzgâr esme yönü	141
Şekil	
1. Nispi rüzgâr sıklığındaki rüzgâr gülleri ...	125
2a. Ocak ayı izotokları	126
2b. Şubat ayı izotokları	127
2c. Mart ayı izotokları	128
2d. Nisan ayı izotokları	129
2e. Mayıs ayı izotokları	130
2f. Haziran ayı izotokları	131
2g. Temmuz ayı izotokları	132
2h. Ağustos ayı izotokları	133
2i. Eylül ayı izotokları	134
2j. Ekim ayı izotokları	135
2k. Kasım ayı izotokları	136
2l. Aralık ayı izotokları	137
3. Bir yıllık esas ortalamadaki izotoklar	138

YELDEĞİRMENLERİNİN TARİHİ

Rüzgâr enerjisinden faydalanma, dün başlamamıştır. Tarih bize yeldeğirmenlerinin, İran, Irak, Mısır ve Çin ' de en eski çağlardan beri var olduğunu öğretmektedir. M.Ö. 17. yüzyılda Babil kralı Hammurabi ' nin rüzgâr enerjisi yardımıyla zengin Mezopotamya ovasını sulamak için bir plân yaptırdığı söylenilir. Bu ülkede kullanılan yeldeğirmenleri kalıntıları, İran plâtosunda bulunan yeldeğirmenlerine benzeyen dikey eksenli, makinaları içermektedir.

M.Ö. 3. yüzyılda havayla ilgili bir çalışmada, İskenderiye kahramanı olan bir Mısırlı, bir orga, basınçlı hava temin eden 4 kanatlı yatay eksenli yeldeğirmeni planını yapmıştı. Biz bundan, bu çeşit yeldeğirmenin, Mısır ' da genel olarak kullanıldığı sonucunu çıkartabiliriz mi ? Buna olumlu cevap vermek zordur. Bununla beraber görüşümüzün yanlış olduğu korkusuna kapılmaksızın, rüzgâr motorlarının doğum yerinin yalnız dikey eksenliler için, Çin ve Akdeniz bölgesinin doğu kısmı olacağını söyleyebiliriz.

İtalya, Fransa, İspanya, Portekiz ' de yeldeğirmenleri ancak orta çağda görülmüştür. Yeldeğirmenlerinin kısa bir süre sonra Büyük Britanya, Hollanda ve Almanya ' da kullanıldığını ortaya çıkarırız. Bazı yazarlar yeldeğirmenlerinin Avrupa 'ya ulaşmasını Ortadoğu ' dan dönen Haçlılara bağlamaktadırlar. Ne varki bu mümkün değildir.

Avrupa ' da kullanılan makinalar 4 kanadı olan, yatay eksenli yeldeğirmenleriydi. Tahılları, bilhassa buğdayı, öğütmede kullanılmaktaydılar. Hollandalılar, yeldeğirmenlerini M.S 1350 yılından itibaren kazanılan toprakların suyunun akıtılmasında kullanmışlardı. Daha sonra suyu 5 m ye çıkarabilen Archimed vidası ile birleştirilerek birlikte kullanılmışlardır. Yeldeğirmenleri aynı zamanda ceviz v.s ve tahıllardan yağ çıkarmak, ağaçları kesmek, eski kilimleri kâğıda dönüştürmek ve boya olarak kul-

lanılan renk maddeleri hazırlamak ve daha önceleri sigaranın yerine kullanılan enfiyenin yapımında kullanılmıştır.

Daha sonra 19. yüzyılda yavaş dönen çok kanatlı rüzgâr türbini görüldü. Bununla beraber Leupold Jakob' sun kitabında "Schauplatz der Wasser Künste" (Hidrolik sanatlar dergisi) 1724 de Leipzig ' de basılmıştır. Biz, bir krankmil ve bağlantı çubuğunun yardımıyla tek taraflı tulumbayı çalıştıran, 8 kanatlı kendi kendini ayarlayan bir rüzgâr türbininin dizaynını görebiliriz. Kendi ekseni etrafında dönme yeteneğine sahip olan her bir kanat, hızlı rüzgârda sürekli bir şekilde rüzgâr hızını azaltmak ve bu şekilde rotorun bir borada, orta kuvvetteki bir rüzgârdan daha hızlı dönmemesi için, bir yay sistemi ile beslenmiştir. Bununla beraber çok kanatlı rüzgâr türbinleri Avrupa ' da değil de A.B.D de gelişti. 1870 den itibaren tüm ülkede hızla yayıldı. Yeldeğirmenlerinin adı " Amerikan Yeldeğirmeni " oldu ve Avrupa ' ya geri döndü.

20. yüzyılın başlangıcında elektrik jeneratörlerini çalıştıran ilk modern türbini Fransa ' da görüldü ve daha sonra dünyanın her tarafına yayıldı. Yeldeğirmenlerinin keşfi Fransız Akademisinden Darrieus tarafından yapıldı. Geçmişte, tüm kuşkların ötesinde, yeldeğirmenlerinin büyük bir başarısı olduğu bilinmektedir.

İnsanoğlu için yeldeğirmenleri plânlarının başarısızlığına kadar mekanik enerjiyi sağladı. Buhar makinasının, içten yanmalı motorun keşfi, elektrikçiliğin gelişmesi karşısında yeldeğirmenlerinin kullanılması ihmal edildi ve terk edildi. Aynı zamanda piyasada, enerji üreten yeni araçların bulunması nedeniyle elektrik rüzgâr jeneratörlerinin üzerinde fazla düşünmeden kullanılmasından vazgeçildi. Bununla birlikte rüzgâr enerjisinin kullanımı düşüncesi, gün geçtikçe unutuldu.

Bununla beraber tarih bazen sürprizlerle doludur. Dünya hidrokarbon stoklarının azalması, enerji talebinin sürekli olarak artması, kirliliğin yayılma korkusu sonucu, rüzgâr enerjisi tekrar önem kazandı.

BÖLÜM 1

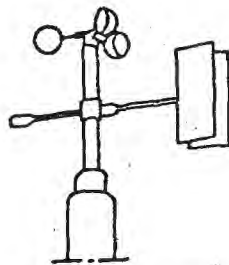
RÜZGÂR

Gezeganimizde, var olan sürekli atmosferik basınç değişikliklerinin etkisi altında hava, hiç bir zaman durgun olmayıp, sürekli olarak hareket etmektedir. Sonuçta oluşan hava akımı rüzgârdır. Rüzgâr, yönü ve hızı ile tanımlanır.

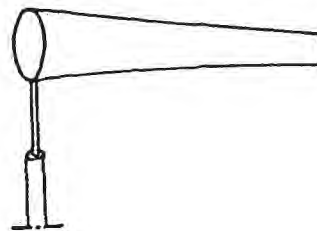
I.1. RÜZGÂR YÖNÜ :

Kuramsal olarak rüzgâr yüksek basınç bölgelerinden alçak basınç bölgelerine doğru eser. Bununla beraber orta ve deniz seviyesinden yüksek bölgelerdeki yönü yer kürenin dönüş etkisiyle bir dereceye kadar değişir. Rüzgâr izobarik çizgilere dikey olacağı yerde, bunlara paralel olur. Kuzey yarımkürede rüzgâr siklonik bölgeler civarında saatin aksi yönünde, antisiklonik bölgelerde ise, saat yönünde döner. Güney yarımkürede bu dönüş yönleri tersine olur.

Rüzgârın yönü, geldiği yöne göre saptanır. Hava akımı batıdan gelirse, bu bir batı rüzgârı olur. Bu yön bize rüzgâr gülü veya bir dikey mil etrafında dönen, bir metal tabaka olan rüzgâr oku tarafından verilir. Rüzgâr yönü pusulanın temel yönlerini işaret eden, tespit edilmiş kollarla ilgili olan rüzgâr okundan, basit bir şekilde gözlemlenebilir.

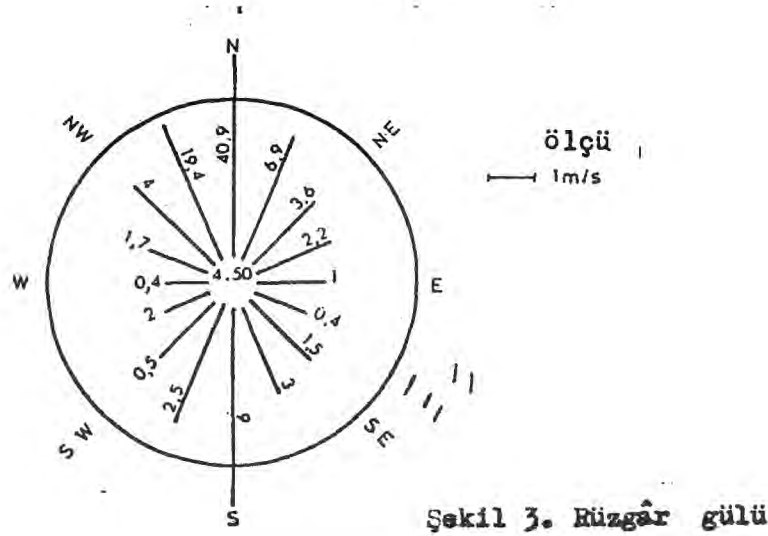


Şekil 1. Rüzgâr yönü hız göstergeleri



Şekil 2. Hava limanı rüzgâr soku

Uygulamada, yeterli derecede önemli her bir meteoroloji istasyonunda sürekli olarak, rüzgâr hızını ve yönünü aynı zamanda kayıt eden incelikli ve ayrıntılı rüzgâr okları vardır. Gözlemle elde edilen veriler, rüzgâr yönünün sürekli olarak orta eksen etrafında ileri_geri hareket ettiğini gösterir. Her bir yerden alınan günlük kayıtların kullanılmasıyla, rüzgârın, her bir yönden esmesi sırasındaki zaman yüzdesini gösteren, bir güneş diyagramı yapılabilir. Radyal vektörlerin uzunluğu hesaplanan yönlerdeki ortalama rüzgâr hızlarına orantılı olacak şekilde düzenlenmişlerdir.



Rüzgâr gülü denilen bär çeşit diyagram günün her bir saati veya her bir aý için, çizilebilir. Grafik serilerini incelemek suretiyle gün içinde veya yıl içindeki rüzgâr yönü değişikliğinin takibi olasıdır.

1.2. RÜZGÂR HIZININ TAYİNİ :

Rüzgâr hızı bir çok çeşitleri olan, anemometrelerle ölçülür. Anemometreler 3 temel sınıfa ayrılır. Dönerli anemometreler, basınçlı anemometreler ve diğerleri.

A) DÖNERLİ ANEMOMETRELER :

En ünlü modeller Robinson Papillon' un kap anemometresi,

C^{je} des compteurs de Montrouge 5 (Fransa) tarafından yapılan Ailleret anemometresi ve çok kanatlı küçük bir yeldeğirmeni olan Jules Richard anemometreleridir.

Robinson - Papillon'un kap anemometresi dünya meteoroloji istasyonlarının çoğunda bulunan bir anemometredir. Bilya yatakları üzerinde çalışan kısa bir mil üzerine takılmış, dört kaplı bir rotordur. Daha alt kısmındaki mil bir stator tarafından çevrilmiş, çok kutuplu bir manyetik sistemi taşır. Göstergeç, rüzgârın hızına bağlı olarak oluşan voltajı ölçer. Rüzgâr hızı 10 m/sn den 20 m/sn ye kadar aniden yükseldiğinde cevap verme aygıtının 19 m/sn lik bir hızı kaydetmesi için 1,3 sn dolayındadır. Kap anemometresi sn deki hızı 1-2 m olan rüzgâr hızıyla çalışmaya başlar.

Ailleret anemometresi temel olarak rüzgâr enerjisini saptamak üzere plânlanmıştır. Bu anemometrenin, bir sayaca veya kayıt aracına bağlanması mümkündür ve bu şekilde oluşan hesaplanabilir. Anemometre kaidesinde voltaj ve frekansı, dar sınırlar içinde rüzgâr hızına orantılı olan, ve sayacın zembereğini etkileyen bir alternatörle birleşmiştir. Alet sn de 3 m dolayında bir rüzgâr hızında çalışmaya başlar.

Jules Richard anemometresi, herşeyin ötesinde bir laboratuvar var aygıtıdır ve kap anemometresinden daha duyarlıdır.

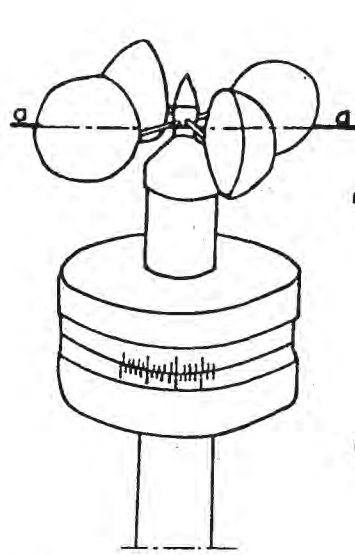
B) BASINÇLI ANEMOMETRELER :

En çok bilinen aygıtlar, eski top kadran anemometresi olan Pitot ve Dines aletleri, parçaları yatay ve dikey olarak kurulan Era ani cevap veren anemometreleri ve Best Romanoff anemometreleridir.

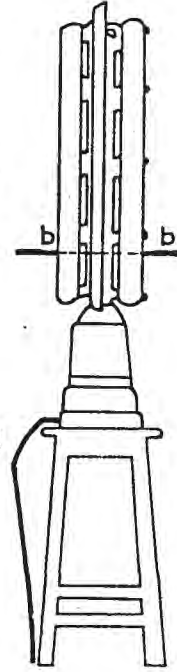
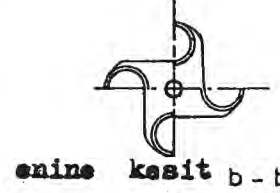
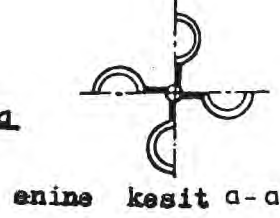
Top ve kadran anemometresi şu anda kullanılmamaktadır. Bu anemometre bir kadranın önünde hareket eden, bir iplik üzerinde asılı bir toptan oluşur. İplik ve dikey çizgi arasındaki açı rüzgâr hızına bağlıdır.

Bir öncekinden yararlanılarak keşfedilen, diğer bir alet eğimli olabilen tabak anemometresidir.

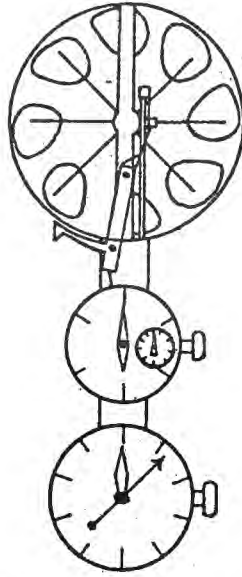
Pitot ve Dines anemometreleri rüzgârın dinamik basıncına duyarlıdır. Dines aygıtında, genellikle rüzgâr yönü ve hızının aynı grafik kağıdına kayıt edilebilmesi için, birleşik bir rüzgâr kayıt aleti vardır.



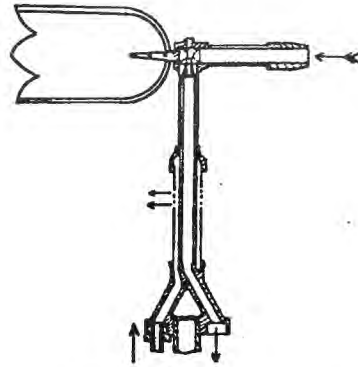
Şek.4. Robinson el anemometresi



Şek.5. Ailleret- CdC anemometresi



Şek.6. Jules Richard anemometresi



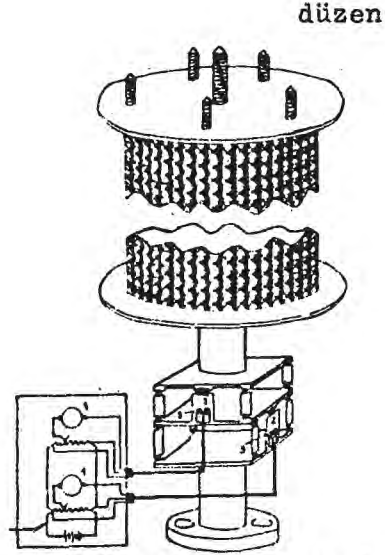
Şek.7. Dines anemometresi

Era ani cevaplı anemometresi , parçaların ölçümüne göre dikey veya yatay kol üzerinde yerleşmiş ve rüzgâr kuvvetine açık olan bir toptan ibarettir.

Best Romani anemometrelerinde ise , aerodinamik gücün bir dikey silindir üzerinde etkisi vardır . Rüzgârın hızı ve yönü galvenimetrenin kullanıldığı kaydediciler sayesinde saptanır. Bu anemometreler elektrik akımını direnç ölçerleri kanalıyla alırlar.

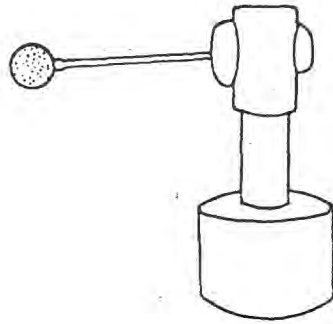


Şek.8a. Best Romani anemometresi

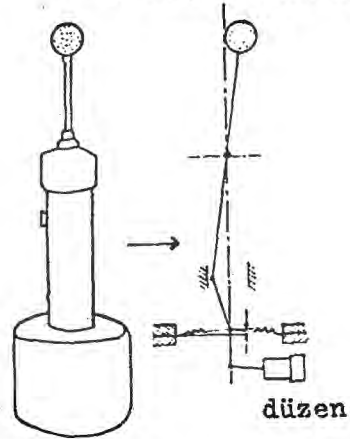


Şek.8b. Temel parçalar

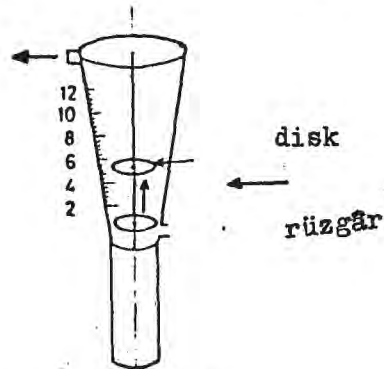
1. Galvenimetne
2. Esnek tabaka
3. Ölçüm aleti



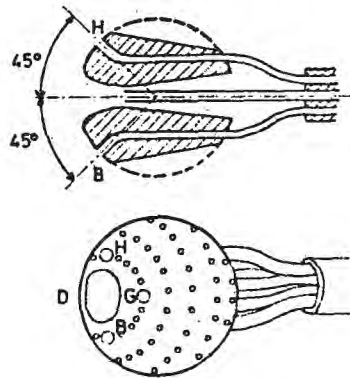
Şek.9, Dikey parçalı Era ani cevaplı anemometresi



Şek.10. Yatay parçalı Era ani cevaplı anemometresi



Şek.11. Rotometre



Şek.12. İ.M.F.L. Anemometresi

Direnç ölçerleri , aletin yanlarındaki dikey silindirlerin alt kısmında olan metalik kanatlar üzerine yerleştirilmişlerdir.

Best Romani anemometreleri saniyenin onda birinden daha az olan , bir reaksiyon zamanına sahiptirler ve aynı zamanda rüzgâr hızının hemen hemen ani olarak kaydına olanak verirler.

Yukarıda söz edilen aletlere ilave olarak I.M.F.L anemoklinometresi , rotametre , ve sıcak telli anemometreleri kullanılabilir . Rüzgâr rotametresi , alt kısmı üst kısmından daha küçük olan konik bir tüpten oluşur. Tübün iç kısmında , merkezin- den delinmiş bir plâstik disk , bir mil üzerinde döner. Tübün dip kısmında bir delik vardır , hava , delik rüzgâra yöneldiği zaman tübe dolar . Daha sonra hava , diski kaldırıp , alt delik ile üst delik arasından geçip , aygıttan dışarı çıkar .

Rüzgârhızı ne kadar yüksek olursa , diskte o kadar yükseğe kalkar. Rüzgâr hızı aygıtın yan tarafındaki cetvelden okunur .

I.M.F.L ANEMOMETRESİ:

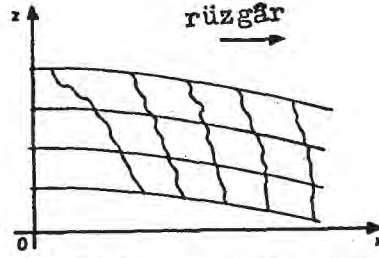
Bu aygıt Institute of Fluid Engineering of Lille (Fransa) tarafından plânlanmış ve düzenlenmiştir. Eksenine 45° meyilde ve merkezinde delikleri olan, küresel bir ölçü anemometresidir. Bu delikler manometrelerle bağlantılıdır. Burada elde edilen kayıtlar rüzgârın , hem hızını hemde yönünü verir. Rüzgârın hızı , merkez ölçüm manometresindeki kayıttan , yön ise , eksene 45° olan deliklerden elde edilir . Aygıt 40° ye kadar olan eğimlerde kullanılabilir.

C) SICAK TELLİ ANEMOMETRELER ve DİĞER YÖNTEMLER :

Tel ,bir elektrik akımıyla ısınır ve rüzgâra karşı konulur. Telin konveksiyon yoluyla soğuması , onun elektrik direncini değiştirir. Rüzgâr hızı ne kadar yüksek olursa , telin soğuması da o kadar çabuk olur. Bu koşullar altında , ısıyı okuduktan sonra rüzgâr hızını öğrenmek için; wheatstone köprüsüne sahip olan tel ölçerinin direncini ölçmek yeterli olur .

30- 200 m arasında değişen yüksekliklerde rüzgâr hızını ölçmenin diğer bir yöntemi, dumanlı roketlerdir. Roket dikey olarak ateşlenir ve düzenli aralıklarla yan taraflarda duman şeridi fotoğrafları elde edilir . Ard arda oluşan pozisyonların analizi, farklı noktalardaki rüzgâr hızını ve yönünü verir.

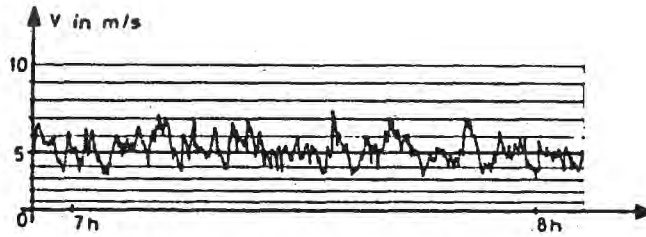
Rüzgâr hızı aynı zamanda meteorolojik ses balonlarıyla ölçülebilir.



Şek.13. Dumanlı roket

Bu nedenle hazırlanmış, çok değişik tiplerde anemometreler vardır. Dünyada, en yaygın olarak kullanılan Robinson anemometresidir. Uygulamada, ekonomik olma avantajına sahip olan, sonucu toplama sayaçlarında kullanılan, genel anemometreler yalnız ayrıntılı ve incelikli olmayan incelemeler için kullanılır.

Tesisin tam olarak kurulmasında gerekli olan temel bilgiyi elde etmek için, önceden sözü edilen aletler, bir zaman fonksiyonu olarak rüzgâr hızının değişkenliklerini veren kayıtlarla birlikte ele alınır.



Şek.14. Anemometre kaydı

I.3. RÜZGÂR HIZI :

Rüzgâr hızının, 17 kuvvet veya güce bölündüğü, Admiral Sir Francis Beaufort tarafından, uluslararası bir skala tesis edilmiştir. Tablo en son gözden geçirilmiş şekliyle bu skalayı gösterir.

Son sütun farklı rüzgâr hızları için, rüzgâra dik olan düz bir tabaktaki N/m^2 deki basınca verir. $p = 0,13V^2$ bağıntısı değerlendirme için kullanılmıştır. V, m/sn olarak ifade edilir.

edilir. Bugüne kadar kayıt edilmiş en yüksek rüzgâr hızı 12 Nisan 1934 tarihinde Mount Washington (New Hampshire , USA) da olmuştur. 5 dakika içinde ortalama hız 338km/h yükselmiştir.

RÜZGÂRIN KUVVETİNE GÖRE KARADA VE DENİZDE GÖRÜLEN

OLAYLARIN TANIMI :

Beaufort sayısı	DENİZ KRİTERİ
0	Deniz bir ayna gibidir.
1	Dalga sırtı oluşmaksızın, kırıksıklıkların görülmesiyle şırıltıların oluşması.
2	Küçük dalgacıklar, kısa fakat belirgin kırıksıklıklar, dalga sırtları cam görünümünü alır ve bozulmazlar.
3	Büyük dalgalar, dalga sırtları bozulmaya başlar, cam görünümlü köpük oluşması, dalga sırtları köpüklenerek saçılabilir.
4	KÜÇÜK dalgalar daha çok uzar, oldukça sık beyaz köpüklerin oluşması.
5	Daha belirgin uzun ve orta büyüklükteki dalgalar birçok beyaz köpük oluşur ve su saçılır.
6	Büyük dalgalar oluşmaya başlar, beyaz köpükleri ile dalga sırtları her yerde daha yoğun olarak görülür.
7	Su yukarıya doğru sıçrar, rüzgârın yönü boyunca dalgaların kırılmasından oluşan beyaz köpükler, şeritler halinde patlak vermeye başlar.
8	Daha uzun boylu, oldukça yüksek dalgalar, dalga sırtlarının kenarları köpüklenecek şekilde kırılır, Köpük, rüzgârın yönü boyunca belirgin şeritler halinde sürüklenir.
9	Yüksek dalgalar,, rüzgârın yönü boyunca, yoğun köpük şeritleri, dalga sırtları dönmeye başlar. Suyun saçılması görüşü etkileyebilir.
10	Uzun, dönen sırtlı, çok yüksek sırtlı dalgalar, parçalar halinde oluşan köpük, rüzgârın yönü boyunca yoğun beyaz şeritler halinde sürüklenir. Denizin tüm yüzeyi beyaz bir görünüm alır. Denizin çalkalanması artar, bu durum görüntüyü zorlaştırır.

- II Aşırı yüksek dalgalar, bir süre için dalgaların arkasında görünmezler. Deniz rüzgâr yönü boyunca uzanan, uzun beyaz köpüklerle tamamen kaplanmıştır. Dalga sırtlarının her kenarı köpüklenir, görüntü etkilenir .
- I2 Hava köpük ve su serpintileri ile doludur. Deniz ardarda oluşan su serpintileriyle tamamen beyazdır, görüntü çok ciddi şekilde etkilenir.

Beaufort sayısı	KARA KRİTERİ
0	Duman dik olarak yükselir.
1	Rüzgâr dumanı eğimlendirir, fakat rüzgâr gülü dönmez.
2	Yapraklar hafif kıpırdar, insan yüzünün üzerinde rüzgârın estiği hissedilir.
3	Yapraklar ve küçük dallar, yavaş yavaş sallanır.
4	Rüzgâr toz ve yol üzerindeki yaprakları üfürür, dallar sallanır.
5	Küçük ağaçlar ileri- geri sallanmaya başlar.
6	Büyük dallar sallanır, elektrik telleri titrer, şemsiyenin kullanımı zorlaşır.
7	Ağaçlar ileri - geri sallanır, rüzgâra karşı yürümek pek hoş olmaz.
8	Küçük dallar kırılır, dışarda yürümek zorlaşır.
9	Ağaç dalları kırılır,
10	Ağaçlar kökünden sökülür ve çatılar zarar görür.
II	Yoğun yıkımda çatılar yerinden sökülür, evler yıkılır, v.s

I.4. GENEL ATMOSFERİK SİRKÜLASYON:

Genel atmosferik sirkülasyon iki temel olaydan kaynaklanır: Güneş radyasyonu, yer kürenin dönüşü.

A) GÜNEŞ RADYASYONU :

Güneşin pozisyonu nedeniyle yerküresi, ekvatorun çevresinde kutuplardan daha sıcaktır. Bu durum, tropik bölgelerde yükselen ve atmosferin daha üst tabakasında kutuplara doğru hareket eden, sıcak havanın yerini almak için soğuk yüzey rüzgârlarının kutuplardan ekvatora doğru esmesine neden olur.

B) YERKÜRENİN DÖNÜŞÜ :

Yerkürenin dönüşünde atmosferik sirkülasyonu, etkiler. Atmosferin daha üst kısmındaki sıcak hava batıya yönelirken, atalet kuvveti yerkürenin yüzeyine yakın yerdeki soğuk havanın batıya doğru yönlenmesine yol açar. Bu olay, kuzey yarımküredeki düşük basınç bölgelerindeki havanın, saat istikametinin aksi yönündeki büyük sirkülasyonuna, güney yarımküredeki havanın da, saat istikametindeki sirkülasyonuna neden olur.

Her iki yarımkürede, az çok birbirinden ayrılmış üç bölgeyi görürüz.

1- Tropikal bölge ,

2 - Ilıman bölge ,

3 - Bir dişli kutusundaki dişliler gibi, birbirine zıt olarak dönen bir kutup bölgesidir.

Kuzey ve güney tropikal bölgeler birbirinden, bir alçak basınç bölgesi olan ekvatordaki durgun bölge tarafından, ılıman bölgelerden ise, subtropikal yüksek basınç kuşakları tarafından ayrılırlar.

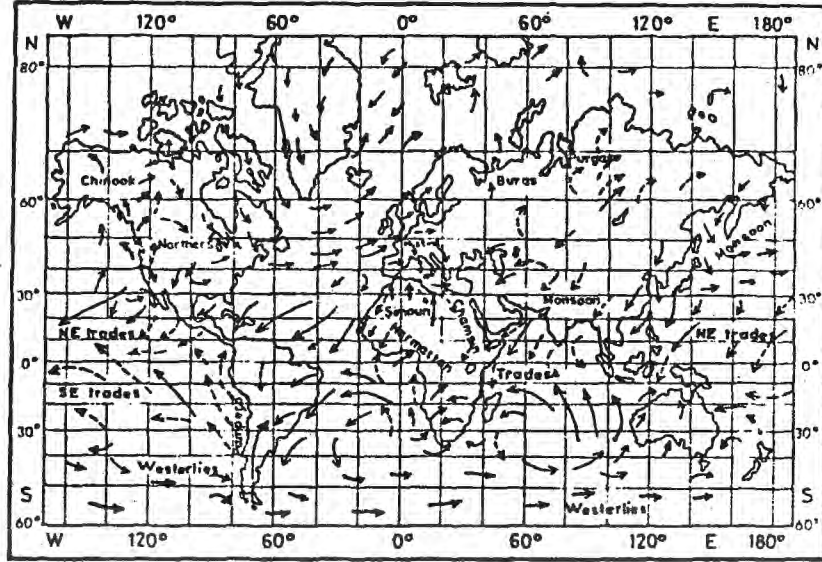
Gerçekte, okyanusların, kıtaların, karayı oluşturan yüzey şekillerinin, mevsimlerin eşit şekilde ısınmaması, yüksek ve alçak basınç kuşaklarının bölünmesine ve bozulmasına yol açar. Zaman zaman kutuplardan ekvatora doğru hareket eden soğuk hava kütleleri tarafından oluşan, atmosferik bozukluklarda vardır. Bu şekilde atmosferin durumu, sürekli bir şekilde yavaş yavaş değişmektedir.

I.5. YERKÜRE YÜZEYİNDE RÜZGÂRIN COĞRAFİ DAĞILIMI :

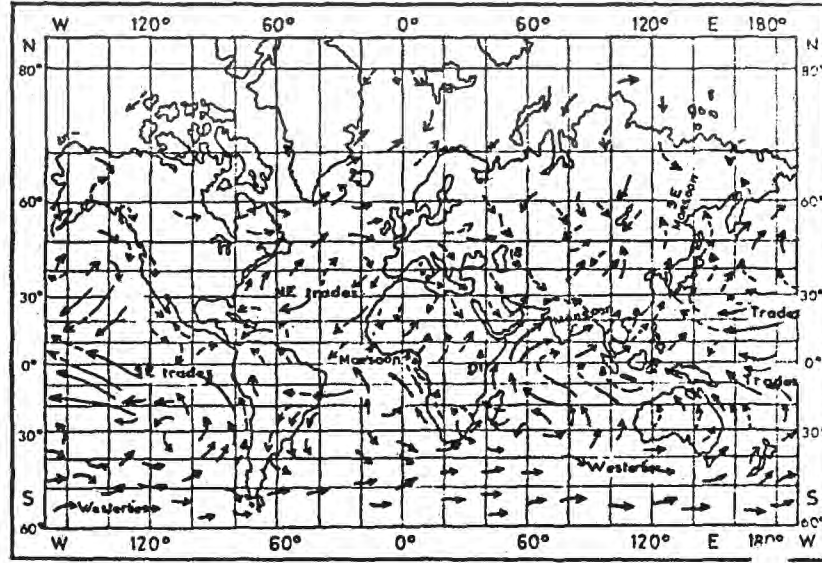
Şekillerdeki haritalar, ocak ve temmuz aylarında yerküre yüzeyindeki ortalama rüzgâr hızı ve ortalama yönü verirler. Haritalar rüzgârın okyanuslarda, karalardakinden genellikle daha kuvvetli olduğunu gösterir. Bu farklılık rüzgâr hızını engelleyen yüzey şekilleri ve bitki örtüsünün oluşturduğu etkilerle açıklanabilir. Sonuç olarak rüzgâr enerjisi üretimi için en uygun alanlar, deniz kıyılarına yakın olan karalardır.

En iyi alanlar aşağıdakilerdir.

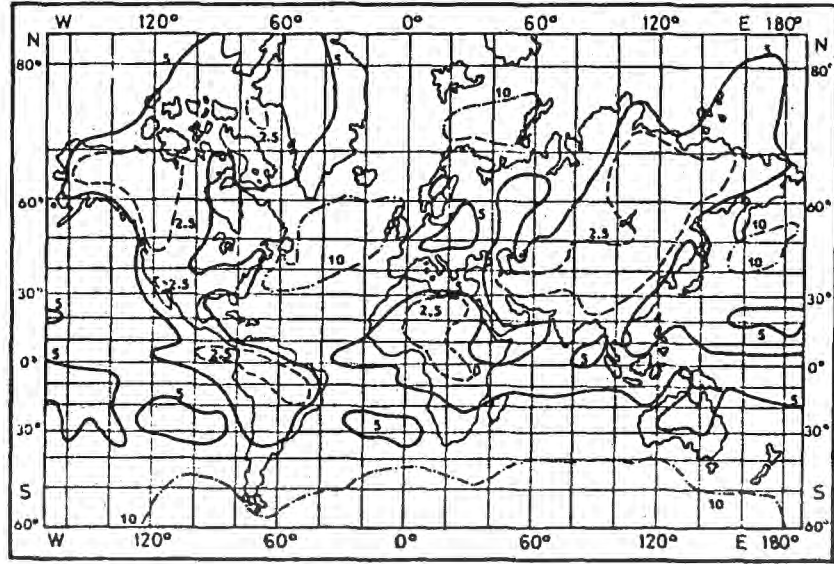
Avrupa ' da : İrlanda, B.Britanya, Fransa, Belçika, İskandinavya, Rusya, Portekiz, Yunanistan,



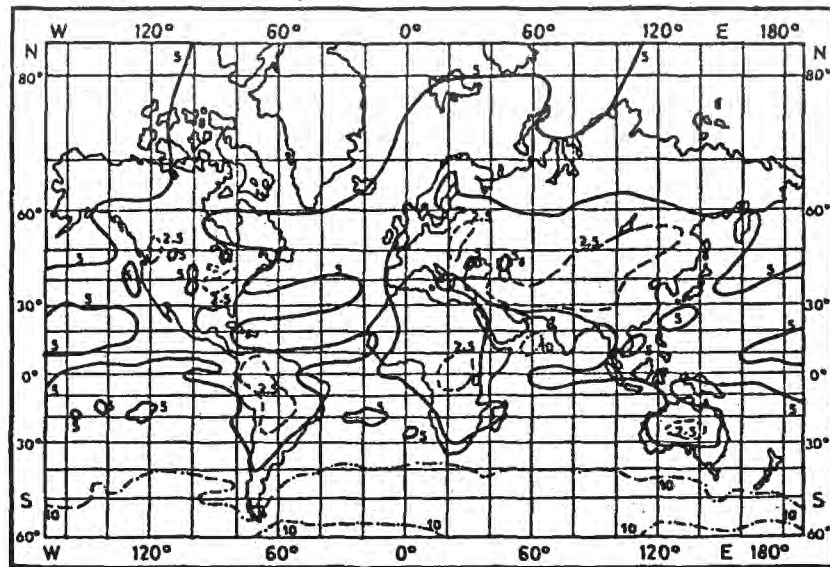
Şek.15a. Ocak ayında ortalama rüzgâr hız ve yönü



Şek.15b. Temmuz ayı ortalama rüzgâr hız ve yönü



Şek.16a. Ocak ayı isotherm haritası. Rüzgâr hızı m/s



Şek.16b. Temmuz ayı isotherm haritası. Rüzgâr hızı m/s

Afrika ' da : Fas, Moritanya, Senegal sahilinin kuzeybatısı, K.Afrika, Somali, Madagaskar.

Amerika ' da : Brezilya ' nın güneydoğu sahili, Arjantin, Şili, Kanada, A.B.D sahil bölgeleri.

Asya ' da : Hindistan, Japonya, Çin, Vietnam 'ın sahil bölgeleri, Sibirya.

I.6. RÜZGÂR HIZININ PERİYODİK DEĞİŞKENLİKLERİ :

A) MEVSİMSSEL DEĞİŞME :

Yüksek ve alçak basınç bölgelerinin yerküre yüzeyindeki hareketinin bir sonucu olarak, rüzgâr hızı ve yönü genellikle yıl boyunca değişir. Ocak ve temmuz ayıyla ilgili isovent haritaları, şekilde görüleceği gibi farklıdır. Güneşin durumuyla ilgili olarak siklonik ve antisiklonik bölgelerin durumlarının her yıl tekrarlanması sonucu olarak, rüzgâr özelliklerinde periyodik ve hemen hemen aynı olan değişkenlikleri gözlemliyoruz.

Kışın oluşturan rüzgâr hızı, yazın olduğundan daha yüksektir. Bu, enerji gereksinimlerinin kış boyunca daha fazla olması nedeniyle, uygun bir faktördür. Bu durum enerji üretiminin rüzgâr hızının kübüyle orantılı olması nedeniyle daha uygun olmuş olur. Enerji ile ilgili aylık katsayıların değişkenliği, hızın aylık katsayılarından daha önemlidir.

Bu şekilde, kışın aylık olarak üretilen enerji, yazın üretilenden en azından 2 veya 3 kat fazladır.

B) GÜNLÜK DEĞİŞİKLİKLER :

Rüzgâr konvektif etkiler nedeniyle günlük değişikliklerinin etkisi altında bulunur. Toprağın özgün sıcaklığının, suyun özgün sıcaklığından daha az olmasından dolayı, karalar üzerindeki havanın ısısı denizler üzerindeki havanın ısısından, gün boyunca daha hızlı bir şekilde yükselir. Karadaki sıcak hava genişler, daha çok hafifler ve yükselir, deniz üzerindeki serin ve daha ağır olan hava, kara üzerindeki havanın yerini alacak şekilde karaya doğru eser. Benzer hava akışına deniz meltemi denir.

Gece süresince, karanın sudan daha çabuk soğuması ve bunun sonucu olarak üzerindeki havayı etkilemesi nedeniyle rüzgârın yönü tersine olur. Karasal serin hava, deniz yüzeyinden yükselen sıcak havanın yerini almak üzere denize doğru eser. Karadan denize olan bu akım, kara meltemini oluşturur.

Bu meltemler orta yüksekliklerde sahil şeridinden karaya 50 km ye, tropik bölgelerde ise 200 km ye kadar uzanabilirler. Bu rüzgârlar, aynı zamanda göl kenarlarından gözlemlenebilir.

Benzer yerel meltemler dağlık yörelerde de oluşur. Sabahleyin zirveler vadilerden önce ısındığı için, zirvelerin üzerindeki hava daha çok hafifler ve yükselir. Vadilerdeki serin ve ağır olan hava onun yerini almak üzere hareket eder. Bu durumda gün boyunca rüzgâr vadilerden dağ tepelerine doğru eser. Gecelerin zirvelerdeki hava, vadilerdeki havadan daha çabuk soğur ve rüzgârın yönü tersine döner. Zirvelerin nispeten serin ve ağır havası vadi yamaçlarından, vadilerin içine doğru akar. Bazı ülkelerdeki, çokça görülen rüzgârlar rüzgâr yönüyle ilgili sözü edilen sonuçları bir dereceye kadar değiştirebilirler. Bu gibi durumlarda, üstün gelen hava akımı, gerçek rüzgârı oluşturmak için meltemle birleşir.

Meltemlerin termik olaylardan kaynaklanmaları nedeniyle, rüzgâr yönü hızındaki günlük değişiklikler az çok aynı olur.

1.7. RÜZGÂR YÖNÜ VE HIZINDAKİ ANİ DEĞİŞİKLİKLER :

Rüzgâr özellikleri ile ilgili kayıtlar, rüzgâr yönü ve hızının düzenli ve devamlı bir şekilde değişmekte olduğunu gösterir. Bir saniye gibi kısa zaman aralıkları içinde rüzgâr hızı 1 den 2 ye ve yönü önemli bir şekilde değişebilir.

Teğet hızı, $\vec{V}_m$ hızında aynı akım tarafından taşınan $\vec{\Delta V}$ olan tek bir kasırga, aşağıdaki kurala göre, yön ve hızın değişmesine yol açar.

$$\vec{V} = \vec{V}_m + \vec{\Delta V}$$

$\vec{V}_m$ ve $\vec{\Delta V}$ nin yönleri aynı olduğu zaman, hız en üst noktada olur, V_m ve ΔV nin yönleri zıt olduğunda, rüzgârın hızı alt noktada olur. $\Delta V/V_m$ oranı genellikle 0,3 ile 0,4 arasında olur.

ΔV nin sabit bir değeri olduğunu varsayarsak,

$$V_{\max} = V_m + \Delta V$$

$$V_{\min} = V_m - \Delta V$$

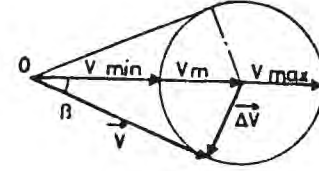
Bu ifadelerden aşağıdaki ifadeleri yazabiliriz.

$$V_m = (V_{\max} + V_{\min})/2$$

$$\Delta V = (V_{\max} - V_{\min})/2$$

β , V_m ve ani rüzgâr hızı V arasında maximum açı olsun, yön değişmesinin büyüklüğü, aşağıdaki bağıntıyla verilir.

$$\sin \beta = V/V_m$$



Şekil 17

L. Vadot yukarıda söz edilen düşüncüyü, Fransız Meteoroloji İstasyonu " La Banne d'ORDANCHE " de yapılmış olan ölçümlemelere uyguladı. Ölçümlemeler tablo verilmiştir .

Tablo 1.

V_{max}	V_{min}	Gözlemlenen değ.	Hesaplanan değ.
53 m/s	39 m/s	$\pm 8^\circ$	$\pm 9^\circ$
36.5 m/s	19.7 m/s	± 22.5	± 24
20.5 m/s	11 m/s	± 17.8	± 19

Rüzgâr yönü ve dikey hız değişkenlikleri :

Gözlemler, dikey rüzgâr yönü değişkenliklerinin, yatay hız değişkenliklerinde gözlemlenen değişikliklerin yalnız 1/10 veya 1/5 kadar olduğunu gösterir. Bu şekilde, daha çok uygun olmayan değişkenlikler ikincisinde olur.

1.8. YÜKSEKLİĞİN ETKİSİ :

Yükseklikle beraber rüzgâr hızında yükselmesi bilinen bir gerçektir. Bu durumda, Paris 'teki Eiffel kulesinde rüzgâr hızı deniz seviyesinin üzerinde 20 m yükseklikte 20 m/s den, 300 m yükseklikte 7-8 m/s ye kadar değişir. Rüzgâr hızının zemine yakın yerde azalması bitki örtüsü, binalar, her çeşit engeller tarafından meydana gelen sürtünme nedeniyle olur.

Meteorolojik veriler, yükseklikle beraber rüzgâr hızının ilgili artışının, bir noktadan diğer bir noktaya değişebileceğini gösterir. Birkaç yazar rüzgâr hızı değişkenlik yasasının aşağıdaki denklemle verilmesini önermişlerdir.

$$\frac{V}{V_0} = \frac{H}{H_0} \cdot m$$

V_0 : Zemin üzerindeki H_0 m deki rüzgâr hızı ,

V : H yüksekliğindeki rüzgâr hızı,

Bu yasa , uzun süren seri halindeki gözlemler sonucunda elde edilen istatistiki bir yasadır. Bireysel bir sonuç değildir.

H_0 genellikle 10 m kabul edilir. n , 0,10 ile 0,40 arasında değişen bir katsayıdır.

Ortalama rüzgâr hız profili , aynı zamanda yere yakın enbeli yüzeylerde z_0 esasına göre olan bir log yasasınca verilebilir.

$$\frac{V}{V_0} = \frac{\ln (H/z_0)}{\ln (H_0/z_0)}$$

Log yasası 30 ile 50 m yükseklikteki bir alanda en yakın sonucu verir. Fakat, sınır tabaka yüksekliğinde güç yasası daha kesindir. Basitliği nedeniyle genellikle güç yasası daha sık kullanılır.

D.F. Warne ve P.C. Calnan yüzey engebeliliği z_0 ve güç yasası sembolü n arasındaki ilişkiyi, aşağıdaki bağıntıyla vermişlerdir.

$$n = 0,04 \ln z_0 + 0,003 (\ln z_0)^2 + 0,24$$

Farklı yüzey engebelilikleri ile ilgili olarak z_0 ve n değerleri tabloda verilmiştir.

Arazi tipi	$z_0(m)$	n
Düzgün engebeli (deniz, kum, kar)	0,001 - 0,02	0,10-0-13
Orta engebeli (kısa otlar, otsu mahsüller, kırsal bölgeler)	0,02-0,3	0,13-0,20
Engelibeli(ormanlar, şehir kenarları)	0,3-2	0,20-027
Çok engebeli(şehir bölgeleri, yüksek binalar)	2-10	0,27-040

H ve H_0 yükseklikleri , zemin yüzeyinin üzerindeki yükseklik olarak değilde, rüzgârın sıfır olduğu yüzeyin üzerindeki yükseklik olarak düşünülmemelidir. Bu durum, yoğun mısır tarlasındaki ortalama mısır yüksekliği veya bir buğday tarlasındaki ortalama buğday yüksekliğindeki gibi bir olaydır. Bir ormandakirüzgârın sıfır olduğu yüzey, bitişik ağaçların dallarının birbirine temas ettiği yerdeki yükseklik gibidir.

Müdahale edilebilen enerji V^3 ile orantılıdır. Bu şekilde ,

enerjinin bölümü , zemin yüzeyinin üzerindeki $H(m)$ ve $H_0(m)$ de, aşağıdaki bağıntıyla verilir.

$$\frac{E}{E_0} = \left(\frac{H}{H_0} \right)^{3n} \quad 0,30 < 3n < 1,20$$

Bu nedenle, en yüksek güce ulaşmak için, rüzgâr jeneratörü mümkün olduğu kadar yüksek kurulmalıdır. Örneğin , yüksek türbülansdan kaçınmak amacıyla, küçük bir rüzgâr üretim merkezi için bir kulenin tepesine veya çevredeki bitki örtüsü ve engebelerden en azından 8-10 m daha yükseğe kurulmalıdır.

Yüzey pürüzlülüğündeki değişiklikler, rüzgâr profilini etkiler. Bir geçiş yüksekliği vardır , bu geçiş yüksekliğinin üstünde yerel engebелilikler rüzgâr hız profilini etkilemez. Mr. Duchene-Marullaz (CSTB , Nantes , Fransa) geçiş yüksekliği için $H = 0,08 X i$ verir. x , yüzey engebелiliğindeki değişiklik olduğu düşünülen, noktanın uzaklığıdır.

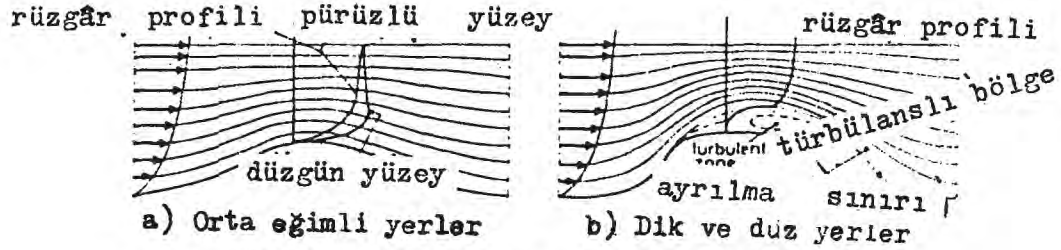
$x > 5$ km için, geçiş bölgesi oldukça önemsizdir. $x < 5$ km ve geçiş üstünlüğünün altındaki değişiklik için, rüzgâr profillerinin özellikleri , rüzgâr yönündeki yüzeyin engebелiliği, geçiş yüksekliğinin üzerindeki değişiklikler ise , rüzgâr yönüne ters yöndeki bölgenin engebелiliği ile ilgilidir.

1.9. YÜZEY ŞEKİLLERİNİN ETKİLERİ : SIRTILAR , TEPELER , UÇURUM ÜZERİNDEKİ HAVA AKIMI . YER SEÇİMİ .

Orografi , rüzgârın perdelenmesi , hızlanması ve yönünün değişmesinde büyük bir rol oynar. Sırt , yamaç ve uçurumlar gibi engebeler rüzgâr hız profilini büyük bir şekilde etkiler. Bazı yüzey şekilleri, rüzgâr enerjisi üretmede çok uygun olurlar. Diğer yüzey şekillerinden önemli derecede perdeleme ve türbülans yarattıklarından sakınılmalıdır.

Sırtlar, kendisini çevreleyen yüzeyden , 100m veya daha az ile 600 m arasında yükselen ve zirvelerinde az veya hiç düz bölge olmayan uzanan yamaçlar olarak tanımlanabilir. Deniz seviyesine paralel, sürekli artan ve orta eğime sahip olan yamaçların sırtları , bilhassa hâkim rüzgârlara dikey ve çıplak oldukları zaman, rüzgâr gücü üretimi için çok uygun olurlar. Zirvenin üzerinde ve çevresinde rüzgâr çok az bir yükseklik

te hızlanır ve şekil 18 de görüleceği gibi düzgün olur. Zirve-deki nispi hız yükselmesi gittikçe artan eğimi olan uzun sırt-lar için, %40 ve %60 ve hatta %80'e ulaşır. En çok uygun olan eğimler 10° ile 22° arasındadır.



Şek.18. Tepe ve yamaçlarda rüzgâr akışı

Sırtların uç kısımları ve rüzgârın aksi yönündeki yüzün üst yarısı genellikle iyi yerlerdir. Fakat rüzgâr yönündeki taraftan olabilecek türbülansın dolayısıyla kaçınılmalıdır. Özel dikkat isteyen sırtlarda seçilecek üretim merkezi yerleri, geçit, dargeçit veya eyer gibi özelliği olan yerlerdir.

Benzer olay, dairesel yamaçların üzerinde olur. Fakat rüzgâr hızının artması daha azdır ve ancak yamaçın eğimine göre %20, %30, %40'a ulaşır. Bununla beraber hâkim rüzgârın yönü mevsimle beraber çokça değişirse, orta eğimli dairesel yamaçlar rüzgâr makinaları için sırtlardan daha uygun yer olabilirler.

Rüzgâr yönüne teğet olan dairesel yamaçların yanlarında, rüzgârın çok yükselebileceği bilinmelidir. Bu gibi yerler, hâkim rüzgârın yönü yıl boyunca, hemen hemen sabit bir yönü muhafaza ederse, iyi rüzgâr gücü üretim yerleri olarak kabul edilebilir. Fakat durum böyle değilse zirve bir rüzgâr gücü tesisi kurmak için daha uygun yerdir.

Aynı zamanda orta eğime sahip olan uçurumlar, bilhassa rüzgâr yönüne dikey olduklarında, rüzgâr enerjisi üretimi için çok uygun olurlar. Battelle Institute (USA) de çalışan H. Wegley, M. Og-rell, R. Drake ve göre, en iyi üretim yerleri bir uçurumdan, rüzgâr yönündeki uçurumun arasındaki yükseklik 0,25 ve 2,5 defa arasında olan yerlerdir. Bir tutucu stratejiye göre, tüm

rotorun türbülans bölgesinin üzerinde iyi bir şekilde döndüğüne emin olmak için rüzgâr üretim yerleri mümkün olduğu kadar uçurum kenarlarına yakın yerler seçilir.

Eğimi 30° den daha fazla olan bir sırt, yamaç veya uçurumda bir yer seçerkem, özel dikkât gösterilmelidir. Çünkü bu gibi engebelerde yüksek türbülans meydana gelebilir. Bir yamaç çok dik olursa, rüzgâr üst yüzeyden kırılarak uzaklaşır ve önemli derecede türbülans rüzgârın geldiği yönde oluşur. Türbülanslı hava akamları, bir yeldegirmenin kanatlarında tehlikeli basınçlara neden olur. Böylece bu çeşit bir yamaç, ideal bir rüzgâr gücü üretim yerini oluşturamaz. Bu durum dik eğimleri olan uçurumlar içinde aynıdır. Seçilen yer nasıl bir yer olursa olsun, hayal kırıklığını önlemek için, seçilmesi şüpheli olan durumlarda ölçümlemeler yapılması tavsiye edilir.

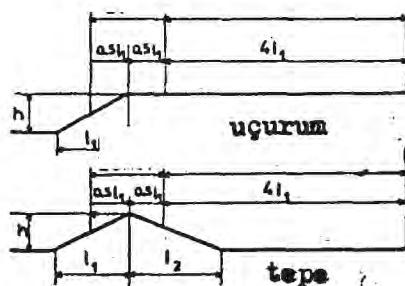
DENEME ÇALIŞMALARI :

Fransa 'da Fransız Elektrik Şirketi ve CSTB Laboratuvarı, (Nantes) sırt ve uçurumlar üzerindeki rüzgâr akımını ilgilendiren rüzgâr tünellerinde ölçümlemeler yaptılar.

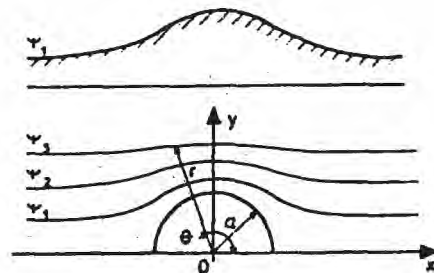
Aşağıdaki tablo, farklı eğimli sırt ve uçurumlar için zemin üzerinde aynı yükseklikteki, rüzgârın aksi yönündeki hızla hızın nispi artışını verir.

Bu tablo C.Sacre tarafından yürütülen ölçümlemelerle ilgili dir. h ve z sırasıyla engebenin yüksekliğini ve zemin yüzeyinin üzerindeki yüksekliği verir. $z \gg 2.5h$ için hız yükselmesi önemsizdir.

Yükseklik	I. bölge		2. bölge	
Yeryüzü	$h/l_1 < 1/3$	$h/l_1 > 1/3$	$h/l_2 < 0.05$	$h/l_2 > 0.05$
$z \gg 2.5h$	$\frac{2.5h-z}{l_1}$	$\frac{2.5h-z}{3h}$	$\frac{2.5h-z}{2l_1}$	0



a) Deneme çalışmaları



b) Teorik çalışmalar

Şek.19. Sırt, yamaç ve uçurumlar üzerindeki rüzgâr

TEORİK ÇALIŞMALAR :

Lamb ve Rosenbrock akım çizgilerinin aşağıdaki tanımlanabileceğini göstermiştir.

a) Uzun sırtlar üzerinde: $\psi = U \left(r - \frac{a}{r} \right) \sin \theta$ ifadesiyle,

b) Dairesel yamaçlar üzerinde : $\psi = U \left(r^2 - \frac{a^3}{r} \right) \sin^2 \theta$

ifadesiyle verilir.

Zirveler üzerinde dikey şekilde olan rüzgâr hızının dağılımı aşağıdaki ifadelerle verilir.

a- durumu için $V = U \left(1 + \frac{a^2}{y^2} \right)$ ile ,

b- durumu için $V = U \left(1 + \frac{a^3}{2y^3} \right)$ ile,

Bu ifadelerde :

U : Engebenin karşı akım rüzgâr hızını,

a : Üretici silindir veya kürenin yarıçapını,

ψ : Bir akım çizgisinin özelliğini veren sabit sayı,

y : O noktası üzerindeki yüksekliği,

V : y (m) yüksekliğindeki rüzgâr hızını,

r ve θ : Bir noktanın kutupsal koordinatlarını gösterir.

Fakat tam yarıküresel veya yarısilindirik yamaçlar gerçekte çok az bulunur. İyi ki, üzerindeki hava akımına etki etmeksizin herhangi bir akım çizgisi aynı şekildeki katı bir yüzeyle yer değiştirebilir. Öyleki sırt veya dairesel tepe , bir akım çizgisiyle çakışarsa, önceki bağıntılar, üzerinde akan rüzgârın hızını hesaplamak için kullanılabilir.

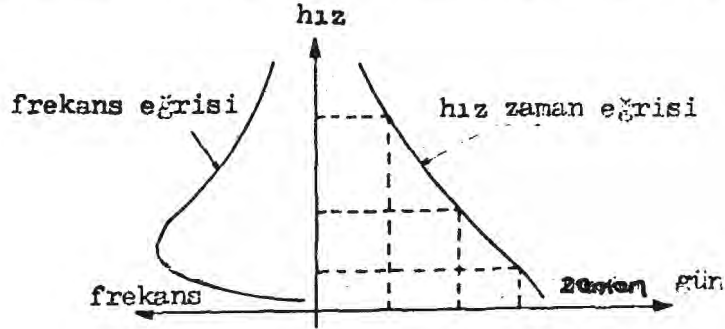
Gerçekte, yukarıda sözü edilen matematiksel ifadeler, viskozite güçlerini hesaba katmaz. Bu nedenle gerçek sonuç ile teorik sonuç arasında bir miktar sapma vardır. Uygun şekilde , ayrıntılı olmayan elemanları veya hesaplama teknikleri olan rüzgâr tünellerindeki benzetme daha iyi sonuçlar verir.

I.10. RÜZGÂRLIN İSTATİSTİK OLARAK İNCELENMESİ :

Anemometre kayıtlarından ve gözlemlerinden elde edilen hız zaman eğrileri ve ortalama frekans eğrileri grafik halinde gösterilebilir. Bu eğrilerin çizimi , önemli olan herhangi bir dizayn için gereklidir.

YILLIK HIZ ZAMAN EĞRİSİ :

Yatay ekseninde, rüzgâr hızının sabit bir değeri aştığı sıradaki zaman kaydı yapılır. Bu değerin kendisi diğer koordinat tarafından yapılır. Bu nedenle buna yıldan yıla devam ederiz. Daha sonra enerjinin saptanması için çok faydalı olacak olan yıllar arasındaki hız zaman eğrisini elde etmek mümkündür.



Şekil 20

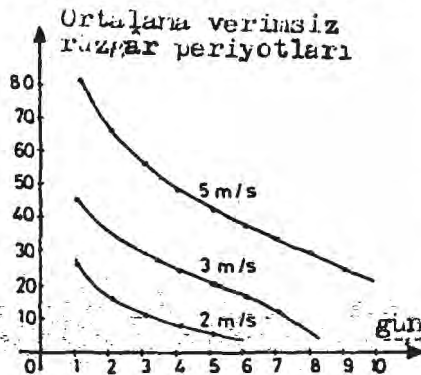
YILLIK FREKANS EĞRİSİ :

Bu eğri yukarıda söz edilen eğriden faydalanarak saptana bilir. Bu eğri rüzgâr hızının belirli sınırlar arasına düştüğü örneğin 3 - 4 m/s yıllık zamanı verir. Bu zaman, hız zaman eğrisinin dikey ordinatına eşdeğerde, yatay koordinatların farkına eşittir.

Frekans eğrisinin benzer noktasının dikey ordinatı 3,5 m/s eşittir. Genellikle yıllık frekans eğrilerinin ancak 1 - 2 tane en büyük değeri vardır.

KISA SÜRELİ SAKIN ZAMAN :

Devamlı, kısa süreli sakin zaman önemlidir. Çünkü bu rüzgârla çalışan üretim merkezleri, kendi kendine çalışır şekilde kullanıldıkları zaman enerjinin depolanması gerektiği dönemi ıçaret eder. Düşük rüzgârlı türbinler 3 m/s den daha az bir hızda ve yüksek hızlı türbinler ise, 5 m/s den daha düşük bir hızda su pompalamak için çalışamazlar.



Şekil 21



Şekil 22

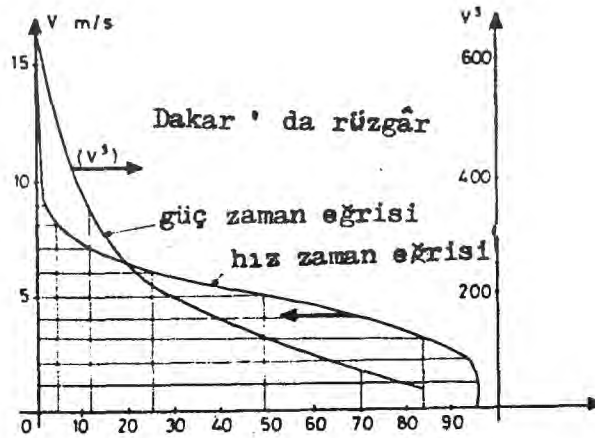
RÜZGÂRIN MEVSİMSEL DEĞİŞİKLİKLERİ :

Bazı uygulamalar için rüzgâr hızının tüm yıl süresince gösterdiği kesin değişiklikleri bilmek faydalı olabilir. Bu amaçla aylık ortalama rüzgâr hızları her yıl için hesaplanır. Daha sonra aylık frekans eğrileri çizilir.

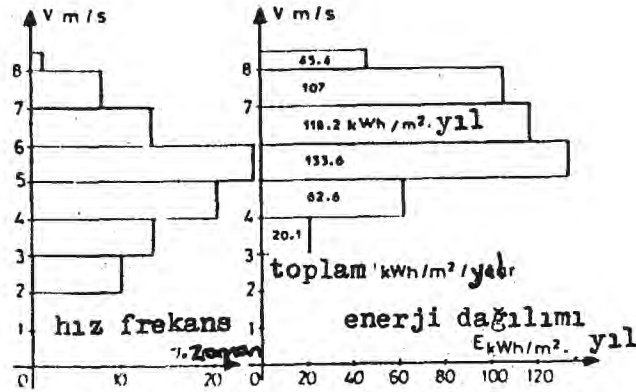
1.11. TEORİK OLARAK ELDE EDİLEN RÜZGÂR ENERJİSİ :

A) GÜÇ ZAMAN EĞRİSİ :

Hız zaman eğrisi günlerin fonksiyonu olarak elde edilebilen gücü veren bir eğrinin çizilmesine olanak sağlar. Bu eğri hız zaman eğrisinin apsisinin değiştirilmemesi ve ordinatlarının kübünün alınmasıyla elde edilebilir. Böylece, güç zaman eğrisinin altında yer alan bölge yıl içinde elde edilen enerji ile orantılıdır.



Şekil 23



Şekil 24

$$E = \int_0^t P dt = K \int_0^t V^3 dt$$

Yıllık enerji kwh/m² olarak ifade edilir. K = 0,37 alınır.

B) ENERJİ DAĞILIM EĞRİSİ :

Hız değerlerinin tüm skalasını 1m/s lik farklı aralıklara bölebiliriz. Her bir hız aralığı için, hız frekansı eğrisinden elde edilecek enerjiyi hesaplamak mümkündür.

Enerji dağılım eğrisi, hız aralıklarıyla ilgili ortalama hızın kübünün alınması ve hız frekansı eğrisinin benzer ordinatıyla düşünülen rüzgâr hızlarının meydana geldiği sırada bir yıl içindeki elde edilen sonucun çarpılması yoluyla elde edilir.

C) RÜZGÂR YÖNÜNÜN BİR FONKSİYONU OLARAK RÜZGÂR ENERJİSİ

DAĞILIMI : ENERJİ GÜLÜ :

Bu diyagram, pusulanın her bir yönü için elde edilen enerjiyi verir. Enerji gülü, ilkin her yön için ortalama rüzgâr hızının kübünün alınması daha sonra eşit zaman yüzdesiyle, çarpımı suretiyle rüzgâr gülü grafiğinden oluşturulur. Türetilen sayılar, her yönde esen rüzgârın içerdiği enerjiye kaba bir şekilde orantılıdır. Enerji gülünün radyal vektörlerinin uzunlukları, bu sayılara orantılı olacak şekilde seçilirler.

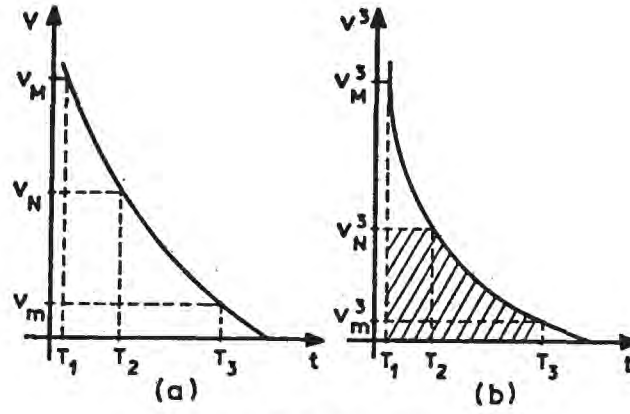
I. I2. ELDE EDİLEN GERÇEK RÜZGÂR ENERJİSİ :

Teorik olarak , rüzgâr makinası rüzgârdan teorik olarak elde edilen tüm enerjiye müdahale edilemez, Çünkü diğer faktörler tarafından sınırlamalar konulmuştur.

Rüzgâr hızı arttığı zaman makina güç üretmeye , belli bir V_m hızında başlar. Bu V_m hızında , makinanın mili üzerinde elde edilebilen güç, tüm makinanın yüksüz kayıplarınca emilen güce eşittir.

Daha sonra, rüzgârın hızı arttığında , 9 itibari rüzgâr hızı, DENİLEN belli bir V_N değerine ulaşır. İtibari rüzgâr hızı, makinanın itibari gücünü sağlamış olduğu rüzgâr hızıdır. Bu değerlerin üzerinde güç , bir ayarlama sistemiyle düzenlenecektir.

Rüzgâr hızı yükselmeye devam ederse, rüzgârın hızı makinanın çalışabildiği max hız olan V_M değerine ulaşır. Bu hızın ötesinde güvenlik amacıyla durur ve enerji üretmez.



Şekil 25

Elde edilen etkin enerji şekilde gösterilen taramalı bölgeyle orantılıdır.

Uygulamada gerçek elde edilebilir enerji, rüzgârmakinasının verimliliğini hesaba katarak, kWh / m² olarak ifade edilen taranmış alanın değerini, bir katsayı ile çarpımı sonucu elde edilecektir.

ORTALAMA YILLIK RÜZGÂR HIZI YOLUYLA GERÇEKTE ELDE EDİLEBİLİR ENERJİNİN SAPTANMASI :

Gerçekten farklı üretim sahalarının daha kolay hesaplamalar için, verilen bir makina tarafından üretilen gerçek enerji ile rüzgâr hızını, ortalama yıllık değere eşit olan sabit bir sayı olarak düşünmek suretiyle elde edilen arasında K_U oranı kullanılabilir.

" Kullanılabilir enerji örneği faktörü " olarak bilinen bu katsayı aşağıdaki ifadeyle verilir.

$$K_U = \frac{V_N^3 (T_2 - T_1) + \int_{T_2}^{T_3} v^3 dt}{\bar{V}^3 T}$$

V : Ani olarak değişen rüzgâr hızı,

$\bar{V}$: Ortalama yıllık rüzgâr hızı $\left(\bar{V} = \frac{1}{T} \int_0^T v dt \right)$

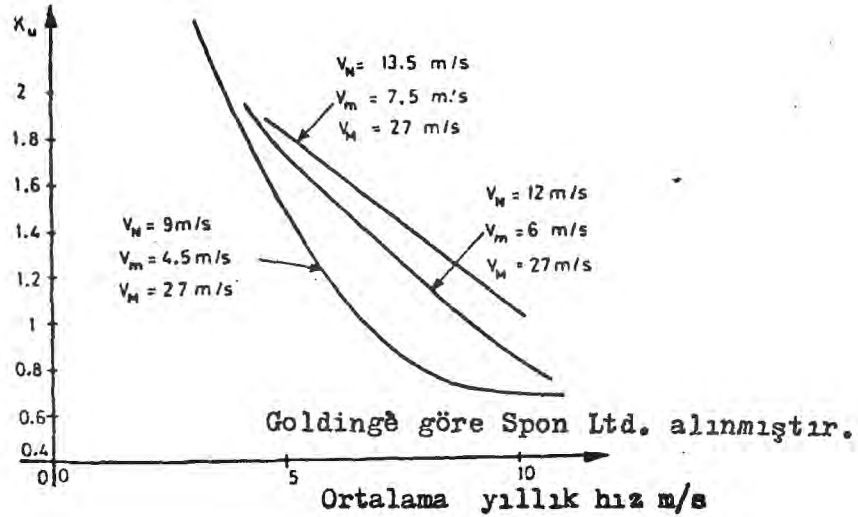
V_N : İtibari hız ,

T_1 : Hızın, makinanın çalışabileceği max rüzgâr hızı V_M nin üzerinde olduğu yıllık süre.

T_2 : Hızın, itibari hız V_N den daha büyük olduğu yıllık süre.

T_3 : Hızın, müdahale edilen hız V_m den daha büyük olduğu yıllık süre.

Ortalama yıllık rüzgâr hızının bir fonksiyonu olarak, K_U katsayısının değişkenliği, Batı Avrupa' nın değişik meteorolojik istasyonları ve farklı itibari hız değerleri için E. W. Golding tarafından incelenmiştir. K_U katsayısı ile ilgili bilgi, yalnız rüzgâr hızı toplama sayaçlarının kullanıldığı yerlerdeki elde edilebilir enerjinin hesaplanmasına olanak sağlar, Bununla beraber yöntemin uygulanması, aynı kaynaklı karşılaştırması yapılabilir hızlardaki rüzgârların etkisi altında olan alanlardaki anemometre kayıtlarından yararlanılarak K_U oranının ilk saptama işinin yapılmasına gerek duyar.



Şekil 26

BÖLÜM 2

RÜZGÂR MAKİNALARININ GENEL TEORİLERİ , AERODİNAMİK

TEMEL YASA ve KAVRAMLARI :

Rüzgârdan güç üretmede kullanılan makinalar, temel olarak iki farklı gruba ayrılabilir. Yatay eksenli makinalar ve dikey eksenli makinalar.

Burada ayrıntılı açıklaması yapılan Betz teorisi, temel olarak, yatay eksenli rüzgâr makinalarıyla ilgilidir. Bununla beraber dikey eksenli makinaların verimliliği , Betz formülü tarafından hesaplanan maximum güç ile karşılaştırmak suretiyle değerlendirilir.

Mekanik benzerlikte işleyen, hareket eden bir kanadı ve benzer geometrik rüzgâr makinalarına etki eden aerodinamik KUVvetlerin aşağıdaki kavramları, yatay eksenli rüzgâr makinaları için olduğu kadar, dikey eksenli rüzgâr makinaları içinde geçerlidir.

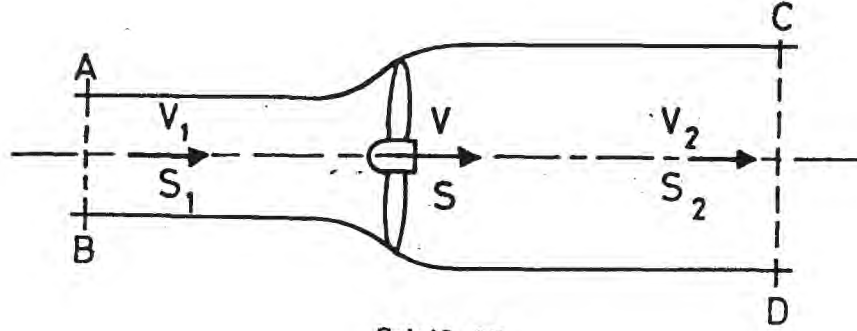
2.1. BETZ TEORİSİ :

Rüzgâr türbinleri ile ilgili ilk global teori Göttingen Institute den A. Betz tarafından kurulmuştur. Betz rüzgâr rotorunun ideal olduğunu varsayar, diğer bir ifadeyle rüzgâr rotorunun poyrası yoktur, arasından geçen havanın sürüklème direnci göstermeyen sonsuz sayıda kanatları vardır, Bu şekilde , rüzgâr rotoru saf bir enerji dönüştürücüsüdür. Bundan başka rotor tarafından taranan tüm alan üzerindeki koşulların aynı olduğu, rotorun dışında ve arasından geçen hava hızının axial olduğu varsayılır. Bu şekilde, hareket eden bir atmosfere yerleştirilmiş sabit duran, örnek bir rüzgâr rotorunu ele alalım.

V_1 : Rüzgâr yönüne aksi yönde oldukça uzak mesafedeki rüzgâr hızı olsun.

V : Rotorun arasından geçen ve kanatlar tarafından taranan tüm S alanı üzerinde aynı olduğu varsayılan rüzgâr hızı,

V_2 : Rotordan rüzgâr yönünde uzaklaşan rüzgâr hızı.



Şekil 27

Rotorun arasından geçen hava akışı kesidi rotorun rüzgâr yönünün tersinde S_1 ve rüzgâr yönünde olanda S_2 dir.

Rotor tarafından mekanik enerjinin üretimi, ancak havanın kinetik enerjisinin azaltılması ile mümkündür. Bu durumda V_2 nin V_1 den daha düşük olması gerekir. Sonuç olarak rotor arasından geçen hava akımının kesiti karşı hava akımından, hava akımı yönüne doğru artar. S_2 , S_1 den büyüktür.

Havanın sıkıştırılamayacağı varsayılırsa, süreklilik denklemi (sabit kütle akışı) aşağıdaki gibi yazılır.

$$\rho S_1 V_1 = \rho S V = \rho S_2 V_2$$

Rüzgâr tarafından, rüzgâr rotoruna uygulanan kuvvet Euler teoremi ile verilir ve aşağıdaki denkleme eşittir.

$$F = \rho S V (V_1 - V_2)$$

Bu nedenle absorbe edilen güç :

$$P = F V = \rho S V^2 (V_1 - V_2) \quad \text{dir.}$$

Daha önce belirttiğimiz gibi bu kuvvet kinetik enerjiden elde edilmiştir, Karşı hava akımından hava akımı yönüne doğru kinetik enerjinin değişimi :

$$\Delta T = \frac{1}{2} \rho S V (V_1^2 - V_2^2) \quad \text{ye eşittir.}$$

P ve ΔT ifadelerini eşitlemek suretiyle,

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad \text{denklemini elde ederiz.}$$

Rotora uygulanan kuvvet, temin edilen kuvvet, bu şekilde aşağıdaki ifadelerle verilir.

$$F = \frac{1}{2} \rho S (V_1^2 - V_2^2)$$

$$P = \frac{1}{4} \rho S (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2)$$

Verilen bir karşı hava akımı v_1 için P kuvvetinin değişimini v_2 nin bir fonksiyonu olarak inceleyebiliriz. Türetmeyle ,

$$\frac{dP}{dv_2} = \frac{1}{4} \rho S (v_1^2 - 2 v_1 v_2 - 3 v_2^2)$$

$$\frac{dP}{dv_2} = 0 \quad \text{EŞİTLİĞİNİN iki çözümü vardır.}$$

Birinci çözüm : $v_2 = -v_1$ fiziksel bir anlamı yoktur.

İkinci çözüm : $v_2 = \frac{v_1}{3}$ maximum güce eşittir.

P nin ifadesinde tam değer $v_2 = \frac{v_1}{3}$ yerine konursa , aşağıdaki denklemle üretilebilen maximum gücü elde ederiz.

$$P_{\max} = \frac{8}{27} \rho S v_1^3 = 0,37 S v_1^3$$

$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$ tür. ρ : Havanın özgül kütlesi.

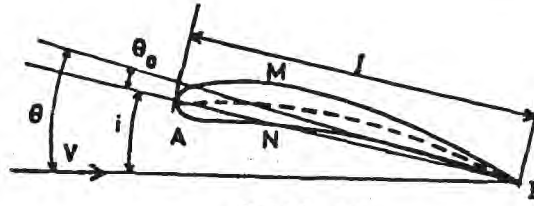
Bu ifade Betz ' in formülünü oluşturur.

Rotorun arasından geçen rüzgâr hızının yönünün axial olduğu ve rüzgâr akışının S alanı üzerinde aynı olduğu varsayılır.

2.2. KANAT : GEOMETRİK ve AERODİNAMİK NİTELİKLER :

Tipi ne olursa olsun (yatay veya dikey eksenli makina) rüzgâr makinasının, temel elemanı kanattır. Bu, dönen bir kanat olarak kabul edilebilir. Kanadın hareketini iyi bir şekilde anlamak ve bilhassa en uygun şekil ve boyutlarını seçmek için, kanatların aerodinamikle ilgili bazı temel bilgilere gereksinme vardır. Betz formülü, bize , kanatların yapısını oluşturma yöntemini vermez.

Bunun için rüzgâr hızı $\vec{V}$ olan bir rüzgâra bağımlı olan hareketsiz kanadı ele alalım. İlkin, kanadın kesidine paralel olduğu varsayılan hız vektörü V ile ilgili geometrik durumunu ve diğer pozisyonlarını ilgilendiren bazı tanımlamaları verelim.



Şekil 28

A) TANIMLAR :

Profilin (B noktası) keskin ucuna " kanadın arka kenarı " denir. Ön kenar arka kenardan en uzak nokta olan, profil burununun A noktasının bulunduğu yerdir,

$AB = l$ profil kirişi ,

AMB , daha üst yüzey ,

ANB , daha alt yüzey ,

Burundan itibaren giriş boyunca herhangi bir mesafedeki bir nokta, daha alt ve daha yüzeyler arasındaki bir eksen noktası işaretlenebilir. Genellikle eğri olan bu gibi tüm noktaların gerçek yeri kesidin orta çizgisi veya yukarı doğru eğri olan çizgisidir.

Gelme açısı , sonsuz hava akımında, giriş ile hava hızı vektörü $\vec{V}$ arasındaki i açısıdır.

Sıfır kaldırma açısı giriş ile sıfır kaldırma çizgisi arasındaki θ_0 açısıdır.

Kaldırma açısı sonsuz karşı hava akımında , sıfır kaldırma çizgisiyle hava hızı vektörü arasındaki θ açısıdır.

$$i = \theta + \theta_0$$

$$\theta = i - \theta_0$$

Burada , θ_0 olumsuz , θ - ve i olumludur. Diğer bir parametre max kalınlık olan h dir. Buna , girişin bir kesri olarak ifade edildiğinde kalınlık / giriş oranı veya nispi kalınlık denir. Kullanılan bugünkü değerler % 3 ten % 20 ye kadar değişir. (%10 ile %15 arasında genel rüzgâr rotorları için kullanılır.)

Max kalınlığın olduğu yerde giriş boyunca olan pozisyon (Ön kenardan uzanan girişten itibaren) % 20 ile % 60 arasında değişir. (Rüzgâr rotorlarının kanatları için bu genellikle % 30 civarında olur.)

B) DURGUN BİR ATMOSFERDE HAREKET EDEN BİR KANADA
UYGULANAN AERODİNAMİK KUVVET :

Aynı hızda fakat ters yönde , kanadın hareketsiz ve havanın hareket etmekte olduğunu varsayarsak, kanat üzerine uygulanan aerodinamik kuvvet değer bakımından değişmez. Uygulanan kuvvet yalnız nispi hız ve rüzgârın geliş açısına bağlıdır. Bu nedenle açıklamayı kolaylaştırmak için, kanadın , sonsuz karşı akım hızı V yi hareket eden havada hareketsiz olduğunu varsayalım.

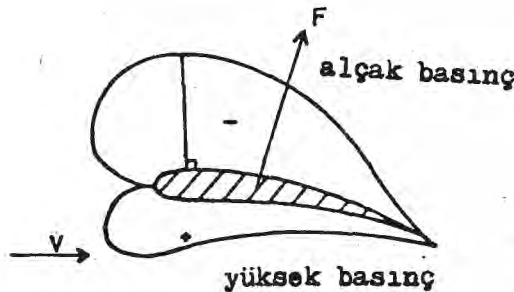
Kanadın dış yüzeyindeki havanın basıncı üniform değildir. Daha üst yüzeyde azalma, daha alt yüzeyde ise basınç artması vardır. Basınç değişkenliklerini grafiksel olarak temsil etmek için profilin yüzeyine dik gelen çizgide, uzunluğu Kp ye eşit olan bir parça çizelim.

$$K_p = \frac{P - P_0}{\frac{1}{2} \rho V^2}$$

P, yüzeyde dikey çizginin alt kısmındaki statik basınç.

ρ , P_0 , V sonsuz karşı akımdaki şartlar, yani profili yapılmış bölümden uzak olan, bir engelle çarpmadan gelen hava akımındaki şartlar.

Çeşitli parçalar Kp nin uçlarını birleştirmek suretiyle şekil de temsil edilen eğri çizgileri elde ederiz. Kp daha üst yüzeyin noktaları için olumsuz, daha alt yüzeyin noktaları için olumludur..



Şekil 29

Başlangıçta kanadı etkileyen farklı kuvvetlerin bileşkesi F kuvvetidir. F , genellikle nispi hız yönüne doğru eğilim gösterir ve aşağıdaki ifadeyle verilir.

$$F = \frac{1}{2} \rho C_r S V^2$$

S : Kanadın uzunluğu . Kanadın kirişi ne esit olan alan.

C_r : Toplam aerodinamik katsayı,

Bu kuvvet iki parçaya ayrılır:

$\vec{V}$ vektörüne paralel olan, sürüklenme kuvveti $\vec{F}_d$,

$\vec{V}$ vektörüne dikey olan , kaldırma kuvveti F_l ,

F_d ve F_l aşağıdaki ifadelerle verilir.

$$F_d = \frac{1}{2} \rho C_d S v^2$$

$$F_l = \frac{1}{2} \rho C_l S v^2$$

C_d ve C_l sırasıyla sürüklenme ve kaldırma katsayılarıdır. Diğer key olan bu parçaları :

$$F_d^2 + F_l^2 = F^2$$

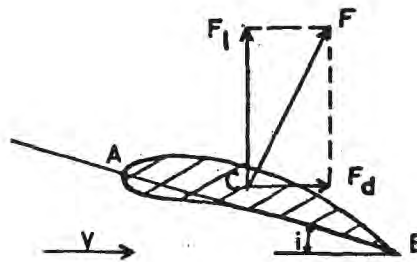
şeklinde yazabiliriz ve bunun içinde ,

$$C_d^2 + C_l^2 = C_r^2 \quad \text{olur.}$$

M nin ön kenarla ilgili olan F nin aerodinamik momenti olduğunu varsayalım. Biz kayma momenti katsayısı C_m yi aşağıdaki bağıntı ile ,

$$M = \frac{1}{2} \rho C_m S l v^2$$

l : kırıştir.



Şekil 30

Bu sonuçlardan , kanat bölümündeki aerodinamik kuvvetler, bir kaldırma , sürüklenme ve kayma momentleriyle tanımlanabilir. Bu durumda, gelme açısının her bir değerinde , çevresinde aerodinamik kuvvet F, momentin sıfır olduğu bir özel C noktası olacaktır. Bu özel nokta basınç merkezidir. Kanat bölümü üzerindeki aerodinamik etkiler yalnız bu noktada etkisi olan kaldırma ve sürüklenme

momentlerince temsil edilebilir. Ön kenar ile ilgili basınç merkezinin pozisyonu aşağıdaki oranla saptanır.

$$CP = \frac{AC}{AB} = \frac{x_1}{l} = \frac{C_M}{C_L}$$

Genellikle $CP = \% 25 - \% 30$ dır.

6) KALDIRMA ve SÜRÜKLEME KATSAYISININ AERODİNAMİK

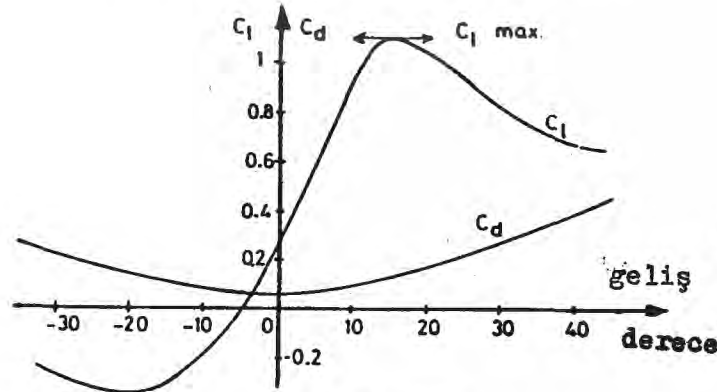
DEĞİŞKENLİĞİ :

1°) GEİRME AÇISINA GÖRE C_d ve C_l NİN DEĞİŞKENLİĞİ :

Değişkenlik , şekil 31de gösterilmiştir. İlkin kaldırma katsayısının değişkenliği ele alındığında , bunu temsil eden eğrinin bocalama noktası olarak bilinen bir i_m gelme açısındaki C_L max un daha yüksek değerinde eğrinin düz bir çizgiden oluştuğu görülür.

Bocalama noktasından sonra kaldırma katsayısı azalır. Aynı zamanda bunu gösteren çizgi, negatif açı için bir eğridir. C_l , min değer aldığı anda , C_l min olur.

Sürüklenme katsayısının değişkenlik eğrisi farklıdır. C_d , gelme açısının belli bir değeri için min dur.



Şekil 31

2°) SÜRÜKLEME KATSAYISINA KARŞI KALDIRMA KATSAYISI :

(EİFFEL KUTBU)

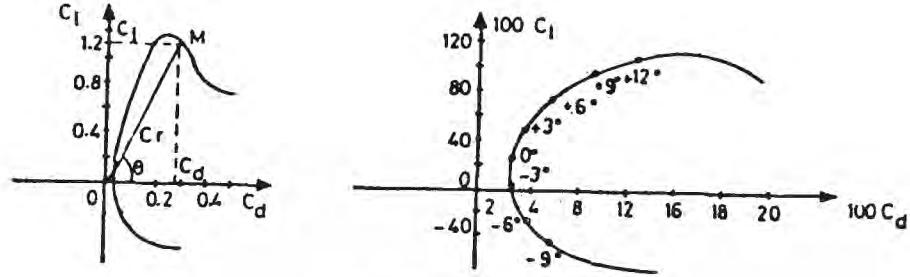
Kaldırma katsayısının değişkenliğinin, sürüklenme katsayısının değişkenliğinin karşılaştırılması şekil 32de gösterilmiştir.

OM nin eğimi $\tan \theta = \frac{C_l}{C_d}$ dir.

QM - C_l / C_d eğrisine teğet olduğu zaman,

$\tan \theta = \max$ ve $C_l / C_d = \min$ olur.

Değişkenlik eğrisi genellikle gelme açısı değerleri olarak derecelendirilir.



Şek.32. Eiffel kutbu

AÇIKLAMA : 1

Bernouilli teoremine göre, kanadın üstündeki akım hızı kanadın altındaki akım hızından daha yüksektir ve profilden daha uzak mesafede olan, engellenmemiş hava akış hızından daha düşüktür. Bu nedenle kanadın etrafındaki hava akışı, iki farklı tipteki hava akışının karışımı olarak kabul edilir. Birinci akış kanat aynı hava akımında bulunduğunda, kaldırma momenti sıfır olan kanadın çevresindeki normal akıştır. Diğer akış ise, havanın kanadın çevresinde daha alt yüzey üzerinde ileriye, daha üst yüzey üzerinde geriye doğru döndüğü akıştır. Kanadın kaldırma momenti, ikinci hava akışıyla birleşir.

AÇIKLAMA : 2

Yukarıdaki sonuç, ancak sonsuz bir uzunluğu olan kanatlara uygulanır. Uzunluğu sınırlı olan bir kanat için yukarıdaki sonuçlar düzeltilmelidir. Kalkan kanadın daha alt yüzeyindeki basınç çevresindeki atmosfer basıncından daha büyük olurken, daha üst yüzeyindeki basınç daha düşüktür. Bunun sonucu olarak uçlarda hava, daha alt yüzeyden daha üst yüzeye doğru akma eğilimi gösterir. Sonuçta kanadın uçlarında dönen hava oluşur. Gerçekte ise uçların etkisiyle kanat boyunca birçok küçük dönen hava bölgeleri oluşur. Bu küçük dönen hava kütleleri, hemen kanat uçlarının iç kısmında iki büyük dönen hava akım bölgesi oluşturur. Bu dönen hava kütlelerinin oluşumu sonucunda sürükleme momenti artar.

Bunun sonucu olarak sürüklenme kuvveti F_{di} oluşurki, bu bir öncekinin kuvvetini arttırır.

$$F_{di} = \frac{1}{2} C_{di} S V^2$$

Sürüklenme katsayısı $C_d = C_{do} + C_{di}$ olur.

C_{do} sonsuz uzunluktaki bir kanadın sürüklenme katsayısıdır. Bundan başka aynı kaldırma momentini elde etmek için gelme açısı ϕ miktarıyla arttırılmış olmalıdır. Bu şekilde aynı kaldırma momentini elde etmek için yeni gelme açısı :

$$i = i_0 + \phi$$

Akışkanlar mekaniğinde sirkülasyon dağılımı eliptik olduğu zaman, C_{di} ve ϕ nin aşağıdaki bağıntılarla verileceği gösterilmiş olur.

$$C_{di} = \frac{S}{L^2} \cdot C_{I\pi}^2 = \frac{C_l^2}{\pi a}$$

$$\phi = \frac{S}{L^2} \cdot \frac{C_l}{\pi} = \frac{C_l}{\pi a}$$

S : Kanat alanıdır,

L : Kanat uzunluğu,

a : Açı oranı ($a = L^2 / S$)

30) KIRIŞ VE DİKLİKLE İLGİLİ AERODİNAMİK KATSAYILAR :

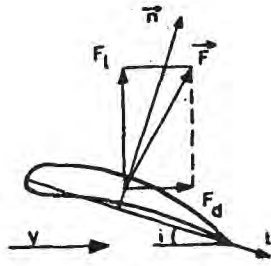
F yi kiriş üzerine ve kirişe dik olan yüzeye düşürdüğümüzde :

Kiriş üzerinde :

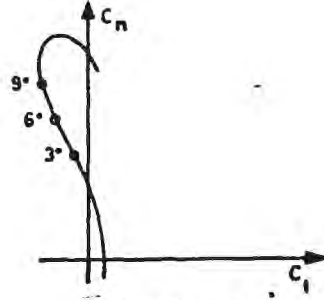
$$F_T = \frac{1}{2} \rho S V^2 (C_d \cos i - C_l \sin i)$$

Dikey üzerinde :

$$F_n = \frac{1}{2} \rho S V^2 (C_l \cos i + C_d \sin i)$$



Şekil 33a



Şekil 33b

$$C_n = C_l \cos i + C_d \sin i$$

$$C_t = C_d \cos i - C_l \sin i$$

C_n eğrisi, C_t eğrisine karşı olarak şekil görünümüne sahiptir. Buna "Lilienthal kutup" denir.

Uygulamada bu eğri, aerodinamik kuvvetlere direnç göstermek için, kanadın kalınlığını saptamada kullanılır.

2.3) ROTOR AERODİNAMİĞİ :

A) GEOMETRİKSEL TANIMLAR :

Eski yeldeğirmenleri veya modern türbinlerin bir poyraya bağlanan ve rotoru oluşturan birçok kanatları vardır. Bunların incelemesine başlamadan önce birkaç tanımlama verelim.

ROTOR EKSENİ : Rotorun dönme eksenidir.

DÖNME DÜZLEMİ : İçinde kanatların döndüğü rotor eksenine dik key olan düzlem.

ROTOR ÇAPI : Rotor tarafından taranan alanın çapı.

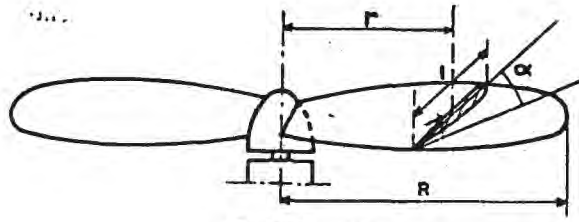
KANAT EKSENİ : Pervaneyle ilgili, etrafında kanat eğimini değiştirmenin mümkün olduğu uzunluğuna eksen.

r YARIÇAPINDAKİ KANAT KESİDİ : Yarıçapı r ve eksen motor eksenine olan bir silindir tarafından kanadın kesişmesi.

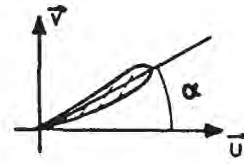
KALEM AÇISI veya EĞİM AÇISI : r yarıçapındaki kanat kesidi nin kirişi ile dönme düzlemi arasındaki α açısıdır.

r YARIÇAPINDAKİ KANAT KESİDİNİN GEOMETRİK EĞİMİ : Yarıçap r de kirişe teğet olan ve rotor eksenine sahip olan yarıçap r nin geometrik helozonunun eğimi. α nın yarıçap r deki eğim açısı olduğunu kabul ettiğimizde, kesitin geometrik eğimi:

$$H = 2 \pi r \tan \alpha \quad \text{dır.}$$



Şekil 34



Şekil 35

Sabit geometrik eğimi olan bir pervane için, r ve $\tan \alpha$ nın değeri kiriş boyunca sabit kalır.

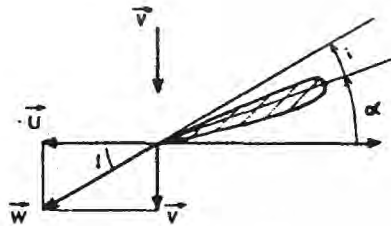
B) BİR KANAT ELEMANININ ÇALIŞMASI:

(BAŞLANGIÇ TEORİSİ)

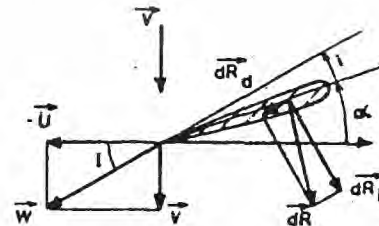
r yarıçapında, uzunluğu dr , kirişi l ve eğim açısı α olan rotor kanat elemanını göz önüne alalım.

Bu eleman $U = 2\pi r N$ eşit olan dönme düzlemindeki bir hıza sahiptir. V ye rotor arasındaki rüzgârın aksiyal hızı diyelim. Daha sonra kanatla ilgili hava akımının hızı şekil 36 gösterildiği gibi W olur.

$$\vec{V} = \vec{U} + \vec{W}, \quad \vec{W} = \vec{V} - \vec{U}$$



Şekil 36



Şekil 37

Gelme açısı $i = I - \alpha$ dır. I , W ve rotorun dönme düzlemi arasındaki açıdır. I , sapma açısıdır.

Bu şekilde kanat elemanı nispi hız $\vec{W}$ da akan havanın etkisi altındadır. Bunun için bu kanat elemanı bir aerodinamik kuvvet, dR ile denenecektir. BU dR kuvveti bir kaldırma kuvveti ve sürükleme kuvvetine ayrılabilir: dR_1 ve dR_d , sırasıyla gelme açısı i ye uygun olan nispi hız $\vec{W}$ ya dikey ve paraleldir. Kanat elemanı yapımında kullanılan profil için, C_l VE C_d nin değerleri, gelme açısı i ye bağlı değerler olacaktır.

Aerodinamik kuvvet dR nin dağılımının, rotor üzerindeki rüzgâr tarafından uygulanan axial itme kuvvetine ve rotor eksenine etki eden döndürme momentine bağlı olduğunu varsayalım. Bu dağılımlar, dF ve dM olsun.

dF rotor eksenine üzerine dR nin yansıması, dM dönme düzlemindeki dR nin yansımasının rotor eksenine ile ilgili momentidir

$$dF = dR_1 \cos I + dR_d \sin I$$

$$dM = r (dR_1 \sin I - dR_d \cos I)$$

Şu bağıntıları,

$$dR_1 = \frac{1}{2} \rho C_1 w^2 dS \quad \text{ve} \quad dR_d = \frac{1}{2} \rho C_d w^2 dS$$

$$w^2 = V^2 + U^2 = V^2 + w^2 r^2 \quad \text{ve} \quad wr = \cot g I$$

$$dP = wdM$$

İfadelerini hesaba katarsak, dF , dM ve dP için aşağıdaki ifadeleri elde ederiz.

$$dF = \frac{1}{2} \rho V^2 dS (1 + \cot^2 I) (C_1 \cos I + C_d \sin I)$$

$$dM = \frac{1}{2} \rho V^2 r dS (1 + \cot^2 I) (C_1 \sin I - C_d \cos I)$$

$$dP = \frac{1}{2} \rho V^3 dS \cot I (1 + \cot^2 I) (C_1 \sin I - C_d \cos I)$$

c) İTME, DÖNDÜRME ve GÜÇ İLE İLGİLİ GENEL İFADELER :

Rotorda, rüzgâr tarafından uygulanan toplam itme kuvveti F , rotor miline etki eden döndürme momenti M , kanatlara etki eden başlangıç momentleri dM ve tüm başlangıç kuvvetleri dF leri sırasıyla ilave etmekle elde edilir. Bu nedenle, rotora rüzgâr tarafından iletilen P gücü, rüzgâr türbini tarafından sağlanan P_u faydalı gücü, farklı koşullar için aşağıdaki ifadelerle hesaplanabilir.

$$P = \sum dF \cdot V = F V$$

$$P_u = M w$$

Verimlilik :

$$\eta = \frac{P_u}{P} = \frac{M_w}{FV} \quad \text{ile verilir.}$$

2.4. BENZER GEOMETRİK RÜZGÂR MAKİNALARININ ÇALIŞMASI :

Önceki paragrafta, rotora etki eden aerodinamik kuvvetleri kısaca analiz ettik. Fakat , kanatlar arasındaki etkileşim gibi bazı faktörleri ihmal ettik. Bu gibi parametrelerin etkisiyle ilgili daha incelikli bilgi edinmek için, bir rüzgâr tüneline ki fiziksel modeller üzerinde deneyler yapmak gerekir.

Geometrik model , yapmayı niyet ettiğimiz prototipe benzer bir modeldir. Model, kinematik benzerlik koşullarında rüzgâr testine tutulmuştur. Diğer bir ifadeyle, modelin veprototipin her-bir benzer kanat elemanındaki havanın gelme açıları aynı olur, Bu koşullar aşağıdaki oranların eşit olmasını gerektirir.

$$\frac{V_{11}}{V_{12}} = \frac{V_{21}}{V_{22}} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{W_{10}}{W_{20}} = \frac{U_{10}}{U_{20}}$$

1 , prototip ve 2 , model ile ilgilidir.

V_{11} ve V_{12} : Prototip ve modelin karşı akımdaki benzer hızları

V_{21} ve V_{22} : Prototip ve modelin doğru akımdaki benzer hızları

V_1 ve V_2 : Rüzgâr rotorları arasından geçen rüzgâr hızı,

U_{10} ve U_{20} : Dönme düzlemindeki çevresel uç hızları ,

U_1 ve U_2 : Prototip ve modelin benzer elemanlarının çevresel hızı,

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{U_{10}}{U_{20}} = \frac{V_{11}}{V_{12}}$$

bağıntıları aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\frac{U_{10}}{V_1} = \frac{U_{20}}{V_2} \quad \text{ve} \quad \frac{U_{10}}{V_{11}} = \frac{U_{20}}{V_{12}}$$

Bu ifade bizi, sapma açıları I_0 ın, prototip ve modelin kanat uçlarında eşit olduğu sonucuna götürür.

İkinci ifade olan uç hız oranı λ_0 (kanat ucunda aksi yöndeki rüzgâr hızının çevresel hıza oranı) prototip ve modeller için aynı olmalıdır. Şu belirtilmelidir ki, sapma açıları olan I , model ve prototipin kanat uçlarında eşit olursa, aynı zamanda benzer yarıçapları da eşit olurlar.

Gerçekte, I_1 ve I_2 ye kesitlerdeki sapma açıları dersek,

$$\text{Cotg } I_1 = \frac{U_1}{V_1} = \frac{w_1 r_1}{V_1}$$

$$\text{Cotg } I_2 = \frac{U_2}{V_2} = \frac{w_2 r_2}{V_2}$$

bağıntıları yazılabilir.

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{U_{10}}{U_{20}} = \frac{w_1 R_1}{w_2 R_2} = \frac{w_1 r_1}{w_2 r_2}$$

bağıntısını hesaba katıp, daha önceki denklemleri birbirine bölersek, aşağıdaki ifadeyi elde ederiz.

$$\frac{\text{Cotg } I_2}{\text{Cotg } I_1} = \frac{w_2 r_2}{w_1 r_1} \cdot \frac{V_1}{V_2} = 1 \quad \text{olur,}$$

Burada, prototip ve modellerin benzer elemanları için sapma açıları I nin eşit olduğu sonucuna varırız. Bu nedenle, aynı zamanda eşit olan eğim açıları ve ($i = I - \alpha$) farkına eşit olan gelme açıları aynıdır. Bu şekilde, C_l ve C_d aynı değere sahip tir. Kanat elemanınca üretilen itme kuvveti, döndürme momenti ve güç,

$$dF = \frac{1}{2} \rho V^2 dS (1 + \text{Cotg}^2 I) (C_l \cos I + C_d \sin I)$$

$$dM = \frac{1}{2} \rho V^2 r dS (1 + \text{Cotg}^2 I) (C_l \sin I - C_d \cos I)$$

$$dP = \frac{1}{2} \rho V^3 dS \text{Cotg}^2 I (1 + \text{Cotg} I) (C_l \sin I - C_d \cos I)$$

ifadelerine başvurarak, ve

dF yi $\rho V^2 dS$, dM yi $\rho V^2 r dS$, dP yi $\rho V^3 dS$ ile bölmek suretiyle, ancak ikinci elemanlarında, $Cotg I$ ve C_l ve C_d içeren ifadeler elde ederiz. Benzerlik koşulları yerine getirildiği zaman, model ve prototipin benzer elemanları için, I , r , i , C_l , C_d nin aynı olduğunu görmüştük. Bu nedenle, prototip ve modelin benzer kanat elemanları için aşağıdaki oranlar eşit olur.

$$\frac{dF_1}{\rho_1 V_1^2 dS_1} = \frac{dF_2}{\rho_2 V_2^2 dS_2}$$

$$dF_1 = dF_2 \frac{\rho_1 V_1^2 dS_1}{\rho_2 V_2^2 dS_2} = dF_2 \frac{\rho_1 V_1^2 D_1^2}{\rho_2 V_2^2 D_2^2}$$

$$\frac{dM_1}{\rho_1 V_1^2 r_1 dS_1} = \frac{dM_2}{\rho_2 V_2^2 r_2 dS_2}$$

$$dM_1 = dM_2 \frac{\rho_1 V_1^2 r_1 dS_1}{\rho_2 V_2^2 r_2 dS_2} = dM_2 \frac{\rho_1 V_1^2 D_1^3}{\rho_2 V_2^2 D_2^3}$$

$$\frac{dP_1}{\rho_1 V_1^3 dS_1} = \frac{dP_2}{\rho_2 V_2^3 dS_2}$$

$$dP_1 = dP_2 \frac{\rho_1 V_1^3 D_1^2}{\rho_2 V_2^3 D_2^2}$$

Sözünü ettiğimiz gibi, toplam itme kuvveti, döndürme momenti ve güç, başlangıç sabit kuvvetleri, başlangıç döndürme momentleri, başlangıç güçlerinin toplama suretiyle elde edilebilir.

$$F_1 = \sum dF_1 = \frac{\rho_1 V_1^2 D_1^2}{\rho_2 V_2^2 D_2^2} \sum dF_2 = \frac{\rho_1 V_1^2 D_1^2}{\rho_2 V_2^2 D_2^2} F_2$$

ifadesini aşağıdaki şekilde yazabiliriz.

$$\frac{F_1}{\rho_1 V_1^2 D_1^2} = \frac{F_2}{\rho_2 V_2^2 D_2^2}$$

Aynı şekilde aşağıdaki denklemlerde uygularız.

$$M_1 = \sum dM_1 = \frac{\rho_1 V_1^2 D_1^3}{\rho_2 V_2^2 D_2^3} \sum dM_2 = \frac{V_1^2 D_1^3}{V_2^2 D_2^3} M_2$$

$$\frac{M_1}{\rho_1 V_1^2 D_1^3} = \frac{M_2}{\rho_2 V_2^2 D_2^3}$$

$$P_1 = \sum dP_1 = \frac{\rho_1 V_1^3 D_1^2}{\rho_2 V_2^3 D_2^2} \sum dP_2 = \frac{\rho_1 V_1^3 D_1^2}{\rho_2 V_2^3 D_2^2} P_2$$

$$\frac{P_1}{\rho_1 V_1^3 D_1^2} = \frac{P_2}{\rho_2 V_2^3 D_2^2}$$

Önceki denklemler, benzerlik koşullarının yerine getirildiğini varsayar.

Son denklem, prototip ve modelin verimliliklerinin, aynı uç hızı oranları için, eşit olduğunu gösterir. Son kesirlerin paydaları, prototip ve model rotorların arasından geçen hava akımının kinetik enerjisine etkin bir şekilde orantılıdır. Rüzgâr tüneline de denenmiş benzer bir geometrik küçük rotor üzerinde yapılan deneylerden büyük bir makinenin verimliliğini saptamamıza olanak sağlayan bu sonucun büyük avantajını görebiliriz.

Önceki ifadeler, rotor arasından geçen rüzgâr hızı, prototip ve modelin itme kuvveti, döndürme momenti ve gücü arasındaki bağıntıları kurar. Rüzgâr hızı V_{11} , rüzgârın ters akım hızı V_{12} yi, payda olarak rotor arasından geçen rüzgâr hızları V_1 ve V_2 nin yerine koyarsak, bu ifadeler hâlâ gerçek ifadeler olur.

Bu hızlar aşağıdaki bağıntıyla ilgilidir,

$$\frac{V_{11}}{V_2} = \frac{V_{11}}{V_{21}}$$

Bu nedenle rüzgâr makinalarının çalışmaları orada , rüzgâr engellenmediği için, bu, karşı akım rüzgâr hızıyla ilgili olarak d değerlendirilecektir. Uygulamada, denklemlerden biri değişkenlik eğrisini gösterir.

$$C_F = \frac{2F}{\rho_S V^2} , \quad C_m = \frac{2M}{\rho_S V^2 R} , \quad C_P = \frac{2P}{\rho_S V^3}$$

Uç hız oranı $\lambda_0 = \frac{U_0}{V}$ ile verilir.

V , türbinin önündeki 5 veya 6 çapındaki rüzgâr makinasının , rüzgâr karşı akım hızıdır. U₀ , kanat ucundaki çevresel hızdır. S taranan alandır.

C_F , C_m , C_p sırasıyla, axial itme katsayısı , moment katsayısı ve güç katsayısı olarak adlandırılır.

Bu şekilde bir grafiksel tanıtımın avantajları ortadadır. Model için çizilen karakteristik değişkenlik eğrileri, prototip ve geometrik olarak benzer her makina için geçerlidir.

Farklı rüzgâr hızları için, döndürme momenti ve güç değişikliklerinin dönme hızına karşı olması, yukarıda söz edilen karakteristik özelliklerden güçlük çekmeksizin çıkarılır. Yukarıdaki bağıntılardan, aşağıdaki ifadeleri türetiriz.

$$F = \frac{1}{2} \rho C_F S V^2 , \quad P = \frac{1}{2} \rho C_P S V^3$$

$$M = \frac{1}{2} \rho C_m r S V^2 , \quad N = \lambda_0 / 2 \pi R$$

Verilen bir makina, bir rüzgâr hızı ve herbir uç hız oranı λ_0 için , C_F , C_m , C_p nin bir değeri ve bu nedenle F , M , P nin bir değeri bulunabilir. Bu şekilde, farklı V değerleri için rüzgâr makinasının mekanik özellikleri (itme kuvveti , döndürme momenti ve güç) ne karşı devirsel hız N yi çizmemiz mümkün olur. Bu eğriler, rüzgâr motorlarıyla çalışan elektrik jeneratörleri pompaların çalışmasını incelemeye esas alınır.

Rüzgâr tüneli deneyleri ile ilgili açıklama :

Benzerlik yasaları diğer yöntemlerle elde edilebilir, örneğin

profillerin geometrik benzerliğini, kinematik benzerliği (aynı şekil hız üçgenleri için) ve dinamik benzerliğini (model ve prototipleri etkileyen kuvvetler, özellikleri ne olursa olsun : atalet , viskozite , basınç v.s aynı oranda olmalıdır) ifade etmek suretiyle elde edilen benzerlik yasaları .

Teorik olarak, viskozite kuvvetlerini hesaba almak gerekir. Bu prototip ve model üzerinde Reynolds sayısının eşitliğini ifade eder.

$$\frac{V_1 D_1}{\nu_1} = \frac{V_2 D_2}{\nu_2} \quad \text{ve} \quad \frac{U_1 D_1}{\nu_1} = \frac{U_2 D_2}{\nu_2}$$

Büyük rüzgâr türbinleri için, bu şartı incelemenin genellikle mümkün olmadığını düşünürüz. Aslında model test deneyleri, genellikle, atmosferik basınç ve çevre sıcaklığındaki rüzgâr tünellerinde yapılır. Bu gerçekten, $\nu_1 = \nu_2$ meydana gelir ve bunun için yukarıdaki eşitlikler aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$V_1 D_1 = V_2 D_2 \quad \text{ve} \quad U_1 D_1 = U_2 D_2$$

$U_1 = \pi N_1 D_1$, $U_2 = \pi N_2 D_2$ veson ifade $N_1 D_1^2 = N_2 D_2^2$ olarak yazılabilir. İlk denklem, rüzgâr modelinin $V_2 = V_1 \frac{D_1}{D_2}$ ve bu nedenle V_1 den daha büyük hız olan rüzgârda denenmesi gerektiğini gösterir. İkinci denklem devirsel hız N_2 nin $N_2 = N_1 \frac{D_1^2}{D_2^2}$ ki N_1 den daha büyüktür, veya eşit olmasını gerektirir.

Bu iddiaların sonuçlarını kavramak için bir örnek alalım.

10 m çapı olan bir rüzgâr türbininin 1/10 skalasındaki bir modelini yaptığımızı varsayalım. Uç hız oranı , $\lambda_0 = 6$ olursa prototipin dönme hızı , 8,70 m/s lik hızı olan ($U_1 = 2\pi N_1 R_1$) bir rüzgârda 100m /dak dır.

Bu nedenle, Reynolds koşullarına uyulursa modelin , rüzgâr hızı $V_2 = 87$ m/s ($V_1 D_1 = V_2 D_2$) olan bir rüzgârda denenmesi gerekirdi. Böylece rüzgâr modelinin dönme hızı $N_2 = N_1 (10)^2 = 100.100 = 10000$ r.p.m. olurdu.

Böyle bir hızda sıkıştırabilme olayı meydana gelirdi.

Skalanın tüm biriminde, model üzerinde meydana gelen olay, gerçekte olaylardan, farklı olacağı için dinamik benzerlik gözden kaybolurdu.

Uygulamada model, aynı düzeyde veya prototipin gerçekte uygulandığı düzeylerden biraz daha yüksek rüzgâr hızları olan bir rüzgâr tüneline denenecektir.

Bu nedenle ($W_2 I_2 / v$) modeli ile ilgili Reynolds sayıları, ($W_1 I_1 / v$) prototipinde gözlenen sayılardan daha düşük olacaktır. Bununla beraber R nin değerleri, Reynolds kritik sayıları denilen belli bir değer olan R_c den daha yüksek olursa, tam benzerlik elde edilir. Aslında R_c değerinin üzerinde, C_d sürüklenme katsayısı, Reynolds sayısı ile pek değişmez. Öyleki, model ve prototiple ilgili olan C_d nin değerleri pratik olarak aynı gelme açısı için eşit olurlar. Sonuç olarak, bu durumda yukarıdaki bağıntılar onaylanır.

Diğer taraftan model deneyleri, R nin R_c den daha düşük olduğu koşullarda gerçekleştirilirse, modeldeki sürüklenme katsayısı C_d , viskozitenin büyük etkisi nedeniyle aynı gelme açısında prototipinkinden daha yüksek olacak ve benzerlik daha az uygun olacaktır.

Şu belirtilmelidirki, daha iyi bir verimlilik için (C_d / C_l) oranının en düşük değerleri, modern rüzgâr türbinlerinin aerodinamik profilleri öyle bir tarzda seçilmelidirki, rüzgâr türbini normal şekilde çalıştığı zaman her kesitteki Reynolds sayısı Reynolds kritik sayısı R_c den daha yüksek olur. Bu eğri ince profiller için 10^4 civarında olur ve NACA profilleri için 10^5 ile 10^6 arasında değişir.

BÖLÜM 3

YATAY EKSENİLİ RÜZGÂR MAKİNALARININ ÇALIŞMALARI ve TANIMI :

Tesis edilen en güçlü yeldeğirmeni istasyoları yatay eksen esasına göre yapılırlar. Bu tip bir makinada ,

- A) Klasik yeldeğirmenleri ,
 - B) Yavaş çalışan rüzgâr türbinleri ,
 - C) Hızlı çalışan rüzgâr türbinleri ,
- arasındaki farklılığı görebiliriz.

3.1. KLASİK YATAY EKSENİLİ YELDEĞİRMENİ :

Çoğu gözden kaybolmuştur , fakat birkaçı hâlâ durmakta ve genç, yaşlı ziyaretçilerin zevkine sunulmakta, yerel ve özel kişilerce, çok titiz bir şekilde muhafaza edilmektedir. Bunlar Avrupa ' da özellikle Atlantik sahili boyunca, Kuzey ve Baltık denizi ve aynı zamanra Akdeniz çevresinde görülebilirler.

Klasik yeldeğirmenleri iki temel tipe ayrılabilir.

- Döner çatılı,
- Döner kafesli ,

DÖNER ÇATILI YELDEĞİRMENLERİ :

Döner mili destekleyen kesik koni şeklindeki çatı , genellikle taştan yapılmış olan binanın üzerinde dönebilir. Çatı dönüğü zaman değirmenin kanatlarının rüzgâra doğru yönelmesini sağlayan uzun bir kiriş tarafından aşağıya doğru uzatılır. En yeni çeşitleri bir yardımcı rüzgâr çarkı tarafından yönlendirilir.

DÖNER KAFESLİ YELDEĞİRMENLERİ :

Çarkın mili , değirmen taşlarının bulunduğu kafese bağlıdır. Önceki tipte olduğu gibi, çarkın rüzgâra karşı yönelmesi bir yön kolu ve bir yardımcı rüzgâr çarkı kanalıyla yapılır.

Değirmenler , geçmiş te çalışırken , genellikle ağaçtan yapılan kanatlar ani bir rüzgâr çıktığında çabucak fora olan kerten beziyle kaplıydılar. Bazı çeşitlerinde dönme hızı, az veya

çok, kanatlardaki seyyar kepenklerin açılmasıyla ayarlanır.

Bazı Portekiz değirmenlerinde kanatlar, üçgen yelken şekilli kanaviçelerden yapılmıştı. Bu küçük yelkenler radyal şekilde düzenlenmiş ve milin üzerine tespit edilmiş, çapraz çataları destekleyen 8 ile 10 kutup arasına gerilmişlerdi.

Genellikle, yeldeğirmeni, değirmenin içinde bir silindire karşı bağlanmış fren üzerinde çalışan bir ip tarafından dışarıdan durdurulabilirdi.

ÖZELLİKLERİ :

Kanatlar genellikle 5 ile 15 m uzunlukta idi. Genişlikleri uzunluklarının 1/5 civarındaydı. Dönme hızları, en düşük hızları en uzun kanatlara eşdeğer olan, 10 ve 40 m/dak arasında değişiyordu.

Paris ' te Eiffel Laboratuvarında bir skala modelinde yapılan testler, yatay eksenli yeldeğirmenin verimliliğinin, uç oranı : $\lambda_0 = U_0 / V$ 2 den 3 e değişen optimal bir değer olduğunu göstermiştir.

Test edilen makinayla verimlilik :

$$\lambda_0 = \frac{\pi D N}{60 V} = 2,7$$

olduğu zaman, max bir değere ulaşır.

Bu, dönme hızı : $N = 51,5 V/D$ ye, C_p katsayısı 0,3 eşit olan, yani Betz sınırının %50 ne eşit olan etkin enerji miktarı ($C_p \text{ Betz} = 16 / 27 = 0,595$) na eşdeğerdedir.

Bu koşullar altında üretilen max güç, rüzgâr hızının ve çapın bir fonksiyonu olarak, aşağıdaki bağıntıyla verilir.

$$P = 0,15 D^2 V^3$$

P, Watt olarak, D, m ve V, m / s ile ifade edilirler.

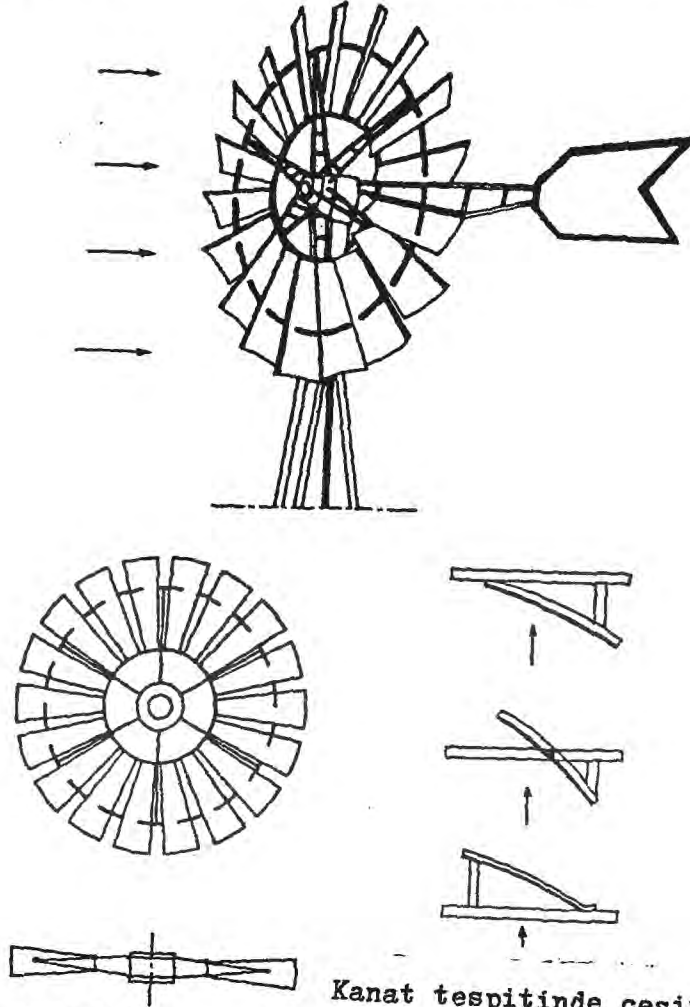
$\rho = 1,27 \text{ kg / m}^3$ civarındadır.

3.2. YAVAŞ ÇALIŞAN RÜZGÂR TÜRBİNLERİ :

1870 den beri çok kanatlı düşük rüzgâr hızında çalışan rüzgâr türbini ilkin A.B.D de daha sonra Avrupa ' da ortaya çıktı. Sayısı 12 ile 24 arasında değişen kanatlar, çarkın tüm yüzeyini veya hemen hemen tüm yüzeyini kaplamaktadır.

Yeldeğirmeninin, arkasında olan kuyruk kanadı , çarkın rüzgâra karşı durmasını sağlar.

Şekil bu tip bir yeldeğirmeninin temsil eder.

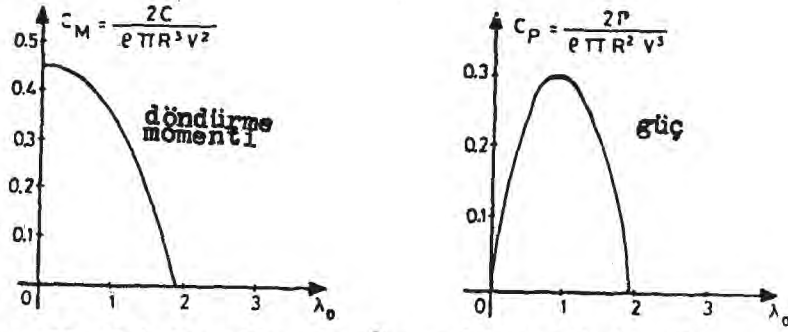


Kanat tespitinde çeşitli metodlar
Sek.38.Çok kanatlı ağır rüzgâr türbini

ÖZELLİKLERİ :

Genellikle inşa edilen bu tip en büyük yeldeğirmenlerinin çapı 5 ile 8 m arasında değişir. Hatta , 15 m çaplı çok kanatlı bir yeldeğirmeni A.B.D de inşa edilmiştir. Bu çok kanatlı yeldeğirmenleri özellikle düşük rüzgâr hızlarına iyi bir şekilde uyarlanır.Bunlar, 2 ile 3 m/s arasında değişen rüzgâr hızlarıyla serbestçe çalışmaya başlarlar. Başlangıç döndürme momenti nispeten yüksektir.Değişkenlik grafikleri şekil 39 da Paris ' te Eiffel laboratuvarında yürütülen test sonuçlarını temsil eder.

İncelemenin model olması durumunda , $\lambda_0 = 1$ olduğu zaman , enerji üretimi max olur



Şek.39. Çok kanatlı rüzgâr makinası için güç ve döndürme momenti

Bu koşullar dakikada dönüşleri,

$$N = \frac{60 V}{\pi D} = 19 \frac{V}{D} \quad \text{ve} \quad C_P = 0,3 \quad \text{yani Betz sınırının}$$

% 50 ne eşit etkin enerji miktarına eşit bir optimal dönme hızına eşdeğerdedir.

Havanın özgül kütlelerinin değeri $\rho = 1,27 \text{ kg/m}^3$ olarak alındığında, bu tip bir makina tarafında üretilmesi olası max kuvvet, yeldegirmenlerinin gücünü veren bir ifade yoluyla çapla ilgili hesabı yapılabilir.

$$P = 0,15 D^2 V^3$$

güç watt, çap m, hız m/s olarak ifade edilir.

Diğerlerinden farklı bir değere sahip olan uç hız oranları λ_0 için belirtilen dönme hızları, makinanınkine eşit olan λ_0 değeri çarpılmalıdır. Düşük hızda çalışan rüzgâr türbinlerince üretilen güç iki nedenle nispeten azdır.

- Bu makinalar genellikle hızı orta olan ve 3 ile 7 m/s arasında değişen rüzgârlarda kullanılır.

- Buna ilave olarak çarkın ağırlığı nedeniyle, çapı 9 ile 10 m arasında olan makinaları kurmak kolay bir şey değildir.

Bununla beraber bu tip makina ortalama rüzgâr hızı 4 ile 5 m/s arasında değişen bölgelerde, su pompalama işi için çok faydalıdır. Bu amaç için bu makinalar genellikle pistonlu turlularla birlikte kullanılırlar.

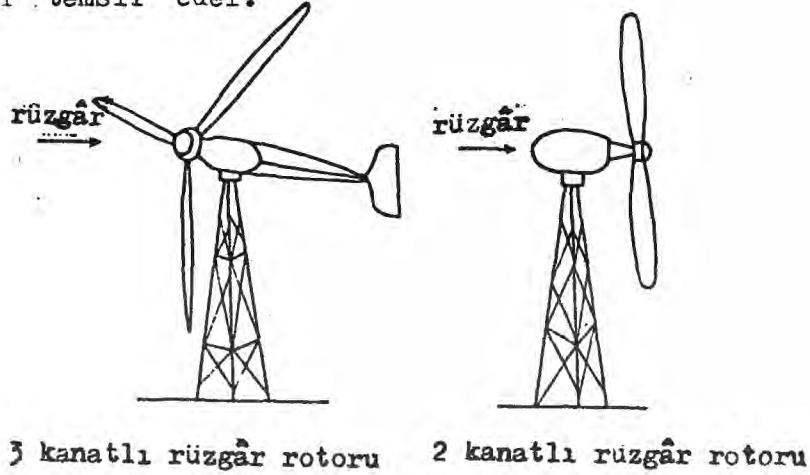
3.3. HIZLI ÇALIŞAN RÜZGÂR TÜRBİNLERİ :

Bu tip rüzgâr makinasında kanatların sayısı, 2 ile 4 arasında değişerek şekilde, daha çok sınırlandırılır. Eşit güçte

bu yeldegirmenleri düşük rüzgârda çalışan yeldegirmenlerinden çok daha hafiftir, bu nedenle daha çok ilgi çekerler.

Bununla beraber, güçlükle çalışabilme dezavantajına sahiptirler. Gerçekte, özel sistemlerin yokluğunda bu makinaları döndürmek için en azından 5m / s lik rüzgâr hızına gerek vardır.

Şekil 40'da biri 2 kanatlı, diğeri 3 kanatlı olan ve iki farklı yönlendirme sistemiyle donatılmış olan iki hızlı çalışan türbinini temsil eder.



Şekil 40

Hızlı çalışan rüzgâr türbinleri elektrik üretimi için çok uygundur. Rüzgâr jeneratörlerinin çoğu yüksek hızdaki rotorlarla çalıştırılırlar.

ÖZELLİKLERİ :

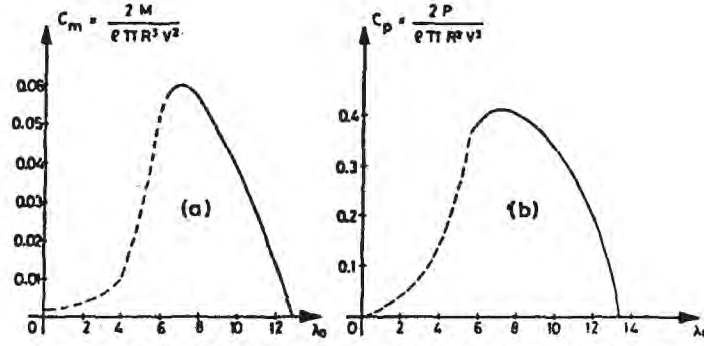
Dönme hızları aynı çaptaki, düşük hızla çalışan rüzgâr makinalarınınkinden daha hızlı ve kanat sayıları azaldığı için daha hareketlidirler. Uç hız oranı λ_0 10 ulaşabilir.

Aynı rüzgâr hızı ve aynı çapta, yüksek hızlı bir rüzgâr rotoru tarafından geliştirilen döndürme momenti, düşük rüzgârda çalışan rüzgâr makinasına temin edilmiş olandan daha azdır.

Şekil 41'de Paris Eiffel Laboratuvarında denenmiş 2 kanatlı rüzgâr rotorunun uç hız oranı λ_0 la ilgili değişkenlik eğrileri ve kuvvet katsayılarını gösterir.

$$\lambda_0 = \frac{\pi D N}{60 V} = 6$$

olduğu zaman optimal bir enerji üretimi vardır.



Şek.41. Süratli rüzgâr türbinleri
Güç ve döndürme mom. grafikleri

Bu, dönme hızı $N = 115 \frac{D}{V}$ ve $C_p = 0,4$ ile eşdeğerdedir.

Deneylere göre, bu rüzgâr türbini ve benzerlerinin max gücü aşağıdaki bağıntıyı uygulamak suretiyle elde edilir.

$$P = 0.2 D^2 V^3$$

Uygulamada bu ifade 2, 3, 4 kanada sahip olup olmadıkları hesaba katılmadan, hızlı çalışan rüzgâr türbinlerince üretilmesi olası max kuvveti başlangıçta tespit etmede kullanılan bir ifa dedir.

HIZLI ÇALIŞAN RÜZGÂR ROTORLARININ AVANTAJLARI :

Yüksek dönme hızları nedeniyle ancak 2,3 veya en fazla 4 olan az kanat sayıları vardır. Hızlı çalışan rüzgâr türbinlerinin ağırlık ve fiatı, bu nedenle, aynı çapta, düşük hızlı rüzgârda çalışanlarıkinden daha düşüktür.

Buna ilave olarak, düşük rüzgâr hızıyla çalışan rüzgâr rotorlarıkinden daha yüksek olan savurmalı kuvvetlere karşı koyacak şekilde yapıldıklarından ani rüzgâr patlamalarından kaynaklanan basınç değişikliklerinin önemi daha azdır.

Fırtınalarda kullanmak için, eksenleri üzerinde kanatların dönmesinde kullanılan kapama alatları, aynı zamanda daha az enerji isterler.

Bir diğer avantajı, makina hareketsiz tutulduğu zaman, axial itme kuvveti (kanatlar çalışma pozisyonunda olsa bile) çalıştığı zamankinden daha düşük olur. Bu durum düşük hızda çalışan yeldeğirmenleri için söz konusu değildir.

Gedser 3 kanatlı yeldeğirmeninde (Danimarka ' da) alınan kayıtlar, makina sabit dururken axial kuvvetin dönen yelde-

değirmeni üzerine uygulanan kuvvetin % 40 na ulaştığını kanıtlamıştır.

DEZAVANTAJLARI :

Bu avantajlara bir sakınca ile dengelenmiştir., başlangıç döndürme momenti düşüktür. Hızlı bir rüzgâr rotoru çok fazla gayret göstermeksizin çalışmaya başlamalıdır. Bu sakınca, eksene yakın olan kanatlara uygun bir giriş ve mümkün olan en iyi eğim açısını vermekle sınırlanabilir.

Örneğin , Aerowatt modeli gibi bir regülatörü olan değişken eğimli kanatlarda kullanılabilir. Makina çalışmaya başladığında eğim açısı max olur ve hız yükseldiğinde azalır.

3.4. KULLANILAN PROFİLLER :

Kullanılan profiller, makinanın tipine göre değişir. İlk yel değirmeni kanatları, keten beziyle kaplanmış, ağaç işinden yapılmışlardı. Kanatlar, desteğin heriki tarafındaki ağaç çiteler tarafından desteklenirdi. Daha sonra çiteler , aerodinamik verimli liği iyileştirmek için kanatların arka tarafına doğru kaydı.

Daha modern dizaynlarda, bez kanatların yerini , metal tabaka aldı ve fazla rüzgârlarda rotorun hızını kontrol etmek için, kepenk ve kapakçıklar kullanıldı.

Yavaş çalışan yel değirmenliri , ince ve hafifçe konkav profiller kullanır. Sertliklerinin az olması nedeniyle, bu profiller seyyar çarkın iskeletini oluşturan metalik dairesel bir iskelete tespit edilirler.

Hızlı çalışan rüzgâr türbinlerinin daima rüzgâr direncini azaltıcı biçimde kanatları vardır. Profilleri genellikle NACA veya Göttingen serilerinden seçilir. (NACA 4412 - 4415 - 4418 23012 - 23015 - 23018 Göttingen 623 - 624) Bu kanatlar, azalan sürüklenme ve aynı zamanda Reynolds sayısının yeteri kadar yüksek olması koşuluyla yüksek bir aerodinamik verimliliği ile karakterize edilir.

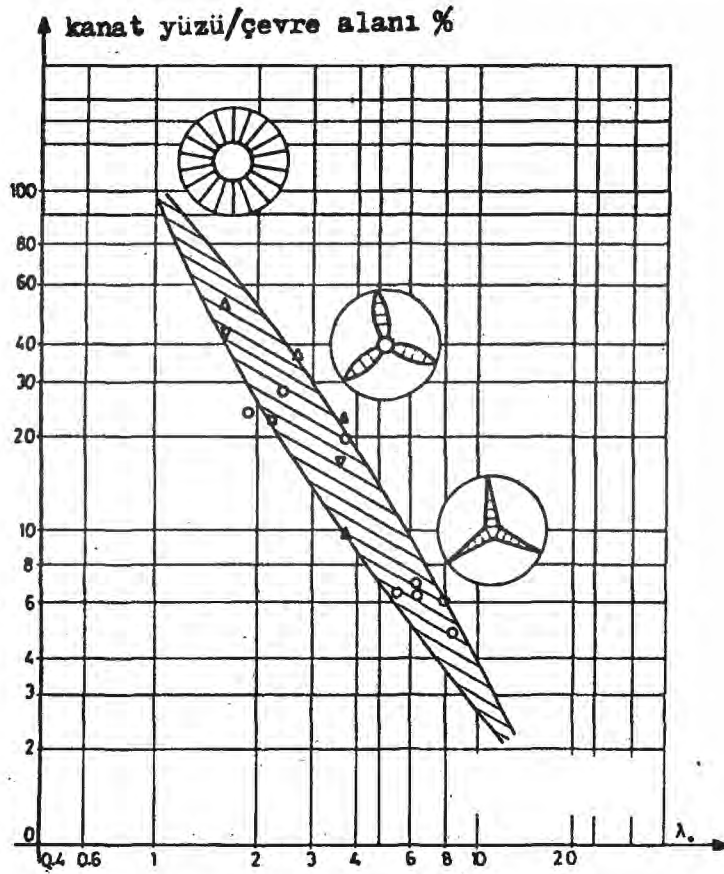
Kısa bazı yüksek hızda çalışan rüzgâr gücü üretim merkezleri Wörmann ve NACA serilerinin düzgün akışlı profillerini kullanır. (FX 60,126 , 61,40 , 77... NACA 63,618 , 63,615 , 64,612 64,618) Bu kanatların sürüklenme /kaldırma oranları çok düşüktür.

Bu nedenle, bu gibi profillerin kullanılmasıyla iyi sonuçlar elde edilir.

3.5. UÇ HIZ ORANI λ_0 İLE İLGİLİ OLARAK KANATLARIN

NİSPİ YÜZEYİNİN DEĞİŞKENLİĞİ :

Grafik 42 görüldüğü gibi , kanatların toplam yüzeylerinin rotor tarafından taranan alana oranı , uç hız oranı yükseldikçe, artar. Bu grafik Ekim 1954 de Yeni Delhi kongresinde Ulrich Hütter tarafından sunulan bir araştırmaya bildirisinden alınmıştır.



Şekil 42

3.6. YÖNLENDİRME SİSTEMLERİ :

En sık kullanılan yönlendirme sistemleri :

- Kuyruk kanadı ,
- Yardımcı rüzgâr çarkı ,
- Destegin rüzgâr yönündeki rüzgâr türbini ,
- Yardımcı motor sistemleri ,
- Elle çalıştırma sistemleridir.

A) KUYRUK KANADI :

Bu alet, başlıca çapı 6 m ye kadar olan yavaş rüzgâr türbinlerinin yönlendirilmesinde kullanılır. Tatmin edici sonuçlar elde etmek için bazı koşulların yerine getirilmesi gerekir.

E nin yönlendirme eksenini ve pervane dönüş düzlemi arasındaki mesafeye eşitliğini ele alalım. $4E$ ye eşit olan bir değer yönlendirme eksenini ve kuyruk kanadının merkezi arasındaki mesafe olan L ye verilirse kuyruk kanadının A yüzeyi, rotor tarafından taranan S yüzeyi ile ilgili aşağıdaki değerlere sahip olmalıdır.

Çok kanatlı bir yeldegirmeni için, $A = 0,10 S$,

2 veya 3 kanatlı bir yeldegirmeni için, $A = 0,04 S$.

L , $4E$ den farklı olursa, dengeyi temin etmeye gerekli olan dümen alanı aşağıdaki denklemlerden hesaplanabilir.

$$S = 0,40 S \frac{E}{LL} \quad \text{çok kanatlı rüzgâr rotorları için,}$$

$$S = 0,16 S \frac{E}{L} \quad \text{hızlı çalışan rüzgâr rotoru için,}$$

Uygulamada, genellikle tahminen 0,6 ya eşit olan bir değer verilir.

B) YARDIMCI RÜZGÂR ÇARKLARI :

Bu sistem yönlendirme aşağıdaki prensiplere göre yapılır. 1 veya 2 küçük rüzgâr rotoru esas rüzgâr türbini gövdesinin yanına yerleştirilir. Bu küçük rüzgâr rotorlarının eksenini esas rüzgâr rotorunun eksenine dikey olur.

Esas rüzgâr rotoru, rüzgârla karşılaşmadığı zaman, desteğe kaynakla tutturulmuş, sapma eksenini ile ortak merkezli bir dişli çark üzerinde çalışan sonsuz bir pervaneyi döndüren bir yardımcı rotor çalışmaya başlar, Yardımcı rüzgâr rotorunun miline rüzgâr dikey olarak estiği zaman, rotor çalışmasını durdurur. İkincil yeldegirmeni kanatları doğru yönde rüzgâr makinasının mil etrafında dönmeye olanak sağlayan bir sapma göstermelidir.

Şu belirtilmelidir ki, yardımcı rüzgâr rotoru desteğin rüzgâr yönünde veya rüzgârın aksi yönünde yerleştirilmiş olan bir esas rotor ile beraber kullanılabilir.

Bir kuyruk kanadı kullanılan yönlendirme sistemiyle kıyasla-

lanacak olursa bu alet, daha az sarsıntısız ve daha düzenli olmanın avantajını verir.

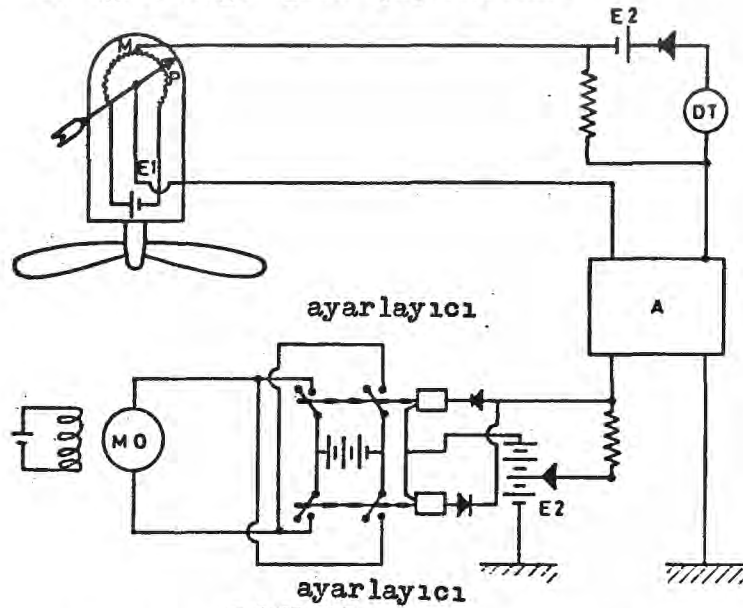
C) KENDİ KENDİNE YONLENER RÜZGÂR ROTURU :

Esas yeldeğirmeni, bir rüzgâr fırlıdağı gibi çalışarak, destegin rüzgâr yönünde yerleşmiş ve otomatik olarak rüzgâra doğru kendi yönünü bulur. Buenos Aires ve Montevideo Üniversitelerinden Prof. Cambilargiu bu tip tesisler üzerinde çalıştı.

Tecrübeleri, $d = 0,022 D$ çaplı bir destek kullanarak (D yel değirmeninin çapıdır) pervane düzlemi mil ekseninden $0,25 - 0,30D$ den daha düşük olan bir x uzaklığında yer aldığında, sarsıntılar rın farkedildiğini kanıtlamıştır. 3 e eşit bir nispi açıklığı olan bir aerodinamik şekilli destek ve 2 kanatlı bir rotor için bu mesafe, $0,13 D$ ye indirilir. Prof. Cambilargiu ' nun görüşüne göre, sarsıntılar 3 kanatlı bir rotor ile daha da azaltılabilir.

D) YARDIMCI MOTORLA YONLENDİRME :

Bir yardımcı motor kullanan böyle bir sistemin düzenlemesi şekil 43 de görüldüğü gibi yapılabilir.



Şekil 43

Elektrikli otomatik motor kullanma düzeni

Her iki şekilde dönebilen kayma eksenli motor, bir rüzgâr fırlıdağı ve yeldeğirmeni tarafından çalıştırılabilen bir devir sayıcı dinamo tarafından kontrol edilir. Rüzgâr rotorunun üzerindeki yeldeğirmenin üzerine tespit edilmiş rüzgâr fırlıdağı,

yeldeğirmeni iskeletiyle bir kısmı oluşturan yatay dairesel reosto üzerindeki bir mil etrafında hareket eden , bir kumanda kolunu taşır.

Bu reostonun orta noktası ve kumanda kolu arasındaki gerilim, bir yükseltici üzerindeki bir R direnci aracılığıyla uygulanır.

Dönme hızına orantılı bir gerilim üreten devir sayıcı dinamo DT , birbirine zıt yönde yerleştirilmiş , bir E_2 bataryası bir düzeltici ve önceki direnç R yi içine alan bir devreyi besler. Rotor hızının itibari hızdan daha düşük olması koşuluyla sayıcı dinamo kutupları arasındaki gerilim E_2 bataryasının kutupları arasındaki gerilimden daha zayıftır. Dinamo akım vermez. Bundan böyle yükseltici girişine verilen gerilim , M ve P arasında varolan bir gerilimdir. Kayma eksenli motor MO çalışmaya başlar ve yeldeğirmeni rüzgâra karşı doğru pozisyonu alana kadar çalışır.

Dönme hızı çok yüksek olursa dinamo , R nin içindeki , gerilimin düşmesine yolaçan bir akım verir. Kayma eksenli motor burada çalışmaya başlar. Rüzgâr rotoru, R ve MP nin kutuplarındaki voltajların toplamı sifıra ulaşana kadar, rüzgârı karşılayan yüzeyin azalmasına orantılı olacak şekilde sınırlanır,

Bu alet rotor eksenli üzerindeki yükün azalması veya baskı olayı meydana geldiği zaman, rüzgâr rotorunun son hızda çalışmasını önler. Kayma eksenli motorun sürekli çalışmasını önlemek için, rüzgâr fırılacağı kumanda koluna sıkı bir şekilde bağlanmamıştır. Fakat, rüzgâr türbini milinin yönünü değiştirmeksizin iki durma arasında heriki yana doğru birkaç derece dönebilir. Rüzgâr fırılacağı rotor shaftının yönü ve rüzgârın yönü arasında ki uzaklık 10° lik bir açının dışına çıkarsa, ancak dönme kolunu sürükler.

3.7. AYARLAMA DÜZENLERİ :

Birçok durumlarda, rüzgâr makinasının dönme hızının , rüzgâr hızı değişkenlikleri olsun veya olmasın, değişmez bir değeri muhafaza etmesi arzu edilir. Bu şekildeki sonuçlara varılması için, dönme hızı regülatörleri kullanılır. Bu sistemler ayrıca güç sınırlaması ve hızı yüksek olduğu zaman, kanatları

etkileyen kuvvetlerin azaltılması için kullanılır. Bu aletler 2 kategoriye ayrılabilir.

- Tespit edilmiş kanatlı rüzgâr makinaları için ayarlama sistemleri ,

- Değişken eğimli rüzgâr makinaları için ayarlama sistemleri

3.8. YATAY EKSENLİ RÜZGÂR MAKİNALARININ DİĞER MODELLERİ :

Yukarıda sözü edilen rüzgâr makinaları genelde ençok kullanılanlardır. Bununla beraber yatay bir eksenle çalışan diğer modellerde yapılmıştır. Fakat bunların bir kısmı ancak prototip - tirler.

TEK KANATLI RÜZGÂR MAKİNASI :

Bu model basit ayarlama imkanı sağlama ve ucuz olma avantajına sahiptir, fakat şekli estetik değildir. Buna ilave olarak kanadın dip kısmındaki eğilme momenti dikkate alınabilir ve titreşimler daha fazladır.

KANATLARINDA BAŞKA ROTORLARA SAHİP OLAN YATAY EKSENLİ RÜZGÂR TÜRBİNİ :

Bu düzenleme, olağan rüzgâr rotoru ve jeneratör arasındaki hareket iletişimini durdurma avantajına sahiptir. Fakat teklif edilen dizayn bugüne kadar pek başarılı olmamıştır.

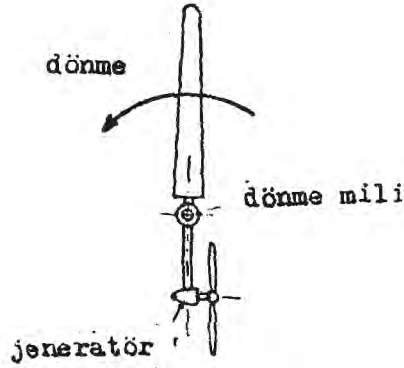
DİFÜZÖR YÜKSELTİCİSİ :

Kapalı sistem rüzgâr makinalarıyla ilgili denemeler yapılmaktadır. Bu denemeler em etkin dizaynın, şekil görüldüğü gibi, rüzgâr rotorunun hemen arkasına yerleşmiş difüzörün oluşturduğunu göstermiştir. Difüzör rüzgârı karşıladığı noktada dardır ve arkaya doğru genişler.

Bu şekil , rotor kanatlarının arkasında önemli bir basınç düşüklüğü yaratır. Buda pervane arasından hava akışının artmasına neden olur. Deneyler rotor arasındaki rüzgâr hızının 1,5 kat, gücün ise 3,5 kat arttığını göstermiştir.

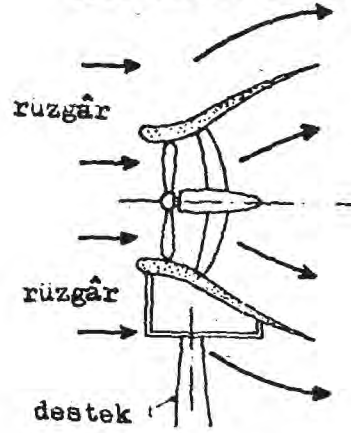
Gerçekte, difüzörün güç üretim çapına eşit olan bir çapa sahip bir yeldeğirmeni tarafından üretilen gücü gözönüne alırsak, bunun tarafından elde edilen gücün , difüzörün yükselticisi sistemi tarafından temin edilen güce hemen hemen eşit olduğunu gözleriz.

Tek kanatlı rüzgâr turbini

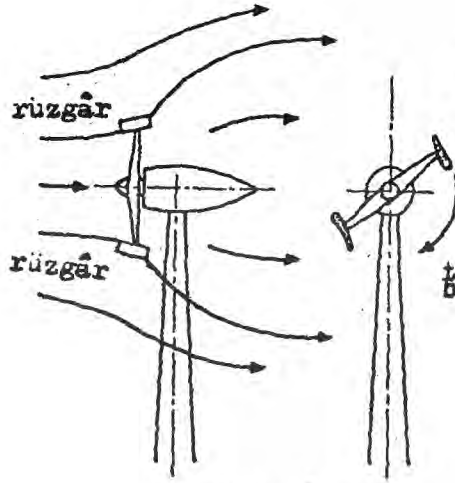
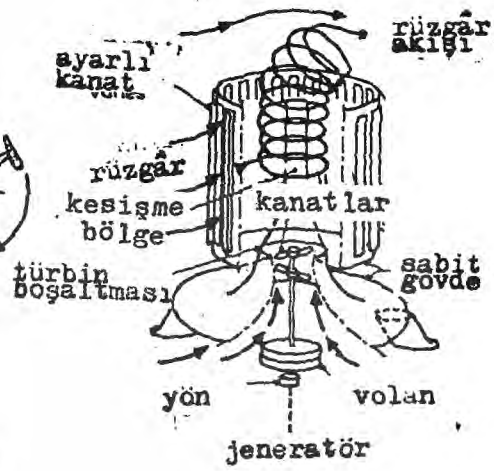


Şekil 44

Uçlu rüzgâr rotörü



Şekil 45

Şekil 46
Dinamik ön sıkıştırıcıŞekil 47
Kasirga sistemi**DİNAMİK İNDÜKSİYON ALETİ :**

Dinamik indüksiyon aleti , geleneksel yatay eksenli bir makinanın rotor kanatlarının uçlarına tespit edilmiş küçük bir T şeklindeki aletten ibarettir. Bu şekil, havayı pervanelerden uzaklaştırarak dışarı doğru iter. Bu yolla pervanelerin içine doğru daha çok havanın çekilmesine ve böylece daha yüksek verimliliğe sebep olur. Bugüne kadar bu düşüncenin büyük başarı sağladığı bilinmemektedir.

HORTUM SİSTEMİ :

Dr. Yen ' in sistemi olan bu sistem, açılabilen dikey delikleri olan bir kuleden ibarettir. Rüzgâra doğru taraftaki delikler açık olurken rüzgâr akışına zıt yöndeki delikler ise kapalı olur.

Rüzgâr kuleye doğru estiği zaman, kulenin tepesine doğru dönerek gider ve küçük bir hortum yaratır. Dönen hava kütle - sinin merkezindeki basınç düşüktür. Böylece dışarıdaki hava, ku - lenin alt kısmının etrafındaki açık yerler arasından emilir ve iç kısma yerleştirilen bir rüzgâr rotorunu çalıştırır. Dr. Yen' rüzgâr rotoruyla elde edilen gücün izole edilmiş bir pozisyon da yerleştirilen aynı rotor tarafından sağlanan gücün 100 ka - tına eşit olacağı düşüncesindedir.

3.9. KANAT YAPISI :

Kanat yapısı için kullanılan materyal sağlam ve hafif ol - malıdır, kötü iklim koşullarında bozulmamalıdır. Kuvvetin, ağır - lığa oranı mümkün olan en yüksek değere sahip olmalıdır. Uy - gulamada kanatlar, ağaç , alüminyum, plastik alaşımlı fiberglas veya çelikten yapılabilirler.

Ağaç, küçük rüzgâr jeneratörlerinin kanatlarının yapımında kullanılır. Kanatlar oyulur ve çelik civatalarla poyraya bağlanır. Orta büyüklükteki makinaların kanatları için ağaç, yapışkan bir madde ile kaplanmış kontrplâk şeklinde kullanılabilir. Ağaç kanat lar, nemin dengeyi ve ağacın kalitesini bozması nedeniyle mut - lak şekilde su geçirmez olmalıdır. Kanatları neme karşı korumak için ağaç, fiberglas veya reçine ile kaplanabilir veya vernik - le cilalanabilir.

Çıkıntılı çitalar şeklindeki alüminyum alaşımı, genel olarak küçük rüzgâr makinalarının yapımında kullanılır. Orta ve büyük boyutlu rüzgâr rotorlarının kanatlarını yapmak için fiberglas ge nellikle imalatçılarca benimsenir. Fiberglas hava koşullarına kar şı direnç gösterir ve kolayca şekillenebilir. Plastik alaşımlı fiberglas ve çeliğin birlikte kullanılarak yapılan kanatlarda imâledilmektedir. Alüminyum alaşımı paslanmaz çelik, çok büyük b boyutlu rüzgâr rotorları için kullanma olasılığı en yüksek seç çeneklerdir. Çünkü bu materyallerden yapılan kanatlar plastik alaşımlı fiberglastan yapılan kanatlardan daha sert olurlar.

Yavaş çalışan makinaların kanatları için galvenizli demâr tabakadan yararlanılır.

BÖLÜM 4

YATAY EKSENİLİ RÜZGÂR TÜRBİNLERİ , KANATLARIN DİZAYNI ve
RÜZGÂR GÜÇÜ ÜRETİM TESİSİNE ETKİ EDEN KUVVETLERİN
SAPTANMASI :

Bir rüzgâr makinasının temel elemanı rotordur. Rotorun yapı-
sını üstlenmeden önce , iki problemin çözümlenmesi zorunludur.

Birincisi : Kanatların aerodinamik şeklinin tanımı, profil se-
çimi, giriş ölçümlmeleri , kalem açıları, kanatların sayısı v.s

İkincisi : Uygun miktarda emniyet payı ile beraber rotorun
en zor çalışma şartlarına dayanmasını sağlamak için materyal
kuvveti ile ilgili olarak kanatların dizaynı.

4.A. ROTORUN AERODİNAMİK ŞEKLİ :

KANAT SAYISI ve ROTORUN ÇAPI :

Bir makinanın en önemli düzenlemesi, makinanın kuruluş amacı
ve yerel rüzgâr hızı gözönünde tutularak yapılır.

Bu nedenle rüzgârlı bir bölgede çalışan bir jeneratör kur-
mayı düşünüyorsak, ayarlama oranını sınırlandırmak için, yüksek
uç hız oranı λ_0 5 ile 8 arasında çalışan hızlı bir rüzgâr
rotorunun seçilmesi daha iyi olur. Bu nedenle, rüzgâr makinası
2 veya 3 kanatlı olacaktır, Rüzgâr hızının düşük veya orta ol-
duğu bir yerde su pompalamak gerekirse, uç hız oranı 1 ile 2
arasında değişen çok kanatlı bir rüzgâr türbini uygun olur.

Uygulamada, kanatların sayısı kanat uç hızı ve makinanın
aksi akım yönündeki rüzgâr hızı arasındaki λ_0 oranına bağlıdır

$\lambda_0 = 1$	için	8 ile 24	kanat
$\lambda_0 = 2$	için	6 ile 12	kanat
$\lambda_0 = 3$	için	3 ile 6	kanat
$\lambda_0 = 4$	için	2 ile 4	kanat
$\lambda_0 > 5$	için	2 ile 3	kanat

Daha sonra rotorun çapı, önceki bölümde gördüğümüz bağıntı-
lardan biriyle saptanmış olacaktır.

$P = 0,15 D^2 V^3$ yavaş çalışan rüzgâr rotoru,

$P = 0,20 D^2 V^3$ hızlı çalışan rüzgâr rotoru,

Şakat bu sorulara cevap bulmak rüzgâr rotorunu inşa edebil-
memiz için yeteriyi değildir.Yapı için aynı zamanda kanat kiri-
şini, rotor ekseninde değişebilir mesafedeki kalem açısının da öğ-
renmek gereklidir.

Bu problemi çözmek için birçok teori ortaya konuldu. Biz
Sabinin, Stefaniak, Hütter ve Glauert tarafından geliştirilmiş
teorilere başvuracağız.Bu teorilerin tümü, bir dönen hava küt-
leleri sistemini tanıtır.

Kendimizi basit bir teoriye ve Massachusset- USA daki Amherst
Üniversitesinin araştırmacıları tarafından geliştirilmiş olan
Glauert hava kütlesi dönme teorisini sınırlandıracağız.

Sonuç olarak, yukarıda sözü edilen farklı teorilerin uygu-
lanmasıyla elde edilen sonuçlar arasında bir karşılaştırma yapı-
cağız.

4.A.I. BASİTLEŞTİRİLMİŞ YELDEĞİRMENİ TEORİSİ :

4.A.I.1. KANAT KİRİŞİNİ HESAPLAMAK İÇİN TEMEL BİR BAĞINTININ SAPTANMASI :

Kanat girişini saptamak için dönme ekseninden $r+dr$, r
aralıkları içinde yerleşmiş olan kesitteki aksial itmeyi iki
yolda değerlendireceğiz. Bu hesaplama, yeldeğirmenin Betz for-
mülüne göre uygun koşullarda çalıştığı varsayılarak yürütülecek
tir.

a) İLK DEĞERLENDİRME :

Betz teorisine göre tüm rotor üzerindeki aksial itme ,

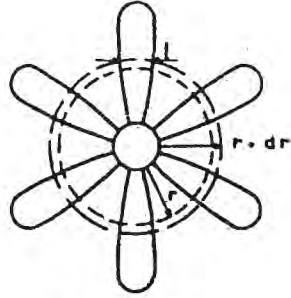
$$F = \frac{\rho S}{2} (V_1^2 - V_2^2)$$

denklemleri ile ,

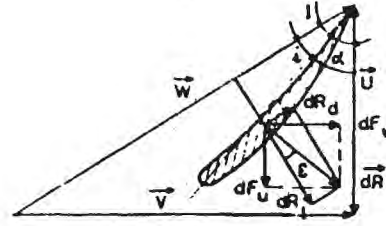
Rotor arasından geçen rüzgârın hızı :

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2}$$

ile verilir. V_1 VE V_2 rüzgâr makinasının arkasında veya önün-
de belli bir mesafedeki rüzgâr hızlarıdır. Üretilen güç $V_o = V_1/3$



Şekil 48



Şekil 49

olduğu zaman max miktarına ulaşır.

Böylece, aksial itme kuvveti F ve taranmış alan arasındaki rüzgâr hızı V :

$$F = \frac{4}{9} \rho S V_1^2 = \rho S V^2 \quad \text{ve} \quad V = \frac{2}{3} V_1 \quad \text{olur.}$$

Taranmış alanın her bir elemanının, özel alanına orantılı olacak şekilde olan toplam aksial itme kuvvetini etkilediğini varsayalım. $r + dr$, r aralaları içine yerleşmiş elemanların katkısı :

$$dF = \rho V^2 dS = 2\pi \rho V^2 r dr \quad \text{olur.}$$

b) İKİNCİ DEĞERLENDİRME :

w olan dönme hızı, r uzaklığındaki kanat elemanının çevresel hızı $U = w r$ olur. Rotor arasındaki mutlak rüzgâr hızı $\vec{V}$, r yarıçapındaki elemanın çevresel hızı $\vec{U}$ ve kanat kesidiyle ilgili hava hızı $\vec{W}$ arasındaki bağıntı $\vec{V} = \vec{W} + \vec{U}$, $\vec{W} = \vec{V} - \vec{U}$ olarak yazılabilir. Uzunluğu dr olan eleman üzerine etki eden aerodinamik kuvvetleri ele alalım. Kaldırma ve sürükleme kuvvetleri için :

$$dR_l = \frac{1}{2} \rho C_l W^2 l dr$$

$$dR_d = \frac{1}{2} \rho C_d W^2 l dr$$

bağıntılarını elde ederiz. Sonuç olarak da,

$$dR = \frac{dR_l}{\cos \xi}$$

bağıntısını elde ederiz. ξ , dR ve dR_l arasındaki açıdır. l , rotor ekseninden r mesafesindeki kanadın kirişidir.

$W = \frac{V}{\sin i}$ olduğu zaman bu aşağıdaki ifadeyi takip eder.

$$dR = \frac{1}{2} \rho C_l \frac{W^2}{\cos \xi} l dr = \frac{1}{2} \rho C_l \frac{V^2}{\sin I} \frac{l dr}{\cos \xi}$$

dR yi rotor eksenine üzerine düşürelim ve toplam aksial itme kuvvetindeki $r + dr$, r aralıkları içindeki kanatların parçalarının dF ye katkısını hesaplayalım.

b , kanat sayısı olduğunda :

$$dF = \frac{1}{2} \rho C_l b \frac{V^2}{\sin^2 I} \frac{\cos(I - \xi)}{\cos \xi} l dr$$

ifadesini elde ederiz.

Bu denklemi önceki paragrafta dF için elde edilen ifade ile eşitlediğimizde aşağıdaki ifadeyi elde ederiz.

$$C_l b l = 4\pi r \frac{\sin I^2 \cos \xi}{\cos(I - \xi)}$$

4.A.I.2. ÖNCEKİ BAĞINTININ DEĞİŞTİRİLMESİ: BASİTLEŞTİRME :

$\cos(I - \xi)$ nın ayrıntısına inmek suretiyle önceki bağıntıda aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$C_l b l = 4\pi r \frac{\tan^2 I \cos I}{1 + \tan \xi \tan I}$$

En uygun çalışma koşullarında rotor arasındaki rüzgârın hızı :

$$V = \frac{2}{3} V_1 \quad \text{olur.}$$

Bu şekilde, sapma açısı :

$$\cotg I = \frac{w r}{V} = \frac{3}{2} \frac{w r}{V_1} = \frac{3}{2} \lambda$$

denklemini ile verilir.

$C_l b l$ miktarını veren denklemdeki bu sonucu önceki denklemlerle değerlendirmeye :

$$C_l b l = \frac{16\pi}{9} \frac{r}{\lambda \sqrt{\lambda + \frac{4}{9} \left(1 + \frac{2}{3\lambda} \tan \xi \right)}}$$

denklemini elde ederiz.

Normal çalışmada , $\tan \xi = \frac{dR_d}{dr_\ell} = \frac{C_d}{C_\ell}$ değeri genellikle çok düşük olur.

En uygun değere yakın gelme açıları için ve genelde kullanılan kanatlar için $\tan \xi = 0,02$ dolayında olur. Bu önceki bağıntının aşağıdaki gibi yazılmasına yol açar.

$$C_{\ell bl} = \frac{16\pi}{9} \frac{r}{\lambda \sqrt{\lambda^2 + \frac{4}{9}}}$$

Kanat ucundaki ve rotor ekseninden r mesafesindeki hız oranı sırasıyla ,

$$\lambda_0 = \frac{w R}{V_1} \quad \text{ve} \quad \lambda = \frac{w r}{V_1} \quad \text{olur.}$$

Bu bağıntı arasındaki w ve V_1 kullanmak suretiyle,

$$\lambda = \lambda_0 \frac{r}{R} \quad \text{yi elde ederiz.}$$

$C_{\ell bl}$ miktarını veren denklemdeki λ nın değerini tekrar göz önünde tutarak :

$$C_{\ell bl} = \frac{16\pi}{9} \frac{R}{\lambda_0 \sqrt{\lambda_0^2 \frac{r^2}{R^2} + \frac{4}{9}}}$$

denklemini elde ederiz.

4.A.I.3. KANAT ŞEKLİNİN UYGULANMASI :

Uç hız oranı λ_0 ve yeldeğirmeninin çapının bilinmesiyle sapma açısı I , aşağıdaki bağıntıdan herbir r değeri için , hesaplanabilir.

$$\cotg I = \frac{3}{2} \lambda = \frac{3}{2} \lambda_0 \frac{r}{R}$$

Kalem açısı α belli olursa, sapma açısında saptanır. ($i=I, \alpha$) Bu şekilde, kanat aerodinamik özelliklerinden, C_ℓ nin değeri elde edilebilir.

Bu yolla verilen bir kanat sayısı için, $C_{\ell bl}$ ifadesi bize

r mesafesinin, rotor ekseninin bir fonksiyonu olarak her kanadın kirisini, güçlük çekmeden saptama olanağı verir.

C_{lb} yi veren ifade, rotor ekseninden belli bir r uzaklığındaki kanat kirisinin uç hız oranı λ_0 arttığı zaman, azaldığını gösterir. Bundan böyle, rotorlar daha hızlı döndükleri için daha hafif olacaklardır.

Belli bir uç hız oranı λ_0 için bağıntı, kanat kirisinin kanat ucundan poyraya doğru arttığında gösterir. Bununla beraber bu kural çarpıtılabilmektedir. Bazı rüzgâr gücü üretim tesislerinde C_l kanat boyunca sabit bir değeri korumaz. Böylece uç kısımdan poyraya doğru azalmaz.

4.A.I.4. KANAT ELEMANININ TEORİK AERODİNAMİK VERİMLİLİĞİ :

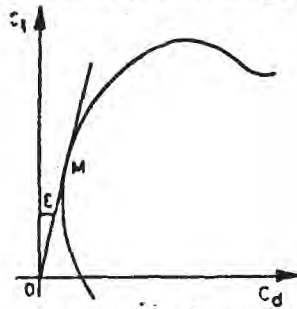
EN UYGUN GELME AÇISI.

$r + dr$, ve r arasına yerleşmiş kanat elemanının aerodinamik verimliliği aşağıdaki oranla tanımlanabilir.

$$\eta = \frac{dP_u}{dP_t} = \frac{w dM}{V dF_v} = \frac{U dF_u}{V dF_v}$$

dF_u ve dF_v , sırasıyla, dönme düzlemi ve rotor eksenindeki aerodinamik güç dR nin yansımalarıdır,

dP_u , rotor tarafından sağlanan güçteki kanat elemanına dr nin katsayısı ve dP_t rüzgâr tarafından dr elemanına sağlanan güç.



Şekil 50

$$dF_u = dR_l \sin I - dR_d \cos I$$

$$dF_v = dR_l \cos I - dR_d \sin I$$

$$\cotg I = \frac{U}{V}$$

olduğu zaman bu aşağıdaki ifade takip eder.

$$\eta = \frac{dR_l \sin I - dR_d \cos I}{dR_l \cos I + dR_d \sin I} \cotg I$$

$$\tan \xi = \frac{dR_d}{dR_l} = -\frac{Cd}{Cl}$$

konulmasıyla önceki ifadeyi aşağıdaki şekilde yazabiliriz.

$$\eta = \frac{1 - \tan \xi \cdot \cotg I}{\cotg I + \tan \xi} \cdot \cotg I = \frac{1 - \tan \xi \cdot \cotg I}{1 + \tan \xi \cdot \tan I}$$

Verimlilik , $\tan \xi$ nun daha düşük olduğu kadar çok daha yüksek olur. Bu sınırdaki $\tan \xi$ sıfıra eşit olsaydı aerodinamik verimlilik 1 e eşit olurdu.

Gerçekte $\tan \xi$ nın değeri, gelme açısına bağlıdır. $\tan \xi$, OM düz çizgisinin Eiffel kutbuna teğet olduğu yerdeki noktaya eşit olan gelme açısı için min. olur. Gelme açısının bu özel değeri için aerodinamik verimlilik max. bir değere ulaşır.

4.A.II. GLAUERT ' İN HAVA KÜTLESİ DÖNÜŞ TEORİSİ :

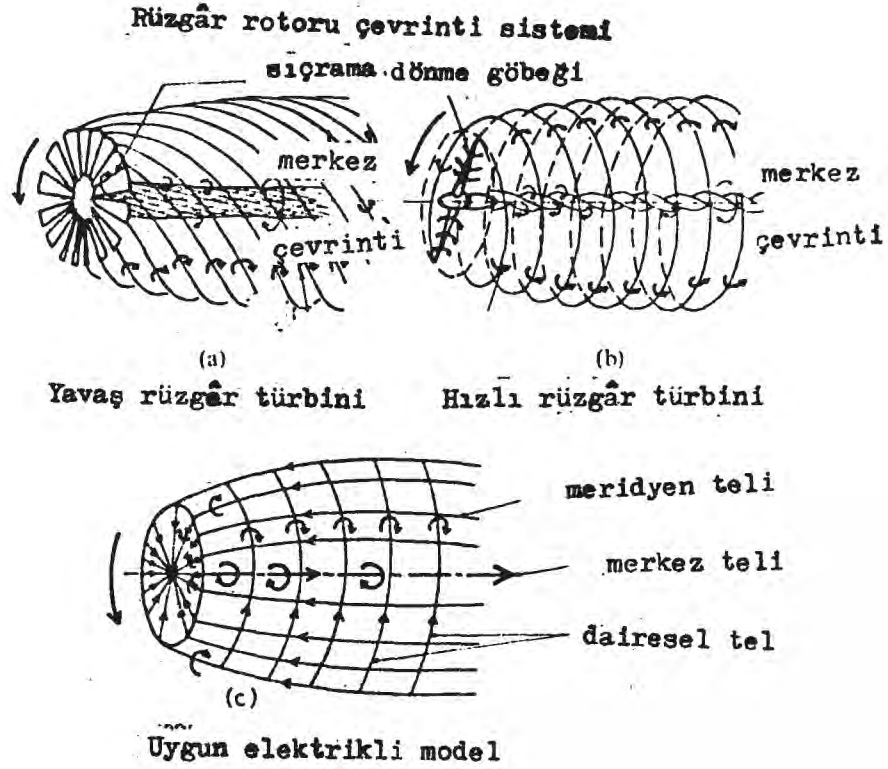
Hava kütlesi dönme teorisinin , rotor arasından geçen hava akımının etkisiyle meydana gelen dönmelerini hesaba katmanın üstünlüğü vardır.

4.A.II.1. BİR RÜZGÂR ROTORUNUN HAVA KÜTLESİ DÖNME SİSTEMİ :

Uzunluğu sınırlı kanatları olan bir rüzgâr rotorunun, rüzgârın ters yönündeki her bir kanat için, biri poyraya yakın diğeri kanat ucunda olan, esas kısım için, iki hava kütlesi dönüşü tarafından oluşturulmuş bir hava kütlesi tabakası vardır. Her bir kanat ucu hava akımında bir helezon çizdiğinden , türbin döndüğü zaman, her bir dönen hava kütlesinin kendisi helezon şeklinde olacaktır.

Hareketini diğer kanatların poyradaki hava kütlesi dönmeleri ne ilave olarak poyranın yanında oluşan dönen hava kütlesiyle aynı olaydır.

Bununla beraber hız alanını saptamak için, her bir kanadın hareketinin yerine, bir sınırdaki dönen hava kütlesini kullanmak mümkündür. Bu şekilde, bir rüzgâr rotorunun hava kütlesinin dönme sistemi şekil 51 de görüleceği gibidir.



Şekil 51

Boşlukta verilen bir noktada rüzgâr hızı engellenmeyen bir rüzgâr hızının bir sonucu ve hava kütlesi dönme sisteminin etkisiyle meydana gelen hız olarak gözönünde bulundurulur. Hava kütlesinin dönme etkisiyle meydana gelen hızın kendisi, aşağıdaki üç hava kütlesi dönme sistemlerinin altaltatasıralanmasının bir sonucu olarak görülebilir.

- Bir sirkülasyon yoğunluğu $b\Gamma = \Gamma_0$ (Γ , herbir kanada sınır olan dönen hava kütlesinin sirkülasyonu, b , kanat sayısı) ile rotor eksenini üzerinde merkezileşmiş, merkezi hava kütlesi.
- Herbir kanada sınır olan dönen hava kütleleri.
- Herbir kanadın ucundan yayılan helezonik dönen hava kütleleri.

4.A.II.2. BENZER ELEKTRİK DEVRESİ ve KENDİLİĞİNDEN MEYDANA

GELEN HIZLARIN SAPTANMASI :

Akışkanlar mekânîği, dönen hava kütlesi tarafından kendiliğinden meydana gelen hızın Biot ve Savart'ın yasalarınca veya irdelenen döner hava kütleleri gibi aynı şekle sahip olan doğru akım tarafından meydana getirilen manyetik alanlar gibi aynı yolda Ampere'ın teoremiyle elde edilebilir.

Bu yolla, önceki dönen hava kütleleri sisteminin yerini şekil :

=) Doğru akım $b I = I_0$ rı taşıyan bir merkezi tel

- Yeldeğirmeni kanatları gibi aynı şekilde düzenlenmiş, herbiri sözü edilen merkezi tele toplam olarak, ortak noktalarında $b I = I_0$ akımını sağlayan bir I akımını taşıyan b tellerinden oluşan bir set ,

- Herbiri, önceden sözü edilen tellere bir I akımını temin eden helezon şeklindeki tellerden oluşan bir set,

Manyetik alanı saptamak için son set, aşağıdaki diğer iki setle değiştirilebilir.

- Rotor eksenine ortak merkezi olan daire şeklindeki teller tarafından oluşturulan set ,

- Meridyen şeklinde sarılmış tellerden oluşturulan set : Tellerin herbiri bir kanada benzer ve bir I akımını iletir.

Kanat sayısının sonsuz olduğu varsayımından hareket ederek , bu tellerin setleriyle meydana getirilen manyetik alanları hesaplayalım. Bu varsayımlarda, kanatlara benzeyen b telleri setinin yerine , merkezinde I_0 akımını alan ve çemberindeki helezon sete aynı akımı veren bir iletim disk kullanılabılır.

İlkönce, dönme eksenine dikey ve diske mümkün olduğu kadar yakın olan, biri rotoru temsil eden diskin rüzgâr yönünde diğer rüzgâra ters yönde yer alan iki düzlemde merkezi tel, disk ve meridyen telleri tarafından meydana getirilen manyetik alanı saptayalım.

Manyetik alanın aerodinamik yapısı, diskin rüzgâr yönü yönünde olduğu gibi rüzgâr yönünün ters yönünde de simetrik olarak oluşmaları nedeniyle, rotor eksenine ortak merkezi olan halkalardan oluşur.

Disk rüzgâr yönünün aksi yönündeki manyetik alanlar, muhtelif teller nedeniyle, katkı unsuru olurlar. Diskin ön tarafındaki durum aynı değildir.

Şu belirtilmelidirki merkezi tel ve meridyen telleri (teorik olarak sonsuz sayıda) tarafından meydana getirilen H_C ve H_M manyetik alanları eksenden eşit bir uzaklıkta, pozisyonu ne şekilde düşünülürse düşünülün, tüm düzlüklerin yakınlığı nedeniyle, ister diskin arkasındaki veya önündeki bir düzlükte isterse diskin kendi düzlüğünde düşünülün, sabit bir değeri muhafaza ederler.

Ampere teoremini, dönme ekseniiyle ortak merkezli olan bir çember boyunca, diskin rüzgâr yönünde uygularsak , manyetik alanın yoğunluğu için dairesel alandan akım geçmemesi nedeniyle sıfır elde ederiz. Bu, diskte akan akımlar nedeniyle meydana gelen H_D manyetik alanının, merkezi tel ve meridyen telleri tarafından meydana getirilen manyetik alanlara eşit yoğunlukta fakat ters yönde olduğunu ifade eder.

$$H_D = H_C + H_M$$

Rüzgâr akım yönünde , bu alanlar katkı unsuru olurlar. Böylece rotor ekseninden r uzaklığında meydana gelen alan :

$$H = H_D + H_C + H_M = 2 H_D$$

Disk merkezi tel ve meridyen telleri tarafından meydana getirilen manyetik alanlar, bu düzlemlerin birbirlerine olan yakınlıkları nedeniyle , aynı yoğunluğu muhafaza ederler.

Diskin kendi yüzeyinin iç kısmındaki alan, diskte akan elektrik akımı nedeniyle, sıfırdır. Gerçekte diskin her bir noktasında, disk merkezi olarak düşünülen noktayı birleştiren doğru bir çizgi ile ilgili simetrik bir pozisyonda yerleştirilmiş ilk köşeli sektör tarafından meydana getirilen karşı manyetik alan bitişik olabilir. Bu alanlar eşit fakat ters yönde olurlar.

Bu , r yarıçapındaki disk alanı içinde elde edilen manyetik alanın:

$$H = H_C + H_M \neq H_D$$

olmasıyla devam eder.

H_D , dönme ekseninden r uzaklığında , çok yakın çevresinde disk tarafından meydana getirilen çevresel manyetik alandır.

Şimdi, dairesel teller yoluyla oluşan manyetik alanı inceleyelim. Manyetik alanın helezon şeklinde bir sargının ortasında aksial olduğu ve bu manyetik alanın $H_s = n_1 I$, eşit bir yoğunluğa sahip olduğu bilinir. n_1 , her uzunluk birimi için tel sayısıdır. Helezon sargının sonunda aynı zamanda aksial olan alan

$$H_s / 2 = n_1 I / 2$$

ifadesine eşit olur.

Rüzgâr türbinini tekrar irdeleyelim. Diskin akım yönünde, kendiliğinden meydana gelen çevresel hız V_0 , çevresel manyetik alan $2H_D$ eşit olur. Rüzgâr akımı, kanatların aksi yönünde kendi eksenini etrafında bir dönme hızıyla döner. Rotor düzleminde kendiliğinden meydana gelen çevresel hız $V_0/2$ ve daha sonra dönme hızı $\Omega/2$ çevresel alan H_D ye eşdeğer olur. Diskin aksi akım yönündeki sıfıra eşit olarak elde edilen manyetik alanda rüzgâr akışının dönme hızını sıfır yapar.

v nin hava kütlesi dönme sistemiyle rüzgâr yönünde kendiliğinden meydana gelmiş aksial hız olduğunu düşünelim. Yukarıdaki aksial alan $n_1 I$ eşit olan bu hız, rüzgâr hızı V_1 in tersi olan bir yönde yönelir.

Dönme düzleminde kendiliğinden meydana gelen aksial hız ancak $v/2$ ye yükselir. Benzer manyetik alan $n_1 I/2$ dir. Sonuçta elde edilen aksial rüzgâr hızı :

$$V = V_1 - \frac{v}{2} \quad \text{rotor arasından,}$$

$$V_2 = V_1 - v \quad \text{rotorun rüzgâr akım yönünden,}$$

Bu iki denklemdeki v yi ortadan kaldırmak suretiyle,

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad \text{ifadesini buluruz.}$$

Böylece Betz teorisiyle elde edilen V nin değeri değişmeden kalır. Rotorun rüzgâr akım yönünde kanatla ilgili, rüzgâr akımının dönme hızı $w + \Omega$ ye yükselir.

$$w + \Omega = hw \quad \text{olsun.}$$

Bu $\Omega = (h-1) w$ yı takip eder.

Bu koşullar altında kanatlarla ilgili olarak rotor düzlemindeki hava akışının dönüş hızı :

$$w + \frac{\Omega}{2} = \left(\frac{1+h}{2} \right) w$$

olarak ifade edilebilir.

Rotor ekseninden bir r uzaklığında bu, bir çevresel hıza eşdeğerde olur.

$$U' = \left(\frac{1+h}{2} \right) \omega r$$

$V_2 = k V_1$ olsun. Rotor arasındaki aksial hız :

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} = \frac{1+k}{2} V_1$$

olarak yazılabilir.

Rotor düzleminde sapma açısı ve nispi hız, r yarıçapına bağlı olarak aşağıdaki bağıntılarla verilir.

$$\cotg I = \frac{U'}{V} = \frac{\omega r}{V_1} \frac{1+h}{1+k} = \lambda \frac{1+h}{1+k} = \lambda e$$

$$W = \frac{V_1 (1+k)}{2 \sin I} = \frac{\omega r (1+h)}{2 \cos I}$$

4.A.II.3. AKSİAL İTME KUVVETİ ve DÖNDÜRME MOMENTİNİN

HESAPLANMASI :

Kanat elemanlarının r ve $r + dr$ aralığı içinde yer aldığını düşünelim. Bu elemanların tabii olduğu kuvvetleri iki şekilde hesaplayalım.

- Profiller üzerindeki aerodinamik hareketi değerlendirmeye,
- Temel dinamik yasalarına r ve $r + dr$ arasındaki hava akışına uygulamayla,

a) İLK DEĞERLENDİRME :

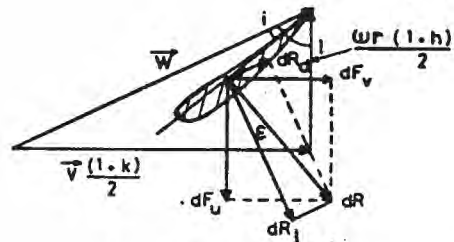
Öncelikli olarak aşağıdaki ifadeleri yazabiliriz.

$$dR_l = \frac{1}{2} \rho C_l W^2 l dr$$

$$dR_d = \frac{1}{2} \rho C_d W^2 l dr$$

dR vektörünü ilk önce rotor eksenine üzerine daha sonra çevresel hız U vektörü üzerine

düşürmek suretiyle, dR nin aksial parçası için :



Şekil 52

$$dF_v = dR_l \cos I + dR_d \sin I = \frac{1}{2} \rho l w^2 dr (C_l \cos I + C_d \sin I)$$

Tegetle ilgili parça için :

$$dF_u = dR_l \sin I + dR_d \cos I = \frac{1}{2} \rho l w^2 dr (C_l \sin I + C_d \cos I)$$

bağıntısını elde ederiz. $\tan \xi = C_d / C_l$ olduğunu hesaba katarak bu denklemleri :

$$dF_v = \frac{1}{2} \rho l w^2 C_l \frac{\cos(I - \xi)}{\cos \xi} dr$$

$$dF_u = \frac{1}{2} \rho l w^2 C_l \frac{\sin(I - \xi)}{\cos \xi} dr$$

olarak yazılabilir. $r, r + dr$ aralığı içinde yer alan kanat elemanlarının, aksial itme kuvvetine katkısı :

$$dF = b dF_v = \frac{1}{2} \rho b l w^2 C_l \frac{\cos(I - \xi)}{\cos \xi} dr$$

Bu katkı aerodinamik döndürme momentinde ise :

$$dM = r b dF_u = \frac{1}{2} \rho b l r w^2 C_l \frac{\sin(I - \xi)}{\cos \xi} dr \quad \text{olur.}$$

b) İKİNCİ DEĞERLENDİRME :

Şimdi, r ve $r + dr$ arasında rotor içinden geçen rüzgâr akışına genel dinamik teoremlerinin uygulanmasıyla bu iki miktarı saptayalım.

Çember arasından akan akımın aksial momentumunu gözönüne alalım. Itme kuvveti dF , aksial hızdaki değişimle, eleman arasından kütle akımı m oranına eşit olur. Yani :

$$dF = m \Delta V = m (V_1 - V_2)$$

$$m = \rho 2\pi r dr V = \rho \pi r dr (1+k^2) V_1$$

olduğunda bu ,

$$dF = \rho \pi r dr V_1^2 (1-k^2) \quad \text{ifadesini takip eder.}$$

Açılı momentumu gözönünde tutarak aynı yoldan başlangıç dönürme momenti :

$$dM = m \Delta w r^2 = m r^2 \Omega$$

bağıntısını elde ederiz. $\Delta w = \Omega$ pervane arasından geçen havanın dönüş hızındaki değişikliktir. Daha sonra ,

$$dM = \rho \pi r^3 dr V_1 (1+k) \Omega$$

$$dM = \rho \pi r^3 dr w V_1 (1+k) (h-1)$$

c) SONUÇ :

V_1 in bir fonksiyonu olarak W nın değerini yerine kullandıktan sonra, yukarıda saptanan dF nin değerinin doğrudan aerodinamik irdelemeye elde edilen değerle karşılaştırma :

$$C_{lbl} = \frac{2\pi r V_1^2 (1-k) \cos \xi}{W^2 \cos (I - \xi)} = \frac{8\pi r (1-k) \cos \xi \sin^2 I}{(1+k) \cos (I - \xi)}$$

Benzer bir şekilde , dM ifadelerinin eşitlemesinden aşağıda ki bağıntı bulunur.

$$C_{lbt} = \frac{2\pi w r V_1 (1+k)(h-1) \cos \xi}{W \sin (I - \xi)} = \frac{4\pi r (h+1) \sin 2I \cos \xi}{(1+k) \cos (I - \xi)}$$

Bu denklemlerden, bazı çalışmalardan sonra aşağıdaki bağıntıların elde edilmesi olasıdır.

$$G = \frac{1-k}{1+k} = \frac{C_{lbt} \cos (I - \xi)}{8\pi r \sin \xi \sin^2 I}$$

$$E = \frac{h-1}{h+1} = \frac{C_{lbt} \sin (I - \xi)}{4\pi r \sin 2I \cos \xi}$$

Yukarıdaki birinci denklemin herbir kısmını ikinci denklemlerle bölmek suretiyle aşağıdaki ifadeyi elde ederiz.

$$\frac{G}{E} = \frac{(1-k)(h+1)}{(h-1)(1+k)} = \cotg (I - \xi) \cotg I$$

4.A.II24. YEREL GÜÇ KATSAYISI :

Çember $(r, r+dr)$ içinden geçen rüzgâr akımından oluşan max güç :

$$dP_u = w dM = \rho \pi r^3 dr w^2 (1+k)(h-1)$$

denklemlerle verilir. Bu değer, yerel güç katsayısına eşdeğerde olur.

$$C = \frac{dP}{\rho \pi r dr V_1^2} = \frac{w^2 r^2}{V_1^2} (1+k)(h-1) = \lambda^2 (1+k)(h-1)$$

λ , wr/V_1 e eşit olur.

İDEAL BİR YELDEĞİRMENİ İÇİN YEREL GÜÇ KATSAYISININ MAXİMUM DEĞERİ :

Yerel güç katsayısının ulaşılabilen max. değerini hesaplayalım.

Bu amaç için, hava direnciyle karşılaşmayan ve sonsuz sayıda kanadı olan hayali bir yeldeğirmenini ele alalım. Her profil için $C_d = 0$ olduğunda $\tan \xi = C_d/C_l = 0$ olsun.

Bu koşullar altında G/E yi veren denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{G}{E} = \frac{(1-k)(h+1)}{(h-1)(1+k)} = \cot^2 \theta = \frac{\lambda^2 (1+h)^2}{(1+k)^2}$$

Basitleştirmeden sonra aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\lambda^2 = \frac{1-k^2}{h-1}$$

Bu denklemden

$$h = \sqrt{1 + \frac{1-k^2}{\lambda^2}} \quad \text{ifadesi bulunur.}$$

Güç katsayısı C_p nin denkleminde h ın bu değerinin bulunması:

$$C_p = \lambda^2(1+k) \left(\sqrt{1 + \frac{1-k^2}{\lambda^2}} - 1 \right)$$

sonucuna götürür. Verilen bir λ değeri için, $\frac{dC_p}{dk} = 0$ olduğu zaman, güç katsayısı max değerine ulaşır.

Hesaplama, maximum değer denklemin çözümünü sağlayan bir k değeri için elde edildiğini gösterir.

$$\lambda^2 = \frac{1-3k+4k^3}{3k-1}$$

Bu denklem aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$4k^3 - 3k(\lambda^2 + 1) + \lambda^2 + 1 = 0$$

$$k = \sqrt{\lambda^2 + 1} \cos \theta$$

Önceki denklemdeki değerinin k olarak kullanılması, $(\lambda^2 + 1)^{3/2}$ ile bölünmesinden sonra aşağıdaki denklemi verir.

$$4 \cos^3 \theta - 3 \cos \theta + \frac{1}{\sqrt{\lambda^2 + 1}} = 0$$

$$4^4 \cos^3 \theta - 3 \cos \theta = \cos 3\theta$$

olduğu zaman :

$$\cos 3\theta = -\frac{1}{\sqrt{\lambda^2 + 1}} \quad \text{yani} \quad \cos(3\theta - \pi) = \frac{1}{\sqrt{\lambda^2 + 1}}$$

denklemini yazabiliriz. Bu denklemde :

$$\theta = \frac{1}{3} \cos^{-1} \left(\frac{1}{\sqrt{\lambda^2 + 1}} \right) + \frac{\pi}{3} = \frac{1}{3} \tan^{-1} \lambda + \frac{\pi}{3}$$

denklemini takip eder. λ nın her bir değeri için θ yı, daha sonra k yı ve bunun içinde C_p nin maximum değerini saptamak olasıdır.

4.A.II.5. SAPMA AÇISI ve C_{lbl} MİKTARININ EN UYGUN DEĞERİ :

Sapma açısı I ve C_{lbl} değeri için aşağıdaki denklemleri elde etmiştik.

$$\cot I = \lambda_e = \lambda \frac{1+h}{1+k}$$

$$C_{lbl} = \frac{8 \pi r (1-k) \cos \xi \sin^2 I}{(1+k) \cos(I - \xi)}$$

Önceki paragrafta elde edilen sonuçlara göre θ açısıyla ilgili bilgi k nın saptanmasını, daha sonra h ve sonuç olarak λ_e ve I nın saptanmasını sağlar.

C_{lbl} miktarının değerlerini hesaplamak için biz yine , kanat hava direnci olmayan ($\xi = 0$) hayali bir yeldeğirmenini irdeleye ceğiz.

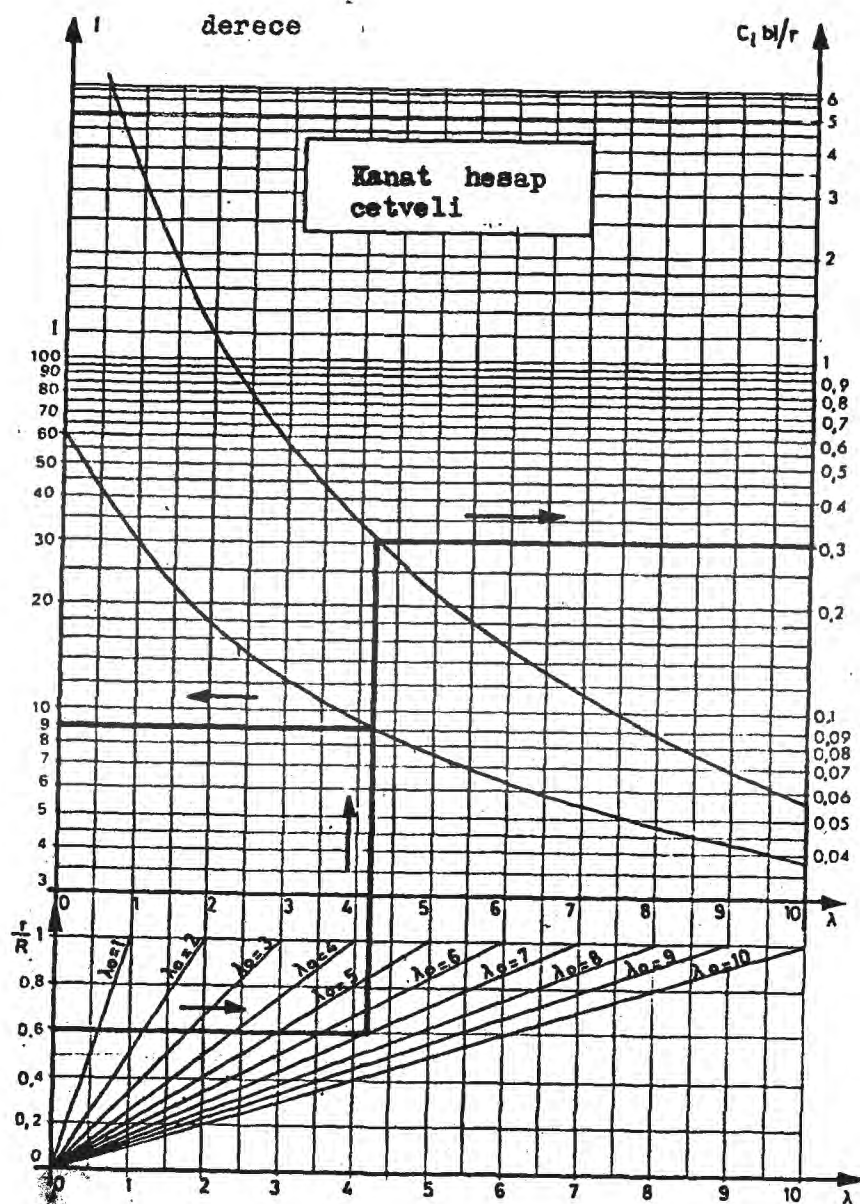
Bu koşullar altında, C_{lbl}/r ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{C_{lbl}}{r} = \frac{8 \pi (1-k)}{(1+k)} \frac{L}{\lambda_e \sqrt{\lambda_e^2 + 1}}$$

En uygun çalışma koşullarında olması için yukarıdaki bağıntılar bize , sapma açısı ve C_{lbl} miktarını saptama olanakını sağlar. Herhangi bir r yarıçapındaki kalem açısı ve kanat kirişini tespit etmek için , bu miktarlarla ilgili bilgi gereklidir

Yukarıdaki sonuçların rüzgâr rotoru dizaynlarına uygulanmasını kolaylaştırmak üzere λ_e , k , h , C_p , C_{lbl}/r miktarları, 0,1 ve 10 arasında değişen farklı değerler için, bilgisayara verilmiştir.

Aynı zamanda C_{lbl}/r ve I miktarlarının değişkenliğini λ nın bir fonksiyonu olarak gösteren bir diyagram yapılmıştır. Bu diyagram bize rüzgâr türbini çalışmalarının verilen bir uç hız oranı için bir maksimum değere ulaşmasına olanak vermek üzere, kanatlara verilecek geometrik özellikleri cabucak saptama olanakını sağlar.



Diyagramın kullanılması zorluk çıkarmaz. Bir kez rüzgâr türbini çalışmalarını için en uygun duruma getirilmesi zorunlu olan hız oranı λ_0 seçildi. Bu, r yarıçapındaki C_{bl}/r ve I miktarlarını elde etmek için, daha düşük eksenler sisteminde irdelenen kesidin pozisyonunu r/R oranına eşdeğerde olan noktadan grafik üzerinde çizilen okları takip etmek yeterli olur. I ve C_{bl} nin değerleri sırasıyla sol ve sağ dikey eksenler üzerinde okunur. Daha aşağı koordinat sistemindeki eğik düz çizgiler : $\lambda = \lambda_0 r/R$ ifadesiyle çözümlenmiş bir şekilde temsil edilirler.

Her doğru çizgi bir λ_0 değerine eşdeğerde olur.

$\lambda_0 = 7$ için monogram, $r = 0,6$ yarıçapında $C_{bl}/r = 0,3$ ve $I = 9^\circ$ verir.

Aynı yolda, irdelenen kesitteki hız oranının : $\lambda = \lambda_0 r/R = 7 \cdot 0,6 = 4,2$ olduğunu hesaba katarak tablo dan, $\lambda_0 = 4,2$ için $I = 8^\circ 928$ ve $C_{bl}/r = 0,305$ için, grafikte verilen sonuçlarla yakından uyumlulukta bulunan değerleri elde ederiz.

Gelme açısı i bilindiğinde, kaldırma katsayısı C_l ve kalem açısı $\alpha = I - i$ saptanabilir. Kanatların b sayısı verildiğinde, r yarıçapındaki kanat kirişi hesaplanabilir.

Böylece sorun, gelme açısının seçimine indirgenir.

4.A.II.β. RÜZGÂR DİRENCİ ÖNEMSENMEYECEK KADAR AZ OLMAYAN

YETERSİZ KANATLARIN KULLANILMASIYLA ULAŞILABİLEN

YEREL GÜÇ KATSAYISI. EN UYGUN GELME AÇISI :

Kanat elemanlarının r ve r+dr arasına yerleştirildiğini göz önünde tutalım.

Öncelikli olarak, yerel güç katsayısı aşağıdaki bağıntıyla tanımlanır :

$$C_p = \frac{w dM}{\rho \pi r dr v_1^3} = \frac{V dF}{\rho \pi r dr v_1^3} - \frac{w dM}{V dF}$$

$$C_p = \frac{V dF}{\rho \pi r dr v_1^3} - \frac{U dF_u}{V dF_v}$$

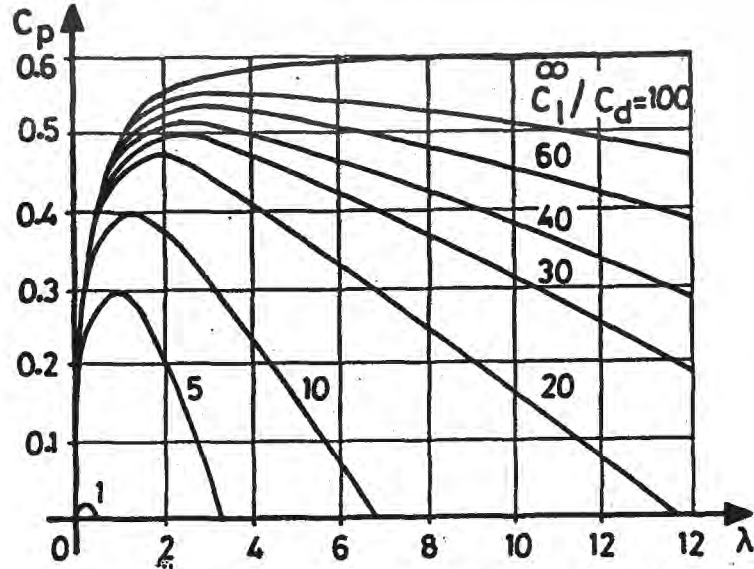
Değerleri dF , dFu , dFv ve V olarak kullanma ve :

$$\cot g I = \lambda \frac{1+h}{1+k} \quad \text{ve} \quad \tan \xi = \frac{Cd}{C\ell}$$

bağıntılarını hesaba katarak:

$$C_p = \frac{(1+k)(1-k^2)}{(1+h)} \frac{1-\tan \xi \cot g I}{1+\tan \xi \tan I}$$

$\tan \xi = 0$ olduğu zaman, ikinci kısmın birinci kesri r yarı çapında hayali bir yeldeğirmenin güç katsayısını temsil eder. Bu katsayının tablo daki koşullar yerine getirildiği zaman max. değerine ulaştığını görmüştük. $\tan \xi$ nun sıfırdan farklı olduğu yerdeki hipotezde şekil 53 ve λ nın bir fonksiyonu olarak $Cd / C\ell$ oranının muhtelif değerleri için ulaşılabilen max güç katsayısını gösterir. Grafik yüksek kanat uç hızı oranı λ_0 için iyi bir çalışma elde etmesi, daha düzgün parçalardan oluşan kanatları oluşturur.



Şek. 53. Maximum sınırlı güç değişimi ($b = x$)

Verilen bir kanat uç hız oranı λ_0 için, $\tan \xi$ nun daha düşük olması kadar güç katsayısı çok daha yüksek olur. $\tan \xi$ nun min değeri yani $Cd / C\ell$ oranının min değerine eşdeğer olan Eiffel noktasında max değerine ulaşır.

4.A.II.7. KANAT SAYISININ ETKİSİ :

Önceki teori , kanat sayısının sonsuz olduğunu varsayar. Gerçekte kanat sayısı sınırlıdır.

Dönen hava kütlelerinin yoğunluğunun daha büyük olması nedeni niyle enerji kayıpları meydana gelecektir. Bu enerji kayıpları, Rohrbach , Worobel, Goldstin ve Prandtl tarafından incelenmiştir.

Prandtl ' a göre oluşan verimlilik eksikliği, b kanat sayısına sahip olan bir rüzgâr makinası için, aşağıdaki bağıntıyla verilir.

$$\eta_b = \left(1 - \frac{1,39}{b} \sin I_0 \right)^2$$

I_0 : Kanat ucundaki sapma açısıdır.

Rüzgâr rotorunun, en uygun koşullara yakın koşullarda çalıştığı yerdeki hipotezde :

$$\sin I_0 = \frac{1}{\sqrt{1 + \cot^2 I_0}} = \frac{2}{3\sqrt{\lambda_0^2 + 4/9}}$$

Prandtl bağıntısının bu koşullara uygulandığını varsaydığımız da aşağıdaki bağıntıyı elde ederiz.

$$\eta_p = \left(1 - \frac{0,93}{b\sqrt{\lambda_0^2 + 0,445}} \right)^2$$

Şunu işaret edelimki , orijinal Prandtl bağıntısı kesinlikle düşük yüklü pervaneler için kurulmuştur. Gerçekte, normal şekilde yüklenmiş veya bir rüzgâr tüneline denemiş rüzgâr rotorları için , bilgisayar programlarında yukarıdaki ifadenin kullanılması, deneme sonuçlarıyla sıkı bir uyum içindeki güç katsayıları sonucunu getirir.

4.A.II.8. KANAT KİRİŞİNİN ve KALEM AÇISININ PRATİK

OLARAK SAPTANMASI :

Gelme açısını seçmenin bir yöntemi, bu şekilde kanatların geometrik yapısını tanımlamanın bir yöntemi yoktur.

Daha yüksek verimlilik elde etmek için her kesitte, karşı direnç/kaldırma oranı C_d/C_l yi azaltan en uygun i_o değerine eşit olan bir gelme açısını ele alabiliriz. Grafikten elde edilen sapma açısının yanında, kalem açısı :

$$\alpha = I - i_o$$

bağıntısıyla saptanır.

Kaldırma katsayısı C_l bilinirse r yarıçapındaki profil kirişi C_{lb}/r değerlerinden zorluk çekmeden hesaplanabilir.

Gerçekte bu yöntem çok az uygulanır. Etkin bir şekilde, kanat ucunun yanında, gelme açısı için kanadın her uzunluk birimi için taranmış alanın önemi nedeniyle, en uygun değeri alınması doğru olursa, yöntem, çok sık olarak, rotor poyrasının yanındaki giriş ile ilgili önemli sonuçlara götürür.

i_o a eşit olan kaldırma katsayısı genel olarak pek yüksek değildir. (0,9 civarında) Poyraya doğru daha fazla yükselen bir gelme açısının alınmasıyla, bununla beraber 0,1 den daha düşük $\tan \epsilon$ nun değerine eşdeğerde olan Eiffel kutbunun artan kısmındaki olan temsil edici noktayı muhafaza etmeyle, poyraya yakın kanadın birim uzunluğu için olan taranmış alanın küçük olması nedeniyle verimliliği önemli derecede azaltmaksızın kanat girişini azaltırız. Örneğin $r > 0,8 R$ için olan i_o dan poyranın yanındaki daha yüksek bir değere doğru değişecek olan gelme açısının değişkenliğini seçeceğiz.

Uygulamada genel pervaneler için (Gottingen 623, NACA 4412, 4415 , 4418, 23012, 23015, 23018) max gelme açısı, rotor milinden 0,2 R uzaklığındaki normal çalışmada 10° ile 12° eşit olarak seçilecektir. Böyle bir gelme açısı değeri için kaldırma katsayısı 1,2 , 1,3 dolayındadır. Bu şekilde bir rotorun uyarlamasında varolan diğer bir olasılık H miktarının kanat boyunca sabit bir değeri muhafaza etmesidir.

$$H = 2\pi r \tan \alpha = 2\pi R \tan \alpha_o$$

Kanat ucundaki kalem açısı α_o , $I_o - i_o$ eşit seçilir. I_o , kanat ucundaki sapma açısıdır.

α ile ilgili bilgi i nin daha sonra C_l ve rotor ekse-

ninden herhangi bir r mesafesindeki kirişin saptanmasına olanak sağlar. Bununla beraber gelme açısının rüzgâr türbini verimliliği ni kuşkulandırabilen $0,2R$ ile $0,3R$ arasında istenmeyen değerlere ulaşamadığının doğruluğunu denemek kolay olacaktır.

Kanat boyunca gelme açısının değişkenliği iyi seçildiye, kanadın uzunluk birimi başına olan taranmış alanın kanat ucundan poyraya doğru azalması nedeniyle verimlilik azalması azdır. (Bu azalma, gücü sabit bir değerde muhafaza etmek için, rotor çapının az bir şekilde arttırılmasıyla kolaylıkla önlenabilir.) Diğer taraftan hem kirişte hemde kalem açısındaki azalmayı takip eden başlangıç döndürme momentinin azalması uygun değildir. Bununla beraber bu çözüm daha hafif rüzgâr rotorları yapılmasına yol açması nedeniyle sık sık uygulanır.

Dikkâte alınması gereken diğer bir faktörde imalatla ilgili dir. Önceden sözü edilen yöntemlerin uygulanması ile saptanan kanat şekilleri bükülürler. Fabrikasyon zorlukları fiberglas yapı kullanıldığında azalır. Ön ve arka kenarlar düzgün yapılabilir y veya yapılamazlar. Fakat çelik veya alüminyum kullanıldığında hem ön, hem arka kenarların düzgün olması arzu edilir.

4,A.III. RÜZGÂR TÜRBİNİ ÖZELLİKLERİNİN HESAPLAMALARI :

Mekanik özelliklerin λ_0 ın bir fonksiyonu olarak güç katsayısı ve döndürme momentinin saptanması özellikle ilginçtir. Yaptımdan önce bu özelliklerle ilgili bilgi, sonuçta en ekonomik şekilde verimliliği arttırmak için, başlangıç dizaynında bazı düzeltmelerin yapılmasına olanak sağlar.

Fakat biz ilk önce , öncelikle ulaşılmış sonuçları hatırlatmalıyız. Önce r ve r+ dr arasında bulunan kanat elemanlarına etki eden aerodinamik kuvvetlerin aksial itme kuvveti dF ve başlangıç döndürme momenti dM yi yazarsak.

$$dF = \rho \pi r V_1^2 (1-k^2) dr$$

$$dM = \rho \pi r^3 \omega V_1 (1+k)(h-1) dr$$

I ve W nun V ile ve k nın h ile olan ilişkili bağıntılarını hesaba alarak+

$$W = \frac{V_1(1+k)}{2\sin I} = \frac{wr(1+h)}{2\cos I}$$

$$\cotg I = \lambda \frac{1+h}{1+k} = \lambda_0 \frac{r}{R} \frac{1+h}{1+k}$$

olur. Daha sonra aşağıdaki bağıntıları kurduk.

$$G = \frac{1-k}{1+k} = \frac{C\ell b l \cos(I-\xi)}{8\pi r \cos \xi \sin^2 I} \quad \text{ve}$$

$$E = \frac{h-1}{h+1} = \frac{C\ell b l \cos(I-\xi)}{4\pi r \sin 2I \cos \xi}$$

dF ve dM ifadelerinin integralinin alınmasıyla aksial itme kuvveti ve döndürme momenti için :

$$F = \int_0^R \rho \pi V_1^2 (1-k^2) r dr$$

$$M = \int_0^R \rho \pi V_1 w (1+k)(h-1) r^3 dr$$

bağıntılarını elde ederiz. Daha sonra aksial itme kuvveti ve döndürme moment katsayıları için:

$$C_F = \frac{2F}{\rho S V_1^2} = 2 \int_0^1 (1-k^2) \frac{r^2}{R^2} d\left(\frac{r^2}{R}\right)$$

$$C_M = \frac{2M}{\rho S V_1 R} = 2 \int_0^1 \lambda (1+k)(h-1) \frac{r^2}{R^2} d\left(\frac{r^2}{R}\right)$$

bağıntılarını göz önünde bulundurarak :

$$\lambda = \frac{1+k}{1+h} \cotg I \quad \text{ve} \quad E = \frac{h-1}{h+1}$$

önceki bağıntı aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$C_M = 2 \int_0^1 (1+k)^2 E \cotg I \frac{r^2}{R^2} d\left(\frac{r}{R}\right)$$

$$f_r = (1-k^2) \frac{r}{R} \quad \text{ve} \quad m_r = (1+k)^2 E \frac{r^2}{R^2} \cotg I$$

olsun. Bundan aşağıdaki denklemleri yazabiliriz.

$$C_F = 2 \int_0^1 f_r d\left(\frac{r}{R}\right)$$

$$C_m = 2 \int_0^1 m_r d\left(\frac{r}{R}\right)$$

En uygun çalışmada k ve h ın değerleri her bir profil için bilinir. Böylece aksial itme kuvveti ve döndürme momentinin hesaplanması kolaydır. Fakat rüzgâr rotoru λ_0 dan farklı bir uç hız oranına eşdeğerde olan bir dönme hızıyla dönerse, gelme açıları aynı değildir. Bu nedenle k ve h değerleri, aksial itme ve döndürme momenti ve daha sonra C_F ve C_m katsayıları da değişir.

Uygulamada C_F ve C_m yi saptamak için r/R oranının birkaç değerini irdeleneceğiz. (örneğin 0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1)

Eşit yarıçaplarda gelme açısını keyfi bir şekilde değiştireceğiz. Dereceden dereceye doğru ve r/R oranının her bir değeri için hesaplayacağız.

- İrdelenen gelme açısına iğave etmeyle elde edilen sapma α açısı I , kalem açısı α , ($I = i + \alpha$),

- C_l , ξ nun değerleri,

- G , E , k ve h ın değerleri,

$$\lambda_0 = \frac{R}{r} \frac{1+k}{1+h} \cotg I \quad \text{bağıntısını kullanmak suretiyle}$$

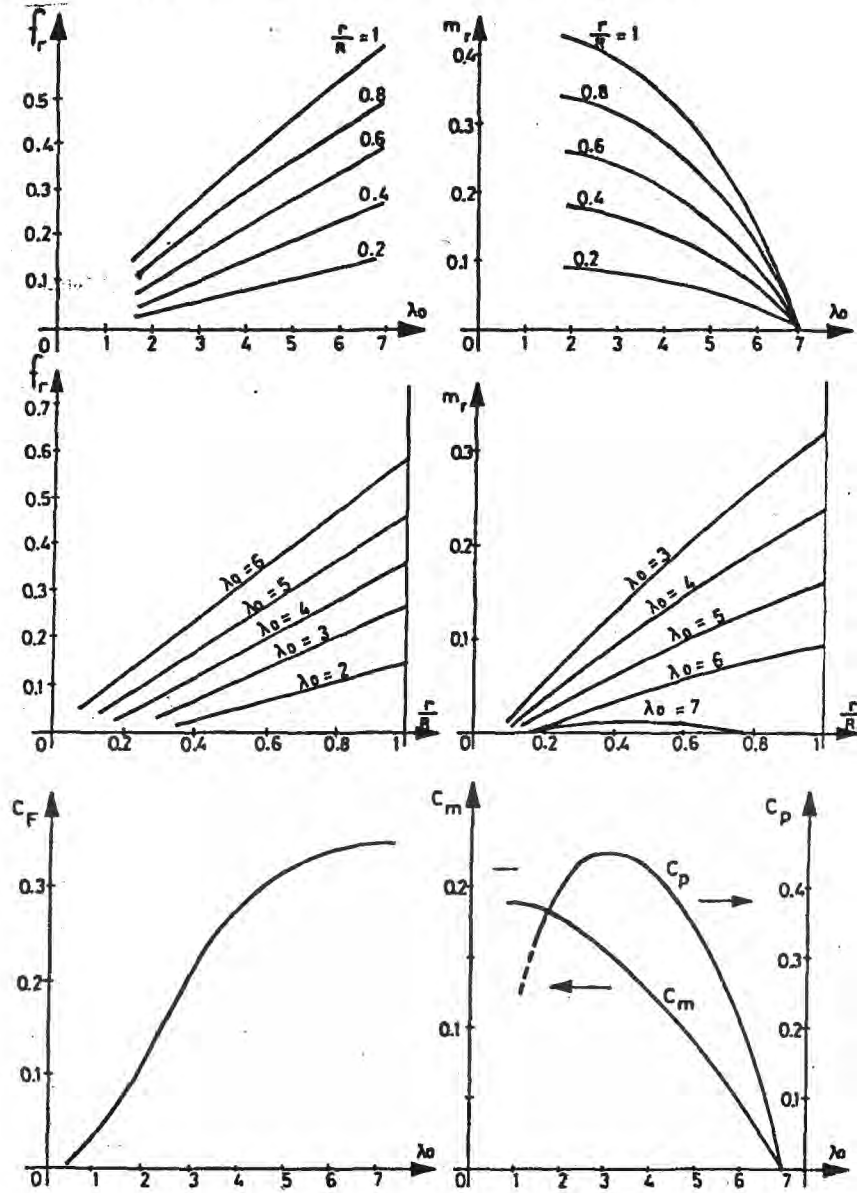
uç hız oranı λ_0 , f_r ve m_r nin miktarları,

Yapılan hesaplamalarla :

- λ_0 ın bir fonksiyonu olarak f_r ve m_r nin değişkenlik eğrileri her bir eğri verilen r/R değerine eşdeğerde olur.

- Önceki iki grafikten alınan, λ_0 ın bir fonksiyonu olarak f_r ve m_r nin değişkenliklerini çizmek olasıdır.

λ_0 ın bir fonksiyonu olarak C_F ve C_m katsayılarının farklı



Şekil 54

değerleri, λ_0 değerlerinde işaretlenmiş muhtelif eğriler ve yatay eksenler arasında yerleşmiş alanları ölçme ve daha sonra, C_F ve C_m ifadelerine göre alanları 2 ile çarpmak suretiyle elde edilirler.

Bu bölümde C_p güç katsayısının $C_p = C_m \lambda_0$ bağıntısıyla, C_m ile ilgili olduğunu göstermiştik. Bu nedenle C_m ve C_p yi λ_0 eğrisinden saptamak kolaydır. Uygulamada, hesaplamaların uzun olması nedeniyle bilgisayar kullanılması daha iyi olur.

4.A.IV. MUHTELİF TEORİLERLE ELDE EDİLEN SONUÇLARIN

KARŞILAŞTIRILMASI :

Bu bölümün başında işaret edildiği gibi rüzgâr rotorlarının birkaç teorisi vardır. Birini veya diğerini uygulamayla elde edi

Tablo 3 Miktar C_{bl}/r

λ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Simplified method	4.65	1.32	0.608	0.345	0.222	0.155	0.114	0.087	0.069	0.056
Hütter	3.5	1.20	0.58	0.32	0.215	0.155	0.12	0.08	0.07	0.055
Stefaniak	3.37	1.19	0.572	0.33	0.216	0.152	0.114	0.088	0.069	0.056
Sabinin	3.71	1.31	0.63	0.363	0.237	0.167	0.125	0.097	0.076	0.062
Glauert	3.37	1.19	0.576	0.334	0.217	0.152	0.112	0.086	0.068	0.056

Tablo 4 Eğilme açısı I

λ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Simplified method	33°7	18°	12°	9°5	7°6	6°3	5°5	4°8	4°2	3°8
Hütter	30°	18°	12°	9°2	7°6	6°3	5°5	4°5	4°2	3°8
Stefaniak	30°	17°7	12°3	9°36	7°54	6°3	5°5	4°5	4°2	3°8
Sabinin	30°	17°5	12°	9°5	7°6	6°3	5°5	4°5	4°2	3°8
Glauert	30°	17°7	12°29	9°36	7°54	6°3	5°42	4°75	4°23	3°8

len sonuçlardaki farklılıkları göstermek için, ençok bilinen her teori için en uygun çalışma koşulları altında C_{bl}/r miktarını ve I sapma açısının değerlerini hesaplamıştık.

Sapma açısı I ve C_{bl}/r miktarının değerleri :

- Bu bölümün başlangıcında verilen bağıntılara göre basitleştirilmiş yöntem için ,
- Forschung 19, Heft 1 de yayınlanan " Windrad grösster Leistungabgabe " çalışmasından tablodaki Stefaniak yöntemi için,
- Yeni Enerji Kaynakları ile ilgili Roma toplantısında Hütter tarafından sunulan bir bildiride yayınlanmış olan bir grafikten Hütter teorisi için ,
- NACA tarafından Rusçadan İngilizceye çevrilerek yayınlanan I. Shefter ' in yazdığı " Wind Powered Machines " kitabından alınan formüllerden Sabin ' in teorisi için, saptanmıştır.

Tablolar sapma açıları ile ilgili olarak C_{bl}/r değerlerinin sapmasının küçük olduğunu gösterir.

Bununla beraber Sabin ' in teorisince elde edilen değerler, diğer yöntemlerle hesaplanan değerlerden % 10 dolayında daha büyüktür.

4.B. KANAT YAPISININ SAPTANMASI :

Normal çalışmada, kanatlar savurma kuvvetlerine ani rüzgâr değişikliklerine eşlik edebilen yönlenme değişiklikleri tarafından meydana gelen eğilme momentlerine karşı dayanıklı olmalıdır. Rüzgâr türbini rüzgâra karşı durduğunda kanatlar kırılmaksızın en şiddetli fırtınalarda karşı koymalıdırlar.

4.B.1. NORMAL ÇALIŞMADA ANİ RÜZGÂR DEĞİŞİKLİKLERİ NEDENİYLE MEYDANA GELEN EĞİLME GERİLMELERİNİN SAPTANMASI :

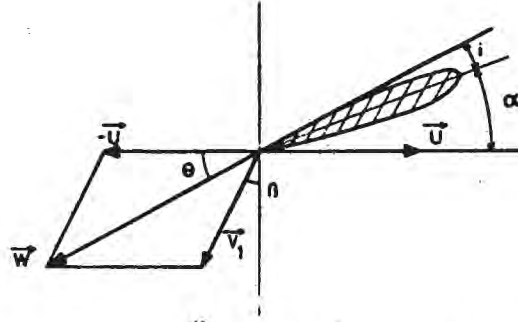
Ani rüzgâr değişiklikleri rüzgâr hızının artması ve yön değişikliklerinin sonucu olarak kanatlarda eğilme gerilmesinin artmasına yol açarlar. Ani rüzgâr değişiklikleri sırasında rüzgâr hızı lsn içinde 15 ile 20 m/sn değişebilir ve rüzgâr yönü aynı süre içinde birkaç düzine derece değişebilir. Böylece kanatların uygun olmayan bir gelme açısı altında rüzgâr hücumuna uğrama olayı meydana gelir. Sonuç olarak bu etki eğilme momentinde bir artışa yol açar. Sappa açısındaki değişkenlik rüzgâr hızının nispi yükselişinden daha yüksek bir basınç artışına yol açar. Temelde rüzgâr yönü değişiklikleri yatay ve çok anidir.

Makina ataleti ve yön değişikliğinin çabukluğu nedeniyle rüzgâr türbininin eksenini kısa bir zamanda rüzgâr yönü değişikliklerine tekrar yönlenemez. Bu nedenle rüzgâr türbini eksenini ve rüzgâr yönü arasındaki açının 30° ve 40° ve hatta daha fazlasına kadar ulaşması olayı meydana gelebilir. Aynı zamanda rüzgâr hızı geçici olarak yükselebilir. Ani rüzgâr değişikliğinin kısalığını ve yönünü hesaba katarak gerçek rüzgâr azalmaksızın çok sıkça kanatlara ulaşabilir.

Baha çok yüklü olan kanatlar gerçek rüzgâra karşı hareket eden ve dikey pozisyonda bulunan kanatlardır. Böyle bir kanadı gözönüne alalım. β rüzgâr türbini eksenini ve gerçek rüzgâr yönü arasındaki açı olduğunu kabul edelim.

Çevresel hız $U = U_{or}/R$ de hareket eden rotor ekseninden r mesafesindeki kanat kesidi, nispi rüzgâr hızının etkisi altına dadır.

$$W_1 = \sqrt{U^2 + V_1^2 + 2 UV_1 \sin \beta}$$



Şekil 55

Bu rüzgârın yönü, aşağıdaki gibi bir θ açısıyla dönme düzlemine doğru eğilim gösterir.

$$\tan \theta = \frac{V_i \cos \beta}{U + V_i \sin \beta}$$

Kesidin kirişine dikey bir şekilde etki eden uzunluk birimiyle aerodinamik kuvvetin parçası :

$$f_n = \frac{1}{2} \rho C_n l w^2$$

olur. l : kiriş

C_n : gelme açısı $i = \theta - \alpha$ ya eşit olan Lilienthal'ın aerodinamik katsayısı.

Verilen U_0 ve V_i hızları için, β nın birkaç değerini irdemeyle $C_n w$ miktarıyla ulaşılabilen max değeri ve sonuç olarak rotor ekseninden r uzaklığında yer alan herhangi bir kesitteki f_n nin bir max değerini hesaplamak olasıdır.

Büyük aerogenerator kanatlarının genellikle küçük bir bükümü vardır. Bu eğilme gerilmelerinin saptanması için savsaklanabilir bir büküm olarak irdelenebilir. Bu şekilde elde edilen değerler gerçek gerilmelerden biraz yüksektir fakat farklılık azdır.

Yukarıdaki varsayımda kanat ucu ve dönen ekseninden x uzaklığında yer alan kesit arasında etki eden aerodinamik kuvvetler nedeniyle max eğilme momenti:

$$M_x = \int_x^R (x - r) f_n M dr$$

ye yükselir.



Şek.56 xx' boyuna nötr eksen

f_{nM} , f_n nin max değeridir.

Bu şekilde kanadın dip kısmından x uzaklığındaki kesitte olan eğilme gerilmesi :

$$R_f = \frac{M_x \cdot V}{I_x}$$

değerine ulaşır. I_x , kesidin uzunlamasına nötr eksenine ilgili kesidinin geometriksel atalet momentini, V , bu eksenenden daha çok yüklenen dokuya doğru mesafeyi temsil eder.

Kanatların kesit şekli ve rüzgâr türbinlerinde genellikle kullanılan özel şekliyle bu doku üst kısmı sıkılan kemerli bir dokudur.

Doku, kullanılan materyale bağlı olarak verilen bir değerde R_f yi sınırlamak için hesaplanacaktır.

Şu belirtilmelidir ki , elde edilen gerilmeler rotor eksenine paralel ve sürekli olduğu varsayılan itibarı rüzgâr akışında görülen normal gerilmelerden çok daha yüksektir. Kanatlar önceki yöntemlere göre aerodinamik bir şekliyle saptanmış olsaydı etkin bir hesaplama, max gerilmelerin rotor ekseninden yaklaşık 0,6R lik bir uzaklıkta yer alıp , kanadın alt kısmında yer almadığını gösterir.

4.B.2. NORMAL ÇALIŞMADA SAVURMA KUVVETLERİ NEDENİYLE MEYDANA GELEN GERİLMELER :

Kanatlar rotor miline dikey olduğu zaman rotor ekseninden r ve r+ dr uzaklığı arasında yer alan kanat elemanlarında meydana gelen savurma kuvveti :

$$dF_c = \rho S w^2 r dr$$

bağıntısı ile verilir.

S : x uzaklığında kanadı oluşturan materyalin kesididir. Bu nedenle savurma kuvveti nedeniyle meydana gelen bu kesitteki

gerilmeler :

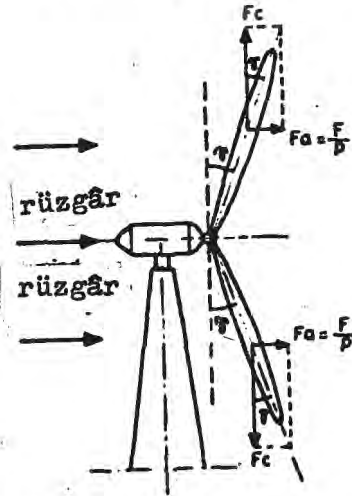
$$R_c = \frac{F_c}{S_x} = \frac{1}{S_x} \int_0^R \rho S w^2 r dr$$

ye yükselir.

Savurma kuvvetlerinin varlığının bir sonucu olarak eğilme momenti tarafından uzatılmış olan dokular daha çok uzar ve sıkıştırılmış olan dokular sıkışmalarını azalttırırlar. Normal çalışmada yerçekimi kuvvetleri nedeniyle meydana gelen gerilmeler savurma kuvvetleriyle meydana gelen gerilmelerle kıyaslandığında daha düşük olurlar.

4.B.3. NORMAL ÇALIŞMADA SAVURMA KUVVETLERİYLE , DÖNDÜRME KAYBININ KARŞILANMASI :

Kanatlar , kanat eksenleri dönme eksenine aşağıdaki bağıntıya göre saptanan, 90° den daha düşük bir açı yapmaları için, poyraya bağlandıkları zaman normal çalışmadaki gerilmeler önemli derecede azalır. Bu durumda kanatlar tarafından taranan yüzey koni şeklinde bir yüzeydir. Bu düzenlemeye genellikle " arkaya doğru meyillenme " veya " konikleşme " denir.



Sekil 57

Aerodinamik kuvvetin momenti savurma kuvvetlerinin momentiyile dengelenir. γ açısı iyi seçilirse , kanatların yalnız gerilmelerin etkisi altında çalışmaları için, elde edilen eğilme momenti sıfıra eşit olabilir.

F_a nın aksial itme kuvveti , b nin kanat sayısı F_c nin herbir kanada etki eden savurma kuvveti olduğunu ele alalım.

$$\tan Y = \frac{F_a}{b F_c}$$

olduğu zaman düşünülen şartlar yerine getirilmiş olur.

Normal çalışmada, ani rüzgâr değişikliği olmadığı zaman, kanat gerilmeleri kendi başına fonksiyonunu yerine getiren savurma kuvvetlerince yaratılmış olan gerilmelerden ender olarak daha yüksek olur.

Y açısının sabit bir değeri için, kaybın tam olarak karşılanması, dönme hızının tek bir değeri hariç gözlenemez.

Bu sorunu çözmek için, bazı rüzgâr gücü üretme tesislerinde kanatlar, poyraya menteşeyle tıtturulur. Y açısı öyle bir şekil de değişikliği eğilme momentini dengeyer. "Konikleşme" değişken olabilir ve kanatlar birbirinden bağımsız olarak "konikleşebilir.

Fakat, nasıl bir düzenleme uyarlanırsa uyarlansın, normal çalışmada kanatlar ani rüzgâr değişiklikleriyle oluşan eğilmeden tam olarak izole edilemez. Bununla beraber kanatlar, rüzgâr türbini rüzgâra karşı durduğu zaman, meydana gelen eğilme momentine karşı koyabilmelidir.

Gerilme azaltılmasıyla ilgili sonuçta, Louis Vadot 'a göre 10 veya 11 kadar özgün rotorları olan, arkaya doğru meyilli rüzgâr makineleri inşa etmek olasıdır. Eksene dikey kanatları olan rotorda sınır 9 dur. Arkaya doğru meyillenme bilhassa rüzgâr türbinleri tespit edilmiş kanatlara sahip olduğu zaman, hızlı rüzgâr türbinlerinin güvenliğini iyileştirir.

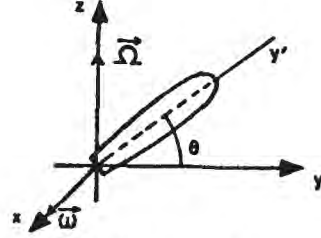
4.B.4. JİROSKOBİK ETKİLER :

Rotor milinin yönlendirilmesi sırasındaki değişiklikleri jiroskobik kuvvetler yaratır.

w yı sabit olduğu varsayılan rotor milinin dönme hızı ve Ω dikey eksen etrafındaki rotor milinin yönlendirme hızı olarak ele alalım. Dönme eksenine ilgili atalet momentinin I_1 olduğu bir kanadı ve :

- Birincisi $\vec{w}$ ve $\vec{\Omega}$, Ox ve Oz eksenleri tarafından getirilmesi için dikey eksen etrafında rotor miliyle beraber dönen bir $Oxyz(R)$, Oz ye dikeydir.

-İkincisi , rotor tarafından yok edilen $Oxy'z'(R')$, Oy' : bir kanat ekseni boyunca yönelmiştir diye iki yek değiştirebilen üç yüzlü piramidi irdeleyelim.



Şekil 58

Oy' ile ilgili kanadın atalet momentinin hemen hemen önemsiz olduğu varsayımından hareketle atalet matrisi $Oxy'z'$ koordinat sistemi ile ilgili olan kanadın momentum momenti, aşağıdaki bağıntılarla verilir.

$$I = \begin{bmatrix} I_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_1 \end{bmatrix}$$

$$I(\vec{\Omega} + \vec{w}) = \begin{bmatrix} I_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ \Omega \sin \theta \\ \Omega \cos \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 w \\ 0 \\ I_1 \Omega \cos \theta \end{bmatrix}$$

$Oxy'z'$ ile ilgili olan Oy' ile uzunluğuna ekseni aynı yerde olan kanada uygulanmış momentum momenti prensibi, aşağıdaki bağıntıyı yazmamıza olanak sağlar.

$$\frac{d}{dt} [I(\vec{\Omega} + \vec{w})]_{R'} + (\vec{\Omega} + \vec{w}) \wedge I(\vec{\Omega} + \vec{w}) = \vec{M}$$

$\vec{M}$, 0 noktası ile ilgili olarak kanada uygulamayla elde edilen moment. Yani aerodinamik kuvvetlerinin $\vec{M}_a$ momentinin ürünü ve yarıçapının önemsiz bir değere sahip olduğu varsayılan poyradan kaynaklanan gömme momenti $\vec{M}_c$ dir. Tüm hesaplamalar yapıldığında :

$$\vec{M} = \begin{bmatrix} \frac{I_1}{2} \Omega^2 \sin 2\theta \\ 0 \\ I_1 \frac{d\Omega}{dt} \cos \theta - 2I_1 \Omega w \sin \theta \end{bmatrix}$$

Dönme ekseninin yönü tespit edilmiş olarak kalırsa ($\Omega = 0$) M momenti sıfıra eşit olur. Daha sonra :

$$\vec{M} = \vec{M}_e + \vec{M}_a = 0 \text{ yani } \vec{M}_e = -\vec{M}_a \text{ yı elde ederiz.}$$

Gömme momenti aerodinamik momentini dengeler. Dönme ekseninin yönü değiştiğinde ortaya çıkan M momenti, kanatları oluşturan materyaldeki gerilmeleri arttıran ek gerilmeler yaratır.

$$\vec{M}_i + \vec{M}_e + \vec{M}_a = 0$$

denklemini,

$$\vec{M}_e = -(\vec{M}_a + \vec{M}_i) \text{ olarak yazılabilir.}$$

$\vec{M}_i$ momenti $-\vec{M}$ eşittir.

Rotor eksenini yönlenmesinin :

$$\alpha = \alpha_0 \sin 2\pi \frac{t}{T} = \alpha_0 \sin w_1 t$$

açılı değişkenliğine göre ileri - geri hareket ediyor olması varsayımına göre aşağıdaki ifadeyi yazabiliriz.

$$\Omega = \frac{d\alpha}{dt} = \alpha_0 w_1 \cos w_1 t = \Omega_0 \cos w_1 t$$

$$\frac{d\Omega}{dt} = -\Omega_0 w_1 \sin w_1 t = -\alpha_0 w_1^2 \sin w_1 t$$

w_1 , w dan daha küçüktür. $\vec{M}$ momentli kanat için en tehlikeli unsur Oz' boyunca olanıdır. Çünkü bu unsur en fazla genişliğe sahiptir ve dönme yüzeyine dikey olarak fonksiyonunu yerine getirir. Bu alan hesabındaki eşit olmayan iki deyimini içerir.

$$I_1 \frac{d\Omega}{dt} \cos \theta = -I_1 \alpha_0 w_1 \sin w_1^2 t \cos \theta \text{ ve}$$

$$-2I_1 \Omega w \sin \theta = -2I_1 \Omega_0 w_1 w \cos \theta_1 t \sin \theta$$

w ile karşılaştırıldığında w_1 küçük olduğunda bu Coriolis kuvvetinin momentini temsil eden son terim daha yüksek olan terimdir.

$$\theta = \pm \frac{\pi}{2} \text{ olduğu zaman genişliği max dadır.}$$

Bu şekilde jirokobik etkiyle meydana gelen gerilme, kanat dikey olduğu zaman , max dadır.

$$2I_1 \Omega_0 w_1 w = 2I_1 \Omega_0 w$$

miktarı jirokobik etkiyle oluşan ek eğilme momentine temsil eder. Bu, aerodinamik kuvvetler nedeniyle, eğilme momentine ilave edilmelidir.

i_1 , x kesitinin uzunlamasına nötr olan eksenini ile ilgili olarak rotor ekseninden x uzaklığı ve kanat ucu arasında yer alan kanat parçasının atalet momenti olsun. Kanat ayağından x uzaklıktaki jirokobik etki nedeniyle meydana gelen max gerilme:

$$R_g = \frac{2 I_1 \Omega_0 w v}{I_x}$$

TÜM ROTORU ETKİLEYEN SONUÇ MOMENTİ :

Dönme ekseninin yönlenmesi değişiyorsa , meydana gelen ve tüm rotoru etkileyen sonuç momentini hesaplayalım.

M momentinin üç yüzlü piramit Oxyz deki unsurun yapılan çözümleme üzerine tüm hesaplamalar yapıldıktan sonra :

$$M = \begin{bmatrix} -\frac{I}{2} \Omega^2 \sin 2\theta \\ 2I w \Omega \sin^2 \theta - \frac{I}{2} \frac{d\Omega}{dt} \sin^2 2\theta \\ -I \Omega w \sin 2\theta + I \frac{d\Omega}{dt} \cos^2 \theta \end{bmatrix}$$

yı elde ederiz.

İlk önce iki kanatlı bir rüzgâr makinasını irdeleyelim w t nin Oy ile birlikte ilk kanadın açısı olduğunu kabul edelim.

İkinci kanadın açısı Oy ile birlikte $(w t + \pi)$ olur.

Ox ile ilgili olarak tüm rotorun I atalet momenti $I = 2I_1$ olur.

Momentleri üstüste koymak suretiyle ,

$$\vec{\Sigma M} = \begin{bmatrix} \frac{I}{2} \Omega \sin w t \\ 2Iw\Omega \sin^2 wt - \frac{I}{2} \frac{d\Omega}{dt} \sin^2 wt \\ -I\Omega w \sin 2wt + \frac{d\Omega}{dt} \cos^2 wt \end{bmatrix}$$

elde ederiz.

Şimdi üç kanatlı bir makınayı irdeleyelim. wt, ilk kanat ve Oy arasındaki açı olursa, diğer kanatların açıları sırasıyla :

$$(wt + 2\pi/3) \quad \text{ve} \quad (wt + 4\pi/3)$$

olacaktır. Farklı momentleri üstüste koymak $I = 3I_1$ eşitliğini hesaba katarak üç kanatlı bir makina için :

$$\vec{\Sigma M} = \begin{bmatrix} 0 \\ I w \Omega \\ I \frac{d\Omega}{dt} \end{bmatrix}$$

elde ederiz.

Bu durumda 3 kanatlı rotorun 2 kanatlı bir rotordan tüm set üzerinde daha dengeli olduğu görülür. Daha fazla sayıda kanadı olan bir rüzgâr türbini için benzer bir sonucu elde ederiz. Bununla beraber her bir kanat, bu kanat 3 kanatlı bir makinanın parçasıda olsa bütünüyle jiroskopik etkilerden ayrı ayrı etkilenir.

KANAT GERİLMELERİNE JİROSKOPİK KUVVETLERİN NİSPİ ETKİSİ :

Jiroskopik etkiler kanatlardaki gerilmeleri arttırır. Nispi artma uç hız oranı düşük olduğu zaman daha önemlidir.

S' Remy des Landes ' de tesis edilen Fransız aérojénaratörünün projesini yapan M. Louis Vadot şunu belirtirki :

Eşit yönlenme hızında jiroskopik gerilme 12 m/sn lik bir rüzgâr hızında $\lambda_0 = 5$ için normal gerilme 0,4 defadan $\lambda_0 = 10$ için 0,066 ve $\lambda_0 = 15$ için 0,017 kata kadar değişir.

4.B.5. TİTREŞİMLER :

Dayanıklılığın azalması nedenleri arasında titreşimler temel neden olur. Bunlar muhtelif olaylardan kaynaklanır.

- Rotor mili rüzgâr yönüne doğru tam olarak yönleneemezse. Rotor eksenini bu yöne doğru eğilimli olduğunda, aksial simetrisizlik nedeniyle hız vektörü üçgenleri her kanat için aynı değildir.

- Rotor tarafından taranan alanda rüzgâr hızlarının eşit olmayan dağılımı (daha yüksek ve daha alçak kısımlardaki rüzgâr hızları arasındaki fark)

- Rüzgâr hızının anlık değişkenlikleri .

- Her kanada etki eden yerçekimi kuvvetleri ve rotor dönerken yönünün kanat eksenine ilgili olarak sürekli bir şekilde değişmesi.

- Rotor milinin yönlenme değişikliklerini yaratan ve daha sonra kanatların iç kısmında jiroskopik baskıların ortaya çıkmasına yol açan rüzgâr yönündeki değişiklikler.

Tüm bu nedenler için ve kanatların esnek bir yapıya sahip olmaları nedeniyle titreşimler daima olur. Titreşimlerin düzeyi rüzgâr üretim tesislerinin güvenliğini tehlikeye atmayacak şekilde düşük tutulmalıdır. Titreşimler rüzgâr makinasının dayanıklılığının azalmasına sebep olur. Dayanıklılığın azalmasıyla diğer yüklerin etkisi altında olduğu zaman , materyal kuvvetinin azalması kastedilir.

Titreşimlerin büyüklüğünü sınırlamak için rotor ve kule yapıları arasındaki tınlama etkileri mutlak bir şekilde önlenmelidir?

KANATLAR :

Kanatlar, rotor desteğinin rüzgâr yönü istikametinde dönerse, devir başına bir kez zorlayıcı bir titreşime tabidir. Desteğin arkasında kanatların ilk geçişlerinden sonra, doğal süreçleri içinde, bir kez daha kulenin başlangıç noktasına gelene ve daire tekrarlanana kadar titrerler. Hasarı önlemek için kanadın ileri - geri hareketlerinin doğal sıklığı sn deki devir sayısından farklı olmalı ve bu sayının tam bir katı olmamalıdır.

Kanat titreşimlerinin büyüklüğü rotorun, desteğinin rüzgâr yönü istikametinde döndüğü zaman , daha büyük olur.

Rotor rüzgâr yönünün ters yönünde döndüğü zaman daha küçük olur.

Rüzgâr yönü / Rüzgârın ters yönü büyüklüğünün oranı kafes kuleyle oluşturulmuş bir destek için ikiye , bir beton kule için ise dörde ulaşabilir. (Morrison : Rüzgâr gücü tesisleriyle ilgili deney)

Bu şekilde rotorun kulenin rüzgâr yönünün ters yönünde yerleştirilmesi kanatların içindeki dayanıklılığın azalmasını azaltır.

DESTEK :

İki kanatlı bir rotor için kule , taranan alanın daha üst ve daha alt kısmındaki ortalama rüzgâr hızındaki farklılık nedeniyle her devirde iki kez uyarılır. sn deki devir sayısı n olursa kule üzerindeki uyarıcı kuvvetin frekansı $2n$ olur. Destegin ilk şeklindeki doğal frekans tınlamamak için, ilk zorlayıcı frekans $2n$ den itibaren uygun bir şekilde yerleşecek biçimde seçilmiş olmalıdır. Ayrıca daha yüksek şekilde tınlamanın önüne geçecek şekilde dikkat edilmelidir. Destegin doğal frekansı $2n$ den büyük olursa, bu " sert " olarak isimlendirilir. n ve $2n$ arasında kule " yumuşak " olarak ve n nin altında olduğu zamansa , " çok yumuşak " olarak karakterize edilir.

Kule ne kadar sert olursa , o kadar ağır ve maliyeti yüksek olacaktır. Dünyadaki son dizaynlarda " yumuşak " ve " çok yumuşak " destekler kullanılır.

Kuledeki titreşimlerin etkisi, kanatların poyraya tespiti sıkı olmadığı, bilhassa , kanatlar poyraya menteşe ile tespit edildiği zaman (değişebilir konikleşme) veya rotor dönme yüzeyinin içinde veya dışında 5° kadar olan bir açıyla düzensiz bir şekilde rotor çalışabildiği zamanda azalır. Bu gibi düzenlemeler, rotor milinde ve destekteki ani rüzgâr değişiklikleri ve aşırı dengesiz rüzgârlar tarafından meydana getirilen eskimeyi azaltırlar,

4.B.6. ROTOR RÜZGÂRA KARŞI DURDUĞU ZAMAN BİR FIRTINA

SIRASINDA EĞİLME GERİLMELERİNİN SAPTANMASI :

Cd nin kanat rüzgâra dikey bir şekilde yer aldığı zaman, kanadın, rüzgâr direnci katsayısı olduğunu varsayalım. $r + dr$ ve r arasındaki kanat elemanı üzerine uygulanan kuvvet :

$$dF = \frac{1}{2} \rho C_d l V^2 dr = f_v dr$$

Rotor ekseninden x uzaklığındaki eğilme momenti :

$$M = \int_x^R (r - x) f_v dr \quad \text{olur.}$$

Uygulamada , rüzgâra hemen hemen dikey durumda olan kanat yüzeyindeki rüzgâr direnci katsayısı yaklaşık olarak 2 ye eşittir. Kalem açısı α nispeten önemli olduğu zaman C_d için:

$$C_d = 2 \cos \alpha$$

Eksenden x uzaklığındaki eğilme momenti ile ilgili bilgi bize eşdeğer gerilmeyi saptamamıza olanak sağlar.

$$R_f = \frac{M_f v}{I_x}$$

M_f , yukarıdaki eğilme momentidir. I_x ve v önceki paragraftaki anlamı taşır. Uygulamada rüzgâra karşı olan rotorlarda durgun zamandaki gerilmeler , 4 den daha küçük λ_0 oranına sahip olan rüzgâr türbinlerinin yapısal hesaplamaları ve oranları ne olursa olsun arkaya doğru eğimli rüzgâr türbinleri için yaygındır. Kanatları rotor miline dikey olan yüksek rüzgâr hızları için gerilmeler, çok , kuvvetli rüzgârlarda durdukları zaman, ani değişen rüzgârlarla normal şekilde çalışan türbinlerde oluşan gerilmeler daha düşük olurlar

4.B.7. VERİLEN BİR RÜZGÂR HIZINDA ÇALIŞAN GEOMETRİK OLARAK BENZER RÜZGÂR ROTORLARINDA GÖRÜLEN GERİLMELER :

Belli bir rüzgâr hızında çalışan ve aynı uç hız oranı λ_0 da dönen geometrik olarak benzer iki rotoru irdeleyelim. Bunların aynı malzemeden yapıldığını varsayalım. Rotor 1 parametrelerine 1 indisi, rotor 2 parametrelerine 2 indisi verelim.

Daha sonra savurma kuvvetleri ve eğilme momentleriyle rotor 1 ve rotor 2 nin benzer kesitlerindeki gerilmeleri saptayalım.

a) SAVURMA KUVVETİ :

Bu kuvvetin yoğunluğu aşağıdaki ifadelerle verilir.

Rotor 1.

$$F_1 = \int_{X_1}^{R_1} \rho w_1^2 r_1 S_1 dr_1$$

$$\lambda_0 = \frac{w_1 R_1}{V} \quad \text{yani} \quad w_1 = \frac{\lambda_0 V}{R_1}$$

bağıntılarıyla w_1 ile λ_0 birbiriyle bağıntılıdır.

F_1 için değer :

$$F_1 = \int_{X_1}^{R_1} \rho \frac{\lambda_0^2}{R_1^2} V^2 r_1 S_1 dr_1 = \rho \frac{\lambda_0^2}{R_1^2} V^2 \int_{X_1}^{R_1} r_1 S_1 dr_1$$

Rotor 2.

$$F_2 = \rho \frac{\lambda_0^2}{R_2^2} V^2 \int_{X_2}^{R_2} r_2 S_2 dr_2$$

bağıntısını buluruz. Bu şekilde benzer kesitlerdeki savurma kuvvetlerince meydana getirilen gerilmeler için :

Rotor 1 :

$$R_1 = \frac{F_1}{S_{X_1}} = \rho \frac{\lambda_0^2}{R_1^2} \cdot \frac{V^2}{S_{X_1}} \int_{X_1}^{R_1} r_1 S_1 dr_1$$

Rotor 2 :

$$R_2 = \frac{F_2}{S_{X_2}} = \rho \frac{\lambda_0^2}{R_2^2} \cdot \frac{V^2}{S_{X_2}} \int_{X_2}^{R_2} r_2 S_2 dr_2$$

buluruz. İki rotorun benzerliklerini hesaba katarak :

$$\frac{1}{R_1^2 S_{X_1}} \int_{X_1}^{R_1} r_1 S_1 dr_1 = \frac{1}{R_2^2 S_{X_2}} \int_{X_2}^{R_2} r_2 S_2 dr_2$$

BAĞINTISINI YAZABİLİRİZ. Buradanda ,

$$R_1 = R_2 \quad \text{olur.}$$

Bu şekilde benzer kesitlerde savurma kuvvetlerince meydana getirilen gerilmeler eşittir.

b) EĞİLME MOMENTİ

Önceki bölümde benzer kesitlerdeki gelme açılarının benzer koşullarda çalışan rotorlar için eşit olduğunu göstermiştik. Bu eşit rüzgar hızlarında benzer elemanlara etki eden kaldırma ve rüzgar direnci kuvvetlerinin karesiyle orantılıdır.

$$F'_1 = k R_1^2, \quad F'_2 = k R_2^2$$

Benzer profillerdeki eğilme momentleri ölçümlerinin kübüyle orantılıdır.

$$R'_1 = \frac{M_1 v_1}{I_1} = \frac{k' R_1^3}{k'' R_1^4} = \frac{k' k''}{k''}$$

$$R'_2 = \frac{M_2 v_2}{I_2} = \frac{k' R_2^3}{k'' R_2^4} = \frac{k' k''}{k''} \quad \text{buradanda}$$

$$R'_1 = R'_2 \text{ olur.}$$

Verilen bir rüzgar hızında aerodinamik benzerlikte çalışan geometrik olarak benzer rüzgar türbinlerinin, benzer profillerindeki hem savurma kuvvetleri ve hemde eğilme momentleriyle oluşan baskılar eşit olurlar. Bu iki etkinin üst üste gelmesinden sonuçlanan baskılar içinde aynıdır.

4.B.8.AYNI ÇAPA SAHİP OLAN GEOMETRİK AÇIDAN BENZER VE AYNI UÇ HIZ ORANI İÇİN DİZAYN EDİLMİŞ İKİ KANATLI ÜÇ KANATLI VE DÖRT KANATLI RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE MEYDANA GELEN GERİLMELERİN KARŞILAŞTIRILMASI:

Farklı türbinlerin kanat şekillerinin özdeş olduğu varsayılır. Kanatları oluşturan materyalin net kesidinin normal çalışma veya makinanın şiddetli bir rüzgarla karşı karşıya geldiği zamanki durması anında oluşan eğilme momenti tarafından saptandığını önceden göstermiştik.

Bu bölümün başlangıcında kurulan bağıntılar C_{θ} bl miktarının yalnız r uzaklığının rotor eksenine olan uzaklığına bağlı olduğunu göstermiştik. Gelme açıları bu nedenle rotor ekseninden eşit bir r uzaklığında aynı olan C_{θ} nin değerleri ve bl nin miktarı kanat sayıları ne kadar olursa olsun, özdeş olurlar. Böylece her bir kanadın genişliği kanat sayısının tersine olacak şekilde değişirler. Buradan eşit r yarıçapında iki kanatlı, üç kanatlı, dört kanatlı rotorların kanat kırıgıları:

$2l_2 = 3l_3 = 4l_4$ şeklinde olurlar. Elbette kanatların kalınlıkları aynı oranda olurlar.

benzer kesitler için eşit olan nisbi hızlar, her bir kanat üzerinde eğilme momentleri kirisine buradanda kanat sayılarının tersine orantılıdır: $2M_2 = 3M_3 = 4M_4$

Kanatların ilkin içi dolu, daha sonra boş ve aynı materyallerden yapıldığı varsayımı üzerine irdelenen rüzgar makinelerindeki gerilmeleri saptayalım.

A) İÇİ DOLU KESİTLER :

Rotor ekseninden r uzaklığındaki maximum eğilme gerilmeleri :

$$2 \text{ Kanatlı rotor için: } R_2 = \frac{M_2 v_2}{I_2}$$

$$3 \text{ Kanatlı rotor için: } R_3 = \frac{M_3 v_3}{I_3}$$

$$4 \text{ Kanatlı rotor için: } R_4 = \frac{M_4 v_4}{I_4} \text{ e yükselir.}$$

$$2v_2 = 3v_3 = 4v_4 \text{ ve}$$

$$I_2 = \left(\frac{3}{2}\right)^4 I_3 = \left(\frac{2}{1}\right)^4 I_4 \text{ olduğu zaman:}$$

Tüm hesaplamaların sonunda:

$R_2 = 0,45 R_3 \approx 0,25 R_4$ ifadesi elde edilir. Bundan başka geometrik hesaplamalar 2 kanatlı rüzgar türbininin kütlelerinin 3 ve 4 kanatlı rüzgar türbinlerinin sırasıyla 1,5 ve 2 katına eşit olur.

B) İÇİ BOŞ KANATLAR

Üç durumu inceleyeceğiz.

1" kanatların içi boştur. Ve materyalin kalınlığı, kanatların genişliği ile aynı oranda olur.

Yine aynı sonucu elde ederiz.

2" Kanatların içi boştur ve direnç gösteren yapının e_2 , e_3 , e_4 kalınlıklarına eşit olur. Daha sonra aşağıdaki ifadeyi buluruz.

$$R_2 = \frac{2}{3} R_3 = \frac{1}{2} R_4$$

3" Kanatların içi boştur ve gerilmeler eşittir.

$$R_2 = R_3 = R_4 \quad \text{Daha sonra}$$

$$e_2 = \frac{2}{3} e_3 = \frac{1}{2} e_4 \quad \text{ifadesini elde ederiz.}$$

Geometrik hesaplamalar rüzgar makinalarının P ağırlıklarının kanat sayısı ile orantılı olduğunu gösterir.

$$P_2 = \frac{2}{3} P_3 = \frac{1}{2} P_4$$

Bu çözümlenecek kuram ile ilgili olan ifade geneldir. Yukarıdaki koşullardaki eşit eğilme gerilmesinde rotorların ağırlığı kanatların sayısı ile orantılıdır.

Bu nedenle yalnız eğilme gerilmesini göz önünde tutarsak bu bizi 2 kanatlı bir rotorun 3 kanatlı bir rotordan daha faydalı olduğu sonucuna götürür. Bununla birlikte, bilhassa 2 kanatlı rotorun daha büyük uç kayıpları ve hasar yapıcı titreşimler nedeniyle daha düşük bir aerodinamik verimliliğe sahip olması nedeniyle bazı imalatçılar 2 kanatlı rotoru kusurlu bulurlar. İki kanatlı rotor jiroskopik etkiler için üç kanatlı rotor kadar iyi dengelenmez. 2 kanatlı rotor dönerken pervane bir max ve sıfır arasından ard arda geçen iğnecik eksenini yanında atalet momentinin devirsel bir değişimi, devir başına iki kez, açığa çıkarır. Bu olay titreşimlerin çoğalmasına yol açar.

Bundan başka kanat sayısının ve taranan alanın daha üst ve daha alt kısmındaki rüzgâr hızı arasındaki farklılığın sonucu olarak, basamak yatakları üzerinde rotor reaksiyonunun devirsel bir değişimi vardır. Rüzgâr yönünde kurulmuş 2 kanatlı bir rüzgâr rotoru için bu etki, kanatlardan biri kule çizgisini geçerken, aynı zamanda diğer kanadın taranmış alanın daha üst kısmındaki en yüksek rüzgâr hızının etkisi altında olması nedeniyle çok daha fazla önemlidir. Bu şekilde kanatlar sıkı bir şekilde poyraya bağlanırsa eğilme momenti daha yüksek olur ve rotor milini daha büyük eğilme gerilmelerinin etkisi altında olur.

Buna ilave olarak, taranmış alanın daha üst ve daha alt kısmı arasındaki rüzgâr hızının eşit olmayan dağılımı makinayı yönlendirme eksenini etrafında ileri - geri hareket ettirme eğilimine sahip olan bir döndürme momenti yaradır. Bu döndürme momentinin her devirde 2 kanatlı pervane için 2 max ve 2 min, 3 kanatlı pervane için 3 max ve 3 min değeri vardır. Louis Vadot'a göre, verilen bir rüzgâr değişikliği ve rotor çapı ve hızı için

iğnecik eksenini yanındaki bu döndürme momenti değişkenliğinin büyüklüğü, 2 kanatlı rotorlarda, 3 kanatlı rotorlardan 10 kez daha büyük olur. Bununla beraber 2 kanatlı rotorlar Amerika, İsveç ve B.Britanya 'daki imalatçılar tarafından tercih edilir. Diğer taraftan Fransa ve Danimarka 'da tüm önemli rüzgâr tesisleri 3 kanatlı rüzgâr rotorlarını kullanmaktadır. Bununla beraber Fransa'da düşük güçlü üretim tesislerinde 2 kanatlı rotorlar genelde çok kullanılır.

4.B.9. SAVURMA KUVVETLERİ ve AYNI ÇAP ve AYNI KANAT SAYISINA SAHİP OLAN FAKAT FARKLI λ_0 ORANLARI İÇİN DİZAYN EDİLMİŞ RÜZGÂR MAKİNALARINDAKİ EĞİLME MOMENTİ NEDENİYLE OLUŞAN NORMAL ÇALIŞMADA GERİLMELERİN DEĞİŞKENLİĞİ :

Bu bölümün başında uç hız oranları 3 ten daha yüksek olan hava kütlelerinin dönme teorisiyle ilgili aşağıdaki bağıntıyı kurmamıza olanak sağlar.

$$C_{l,bl} = \frac{16\pi}{9} \frac{R}{\lambda_0 \sqrt{\lambda_0 \frac{r^2}{R^2} + \frac{4}{9}}}$$

Bir V rüzgâr hızındaki normal çalışmada gelme açılarının rotor ekseninden eşit bir uzaklıkta eşit olduğunu varsayalım, Kanatlar iyi bir şekilde dizaynlandıysa rotor ekseninden r uzaklığındaki genişlikleri $1/\lambda_0^2$ ile orantılı olur.

Bu yaklaşık değer, $4/9$ teriminin $\lambda_0^2 r/R^2$ terimine kıyasla düşük olması nedeniyle meydana gelen gerilme değişikliklerini inceleyelim.

a) SAVURMA KUVVETLERİ NEDENİYLE OLAN GERİLME :

Rotor ekseninden r uzaklığındaki bir kesitteki savurma kuvvetleri nedeniyle meydana gelen gerilmeyi veren :

$$R_c = \frac{1}{S_x} \int_0^R \rho w^2 r S dr = \rho \frac{\lambda_0^2}{R^2} \frac{V_1^2}{S_x} \int_0^R r S dr$$

ifadesi, verilen bir rüzgâr hızı V_1 için R_c nin λ_0^2 ye orantılı olduğunu gösterir.

b) EĞİLME MOMENTİ NEDENİYLE OLAN GERİLME :

Bu gerilme ,

$$R_f = \frac{Mv}{I_x} \quad \text{bağıntısı ile verilir.}$$

Gelme açıları, benzer kesitlerde aynı değerlere sahip olursa, başlangıç aerodinamik kuvvetleri lW^2 ye yani $lV_i^2(1 + \lambda_o^2) = lV_i^2(1 + \lambda_o^2 r^2/R^2)$ ifadesiyle orantılıdır.

$\lambda_o r/R$, birincisiyle kıyaslandığında yüksek olursa, $\lambda_o^2 r^2/R^2$ terimi daha önemli olur. Bu şekilde yaklaşık olarak ilk eğilme momenti $l\lambda_o^2 V_i^2$ ye orantılıdır. 1, $1/\lambda_o^2$ ye orantılı olması nedeniyle M nin değeri yaklaşık olarak sabit kalır.

Sıfır noktasındaki lif ile daha çok yüklü lif arasındaki v uzaklığı $1/\lambda_o^2$ ile orantılıdır.

I_x atalet momenti $1/\lambda_o^8$ ile orantılıdır.

Bu nedenle eğilme momenti nedeniyle meydana gelen gerilmeler λ_o^6 ile orantılı olmak zorundadır.

Gerçekte, üs biraz daha aşağıda olur.

Louis Vadot 12 m/sn lik rüzgâr hızında çalışan rüzgâr türbinLERİ için normal çalışmada gerilmeleri saptamıştı. Ani rüzgâr değişikliklerinin olmadığı bir ortamda aşağıdaki (La Houille Blanche 1958) değerleri elde etti.

$$\lambda_o = 5 \quad \text{için} \quad R_{\max} = 49 \text{ N/cm}^2$$

$$\lambda_o = 10 \quad \text{için} \quad R_{\max} = 2130 \text{ N/cm}^2$$

$$\lambda_o = 15 \quad \text{için} \quad R_{\max} = 19000 \text{ N/cm}^2$$

Bu max değerler $r = 0,6 R$ uzaklığında gözlenmiştir.

c) İTİBARİ UÇ HIZ ORANININ BİR FONKSİYONU OLARAK DURMA SİRASINDAKİ GERİLMELERİN DEĞİŞMESİ :

Hareketsiz durumdayken gerilmeler yalnız eğilme momenti nedeniyle oluşurlar. lW^2 miktarı lV^2 eşit olur. V, rotorun dayanmak zorunda olduğu en kuvvetli rüzgâr hızıdır. Kiriş 1, $1/\lambda_o^2$ ye orantılı ve bu nedenle eğilme momentinde orantılıdır. v ve $1/\lambda_o^2$ ve $1/\lambda_o^8$ orantılı olarak değiştiğinde eğilme gerilmesi λ_o^4 orantılıdır.

Bilgi edinmek için, 63 m/sn lik rüzgâr hızında çalışan ve kanatları rotor eksenine dikey olan 3 kanatlı bir rüzgâr rotoru için, Louis Vadot tarafından saptandığı şekliyle, $r = 0,6R$ uzaklığındaki eğilme gerilmelerinin bazı değerlerini verelim.

$$\lambda_0 = 5 \quad \text{için} \quad R = 60 \text{ N/cm}^2$$

$$\lambda_0 = 10 \quad \text{için} \quad R = 800 \text{ N/cm}^2$$

$$\lambda_0 = 15 \quad \text{için} \quad R = 4000 \text{ N/cm}^2$$

Gerçekte değişkenlik λ_0^n ile orantılıdır. n , 3 ile 4 arasında değişen bir sayıdır.

Kanatları eksenlerine dikey olan rüzgâr rotorları için normal çalışma sırasındaki gerilmeler fazladır. Fakat kanatlar dönerken konik bir yüzeyi tarayan rüzgâr türbinleri ile ilgili gerilmeler, rotor şiddetli bir rüzgârla yüzyüze olduğu halde hareketsiz olduğu zaman en yüksek değerde olur.

Bundan başka kanatları eksenlerine dikey olan rotorlar için, durgun haldeki gerilmelerin normal çalışmadaki gerilmelere oranı $1/\lambda_0^2$ olarak değişir.

4.C. TÜM ÜRETİM TESİSLERİNE ETKİ EDEN KUVVETLERİN TANIMI :

1°) AKSİYAL İTME KUVVETİ :

Kiriş ve kalem açıları ile ilgili bilgi aksiyal itme kuvvetini değerlendirmemize olanak sağlar. Aksiyal itme kuvveti ne gibi değerlere yükselebilir? Danimarka 'da Gedser yeldeğirmeninde yürütülen ölçümler, normal çalışmada taranan alanın m^2 deki aksiyal itme kuvveti yaklaşık olarak :

$$p = 0,4 V^2 \quad \text{bağıntısıyla verilmiştir.}$$

Rüzgâr hızı V , taranan alan S ve rotor çapı 5 ile 6 arasında değişen bir rotorda aksiyal basınç : $(p = F_a/S)$ den, önceki ifadeyi :

$$p = \frac{1}{2} C_F V^2 \rho$$

şeklinde yazarsak,

$$C_F = 0,64 \quad \text{katsayısına eşit olur.}$$

Rüzgâra karşı duran rotorda aksial itme kuvveti eşit rüzgâr hızındaki normal çalışmada değerinin %40 na eşit olmuştur. Paris' teki Eiffel Laboratuvarında Nogent Le Roi aerogenerator modeli üzerinde yapılan deneyler, 20 m/sn lik bir rüzgâr hızında C_F katsayısı normal çalışmada ($\lambda_0 = 7$) $C_F = 0,418$ değerine, son hızla çalışmada ($\lambda_0 = 14$) $C_F = 1,318$ değerine ulaştığını gösterdi. Bu sayılar verilen dinamik basınç değerlerine sırasıyla eşdeğerde olurlar.

$$p = 0,26 v^2 \quad \text{ve} \quad p = 0,83 v^2$$

Yürütülen denemeler, bu iki durumda rüzgâr hızına karşı C_F katsayısının bir artışını gösterdi. V rüzgâr hızı sıfıra eşit olduğunda Euler teoremine göre dinamik basınç için :

$$p = 0,63 v^2 \quad \text{yazılabilir,}$$

Yavaş çalışan rüzgâr makinaları için aksial itme kuvveti sayısız kanatlar ve destek yapısının varlığı nedeniyle çok daha önemlidir. Bunun için :

$$p = v^2$$

alınması tavsiye edilir.

(Rüzgâr hızına dikey olan bir tabağa etki eden dinamik hava basıncı : $p = 1,25 v^2$ ifadesiyle rüzgâr hızının bir fonksiyonu olarak verilir.)

2°) EĞİLME MOMENTİ :

Ani rüzgâr değişiklikleri sırasında, daha alt kısımdaki rüzgâr hızının 2 veya 3 katına ulaşabilen üst kısımdaki yüksek rüzgâr hızlarınca karakterize edilen taranmış bölgedeki rüzgâr hızının eşit olmayan dağılımı sonucu, rotor mili, eğilme momentinin etkisi altında olur. Bu moment önemli olabilir. Örneğin makinanın, rüzgârın ters yönünde 20 m/sn, 40 m/sn ve 70 m/sn hıza eşit rüzgâr hızlarında Fransız aerogeneratorü Nogent Le Roi de oluşan eğilme momentleri sırasıyla :

- Normal çalışmada (çevresel hız $U_0 = 75$ m/sn) 8800 , 16000 ve 38400 Nm ye ,

Eşdeğer katsayılar C_{PM} ($C_{PM} = \frac{2MP}{\rho S R v^2}$) : 0,032 , 0,0149 ve 0,0116 dir.

b) Son hızla çalışmada ($U_0 = 270 \text{ m/sn}$) 29000, 56000 , ve 113000 Nm ye yükselmiştir.

Eşdeğer katsayılar $C_p = 0,108$, $0,0514$ ve $0,0343$ tür.

Bu moment değerleri Paris' teki Eijffell Labaratuvarlarında yürütülen ölçümlemelerle saptanmıştır.

3°)ROTADAN AYRILMA MOMENTLERİ:

Rotadan ayırma motoru , türbini yönlendirme eksenini etrafında çalıştırma yeteneğine sahip olmalıdır. Gücünü saptamak için, rotoru rüzgar yönünün dışına döndürmeye gerekli olan minimum döndürme momentinin bilinmesi gerekir. Her bir üretim tesisi özel bir amaç için kurulduğundan, Güçlü tesisler için bir rüzgar tünelineki model üzerinde deneme çalışmaları yapılmasını öneririz.

Nogent- Le Roye aerogeneratörü için, Eijffell Labaratuvarındaki bir rüzgar tüneline 20 m/sn , 40 m/sn ve 60 m/sn rüzgar hızlarında yapılan deneylerden saptanmış rotadan ayrılma momentleri sırasıyla

a) Normal çalışmada :

($U_0 = 75 \text{ m/sn.}$) : 3500, 4750 ve 10250 N/m.

Eşdeğer katsayılar :

$$C_{OM} \left(C_{OM} = \frac{2 \frac{M_{T.O}}{SRV^2}} \right) : 0,013 , 0,0044 , \text{ ve } 0,003 \text{ tür.}$$

b) Son hızda çalışmada :

($U_0 = 270 \text{ m/sn.}$) : 4300, 21800, 45900 N/m. ye ulaşıldı.

Eşdeğer katsayılar :

$$C_{OM} = 0,015 , 0,020 \text{ ve } 0,019 \text{ dur.}$$

Rotadan ayrılma eksenini ve kanatların dip kısmındaki mesafe , bu rüzgar türbini için 2,25 m. ye yükselmişti.

BÖLÜM 5

DIKEY EKSENLİ YELDEĞİRMENLERİNİN ÇALIŞMASI ve TANIMI.

Dikey eksenli yeldeğirmenlerinin, tüm rüzgâr makinalarının öncüleri olduğunu ileri sürmeye hakları vardır. Asırlar öncesinin makinaları olan İran makinalarının takipçileri, bir çok değişik şekiller aldı. Bu bölümde en önemli tipler için çalışma prensipleri ve deneme sonuçları tanımlanmaktadır.

Dikey eksenli rüzgâr makinaları şu şekilde sınıflandırılır.

- Karşı hava direncine göre değişen makinalar,
- Perdeli makinalar ,
- Kapakçıklı kanatları olan makinalar ,
- Döner kanatlı makinalar,
- Tespit edilmiş, hareket edebilir veya eğimli kanatları olan makinalar.

5.1. KARŞI HAVA DİRENCİNE GÖRE DEĞİŞEN MAKİNALAR :

Simetrileri nedeniyle, bu makinaların yönlendirme mekanizmasına ihtiyaçları yoktur ve yapıları çok basittir. Bu makinaların en basit tipi kap anemometresidir.

a) ÇALIŞMA PRENSİBİ :

Bu tip makinaların dönme hareketi, rüzgâr yönü ile ilgili yönlendirmelerine göre, hareket eden havanın içi boş veya simetrik olmayan cisimler üzerine çok farklı kuvvetlerin uygulanması gerçeği nedeninden kaynaklanır. Rüzgâr bir yarıkürenin boş içbükey tarafına eserse, sürükleyici kuvvet :

$$F = \frac{1}{2} \rho S V^2 C$$

ifadesinde görülen aerodinamik katsayı $C = 1,33$ olur. Bu katsayı, hava akımı değerinin yalnız $0,34$ e ulaştığı yarım kürenin dışbükey kısmında olduğu zamankinden daha büyük olur.

Yarım bir silindir için bu katsayılar sırasıyla $2,3$ ve $1,2$ olur. Rotoru oluşturan parçaların orantılı olmaması ve hava direncindeki ortak farklılıklar nedeniyle bir bütün olarak makina üzerindeki rüzgârın eylemi, rotorun hareketi başlatması için

eksenine yakın yerde sürükleyici bir zıt yönlü eş kuvvet çifti meydana getirir.

b) YAKLAŞIK DEĞER TEORİSİ :

Dikey eksenli karşı hava dirençli bir yeldeğirmeni için, bir yaklaşık değer teorisinin temel noktalarını ifade etmek mümkündür. Kanatların merkezinin V rüzgâr hızında, grafikte düz çizgi olarak gösterilen v hızıyla döndüğünü varsayalım. Kanatlar üzerine uygulanan aerodinamik kuvvetler yaklaşık olarak rüzgâr yönünde döndüğü zaman $(V - v)^2$ ve rüzgârın aksi yönünde döndüğü zaman $(V + v)^2$ ye orantılı olur. Yeldeğirmeni tarafından geliştirilen güç :

$$P = \frac{1}{2} \rho S [C_1(V-v)^2v - C_2(V+v)^2v]$$

denklemleri ifade edilebilir.

C_1 ve C_2 sabit olduğu varsayılan iki katsayıdır. Bu güç :

$$v = V_{opt} = \frac{2SV - V\sqrt{4S^2 - 3D^2}}{3D}$$

olduğu zaman optimal olur.

S ve D sırasıyla $(C_1 + C_2)$ ve $(C_1 - C_2)$ ye eşittir.

$C_1 = 3C_2$ olduğu özel durumda $v_{opt} = V/6$ ya,

$C_2 = 0$ olduğunda $v_{opt} = V/3$ olarak elde ederiz.

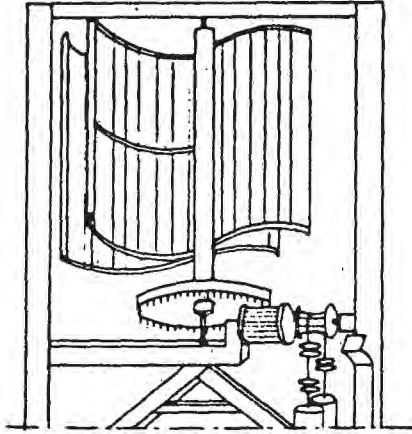
Şekil 60'deki Panemone için $v = \omega R/2$ olur.

Uygulamada, basit farklı dirençli makinalarda $\lambda_0 = U_0/V$ parametresinin değerleri 0,3 ile 0,9 arasında optimal olduğu var sayılır.

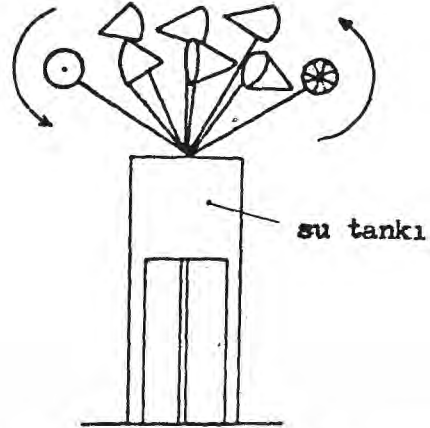
c) PANEMONE :

Panemone, en eski farklı-uyarıcı makinalardan biridir. Kanatlar az çok silindirik şeklindedir. Konik şekilde kanatlarda kullanılır.

Auber de la Rue "L'Homme et le Vent" adlı yapıtında Kanada'da gördüğü dikey eksenli bir yeldeğirmenini tasvir etmiştir. Bu makinanın 12 konik kanadı vardı ve su pompalamak için kullanıldığı yer olan bir çiftliğin deposu üzerine kurulmuştu. Bu çok özel bir tipti, yukarıda tasviri yapılan çeşidin uzun bir kopyasıydı ve aynı prensiple çalışmaktaydı.



Şek.60. Bir pompayı çalıştıran panemone



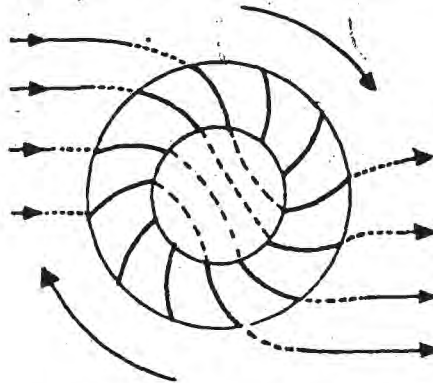
Şek.61. Konik kanatlı panemone

d) LAFOND TÜRBİNİ :

Lafond türbinine adı yaratıcısı Fransa 'daki Montpellier 'den geldikten sonra verilmişti. Bu türbin, savurmalı vantilatör ve hidroliklerde kullanılan Banki türbininin anımsatıcısı olan bir farklı duyarlı çapraz akışlı makinadır.

Aerodinamik kuvvet, içbükey yüzeye rüzgâra dönük kanatlarda, dışbükey yüzeyi rüzgâra dönük kanatlardakinden daha büyüktür. Bundan başka bu makinada akışkan, ilk önce rüzgârla beraber hareket eden kanatlar daha sonra rüzgâra karşı hareket eden kanatlar tarafından saptırılır. Bu olay ilave bir döndürme momenti ile sonuçlanır.

Lafond türbini, λ_0 ın 0,4 değeri için max üretimi elde etme başarısını gösterir. 2,5 m/s lik bir rüzgârdan dönmeye başlar.



Şekil 62. Lafond türbini

" Moteurs a vent " Champly tarafından düzenlenmişti. Bir alıntı olan tablo 5 bu tip makinanın özelliklerini ve çalışmalarını gösterir.

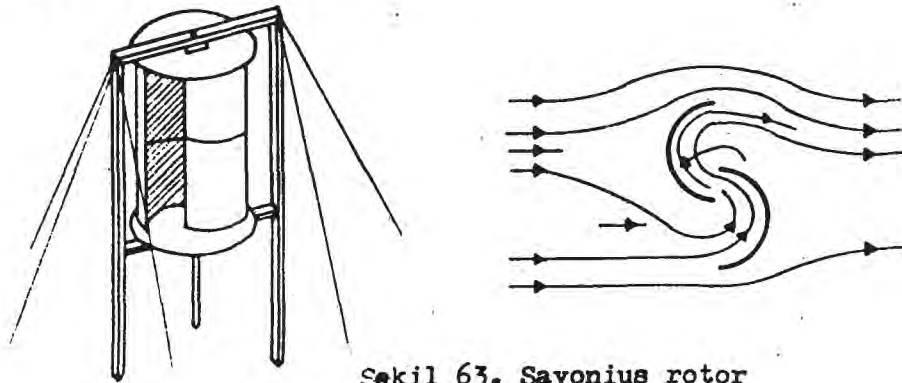
Tablo 5

Alan (m ²)	Çap (m)	Yük. (m)	kanat sayı ve ölçüler	rüzgâr hızına göre güç (watts)			türbin yükü (kg)
				4 m/s	7 m/s	10 m/s	
4	2	2	24 of 0.5 x 1 m	47	140	400	400
6	2	3	36 of 0.5 x 1 m	70	210	600	600
16	4	4	24 of 1 x 2 m	190	560	1 500	2 000

Lafond türbininden elde edilen enerji, aynı taranmış alanı olan yatay eksenli bir türbin tarafından elde edilen enerjinin yarısı dolayındadır.

e) SAVONIUS ROTORU :

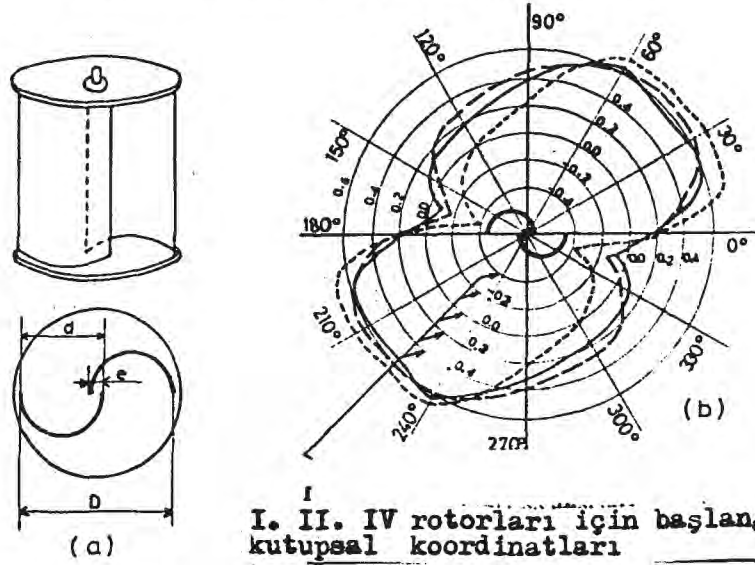
Bu makina Finli mühendis Sigurd Savonius tarafından 1924 de bulundu ve 1929 da patentı alındı. Temel olarak bu rotor eksenleri bir diğetine göre çıkıntılı olan, iki yarım silindirden oluşur. Şekil 63 deki orijinal model $e/d = 1/3$ oranıyla inşa edildi. e, iç kenarların çıkıntısını ve d, rotoru oluşturan iki yarım silindirin çapını temsil eder. Rüzgâr tarafından kanatlara uygulanan kuvvetin içbükey ve dışbükey kısımlarda farklı olduğu gerçeğine ilave olarak rotor, kanatlar tarafından 180° arasında hava akımının sapmasıyla meydana gelen bir aerodinamik eş kuvvet çiftinin etkisi altındadır.



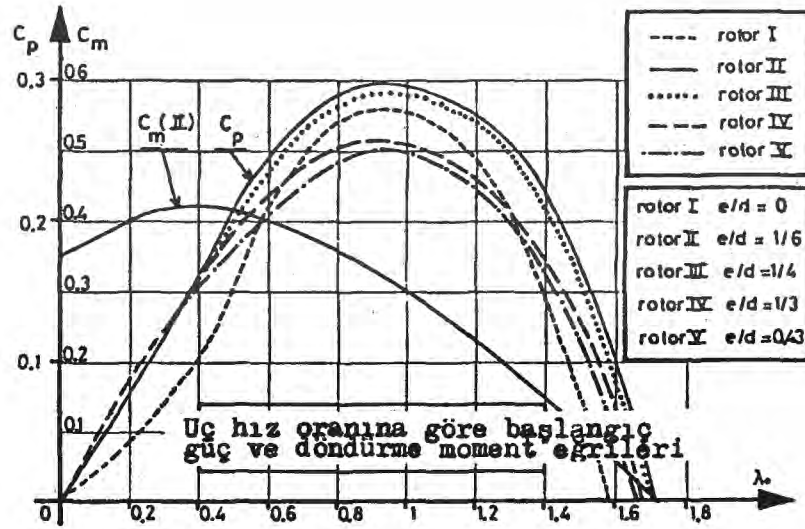
Şekil 63. Savonius rotor

DENEYE ÇALIŞMASI :

Savonius rotoru, sayısız çalışmalar için konu olmuştur. Montreal Mc Gill Üniversitesinden, Kanadalı araştırmacılar,

Savonius rotor çalışma değerleri e/d 

Şekil 64



Şekil 65

Newmann ve Lek Ah Chai, e çıkıntısının farklı değerleri için Savonius rotorunun çalışmasıyla ilgili dikkate değer incelemeler yapmışlardır. Kullanılan rotorlar 6 inç çapında 15 inç uzunluğunda yarım silindirlere oluşmuştur. Her biri e nin farklı bir değerine eşit olan 5 durum araştırılmıştır. (Rotor I, $e = 0$, Rotor II $e = 1$, Rotor III, $e = 1.5$, Rotor IV, $e = 2$, Rotor V, $e = 2.5$ inç)

Denemeler, başlangıç eş kuvvet çiftini, rüzgâr ve elde edilen güçle ilgili, rotorun bir fonksiyonu olarak ölçümlendi.

Şekil 64-65 sonuçları tekrar gösterir ve bilhassa rotor pozisyonunun bir fonksiyonu olarak başlangıç dönme katsayısını ve

uç hız oranının bir fonksiyonu olarak güç katsayısını belirtir. Bazı rotor pozisyonları için, başlangıç döndürme momentinin negatif olabileceği belirtilmiştir. Bu alanın boyutu ve negatif eş kuvvet çiftinin değeri e nin büyüklüğüne bağlıdır. Negatif döndürme momentinin max değeri $e = 0$ (Rotor I) olur. $C_D = 0,40$ ve alanın boyutu 58° olur. Max negatif eş kuvvet çifti $C_D = 0,08$ ve alanın boyutu 18° olduğu zaman $e = 1$ inç (Rotor II) lik bir değer olarak en küçüktür. Döndürme momenti ve güç için alınan en iyi sonuçlar $e/d = 1,6$ (Rotor II) parametresiyle inşa edilen rotorlar için elde edilir.

Max güç katsayısı $0,3$ e ulaşır. Orijinal Savonius rotoru için (Rotor III $e/d = 1,3$) max güç katsayısı $0,25$ tir. Denemeler uç hız oranı $\lambda_0 = wR/V$, $0,9$ ve 1 arasında olduğu zaman en uygun koşulların elde edildiğini gösterir.

Diğer kanat şekillerinin denemesi yapıldı, fakat bugüne kadar elde edilen makinanın çalışma durumu yukarıda tanımlanan rotorların çalışma durumuna göre daima ikinci derecede kalmıştır.

Muhtelif yönlennmeler için, sürükleyici eş kuvvet çiftinin sarkıncalarını önlemek için, bazı araştırmacılar biri yukarıdaki değeri 90° ye kadar çıkıntılı olan 2 rotoru yerleştirme düşüncesine vardılar. Çalışma durumunda güç aynı kalır. Fakat, negatif döndürme momenti alanları yok olur.

ELDE EDİLEN GÜÇ :

Güç katsayısı C_p ,

$$P = \frac{1}{2} \rho C_p S V^3$$

ifadesiyle belirtilen rüzgâr hızı ve güçle ilgilidir. Bu denklemdeki C_p nin yerini önceki denemelerde elde edilen 2. rotor için $0,30$, 4. rotor için $0,25$ max değerlerini aldığı anda ve $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$ olarak konulduğunda üretilen max güç :

$$P_{\max} = 0,18 S V^3 \quad 4. \text{ rotor için,}$$

$$P_{\max} = 0,15 S V^3 \quad 4. \text{ rotor için olur.}$$

S rotorun taramış alanını ifade eder.

$$S = h(2d - e) = hD$$

Artan güç katsayısı ve büyüyen taranmış alan nedeniyle 2. rotordan elde edilen max güç, aynı boyutları olan klasik bir Savonius rotorundan elde edilen max güçten % 25 - 30 arasında daha büyük olur. Uç hız oranı 0,9 ve 1 arasında olduğu zaman, güç max olur. Genelde 2. rotor tarafından geliştirilen güç :

$$P = \frac{1}{2} \rho C_p S V_2^3$$

bağıntısı ile hesaplanabilir.

$$0,9 < \lambda_0 < 1,6 \quad \text{ için } C_p = 0,53 (\lambda_0 - 0,2) (1,7 - \lambda_0)$$

$$0 < \lambda_0 < 0,9 \quad \text{ için } C_p = 0,5 \lambda_0 - 0,2 \lambda_0^2$$

GELİŞTİRİLMİŞ DÖNDÜRME MOMENTİ :

Güç ve döndürme katsayıları $C_p = C_m \lambda_0$ denklemiyle bağıntılıdır. C_p bilinirse, C_m ve bu şekilde döndürme momenti M de bulunur.

$$M = \frac{1}{2} \rho C_m R S V^2$$

BÖLÜM 6

TÜRKİYE DE RÜZGAR ENERJİSİNİ KULLANMA OLANAKLARI

Rüzgâr enerjisini kullanma sorunlarına bir görüş sunuluyor.

Her ay için Türkiye nin rüzgâr hız haritaları, geçmiş 20 - 30 yıldan fazla süreyi kapsayan önceki kayıtlara temel olacak şekilde ayrı ayrı yapılır. Rüzgâr enerjisi kullanma olanakları bu nedenle tartışılır.

Türkiye rüzgâr enerjisi hususunda zengin gözüküyor. Ancak elektrik şebekelerinden uzak olan kırsal alanlarda, yakın gelecekte birkaç küçük hava jeneratörü (1 - 10 kW) kurmak ilginç olabilir.

Burada Türkiye de kullanılan rüzgâr enerjisinin olanaklarını tartışıyoruz. Bu amaçla geçmiş 20 - 30 yıldan fazla süreyi kapsayan önceki kayıtlara temel olarak bizim memleketimizin aylık ortalama rüzgâr hız haritalarını hazırlıyoruz.

Dünyada rüzgâr enerjisinden faydalanma sorunlarına genel bir bakış, bizim tartışmamıza yararlı bilgiler verecektir.

İnsanlık, güçle değirmen çarkını desteklemek, suyu pompalamak, gemilerin yelkenlerini açmaları için rüzgâr enerjisini çalışır duruma getirdi. Sonuçta, güneş enerjisi ortalama $4000 \text{ kW} / \text{m}^2$ de rüzgâr enerjisine dönüştürülür. Böylece teorik olarak gücün 10^9 mW ı bizim gezegenimizin doğal rüzgârında mevcuttu. Bu potansiyel güç dünyanın, esas toplam güç gereksiniminden yüz defadan çok daha büyüktür.

Bir takım tekno - ekonomik sorunlar her nasılsa, rüzgâr enerjisinin kullanımını hala kısıtlamaktadır.

- Erken rüzgâr prototip (örnek) denemelerinin birkaçı ciddi mekanik zararlar nedeniyle başarısız olarak rapor edilmiştir.

- Rüzgârın değişkenliği en iyi makinanın mukavemet faktörüne müsaade etmez, % 35 üstün olan iyi bir bölgede dahi.

- Rüzgârların yetersiz kuvvette olduğu zaman ihtiyacı sağlamak için tatmin edici depolama çözüm yolları henüz başarılamamıştır.

- İlgili çevre sorunları, örneğin;

- RF radyodan ses alma ve televizyonla olası müdahale,

- Pervanelerden gürültü,

- Bitkilerden düşen parçalarla zarar riski,
- Makinaların kullanılabildiği yer (rüzgâr gücünü düzenleyen 500 MW için 100 km²)
- Bilinmez bir mesafeye bölgesel iklimin düzensizliği, havalandırma durumlarının düzensizliğine uygun ve,
- Belki o yöredeki halkın muhalefetine maruz estetik önem daha çok dikkat ister.
- İlgili fiatı, sadece işletmeyle ilgili masraflar, işletme ve bakım için olduğu halde, ilk büyük masraflardan dolayı, geleneksel güç üretimininkinden birkaç kez daha yüksek olarak hesaplanmıştır.

Bununla beraber bir yıllık ortalama 9m/s lik hız iyi bölgelerdeki makinalara dönüşen rüzgâr enerjisi, rüzgâr kuvvetli olduğunda geri çevrilebilen kömür yada petrol yakılmasından sağlanan istasyonlarındaki kadar ucuz elektrik üretilbildiği, genel olarak tahmin edilebilir.

Rüzgâr böylece bir dizel sistemle birleştiğinde yakıttan tasarruf etmek için yada bir hidroelektrik istasyonla birleştiğinde ortalama elde mevcut gücü arttırmak için kullanılabılır.

Dizel, hidro, rüzgâr nükleeri ve depolamadan oluşan karışık bir sistem daha ileride düşünülebilir.

Buradan yüzyılın sonuna kadar Amerikalıların ilk elektriği bulduğunun % 20 sine varan bir rüzgâr gücü, yani 500 000 MW nın o zaman dünyaya yerleştirilebileceği ümit edilebilirdi. (Şunu not etmek ilginçtirki, bahisteki güç üretimi 550 000 km² ye yakın yada Türkiye'nin 2/3 kadar çok toprak alanının kullanımı gereklidir.)

Sonuçta, rüzgâr enerjisinin kullanımı ümit verici görünüyor. Henüz onun kullanımı elde mevcut diğer enerji kaynakları kadar tam kabul edilmiş değildir. Rüzgâr enerjisinin yaygın kullanımı üstelik gerekli endüstriyel parçaların yapımı ve gelişmesi için tekno ekonomik sorunların çözümünü beklemek zorunda olacaktır.

Bununla beraber başlıca gelişen memleketlerin uzak kırsal alanlarda küçük rüzgâr güç araçlarının yerleştirilmesi genelde tercih edildiği hatırlanmalıdır. Böylece şunu not etmek ilginç olabilir, örneğin, Sovyetler Birliğinde uzak küçük köylere elektrik oluşturmak için herbiri 30 kW olan aşağı yukarı 500 000 rüzgâr güç üretim cihazını yerleştirmek plânlanmıştı.

Her ay için Türkiye'nin rüzgâr hız haritaları geçmiş yirmi otuz yıldan çok önceki verilerin koleksiyonları üzerine temel olarak ayrı ayrı çizilmiştir.

Konuyla ilgili sonuçlar tablo 1 ve 2 de ve 1, 2a ve 3 şekillerinde gösterilmiştir. Haritalarda, sonuçlar 20

yıldan çok 30 yıldan daha az bir süre üzerinde toplanan veriler sayesinde bulundu.

Bizim sonuçlarımız ve ilgili çizimlerin dışında aşağıdakiler not edilebilir.

- Türkiye rüzgâr enerjisi yönünden zengin değildir.

- Rüzgâr elektrik şebekesine oldukça yakın mesafede olan Türkiye'nin batı, kuzeybatı ve kuzey bölgelerinde nispeten enerjik olarak (4 - 5 m/s) eser.

- Zıt olarak hâlâ elektrik şebekesinin zayıf kaldığı yada tamamen olmadığı bölgeler, yani doğu ve güneydoğu bölgelerde rüzgâr hemen hemen bütün yıl içinde zayıftır. (1 - 2 m/s)

- Fakat yazın kuzeydoğu bölgesi rüzgâr enerjisinde (3 - 5 m/s) şaşılabilecek şekilde daha zengin olur.

En az 9 M/s olan bir rüzgâr hızı rüzgâr enerjisinin kullanılması için gerekli olabilir. Yine de bizim sonuçlarımızda bu minimum ihtiyaç sadece Türkiye'nin sınırlı bir parçasında (Toprağın % 25) tatmin edici olur. Bundan başka rüzgârın hızlı estiği yerde rüzgâr enerjisinden faydalanma genel olarak şebekeden ucuz ve zaten var olan elektriği kullanmak için makbul bir alternatif kurmamalıdır. Bu bakış açısından belki, sadece rüzgâr enerjisinden faydalanmanın düşünülebildiği yer Türkiye'nin güneydoğu bölümüdür ve ekseriya yazın daha uygundur.

O zaman rüzgâr ve güneş enerjisinin işe yarar duruma gelmesiyle beraber bağlantı kurulabilir.

Aşağıdaki gerçek yine de dikkat çeker.

Türkiye Elektrik İşletmesinin aylık yatırımlarının aşağı yukarı % 20 si yerleşim bölgelerinin elektrik uygulamasına gider. TEK, halen bu yerlere (1970 de % 0,6 , 1977 de % 2,5) toplam üretiminin % 3 den daha çoğunu değerlendirememektedir. Bizim yerleşim bölgelerimizin % 75 i hâlâ karanlıktadır. Böylece elektrik şebekesinden çok uzak olmayan yerleşim bölgeleri için bile, (küçük rüzgâr güç üretim cihazlarını yerleştirmeyi düşünmek ilginç olabilir.) dizel dönüşmenin ekonomik ve kolay olmadığı yerlerde, rüzgârın ortalama memnun edici bir hızda esmesi sağlanır. Böylece en az bazı dizel tasarrufları sağlanabilir.

Problemlere nasıl yaklaşmalı ? Hangi coğrafik yerleşim bölgelerini kesin olarak değiştirmek için önem verilmelidir ? Çözümü çıkarmak için memleketin bütün enerji probleminin genel düzenlemesinden özel rüzgâr enerji parçasına nasıl ilgi duyuldu ? İlgili uluslararası soruları nasıl ele almalı ? Hangi rüzgâr güç cihazları seçilmeli ? İthal edilmelimi ? Memleket içinde yapılmalı mı ? Nasıl ? Böylece bir rüzgâr güç aleti planı nasıl çizilir.

Bunlar şüphesiz merkezi soruların bazısıdır. Onlar çok zordur ve biz ne yazıkki onları cevaplamak için tam hazır değiliz. Sadece Türkiye 'de değirmen çarkı çevirmek ve su pompalamak için kullanılan 250 küçük rüzgâr aletinin var olduğunu not edelim.

Türkiye 'nin zengin olmadığını gösteren burada verdiğimiz veriler potansiyel rüzgâr enerjisiyle ilgilidir. Fakat kırsal alanlarda, elektrik şebekesinden uzak olmasa bile, yakın gelecekte birkaç küçük (1 - 10 kW) hava jeneratörü yerleştirmeyi düşünmek ilginç görünür. Türkiye 'nin güneydoğu kısmı yazın özellikle bu bakış açısından ilginç görünür. Lakin memleketin genel enerji problemlerinin içinde, rüzgâr enerjisinin kullanımıyla ilgili özel problemlerin düzenleme sorununa bir açıklık getirilmiş gibi görünmüyor.

Tablo 1. Farklı yerlerdeki muhtemel rüzgâr yön frekansları (%)

	ADANA	AFYON	ANKARA	ANTALYA	ERZİNCAN	BİLECİK	BOLU
K	28	12	24	25	48	15	4
NE	17	7	35	14	17	5	9
E	6	5	4	1	3	12	6
SE	3	18	3	13	2	9	10
S	18	11	5	10	9	4	12
SW	16	7	16	5	10	4	26
W	4	9	8	1	3	27	25
NW	3	31	7	31	7	24	8
	BURSA	GAZİANTEP	İSKENDERUN	ERZİNCAN	ERZURUM		
K	13	7	15	32	14	16	7
NE	25	61	9	11	8	8	11
E	16	6	7	4	13	14	14
S	5	7	7	12	9	7	12
SW	15	13	9	3	6	12	20
W	13	1	12	4	15	20	14
NW	9	3	33	16	26	16	8
	ERZURUM	GAZİANTEP	İSKENDERUN	ERZİNCAN	ERZURUM		
K	12	6	9	13	11	9	16
NE	51	65	16	6	8	10	12
E	4	3	6	3	3	9	7
SE	3	4	18	18	3	25	6
S	3	4	10	17	11	7	8
SW	21	12	13	8	13	6	35
W	2	6	17	16	26	22	7
NW	4	2	11	17	25	12	9

Tablo 1. (devam)

	AYŞEHİR	KIRŞEHİR	KONYA	KUTAHYA	İÜZBURGAZ	KALAFATYA	MANİSA
K	11	31	23	22	10	8	6
NE	10	15	17	10	34	12	13
E	6	4	6	7	14	8	38
SE	11	4	9	8	9	12	7
S	16	9	9	10	4	12	7
SW	12	11	11	12	13	26	10
W	17	12	11	10	5	11	14
NW	17	14	14	21	11	11	5
	BERSEN	KERZİFOK	İSİLA	SAMSUN	SİNOP	SIVAS	TEKİRDAĞ
K	15	11	7	14	11	23	12
NE	22	39	11	15	6	15	26
E	8	5	12	2	5	9	7
SE	6	8	15	2	28	7	14
S	7	7	9	18	9	10	10
SW	29	11	5	25	5	11	5
W	4	11	15	6	6	10	4
NW	9	8	23	18	30	15	22
	UEFA	UŞAK	YAK	ZONGULDAK			
K	11	12	4	11			
NE	5	12	18	6			
E	9	19	25	4			
SE	7	7	13	31			
S	5	6	10	12			
SW	10	10	9	5			
W	26	19	13	10			
NW	27	15	8	21			

Tablo 2. Ortalama rüzgâr hızları (m/saniye)

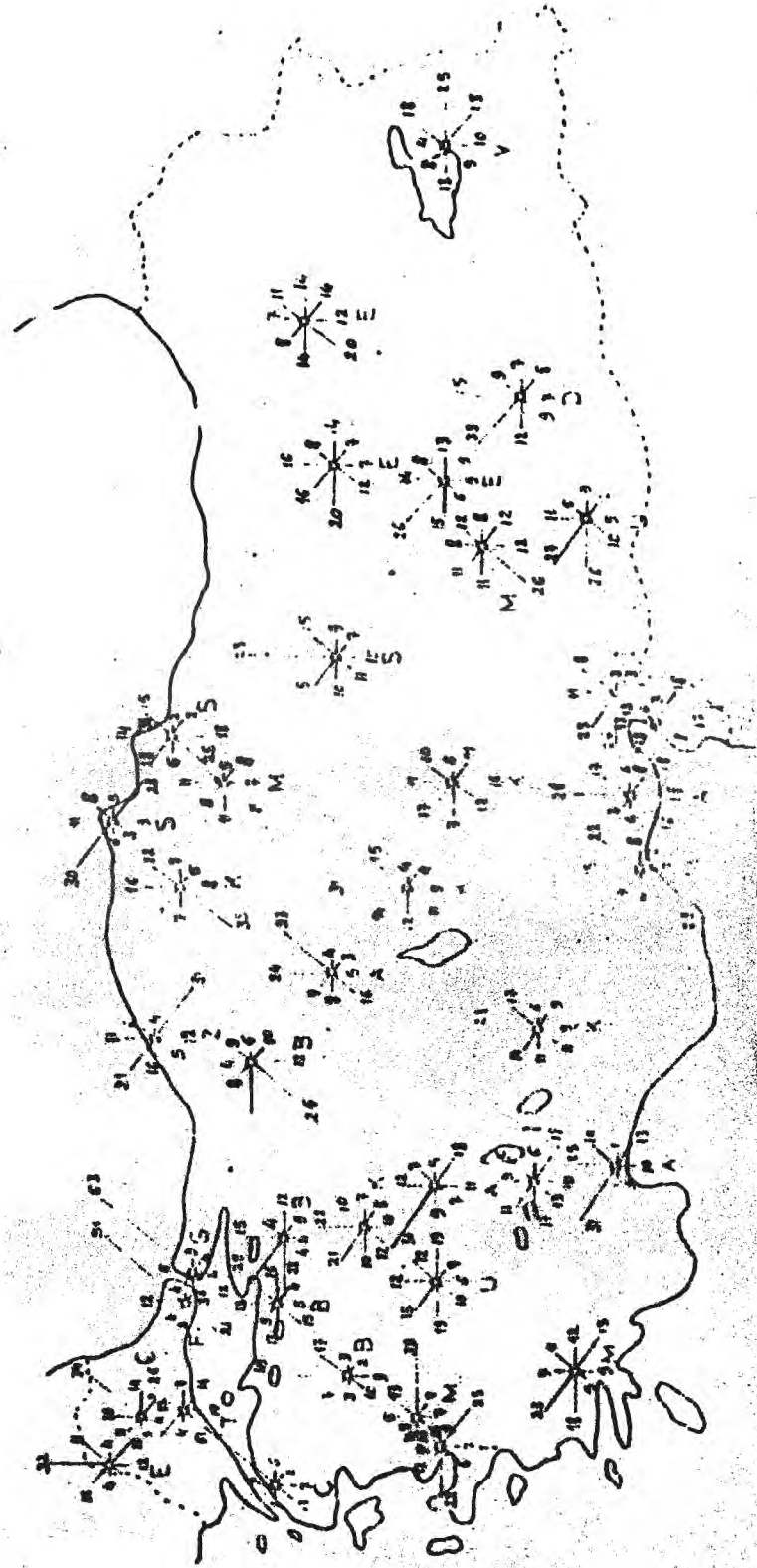
Kayıt devresi (yıllar)	Ayılar İstasyon	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Yıllık Ortalama
41	Adana	2.3	2.2	2.4	2.2	2.1	2.2	2.3	2.2	2.0	1.7	1.7	2.0	2.1
39	Afyon	2.8	3.0	3.1	3.1	2.6	2.5	2.9	2.8	2.4	2.0	2.1	2.6	2.6
27	Akhisar	1.8	2.0	2.3	1.8	1.7	2.1	2.7	2.6	2.0	1.5	1.0	1.3	1.3
21	Akşehir	1.9	2.1	2.0	2.1	1.7	1.6	1.4	1.3	1.3	1.2	1.4	1.6	1.6
21	Alpullu	2.2	2.4	2.6	2.2	1.6	1.5	1.5	1.4	1.3	1.4	1.6	1.9	1.9
23	Anamur	3.0	3.0	2.8	2.3	2.2	2.3	2.2	2.2	2.3	2.3	2.4	2.9	2.5
42	Ankara	3.2	3.4	3.6	3.6	3.1	3.2	3.6	3.6	3.1	2.8	2.7	2.9	3.2
27	Antakya	3.3	3.4	3.8	4.4	5.3	7.1	8.3	7.4	5.3	3.0	3.6	2.9	4.7
40	Antalya	3.5	3.6	3.5	3.1	2.7	2.9	2.9	2.8	3.2	3.0	3.0	3.3	3.1
28	Aydın	1.5	1.4	1.4	1.5	1.5	1.7	1.6	1.6	1.3	1.1	1.2	1.4	1.4
33	Balıkesir	2.9	3.2	3.4	2.7	2.3	3.0	4.1	4.1	3.5	2.6	2.2	2.6	3.1
21	Bandırma	5.6	5.4	5.8	4.6	4.1	4.6	6.2	6.2	6.0	5.3	4.2	4.8	5.2
33	Bilecik	3.6	3.8	3.8	3.7	3.4	3.5	3.7	3.6	3.3	2.8	2.9	3.5	3.4
25	Bediruz	3.1	3.3	3.0	2.5	2.2	2.4	2.7	2.4	2.2	2.0	2.4	3.0	2.6
34	Bolu	1.4	1.6	1.8	1.9	1.6	1.6	1.7	1.8	1.4	1.2	1.2	1.3	1.6
29	Burdur	2.5	2.8	3.0	2.8	2.0	1.6	1.6	1.6	1.6	1.8	2.0	2.2	2.1
30	Bursa	3.4	3.3	2.9	2.4	2.0	2.2	2.9	2.8	2.4	2.0	2.3	3.2	2.7
34	Çanakkale	5.7	5.8	5.3	4.7	3.9	4.0	4.7	4.9	4.7	4.6	4.8	5.6	4.9
25	Çorlu	4.5	4.4	4.3	3.8	3.4	3.5	3.9	4.0	3.7	3.6	3.5	4.3	3.9
27	Çorum	1.4	1.9	2.2	2.6	2.3	2.6	3.6	3.6	2.9	1.9	1.4	1.3	2.3
24	İzmir	3.3	3.3	3.0	2.9	2.9	3.2	3.1	3.0	2.8	2.7	2.7	3.1	3.0
33	Diyarbakır	2.2	2.7	2.9	2.6	2.4	3.2	3.7	3.3	2.8	2.2	1.6	1.7	2.6
25	Antalya	1.6	1.7	1.8	1.7	1.8	1.7	1.7	1.6	1.7	1.5	1.4	1.4	1.6
36	Edirne	2.0	2.3	2.2	1.9	1.8	1.5	1.6	1.6	1.4	1.4	1.5	1.9	1.7
33	Elâzığ	1.6	1.9	2.2	2.3	2.3	2.6	2.9	2.4	2.0	1.5	1.2	1.2	2.0
38	Erzincan	1.6	1.8	2.3	2.4	2.1	2.2	2.6	2.4	1.9	1.3	1.3	1.3	1.9
33	Erzurum	2.0	2.2	2.4	2.9	3.0	2.8	3.1	3.0	2.6	2.5	2.2	1.9	2.6
28	Fethiye	1.0	1.1	1.2	1.3	1.2	1.4	1.4	1.2	1.1	1.0	0.8	0.9	1.1
34	Floryax	4.3	3.0	3.8	3.2	2.8	2.9	3.5	3.4	3.2	3.0	3.3	4.0	3.5
37	Göztepe	3.5	3.4	3.3	2.9	2.7	2.8	3.2	3.1	2.8	2.6	2.7	3.3	3.0
30	Isparta	1.8	1.9	2.2	2.0	1.5	1.4	1.6	1.4	1.3	1.2	1.2	1.6	1.6
30	İskenderun	2.0	1.8	1.8	1.7	1.6	1.9	2.1	1.9	1.4	1.2	1.4	1.9	1.7
32	Geziantep	1.5	1.6	1.9	2.1	2.7	4.3	5.4	4.5	2.9	1.4	1.1	1.3	2.5

x İstanbul

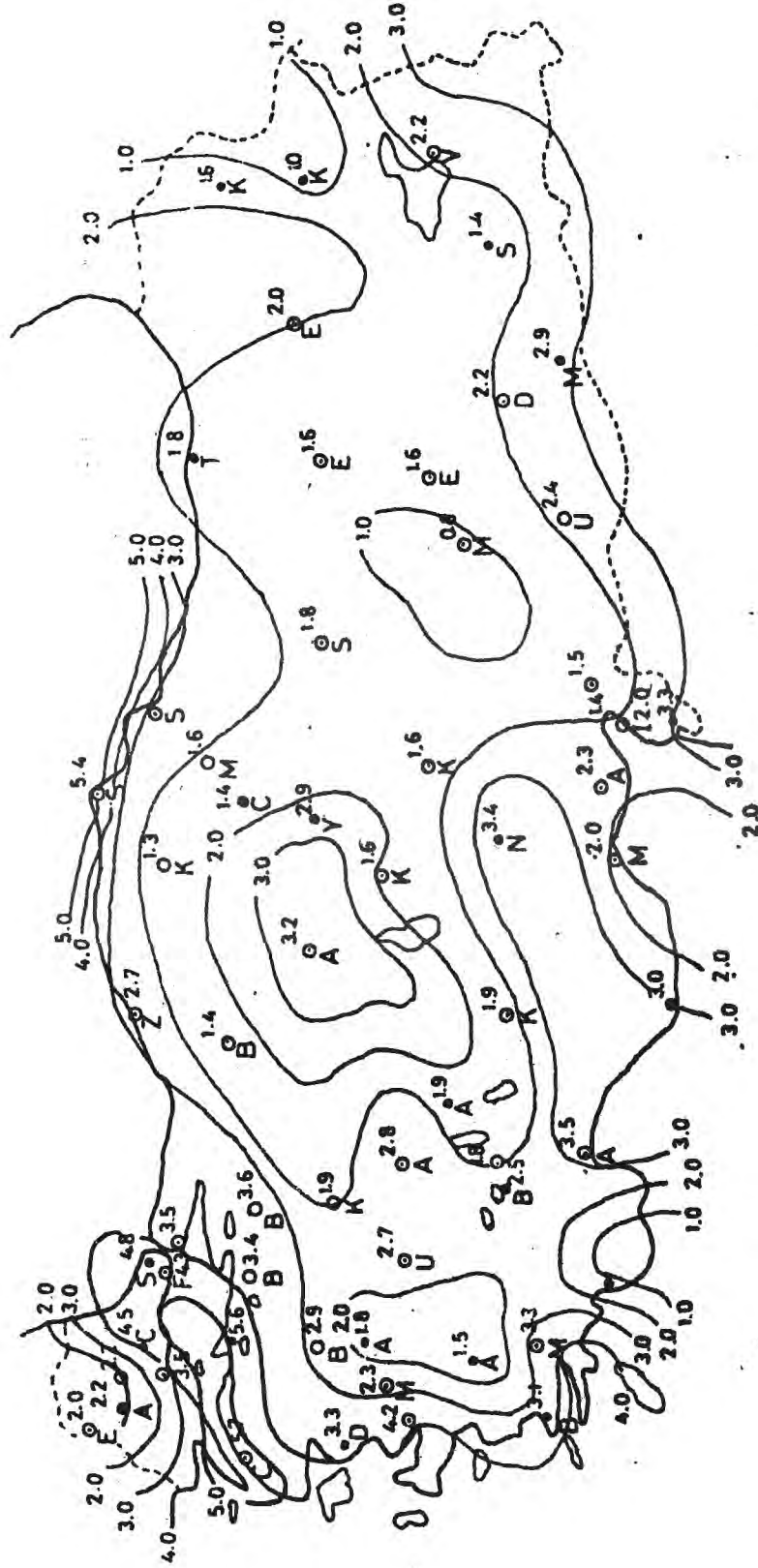
Tablo 2. (devam)

Kayıt devresi (yollar)	Aylar		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Yıllık Ortalama
	İstasyon														
35	Izmir		4.2	4.4	4.0	3.5	3.1	3.2	3.4	3.2	2.9	2.9	3.3	4.0	3.5
20	Karabük		1.0	0.9	1.1	1.6	1.7	1.3	1.7	1.6	1.4	1.2	1.1	0.9	1.3
21	Kars		1.6	1.7	2.0	2.5	2.3	2.2	2.4	2.4	2.1	1.8	1.5	1.5	2.0
34	Kastamonu		1.3	1.6	1.8	1.7	1.4	1.3	1.4	1.2	1.1	1.1	1.2	1.2	1.4
37	Kayseri		1.6	1.9	2.3	2.4	2.1	1.7	1.8	1.6	1.5	1.4	1.3	1.6	1.5
34	Kırşehir		1.6	1.9	2.2	2.1	1.9	2.3	3.0	2.7	2.1	1.6	1.2	1.4	2.0
42	Konya		1.9	2.2	2.5	2.6	2.1	2.3	2.7	2.5	2.1	1.6	1.4	1.6	2.1
30	Kütahya		1.9	2.1	2.2	2.2	1.7	1.5	1.6	1.5	1.4	1.3	1.4	1.7	1.7
30	Lüleburgaz		2.2	2.3	2.4	2.2	1.6	1.5	1.6	1.6	1.5	1.6	1.7	1.6	1.6
35	Kelateye		0.8	1.1	1.5	1.6	1.5	1.4	1.4	1.3	1.2	0.9	0.8	0.7	1.2
30	Karış		2.3	2.6	2.6	2.4	2.0	2.1	2.3	2.3	2.0	1.6	1.8	1.9	2.2
24	Kardin		2.9	3.2	2.9	2.6	2.4	2.7	2.5	2.4	2.2	2.3	2.5	2.6	2.6
31	Kersin		2.0	2.0	2.2	2.2	2.3	2.6	2.7	2.4	2.1	1.7	1.5	1.9	2.1
31	Merzifon		1.6	2.0	2.4	2.7	2.5	2.6	3.4	3.3	2.7	1.8	1.4	1.4	2.3
30	Muğla		3.3	3.5	3.6	3.5	3.1	3.9	4.2	3.9	3.9	2.8	2.7	3.2	3.4
25	Niğde		3.2	3.5	3.7	3.7	3.3	3.2	3.8	3.6	3.3	3.0	3.9	3.1	3.4
25	Samsun	x	2.5	2.5	2.1	1.6	1.4	1.6	1.9	1.9	2.0	1.6	1.9	2.4	2.0
20	Sarıy		4.8	4.5	5.1	4.3	3.8	4.3	5.7	5.6	5.2	4.8	4.0	4.3	4.7
23	Sarıy		1.4	1.7	2.0	2.0	1.8	2.0	2.0	2.0	2.0	1.8	1.5	1.7	1.8
23	Sinir		5.2	5.2	5.6	5.0	4.1	4.1	4.4	4.2	4.1	4.1	4.4	4.3	4.7
33	Sinot		1.8	2.0	2.6	2.5	2.2	2.5	2.4	2.2	1.8	1.5	1.4	1.5	2.0
38	Sivas		3.8	3.5	3.3	2.6	2.3	2.5	2.9	3.1	3.1	3.2	3.1	2.5	3.1
31	Tekirdağ		1.8	1.5	1.5	1.5	1.4	1.2	1.2	1.3	1.5	1.5	1.5	1.7	1.6
23	Tatlıca		2.4	2.6	2.8	2.3	2.7	3.7	3.9	3.3	3.0	2.2	2.0	2.4	2.8
37	Trife		2.1	2.9	3.2	3.2	2.7	2.9	3.4	3.2	2.8	2.4	2.2	2.4	2.8
31	Uşak		2.2	1.9	2.0	2.0	1.9	1.7	1.8	1.6	1.9	1.8	1.8	1.9	1.9
31	Van		2.9	2.9	3.2	3.2	2.6	3.0	4.0	3.6	2.7	2.4	2.3	2.8	3.0
20	Yozgat		2.7	2.7	2.4	2.0	1.9	1.9	2.0	2.1	2.3	2.4	2.4	2.6	2.3
31	Zonguldak		2.7	2.7	2.4	2.0	1.9	1.9	2.0	2.1	2.3	2.4	2.4	2.6	2.3

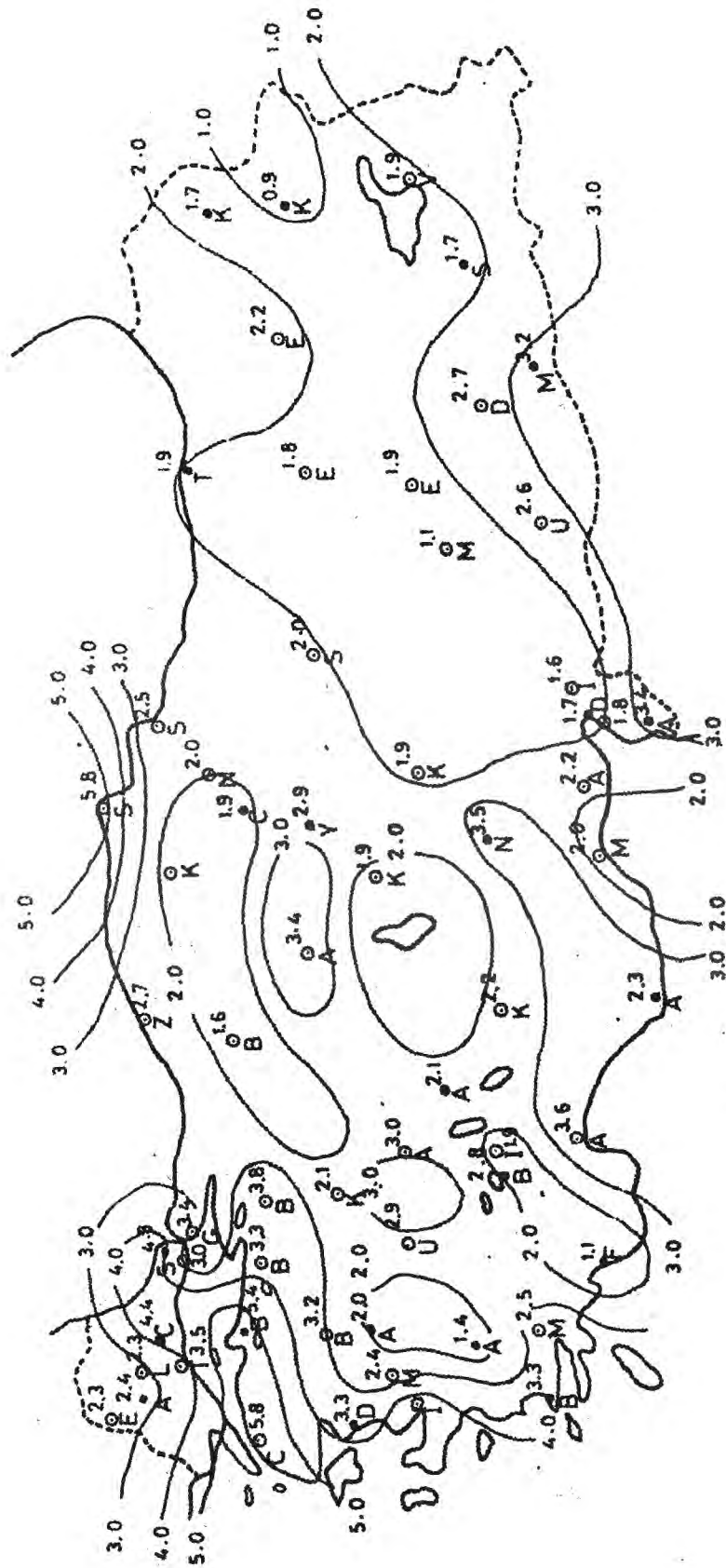
x İstasyon



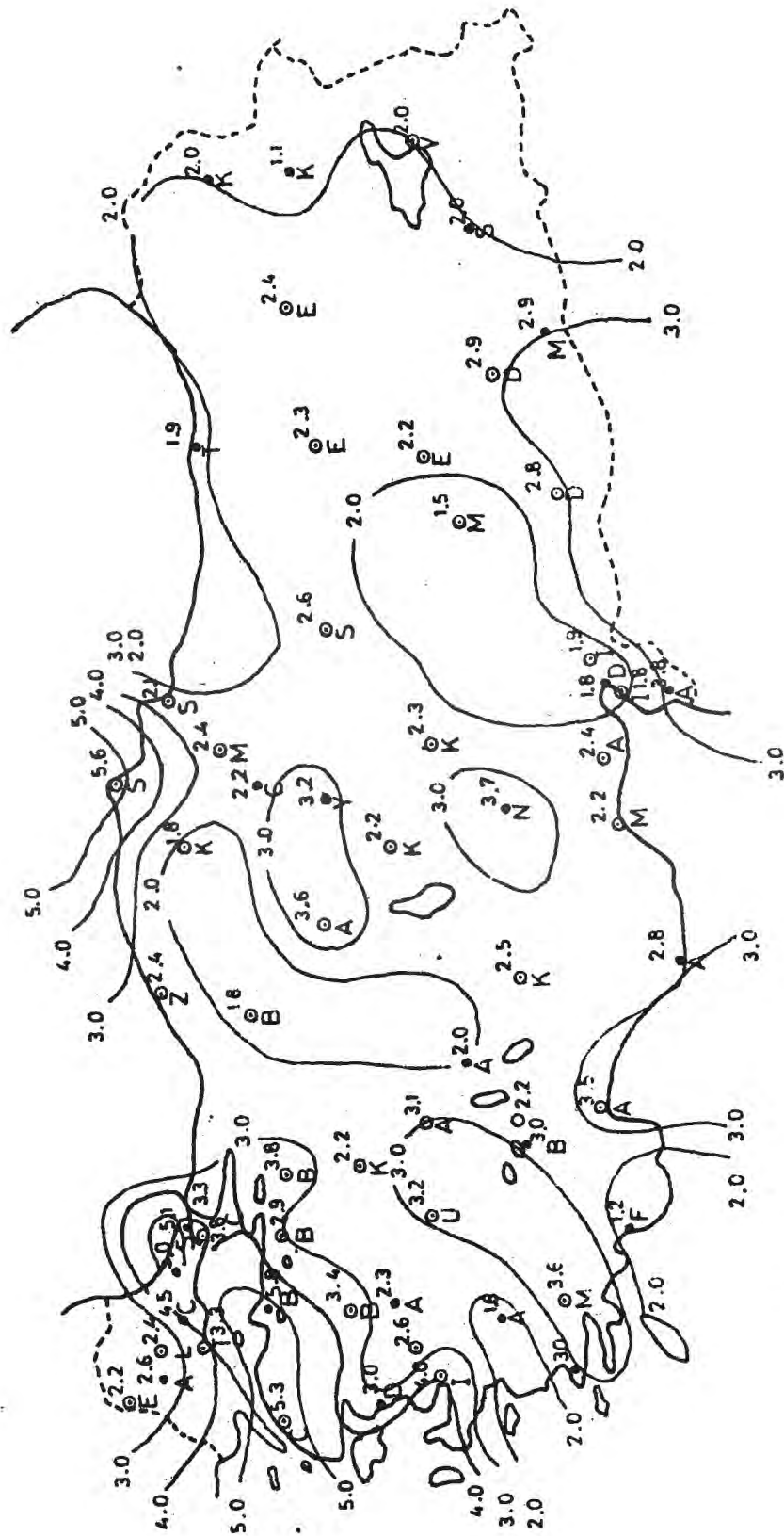
Şekil 1. Nispi rüzgâr sıklığındaki rüzgâr gülleri



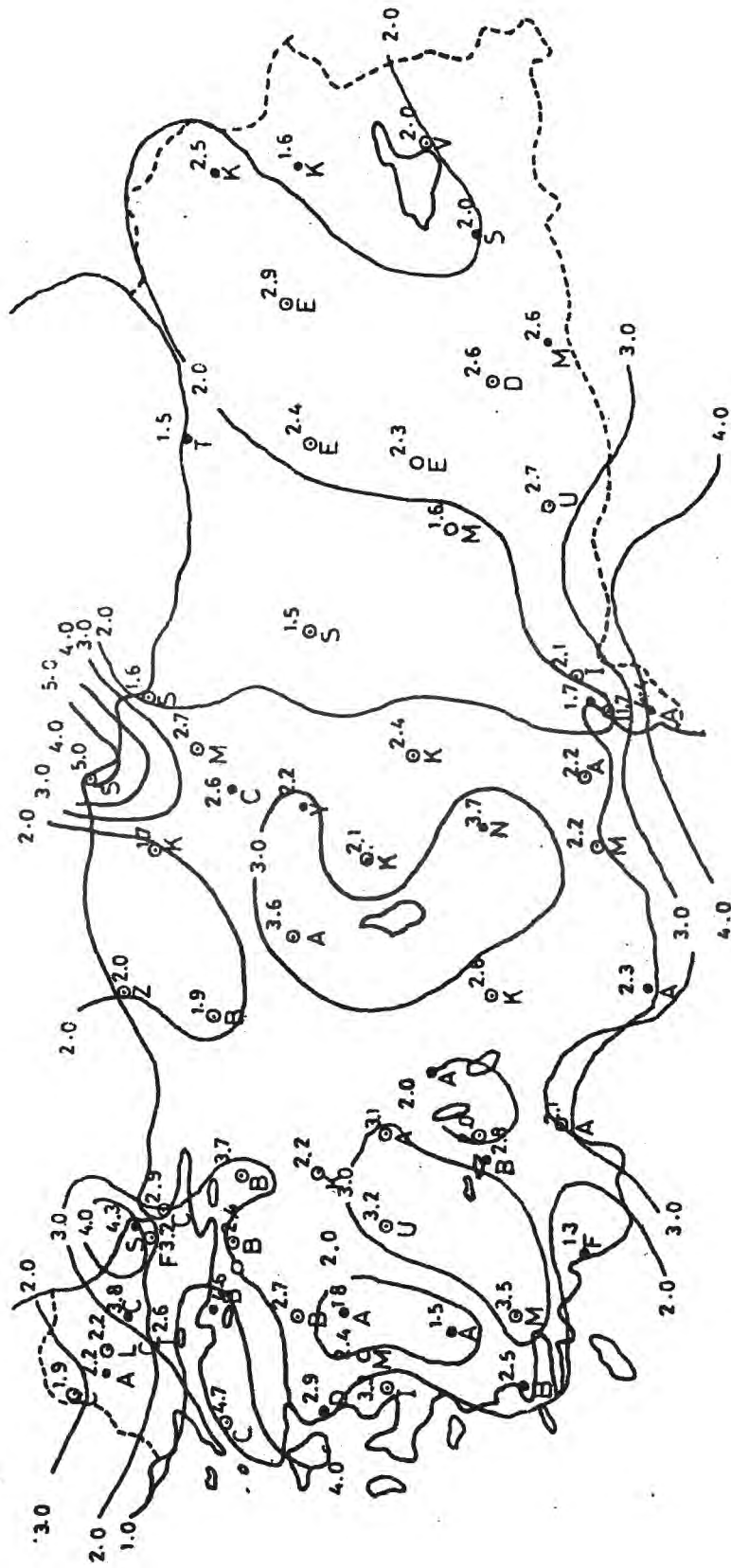
Şekil 2a. Ocak a yıl izotokları (m/s)



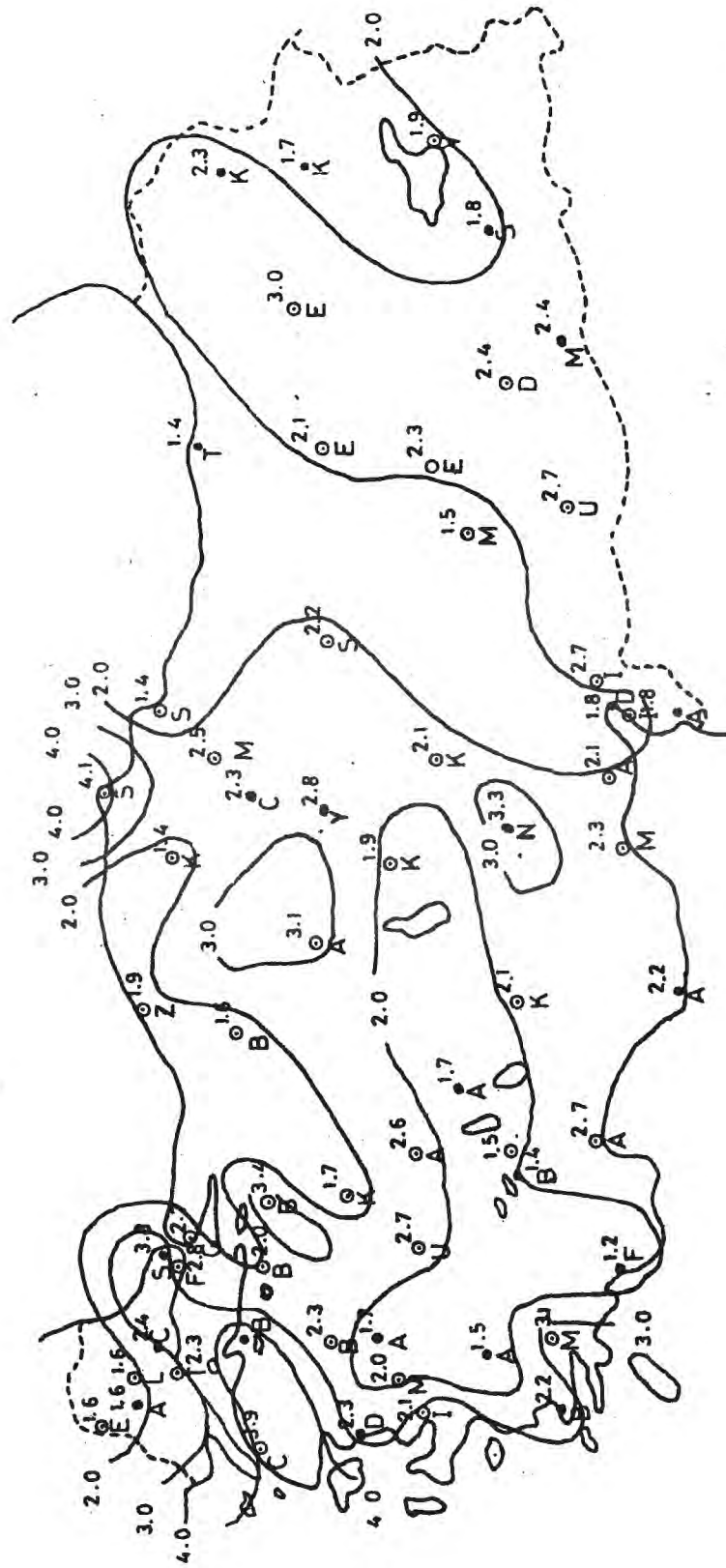
Şekil 2b. Şubat ayı izotokları (m/s)



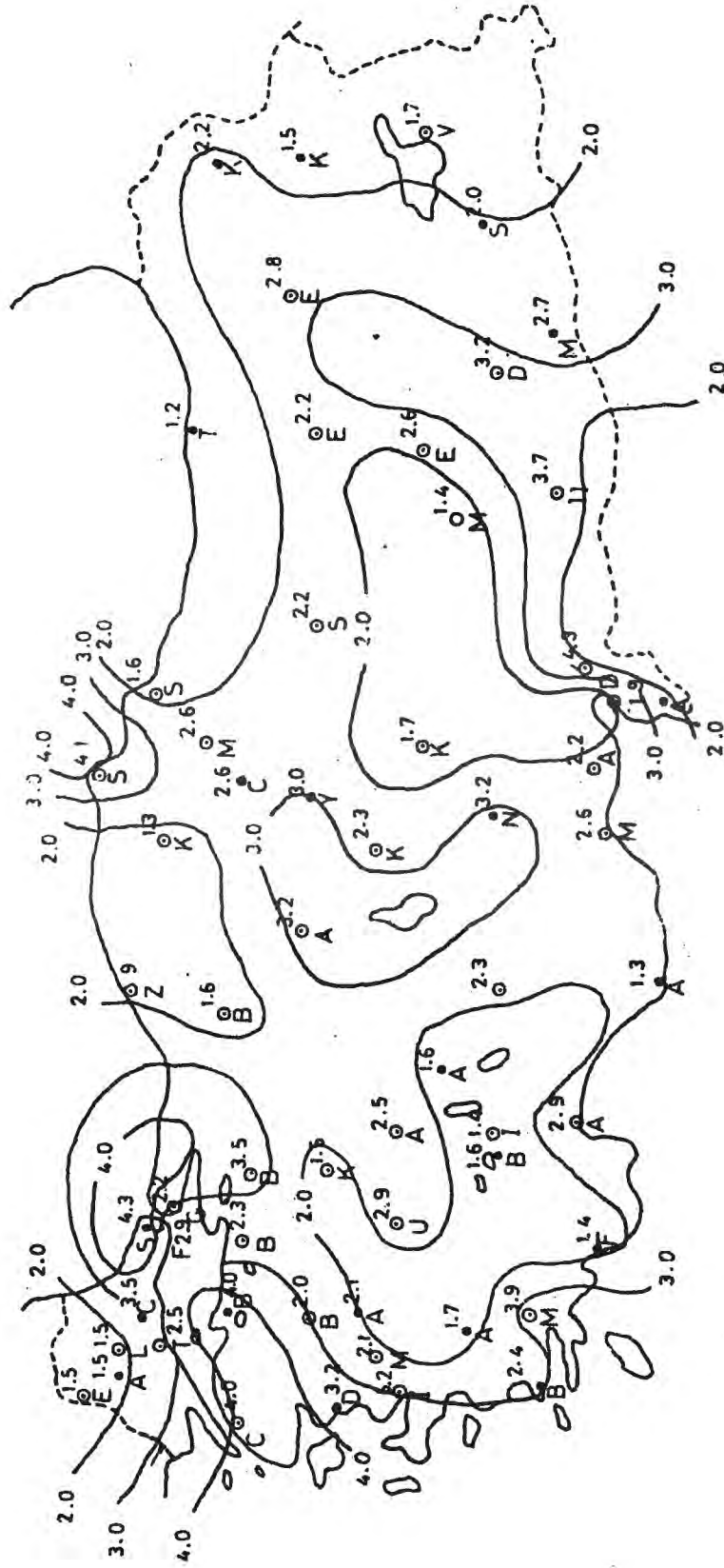
Şekil 2c. Mart ayı izotokları (m/s)



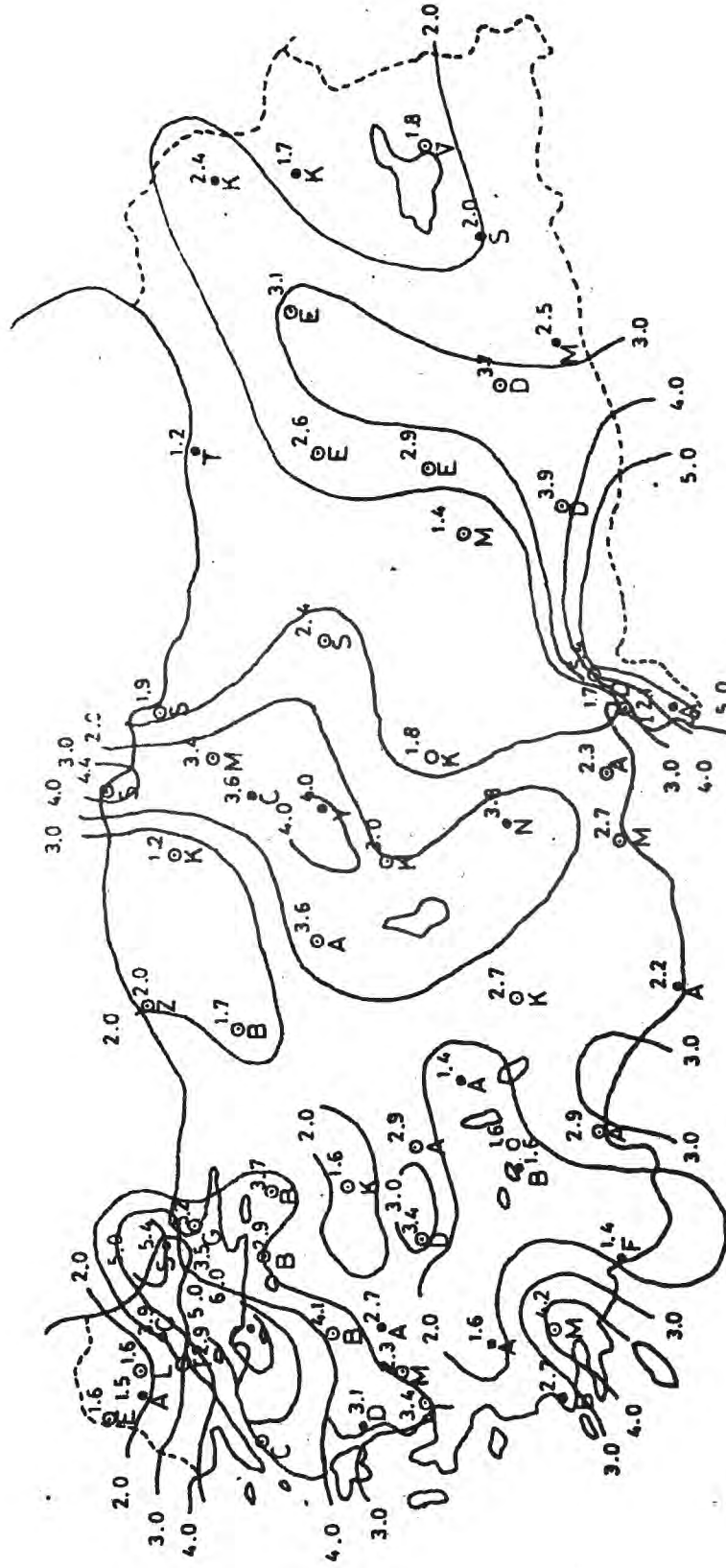
Şekil 2d. Nisan ayı izotoklürü (m/s)



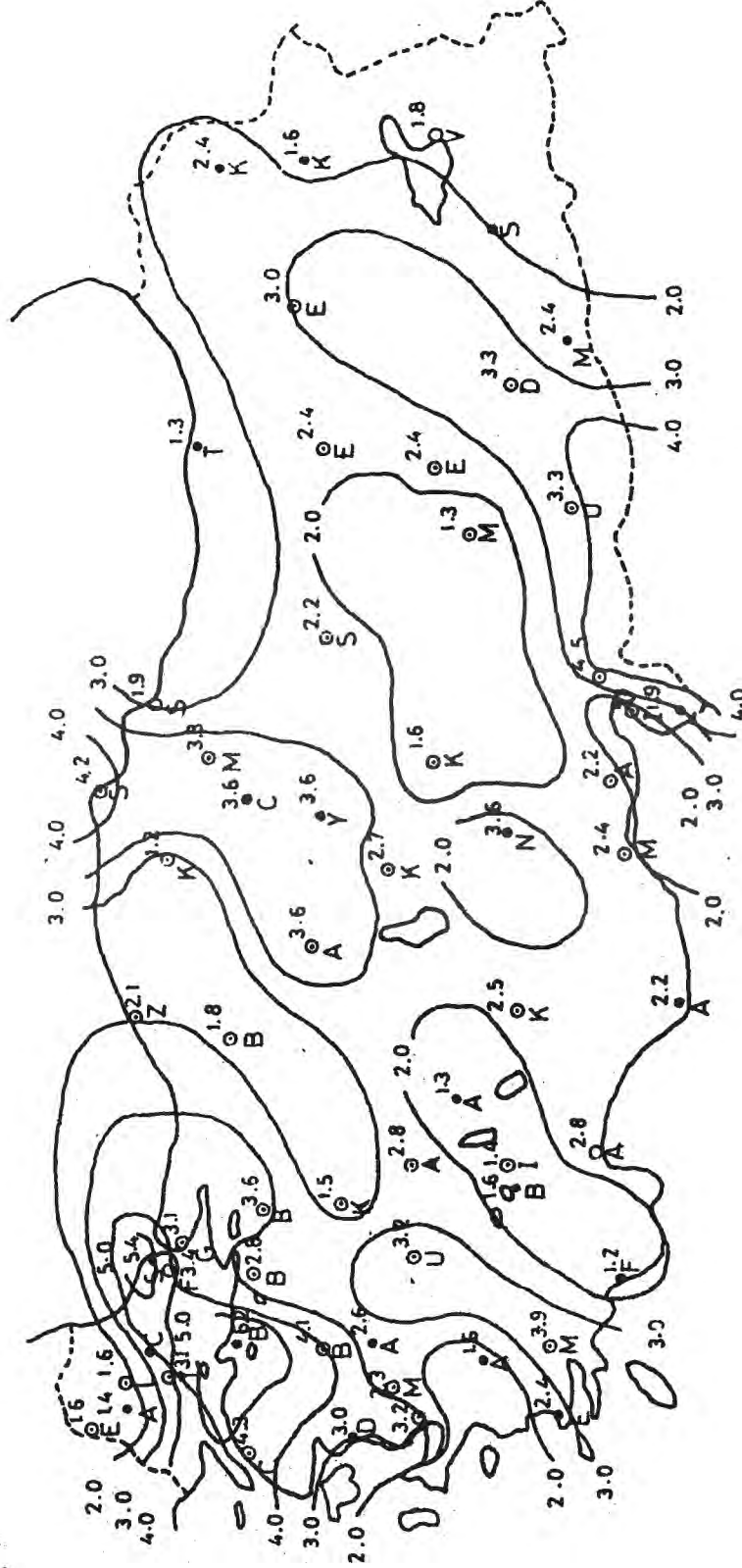
Şekil 2e. Mayıs ayı izotokları (m/s)



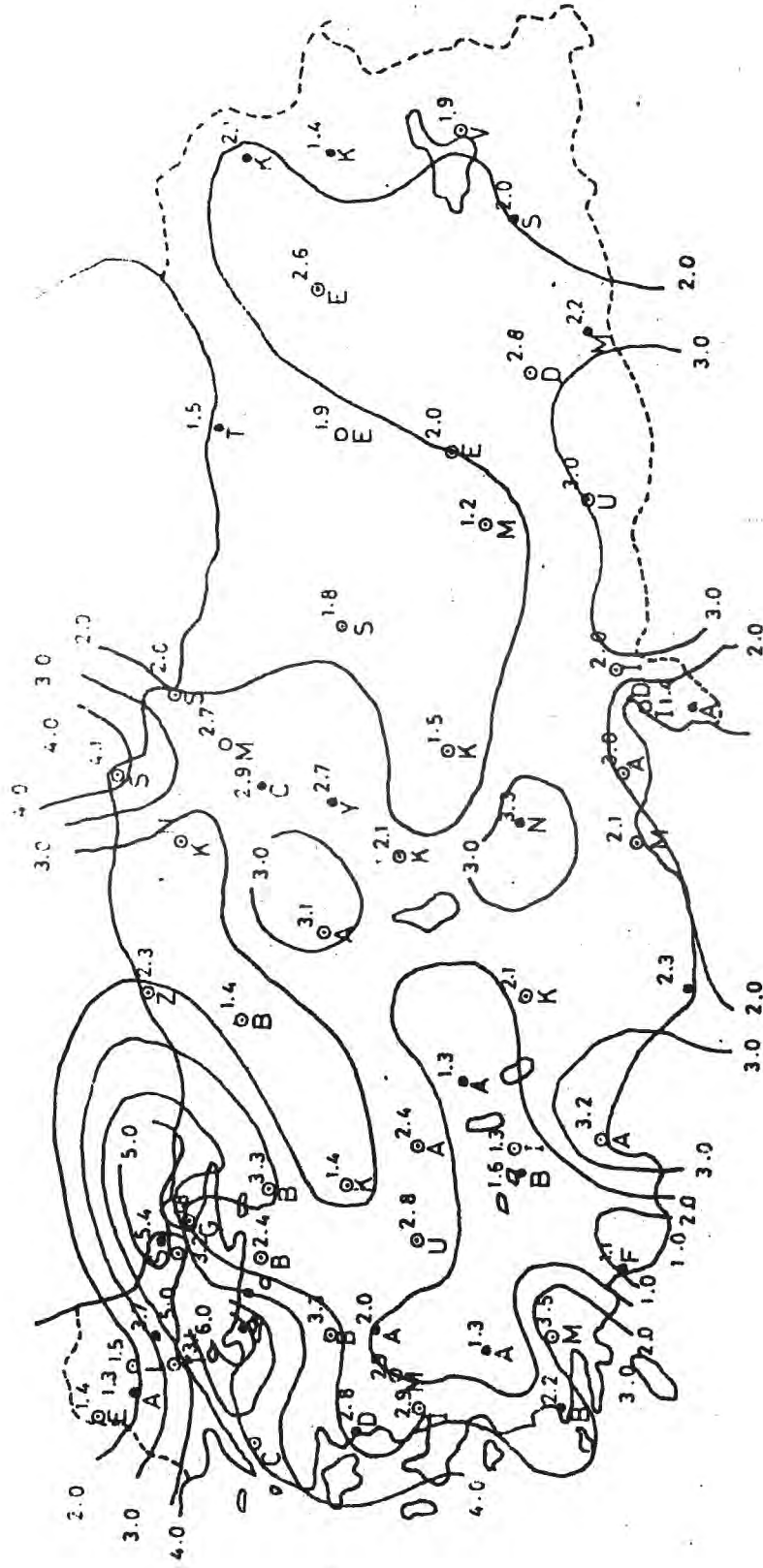
Şekil 2f. Haziran ayı izotokları (m/s)



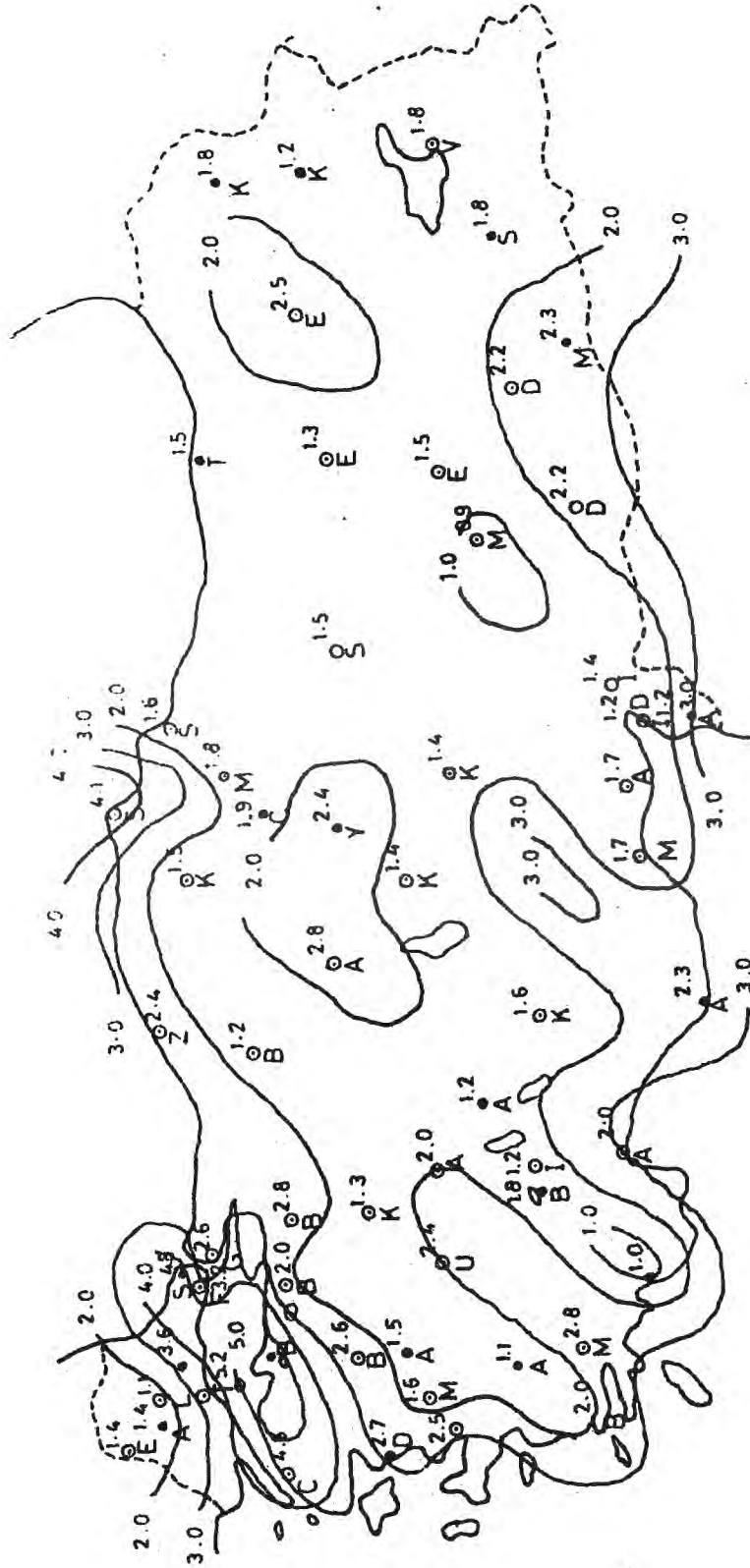
Şekil 2g. Temmuz ayı izotokları (m/s)



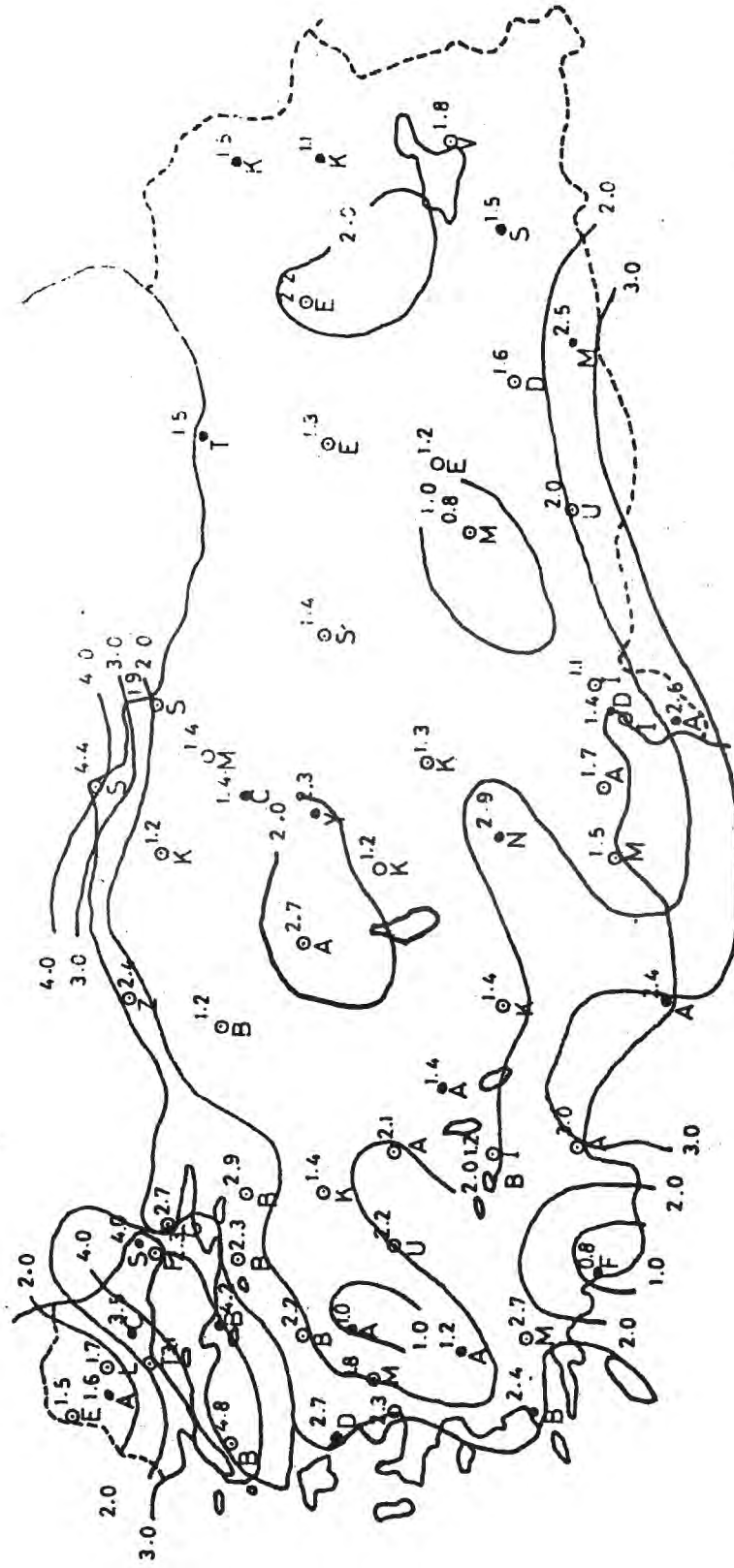
Şekil 2h. Ağustos ayı izotokları (m/s)



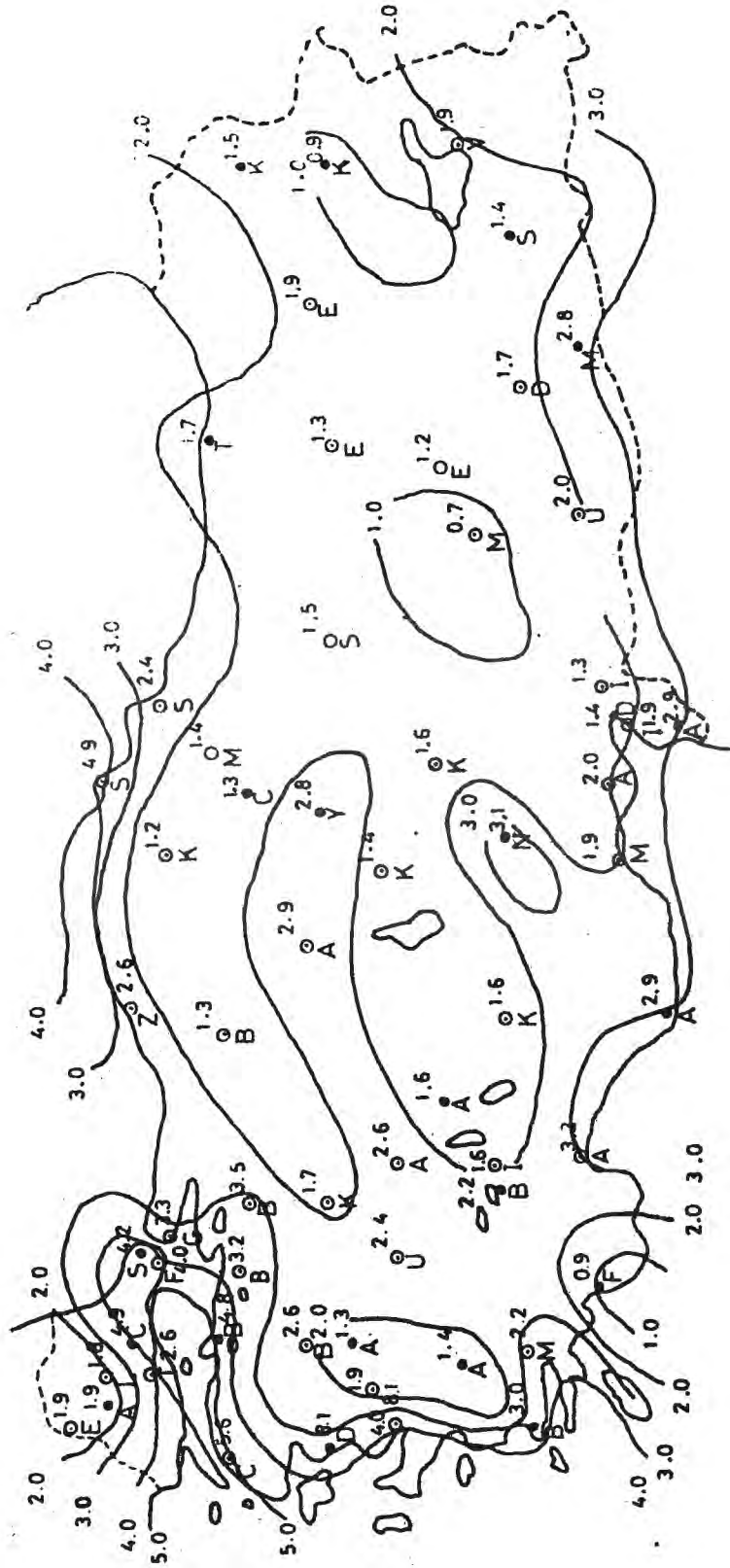
Şekil 21. Eylül ayı izotokları (m/s)



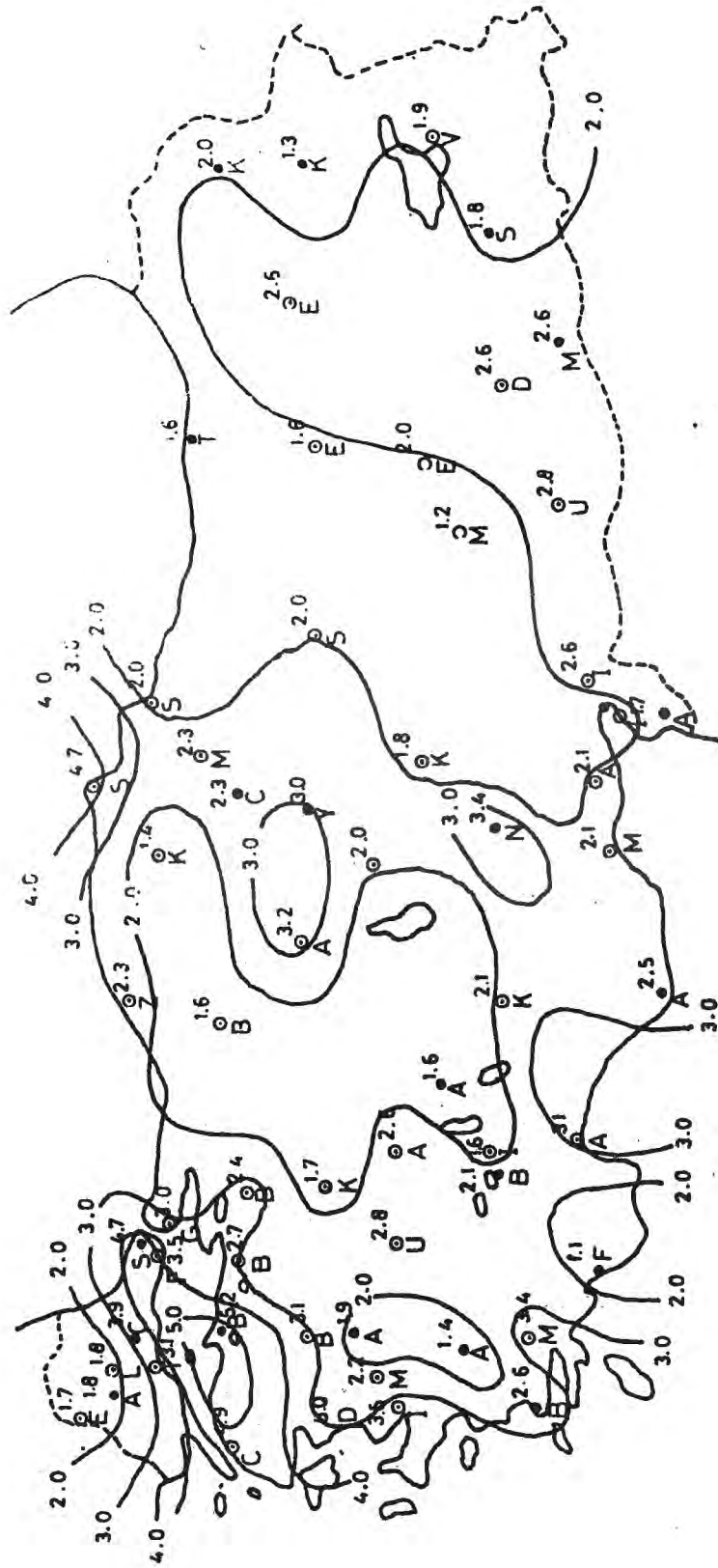
Şekil 2j. Ekim ayı izotokları (m/s)



Şekil 2k. Kasım ayı izotokları (m/s)



Şekil 21. Aralık ayı izotokları (m/s)



Şekil 3. Bir yıllık esas ortalamadaki izotoklar (m/s)

Tablo 3

ESKİŞEHİR En hızlı rüzgâr ve yönü (m/s)

YIL	A Y L A R											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1950	NW 10.5	NW 12.6	SW 14.3	W 27.6	NW 7.7	N 11.0	N 13.7	NE 12.5	NW 10.1	W 12.8	S 9.9	ESE 10.2
1951	N 9.8	WNW 10.4	NW 12.9	ESE 9.8	NNW 13.5	NNW 14.6	N 16.4	WNW 12.1	N 9.2	NNE 8.9	NNW 15.0	NW 13.1
1952	E 8.6	S 12.2	N 15.5	WSW 15.0	NNW 23.6	NW 25.5	N 16.5	NNE 18.2	NNW 8.3	NW 14.6	NW 22.6	E 15.0
1953	W 11.8	S 24.5	WNW 18.1	N 18.0	WNW 24.4	NNW 19.8	NW 19.5	W 5.0	NNW 13.8	E 5.3	W 8.1	N 10.1
1954	WNW 20.7	SW 17.7	NW 7.2	NW 9.5	NW 20.7	NW 23.2	N 17.7	W- NW 20.7	N 19.2	SE 8.4	NE 6.3	SW 7.7
1955	E 8.0	SSW 24.4	SSW 24.4	SSW 20.7	SW 20.7	NW- W 18.9	N-NW 27.8	SW 20.7	W 7.7	W 6.6	SW 24.4	W 6.3
1956	NW 20.1	S 18.0	NW 17.8	SW 24.4	NW 20.1	W-SW 5.6	NW 16.2	S 16.3	NW 16.5	SSW 20.7	SSW 20.7	SE 8.1
1957	N 7.4	NW 24.5	N 7.8	S 25.4	S-SW 16.1	NW 17.9	N 17.9	N-W 16.5	S&SE 17.6	N 11.7	NW 15.6	S-W 12.1
1958	N-NW 20.7	SW 16.3	SSW 25.8	W-SW 22.4	SW 6.6	SSE 17.9	SW 17.2	N-NE 20.7	NW 8.3	S 19.7	E 6.3	E 6.5
1959	W 9.6	N 17.1	NW 14.3	S 19.7	SW 19.1	SW 4.1	NW 2.9	W 2.7	NW 17.0	NW 3.3	SE 3.3	W 3.6
1960	SW 17.9	W 19.7	W 15.2	W 14.3	SE 10.3	W 21.5	W 26.8	NW 9.8	NNW 9.0	E 8.2	N 8.4	ENE 7.1
1961	E 11.9	N 21.5	SSW 26.8	WNW 7.9	SSW 21.0	SW 17.9	N 10.2	NNW 9.3	N 16.5	N 7.9	NW 9.3	E 8.9
1962	S 18.3	SW 20.6	SE 23.2	SW 25.5	N 13.5	N 16.5	NW 17.9	N 17.0	WNW 17.9	N 15.2	S 5.5	W 17.9
1963	N 20.6	S 18.3	NW 22.8	WSW 18.3	N 17.9	N 16.1	NNW 19.7	WNW 15.2	NNW 17.4	W 12.5	W 7.3	SSW 18.3
1964	N 20.2	NW 8.0	SSW 15.6	SW 17.9	SSW 14.3	NW 18.3	W 8.6	WNW 17.9	SW 11.6	NW 8.7	N 18.3	N 16.5
1965	SSE 18.3	WNW 14.8	W 13.9	W 19.7	W 13.4	SSW 16.5	W 14.8	NNW 13.3	N 11.2	N 18.8	N 19.2	S 6.6
1966	S 17.4	S 8.6	SW 17.9	NW 16.2	NW 14.5	WNW 11.1	WSW 12.6	WNW 15.3	NNW 12.0	NW 9.4	WSW 13.3	W 14.5
1967	NW 19.3	NNW 10.1	WNW 17.7	W 18.1	SSW 13.6	WSW 15.5	NNW 13.9	WNW 12.9	NW 11.8	NW 11.5	SE 12.8	W 14.2
1968	E 9.2	W 8.7	W 12.4	W 9.8	W 11.1	WSW 7.6	W 8.4	W 20.0	W 8.6	W 7.2	NW 5.6	W 7.2
1969	W 7.6	W 15.4	NW 8.0	SW 11.1	W 8.6	WSW 12.1	W 8.4	W 7.5	W 8.4	NW 6.8	NW 6.9	S 15.6
1970	SW 12.0	SW 18.3	SW 18.8	SSW 11.6	NW 12.5	SW 13.9	NW 21.5	WSW 12.0	W 8.0	W 7.5	W 11.2	W 9.0
1971	SW 13.4	SW 21.6	S 21.8	SW 14.8	SW 12.1	SW 13.9	SW 12.5	WNW 8.1	SW 20.5	WNW 7.8	SW 12.5	WNW 7.6

ESKİŞEHİR En hızlı rüzgâr ve yönü (m/s)

YIL	A Y L A R											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1972	NW 6.8	W 9.3	W 10.4	SW 16.5	SW 14.3	NW 15.2	SW 12.5	SW 14.3	SW 16.1	SW 13.9	NW 6.4	W 5.4
1973	E 7.2	SW 20.1	SW 17.0	W 7.8	W 6.9	SE 12.1	SW 15.2	W 6.0	WNW 6.2	SW 11.2	SW 7.4	SW 14.3
1974	WNW 9.3	SW 11.6	WNW 7.2	SW 13.4	SW 17.3	W 6.9	WHW 6.9	W 6.2	W 7.2	NW 5.4	WSW 5.4	E 6.3
1975	NW 6.9	NW 6.2	SW 7.5	SW 10.2	W 5.7	NW 4.6	NW 8.4	W 5.8	W 5.8	SE 5.6	E 6.2	W 8.1
1976	NNW 7.0	NW 7.5	SW 6.8	W 9.3	W 8.1	W 6.4	WNW 13.4	NW 6.6	WSW 5.8	W 5.1	W 5.8	SW 9.4
1977	W 8.0	WSW 5.8	W 8.0	WSW 11.1	WSW 6.2	NW 5.2	NNW 5.8	NW 6.8	NW 5.8	N 6.3	SSW 20.1	E 6.3
1978	W 5.0	N 7.8	NW 6.9	WSW 6.8	W 6.6	NW 11.5	WNW 13.1	WNW 7.6	NNW 6.5	E 6.1	SSW 16.1	WNW 19.2
1979	SW 15.7	SSW 19.0	SSW 13.1	SW 15.5	NNE 11.4	NNE 12.6	WNW 11.9	NNW 10.8	NNW 11.5	NW 11.3	N 12.0	NW 25.2
1980	SSE 19.0	W 9.6	WNW 16.1	WSW 13.3	WNW 16.3	NNW 8.2	WNW 9.2	NW 7.2	W 7.8	W 7.0	NW 16.7	NNW 17.4
1981	E 7.8	WNW 14.8	S 21.1	NW 8.9	SW 12.4	N 8.7	W 6.9	NW 5.3	W 5.6	W 4.5	SE 5.7	E 6.3
1982	W 8.7	W 6.9	SW 6.8	SW 11.9	W 7.8	W 5.7	NW 6.6	NNW 5.7	WNW 6.3	W 5.4	ESE 12.3	E 5.4
1983	W 5.4	NE 12.3	SE 5.7	WSW 12.3	NW 6.3	-	W 6.8	N 5.8	NE 6.3	NW 6.0	E 4.6	W 6.0
1984	NNW 8.0	E 4.4	SE 20.8	WNW 6.8	E 5.4	WNW 6.0	NNW 5.7	NW 5.7	W 5.2	NW 4.5	E 5.7	ESE 14.4

Ref. Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü

Tablo 4

Esme sayısı (Hakim rüzgâr) (1949 - 1980)

nler	A Y L A R												Toplam
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
	76	63	103	98	111	140	163	146	91	89	62	52	1194
NE	11	18	14	23	17	19	32	41	20	32	21	15	273
E	75	51	85	82	84	99	105	105	104	104	94	90	1078
NE	100	73	63	56	56	44	30	36	43	69	91	118	779
	755	561	423	279	229	136	103	117	163	313	582	757	4418
SE	201	152	120	57	54	13	13	20	41	97	156	196	1120
E	311	235	201	123	84	41	30	32	50	157	225	306	1801
SE	60	30	41	29	25	11	6	7	15	33	50	58	365
	68	105	61	74	43	38	19	16	32	51	85	62	654
SW	22	18	32	39	34	24	12	12	12	29	21	31	286
W	96	121	170	223	167	151	134	112	100	123	94	102	1593
SW	64	93	109	153	139	142	163	145	140	109	58	69	1384
	432	473	670	730	886	906	1002	994	906	638	378	390	8405
NW	90	82	136	120	184	182	195	208	147	79	54	85	1562
W	169	214	298	328	456	492	462	344	207	145	145	149	3646
NW	34	36	46	67	64	82	131	145	120	75	49	39	888
	406	387	404	399	417	396	346	378	542	771	715	457	5618
	2976	2712	2976	2880	2976	2880	2976	2976	2880	2976	2880	2976	35064
	Hakim rüzgâr yönü: W												

Ref. Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü

BÖLÜM 7

1 KW ENERJİ ÜRETECEK YELDEĞİRMENİ
İÇİN GEREKLİ HESAPLAMALAR

Rotor çapı : $D = 3 \text{ m.}$

Kanat sayısı : $b = 3$

Rüzgar geliş hızı : $V_1 = 8 \text{ m/sn.}$

Verim : $\% 80$

2-3 kanatlı rotorlar, hızlı çalışan rüzgâr rotorlarıdır.

Hızlı çalışan rüzgar rotorlarında güç :

$$P = 0,2 D^2 V^3$$

$$P = 0,2 \cdot 3^2 \cdot 8^3$$

$$P = 921,6 \text{ W}$$

Verim $\% 80$ olduğundan

$$P = \frac{921,6}{0,80} = 1152 \text{ W}$$

2-3 kanatlı rüzgâr rotorlarında uç hız oranı $\lambda_0 = 6$ olur.

Rotoron devirsel hızı :

$$N = \frac{\lambda_0 \cdot V}{\pi \cdot D} = \frac{6 \cdot 8}{\pi \cdot 3} = 5,09 \text{ dev/sn.}$$

$$N = 300 \text{ dev/dak.}$$

Rotor arasından geçen rüzgar hızı :

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2}$$

V_1 : Rotora önden gelen rüzgar hızı

V_2 : Rotora ters yönde rüzgar hızı

$$\text{En uygun çalışma koşullarında } V = \frac{2}{3} V_1$$

$$V_2 = \frac{V_1}{3} = \frac{8}{3} = 2,7 \text{ m/sn.}$$

$$V = \frac{2}{3} V_1 = \frac{2}{3} \cdot 8 = 5,3 \text{ m/sn.}$$

KANAT HESABI :

$$R = 1,5 \text{ m.} \quad r = 0,15 \text{ m.} \quad \lambda_0 = 6 \quad b = 3$$

$$\lambda = \lambda_0 \frac{r}{R}$$

$$\lambda = 6 \cdot \frac{0,15}{1,5} = 0,6$$

Sapma açısı (I)

$$\cot g I = \frac{3}{2} \lambda_0 = \frac{3}{2} \lambda_0 \frac{r}{R}$$

$$\cot g I = \frac{3}{2} \cdot 0,6$$

$$I = 48^\circ$$

Yarıçapın bir fonksiyonu olarak gelme açısı (i)

$$i = 12,5 - 7,5 \frac{r}{R}$$

$$i = 12,5 - 7,5 \frac{0,15}{1,5} = 11,75^\circ$$

Kalem açısı (α)

$$\alpha = I - i$$

$$\alpha = 48 - 11,75 = 36,25^\circ$$

Kaldırma ve sürüklenme katsayıları : (C_1 , C_d)

$$C_1(i) = 0,1 + 0,11 i \quad i < 10^\circ \text{ için}$$

$$C_1(i) = 1,5 - 0,0188 (i-14)^2 \quad 10^\circ < i < 15^\circ$$

$$C_d(i) = 0,007 + 0,0055 (C_1(i) - (0,2))^2 \quad i > 10^\circ$$

$$C_d(i) = 0,0125 + 0,16 (C_1(i) - 1,1)^2 \quad i < 10^\circ$$

$$C_1(i) = 1,5 - 0,0188 (i-14)^2 \quad 10^\circ < i < 15^\circ$$

$$C_1(i) = 1,5 - 0,0188 (11,75 - 14)^2$$

$$C_1(i) = 1,4$$

$$C_1 b_1 = \frac{16\pi}{9} \frac{r}{\lambda_0 \sqrt{\lambda_0^2 + \frac{4}{9}}} = \frac{16\pi}{9} \frac{0,15}{0,6 \sqrt{0,6^2 + \frac{4}{9}}} = 1,56$$

l : Kiriş boyu

$$C_1 b_1 = 1,56$$

$$l = \frac{1,56}{C_1 \cdot b} = l = \frac{1,56}{1,4 \cdot 3} = 0,371 \text{ m.}$$

$$R = 1,5 \text{ m.} \quad r = 0,3 \text{ m.} \quad \lambda_0 = 6 \quad b = 3$$

$$\lambda = 6 \frac{0,3}{1,5} = 1,2$$

Sapma açısı (I)

$$\cot g I = \frac{3}{2} \cdot 1,2$$

$$I = 29^\circ$$

Gelme açısı (i)

$$i = 12,5 - 7,5 - \frac{0,3}{1,5}$$

$$i = 11^0$$

Kaldırma ve sürükleme katsayıları :

$$C_1(i) = 1,5 - 0,0188 (11-14)^2$$

$$C_1(i) = 1,33$$

$$C_d(i) = 0,0125 - 0,16 (1,33 - 1,1)^2$$

$$C_d(i) = 0,0209$$

Kalem açısı (α)

$$\alpha = 29 - 11 = 28^0$$

$$C_1 b_1 = \frac{16 \cdot \pi}{9} \cdot \frac{0,3}{1,2 \sqrt{1,2^2 + \frac{4}{9}}} = 1,02$$

Kiriş boyu (l)

$$l = \frac{1,02}{1,33 \cdot 3} = 0,255 \text{ m.}$$

$$R = 1,5 \text{ m.} \quad r = 0,45 \text{ m.} \quad \lambda_0 = 6 \quad b = 3$$

$$\lambda = 6 \cdot \frac{0,45}{1,5} = 1,8$$

$$\text{Cotg I} = \frac{3}{2} \cdot 1,8 \quad I = 20,3^0$$

$$i = 1,25 - 7,5 \frac{0,45}{1,5} \quad i = 10,25^0$$

$$C_1(i) = 1,5 - 0,0188 (10,25 - 14)^2$$

$$C_1(i) = 1,23$$

$$C_d(i) = 0,0125 + 0,16 (1,23 - 1,1)^2 = 0,0333$$

$$\alpha = 20,3 - 10,25 = 10,05^0$$

$$C_1 b_1 = \frac{16 \cdot \pi}{9} \cdot \frac{0,45}{1,8 \sqrt{1,8^2 + \frac{4}{9}}} = 0,72$$

$$l = \frac{0,72}{1,23 \cdot 3} = 0,195 \text{ m}$$

$$R = 1,5 \text{ m.} \quad r = 0,6 \text{ m.} \quad \lambda_0 = 6 \quad b = 3$$

$$\lambda = 6 \cdot \frac{0,6}{1,5} = 2,4$$

$$\text{Cotg} I = -\frac{3}{2} - 2,4 \quad I = 15,5^\circ$$

$$i = 12,5 - 7,5 - \frac{0,6}{1,5} \quad i = 9,5^\circ$$

$$C_1(i) = 0,1 + 0,11 \cdot 9,5$$

$$C_1(i) = 1,14$$

$$C_d(i) = 0,007 + 9,0055 (1,14 - 1,1)^2 = 0,007$$

$$\alpha = 15,5 - 9,5 = 6^\circ$$

$$C_1 b_1 = \frac{16 \cdot \pi}{9} - \frac{0,6}{2,4 \sqrt{2,4^2 + \frac{4}{9}}} = 0,56$$

$$l = \frac{0,56}{1,14 \cdot 3} = 0,163 \text{ m}$$

$$R = 1,5 \text{ m.} \quad r = 0,75 \quad \lambda_0 = 6 \quad b = 3$$

$$\lambda = 6 \cdot \frac{0,75}{1,5} = 3$$

$$\text{Cotg} I = -\frac{3}{2} - 3 = 4,5 \quad I = 12,5^\circ$$

$$i = 12,5 - 7,5 - \frac{0,75}{1,5} \quad i = 8,75^\circ$$

$$\alpha = 12,5 - 8,75 = 3,75^\circ$$

$$C_1(i) = 0,1 + 0,11 \cdot 8,75$$

$$C_1(i) = 1,06$$

$$C_d(i) = 0,007 + 0,0055 (1,06 - 1,1)^2 = 0,007$$

$$C_1 b_1 = \frac{16 \cdot \pi}{9} - \frac{0,75}{3 \sqrt{3^2 + \frac{4}{9}}} = 0,454$$

$$l = \frac{0,454}{3 \cdot 1,06} = 0,142 \text{ m}$$

$$R = 1,5 \text{ m.} \quad r = 0,9 \text{ m.} \quad \lambda_0 = 6 \quad b = 3$$

$$\lambda = 6 \cdot \frac{0,9}{1,5} = 3,6$$

$$\text{Cotg} I = -\frac{3}{2} - 3,6 \quad I = 10,4^\circ$$

$$i = 12,5 - 7,5 - \frac{0,9}{1,5} \quad i = 8^\circ$$

$$\alpha = 10,4 - 8^\circ = 2,4$$

$$C_1(i) = 0,1 + 0,11 \cdot 8$$

$$C_1(i) = 0,98$$

$$C_d(i) = 0,007 + 0,0055 (0,98 - 1,1)^2 = 0,00707$$

$$C_{1b1} = \frac{16, \pi}{9} \frac{0,9}{3,6 \sqrt{3,6^2 + \frac{4}{9}}} = 0,381$$

$$l = \frac{0,381}{3,0,98} = 0,129 \text{ m}$$

$$R = 1,5 \text{ m.} \quad r = 1,05 \text{ m.} \quad o = 6 \quad b = 3$$

$$\lambda = 6 \frac{1,05}{1,5} = 4,2$$

$$\text{Cotg} I = \frac{3}{2} \cdot 4,2 \quad I = 9^\circ$$

$$i = 12,5 - 7,5 \cdot \frac{1,05}{1,5} \quad i = 7,25^\circ$$

$$C_1(i) = 0,1 + 0,11 \cdot 7,25$$

$$C_1(i) = 0,89$$

$$C_d(i) = 0,007 + 0,0055 (0,89 - 1,1)^2 = 0,00724$$

$$\alpha = 9 - 7,25 = 1,75^\circ$$

$$C_{1b1} = \frac{16, \pi}{9} \frac{1,05}{4,2 \sqrt{4,2^2 + \frac{4}{9}}} = 0,328$$

$$l = \frac{0,328}{3,0,89} = 0,122 \text{ cm.}$$

$$R = 1,5 \text{ m.} \quad r = 1,2 \text{ m.} \quad \lambda o = 6 \quad b = 3$$

$$\lambda = 6 \frac{1,2}{1,5} = 4,8$$

$$\text{Cotg} I = \frac{3}{2} \cdot 4,8 \quad I = 7,9^\circ$$

$$i = 12,5 - 7,5 \cdot \frac{1,2}{1,5} \quad i = 6,5^\circ$$

$$\alpha = 7,9 - 6,5 = 1,4^\circ$$

$$C_1(i) = 0,1 + 0,11 \cdot 6,5$$

$$C_1(i) = 0,815$$

$$C_d(i) = 0,007 + 0,0055 (0,82 - 1,1)^2 = 0,00743$$

$$C_{1b1} = \frac{16, \pi}{9} \frac{1,2}{4,8 \sqrt{4,8^2 + \frac{4}{9}}} = 0,288$$

$$l = \frac{0,288}{3,0,815} = 0,117 \text{ m}$$

$$R = 1,5 \text{ m.} \quad r = 1,35 \text{ m.} \quad \lambda_0 = 6 \quad b = 3$$

$$\lambda = 6 \frac{1,35}{1,5} = 5,4$$

$$\text{Cotg} I = -\frac{3}{2} \cdot 5,4 \quad I = 7^\circ$$

$$i = 12,5 - 7,5 - \frac{1,35}{1,5} = 5,75^\circ$$

$$\alpha = 7 - 5,75 = 1,25^\circ$$

$$C_1(i) = 0,1 + 0,11 \cdot 5,75$$

$$C_1(i) = 0,73$$

$$C_d(i) = 0,007 + 0,0055 (0,73 - 1,1)^2 = 0,00775$$

$$C_1 b_1 = \frac{16 \cdot \pi}{9} \frac{1,35}{5,4 \sqrt{5,4^2 + \frac{4}{9}}} = 0,256$$

$$l = \frac{0,256}{3 \cdot 0,73} = 0,116 \text{ m}$$

$$R = 1,5 \text{ m.} \quad r = 1,5 \text{ m.} \quad \lambda_0 = 6 \quad b = 3$$

$$= 6 \frac{1,5}{1,5} = 6$$

$$\text{Cotg} I = -\frac{3}{2} \cdot 6 \quad I = 6,3^\circ$$

$$i = 6^\circ$$

$$\alpha = 6,3 - 6 = 0,3^\circ$$

$$C_1(i) = 0,1 + 0,11 \cdot 6$$

$$(C_1(i) = 0,76$$

$$C_d(i) = 0,007 + 0,0055 (0,76 - 1,1)^2 = 0,00763$$

$$C_1 b_1 = \frac{16 \cdot \pi}{9} \frac{1,5}{6 \sqrt{6^2 + \frac{4}{9}}} = 0,231$$

$$l = \frac{0,231}{3 \cdot 0,76} = 0,101 \text{ m}$$

r/R	λ	I	$\dot{I}$	α	$C_{l b_l}$	C_l	$l(m)$
0,1	0,6	48	11,7	36,3	1,56	1,4	0,371
0,2	1,2	29	11	28	1,02	1,33	0,255
0,3	1,8	20,3	10,3	10,5	0,72	1,23	0,195
0,4	2,4	16,5	9,5	6	0,56	1,14	0,163
0,5	3	12,5	8,7	3,8	0,45	1,06	0,142
0,6	3,6	10,4	8	2,4	0,38	0,98	0,129
0,7	4,2	9	7,3	1,75	0,328	0,89	0,122
0,8	4,8	7,9	6,5	1,4	0,288	0,815	0,117
0,9	5,4	7	5,75	1,25	0,256	0,73	0,116
1	6	6,3	6	0,3	0,231	0,76	0,101

Kanat Profili :

Kanat profili NACA 23012 olarak kabul edildi.

Ölçüleri :

$y (*) (cm)$	$y (-) (cm)$	$x (cm)$
6,36	3	3,52
8,66	3,98	7
11,3	5,14	14,1
13,2	7	28,2
13,31	7,86	42,3
12,59	7,9	58,2
11,3	7,35	72,3
9,64	6,47	89,9
7,68	6,34	104
5,43	3,84	118,1
2,96	2,16	134
0	0	150

Mil çapı hesabı :

$$M = 71620 \frac{P}{n} \quad \text{BG}$$

$$1,152 \text{ KW} = 1,566 \text{ BG}$$

$$M = 71620 \frac{1,566}{300} = 373,85 \text{ BG}$$

$$S_t \text{ 50 için } \sigma_d = 475 - 315 \text{ kp/cm}^2.$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{16 \text{ Md.}}{\pi \cdot \sigma_d}} = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot 373,85}{\pi \cdot 315.}}$$

$$d = 1,82 \text{ cm.}$$

SİSTEM DİZAYNI

Hedef olarak alınan 1 kW gücün saniyede 8m süratle esen bir rüzgârla elde edileceği kabul edilirse, takriben 3m çapında bir türbine ihtiyaç olmaktadır. Bu şartlar altında türbinin dönüş hızı ise yaklaşık 300 devir /dakika ya çıkmaktadır.

Şekil de, (7) taşıyıcı olarak iş gören sistemi göstermektedir. (6) türbini, (1) türbin milini, (2) yataklama platformunu (G) türbin göbeğini göstermektedir. Taranmış kısımlar bilyalı yatakları temsil etmektedir. (3) ve (4) kasnağı göstermektedir. (3) kasnağı türbin miline yataklanmıştır. (5) doğru akım dinomasını göstermektedir. Türbinde 3 adet kanat vardır.

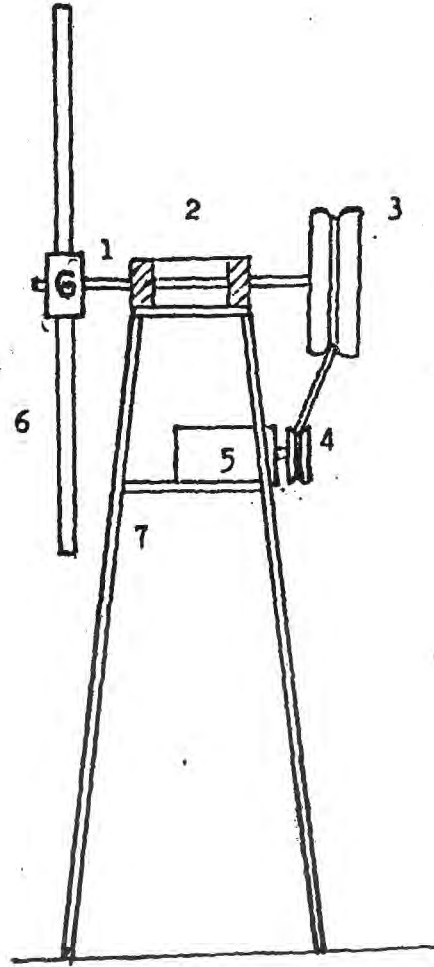
Bu sistemin gelişmesinde üç ana hedef alınmıştır.

- Sistemin üretim faktörünün, yani kilowatt güç başına bir sene içinde ürettiği toplam elektrık enerjisinin yüksek olması.

- Maliyetinin düşük olması.

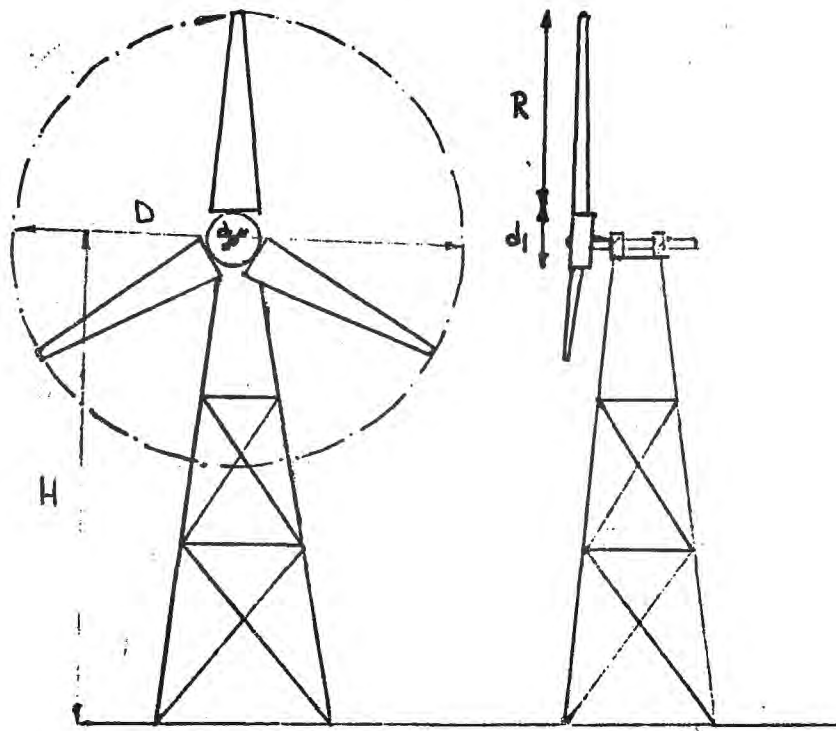
- Kolaylıkla bulunan parçalardan imâl edilebilmesi düşünülmüştür.

Geliştirilen sistem için yatay eksenli bir türbin seçilmiştir.



Yerleştirme Planı

- 1 Türbin mili ,
- 2 Yataklama platformu ,
- 3 Kasnak ,
- 4 Kasnak ,
- 5 Doğru akım dinamosu
- 6 Palalar,
- 7 Taşıyıcı sistemi



Yeldeğirmeninin Şematik Görünüşü

D : Rotor Çapı

H : Kule (taşıyıcı sistemin) yüksekliği

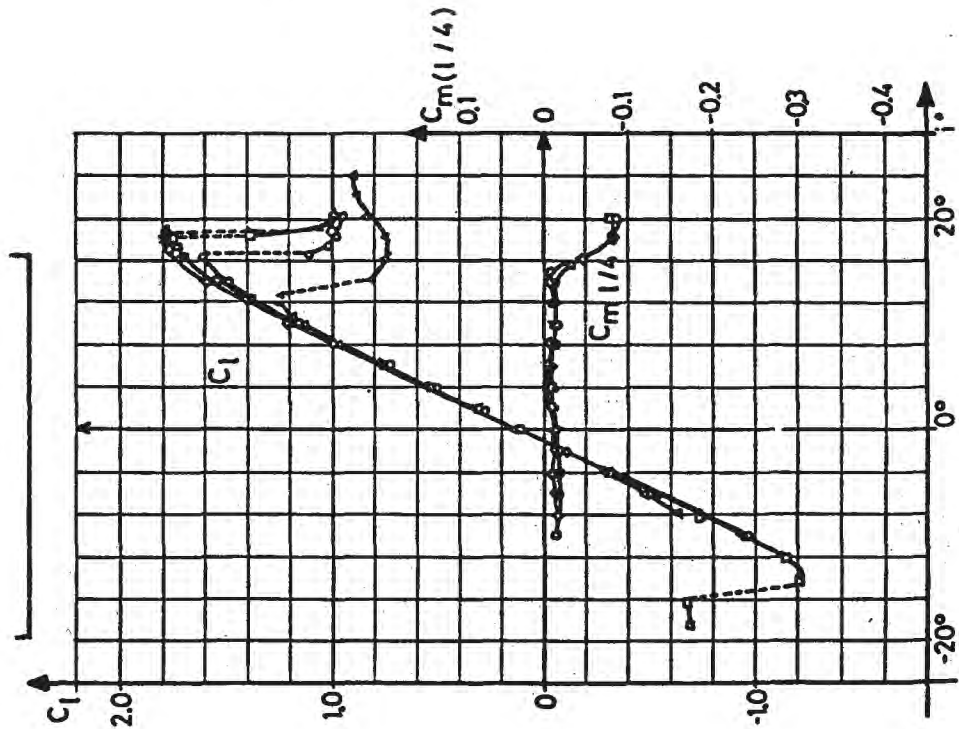
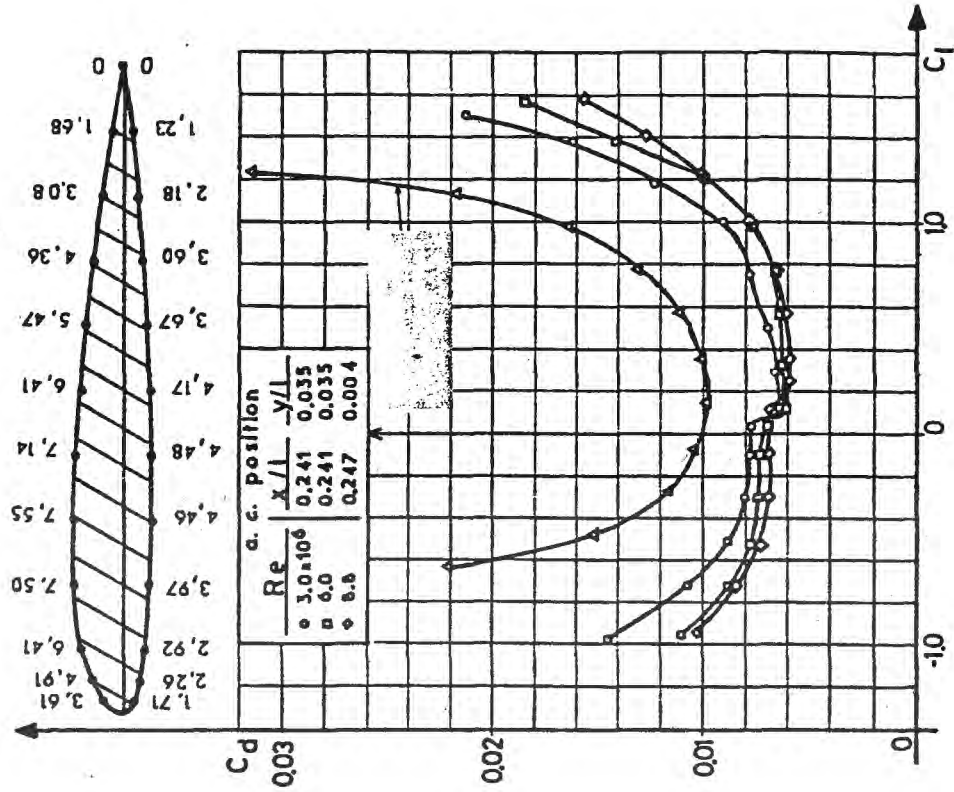
R : Kanat boyu

d_1 : Türbin milinin çapı

d_1 : Türbin göbeği çapı

l : Kiriş uzunluğu

NACA 23012 kanat profili



KAYNAKLAR

1. Desire Le GOURIERES , Wind Power Plants Theory and Design. Mechanical Engineer, Doctor of Science, Professor of Fluid Mechanics, University of Dakar Member of the British Wind Energy Association. 1982
2. Tolga Yarman, Türkiye de Rüzgâr Enerjisini Kullanma Olanakları; İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul
3. Eskişehir için En Hızlı Rüzgâr ve Yönü, Hakim Rüzgâr Esme Sayısı, T.C Başbakanlık Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü. Ankara