

21892

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YATAY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN
AERODİNAMİK DİZAYNI

21892

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Müh. Göksun BEŞERİK

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22 Haziran 1992

Tezin Savunulduğu Tarih : 8 Temmuz 1992

Tez Danışmanı : Doç. Dr. M. Adil Yükselen

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Zeki Erim

Doç. Dr. Süleyman Tolun

- TEMMUZ 1992

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

ÖNSÖZ

Dünyamızın gitgide kirlendiği ve mevcut enerji kaynaklarının dünyanın siyasi dengelerini belirlediği günümüzde, rüzgar enerjisinin temiz ve sonsuz bir enerji çeşidi olması bakımından böyle bir çalışmada bulunmuş olmaktan dolayı duyduğum memnuniyeti ifade etmek isterim.

Bu çalışmamda değerli yardımlarını esirgemeyen sayın hocam Doç. Dr. M. Adil Yükselen'e, bugüne kadar olan maddi ve manevi desteğinden dolayı aileme, tezimin yazılması sırasında sağladığı bilgisayar olanaklarından dolayı Arş. Grv. Nuri H. Aydın ile Arş. Grv. Özlem İlday'a ve bilgilerinden yararlandığım tüm arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Haziran 1992

Müh. Göksun BEŞERİK

İÇİNDEKİLER

NOTASYON LİSTESİ	VI
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
BÖLÜM 2. METEOROLOJİK ETKİLER VE RÜZGAR ENERJİ POTANSİYELİ	7
2.1. Giriş	7
2.2. Meteoroloji İstasyonlarından Alınan Bilgiler	8
2.3. Rüzgar Hızı Şiddetinin Düşey Doğrultuda Değişmesi	11
2.4. Uygun Yer Seçimi	14
2.5. Rüzgar Enerjisinin Kullanılabilir Miktarı	17
2.6. Sonuç	19
BÖLÜM 3. İDEAL DİSK TEORİSİ	21
3.1. Giriş	21
3.2. Temel Denklemler	21
3.3. Betz Limiti	24
3.4. Sonuç	25

BÖLÜM 4. RÜZGAR TÜRBİNİ ETRAFINDAKİ AKIM VE BU AKIMI

KONTROL EDEN DENKLEMLER	26
4.1. Giriş	26
4.2. Sıkıştırılmaz Daimi Akımdan Enerji Çekilmesi Halinde Zamana Bağımlılığın İncelenmesi	27
4.3. Eksen Takımının Seçimi	31
4.4. Türbin Gerisindeki Girdap Sisteminin Yapısı	33
4.5. Genişleyen İz Halinde İndüklenmiş Hızların Hesabı	36
4.6. Silindirik İz Hali	43
4.7. Momentum Dengesi	47
4.7.1. Temel Denklemlerin Elde Edilmesi	47
4.7.2. Denklemlerin Rotor Düzlemine Taşınması	50
4.7.3. Denklemlerin Boyutsuz Katsayılar Cinsinden Yazılması	54
4.7.4. Basitleştirilmiş Teoriler	56
4.8. Sonuç	61
BÖLÜM 5. PALA ELEMANI TEORİSİ	64
5.1. Giriş	64
5.2. Sonsuz Sayıda Palaya Sahip Rotor için Temel Denklemlerin Elde Edilmesi	65
5.3. Lineerleştirilmiş Uç Düzeltme Teorisi	72
5.4. Aerodinamik Optimizasyon ve Hesaplama Yöntemi	74
5.5. Pala Geometrisinin Düzeltilmesi	75
5.5.1. Veter Dağılımının Düzeltilmesi	76
5.5.2. Oturma Açısı Dağılımının Düzeltilmesi	77
5.6. Uygun Çalışma Aralığının Belirlenmesi	79
5.7. Sonuç	80

SONUÇLAR	93
KAYNAKLAR	92
EK A PALA SAYISININ ETKİSİ	95
EK B TETA DEĞERLERİNİN DEĞİŞKEN KESEN YÖNTEMİ İLE HESAPLANMASI	99
EK C OTURMA AÇISI DAĞILIMININ EN KÜÇÜK KARELER YÖNTEMİ İLE DÜZELTİLMESİ	103
EK D BİLGİSAYAR PROGRAMI	105
ÖZGEÇMİŞ	129



NOTASYON LİSTESİ

U	: Rüzgar hızı (m/s)
u'	: Çalkantı hızı (m/s)
h	: Yükseklik (m)
P	: Rüzgardan çekilen güç (W)
$P(U)$	: Rüzgar hızının olasılık dağılımı
$P(E,U)$	: Rüzgar hızının enerji dağılımı
p	: Statik basınç (kg/m-s^2)
$P(r)$	: Basınç integrali
H	: Bernoulli sabiti (kg/m-s^2)
$\vec{F}$	: Birim akışkan kütlesine etkiyen dış kuvvet vektörü (m/s^2)
L	: Taşıma kuvveti (N)
D	: Sürüklenme kuvveti (N)
N	: Rotor etkiyen normal kuvvet (N)
T	: Rotor etkiyen teğetsel kuvvet (N)
Q	: Rotor etkiyen moment (N-m)
$\vec{U}_r$	: Türbin palasına bağlı eksen takımına göre hız vektörü (m/s)
$\vec{U}_a$	: Yere bağlı eksen takımına göre hız vektörü (m/s)
w_t	: Bileşke indüklenmiş hız (m/s)
u	: Eksenel hız (m/s)
v	: Radyal hız (m/s)
w	: Teğetsel hız (m/s)
u_n	: Kontrol yüzeyine dik doğrultuda hız (m/s)
u_s	: Eksenel ve radyal hız bileşkesi (m/s)
C_L	: Taşıma katsayısı (-)
C_D	: Sürüklenme katsayısı (-)
C_N	: Normal kuvvet katsayısı (-)
C_T	: Teğetsel kuvvet katsayısı (-)
C_P	: Güç katsayısı (-)
k	: Sirkülasyon sabiti (m^2/s)
B	: Pala sayısı (-)
r_0	: Göbek yarıçapı (m)
c	: Veter uzunluğu (m)
a	: Eksenel indüklenme faktörü (-)
a'	: Teğetsel indüklenme faktörü (-)
F	: Prandtl uç düzeltme faktörü (-)
S	: Alan (m^2)

X	: Hız oranı (-)
$\dot{m}$	: Rotoru geçen havanın kütleli debisi (kg/s)
r	: Radyal doğrultudaki koordinat eksen
x	: Rüzgar akımı doğrultusundaki koordinat eksen
ϕ	: Rotorun dönme yönündeki koordinat eksen
s	: Akım yüzeyine teğet koordinat eksen
n	: Akım yüzeyine dik koordinat eksen
ρ	: Yoğunluk (kg/m^3)
μ	: Dinamik viskozite ($\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$)
ν	: Kinematik viskozite (m^2/s)
i	: Oturma açısı (°)
α	: Hücüm açısı (°)
θ	: Göreceli rüzgar açısı (°)
θ_t	: Pala ucunda helis açısı (°)
σ	: Lokal katılık oranı (-)
λ	: Uç hız oranı (-)
ψ	: Akım fonksiyonu
$\vec{\omega}$	: Akışkana ait çevri vektörü (1/s)
Ω	: Rotorun açısal hızı (rad/s)
Γ	: Sirkülasyon şiddeti (m^2/s)
γ	: Girdap şiddeti (m/s)

Sık olarak kullanılan indisler:

∞	: Serbest akım şartları
0	: Rotorun yeterince önünde bir akım tüpü kesiti
1	: Rotorun hemen önünde bir akım tüpü kesiti
2	: Rotorun hemen gerisinde bir akım tüpü kesiti
3	: Rotorun yeterince gerisinde bir akım tüpü kesiti
R, ref	: Rotor düzlemi
W	: İz bölgesi

ÖZET

Bu çalışmada yatay eksenli rüzgar türbini konusu, akışkanlar dinamiği yönünden ele alınmıştır. Bu amaçla önce, rüzgar türbininin dizaynından evvel yapılan meteorolojik çalışmalara, uygun yer seçiminin nasıl yapıldığına ve rüzgar enerji potansiyeli konusuna kısaca değinilmiştir.

Ardından, rüzgar türbinlerinin aerodinamiği konusuna girilerek, bu konuda büyük öneme sahip İdeal Disk Teorisine ve Betz Limitine yer verilmiştir. Daha sonra, düşük katılık oranlı ve yatay eksenli rüzgar türbinleri etrafındaki akımın ayrıntılı incelenmesine geçilmiş, bu akım değişik şekillerde modellenerek, genelde kullanılan teorilerde yapılan kabullerin geçerlilik mertebeleri hakkında fikirler verilmeye çalışılmıştır.

Yatay eksenli rüzgar türbininin aerodinamik dizaynı konusunda literatürde en sık rastlanan yöntem Pala Elemanı Teorisidir. Bu çalışmada bu yönteme de yer verilmiş, dizayn için bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Hesaplanan rüzgar türbini palalarının geometrileri düzeltilerek yeni palaların performansı incelenmiş, uygun çalışma aralıkları belirlenmiş ve sonuçlar sunulmuştur.

SUMMARY

THE AERODYNAMIC DESIGN OF HORIZONTAL-AXIS WIND TURBINES

The kinetic energy of the atmosphere is enormous. The idea to make use of this energy is very old. But the availability of the fossil fuels and the invention of electric engine prevented the development of wind turbines some time in the past. The energy crisis of 1974 led to a renewed and lasting interest in alternative energy resources, like water, solar energy and wind energy. Today many researches about wind energy are carried out in different countries.

The purpose of a wind turbine is to get mechanical energy from wind, then to turn it into electric energy. This kind of energy has some superiorities like being clean and unlimited. The electric energy from the wind does not need to be carried. However, it's true that wind energy is intermittent with respect to oil and nuclear power.

In the present work, attention is only limited to fluid dynamics aspect. Firstly, the meteorological effects and the wind energy potential are mentioned briefly. The winds of the earth depend on the effect of unequal heating of the earth's surface by the sun, with the principle of "heated air rises". Since the earth's surface has a rough topographic shape, the magnitude and the direction of the winds are changable. For this reason, most studies on the available amount of wind energy start with a kind of wind energy prospecting close to the ground, based on available meteorological

data. In some countries, the meteorologic data which is available is used. Then siting should be done according to these results. From the point of economics, it is advantageous to limit the wind energy conversion at a certain maximum wind velocity.

In this study, the aerodynamic aspect of this phenomena is also mentioned extensively. In this aspect, Ideal Disc Theory is the basic one and has a great importance. In this theory, the wind turbine rotor is replaced with an infinitely thin disc and the flow through this disc is one dimensional. Flow conditions on the disc are equal at every point. This theory shows that the amount of wind energy extracted from the wind with this disc is propotional to the area of the disc. The axial velocity on the disc is the arithmetic mean of the velocities far in front of and far behind the disc. The power absorbed by the turbine is equal to the energy loss of the mass flow through the turbine. It can be shown that even under the ideal conditions, it's impossible to extract more than 59% of the usable amount of wind energy. Under real conditions, the extracted energy is less then 59%.

Basically, almost any physical configuration which produces an asymmetrical force in a windstream can be made to rotate, translate or oscillate, and power can be extracted. Machines using rotors as wind energy collectors may be classified in terms of the orientation of their axis of rotation, relative to the windstream. Wind turbines whose axis of rotation are parallel to the direction of the windstream are named as horizontal-axis wind turbines and whose axis of rotation are perpendicular to both the surface of the earth and the windstream are named as vertical-axis wind turbines.

One of the main purposes of this study is to understand the flow around a horizontal-axis wind turbine. When a fluid particle moves along a streamline, energy extraction from the incompressible steady flow is indicated aerodynamically by a decrease of the Bernoulli constant, which depends on the static and dynamic pressure of the flow, viz.:

$$H = p + 1/2 \rho U^2$$

According to the concept of steady flow, it's not interesting to extract energy from the flow. Because in a steady flow, the force in the direction of motion is drag and much more strong lift force is always

perpendicular to drag force. So, the extraction of a significant amount of energy from a flow has to be connected with unsteady flow phenomena. For this reason, the choice of reference frame is important. The flow through a steadily rotating horizontal-axis turbine in a reference frame attached to earth is steady, even when the oncoming flow is steady. When the turbine is considered in a reference frame attached to the turbine blade, the flow is steady, but it rotates as a whole around an axis coinciding with the axis of the turbine.

Since there are aerodynamic forces experienced by the turbine blades, it is evident that there must be a circulation of the flow around them. From this point of the view, the flow around the turbine can be represented by vortex lines, like done for a wing. There are two kinds of vortex lines representing the turbine. One of them is the bound vortex which is running along the blade from its root to tip. The other kind is trailing vortex which is running helically along the rotation axis from all points of the blades to infinity. This vortex system induces velocities in front of, at and behind the rotor. With the effect of these induced velocities, the axial velocity increases and the tangential velocity decreases continuously along the rotation axis.

For a detailed calculation, the rotor is represented by an infinite number of blades. This assumption makes the flow axisymmetric and a homogenous circulation distribution at all definite radial stations. So, all quantities are independent from the angular coordinate. The cylindrical wake is examined, as well as the expanding wake. Even in the case of cylindrical wake, the equations representing the flow field are non-linear and the calculation of induced velocities is very complicated. They can only be calculated for some special cases. But the analysis gives important results. For example, the Bernoulli constant and circulation are constant along a stream surface. This result is used to carry the far behind flow conditions to the rotor plane. The calculation for constant circulation along the span shows that the rotation of wake decreases the power output.

Since an exact solution of the influence of wake expansion with the circulation concept is very complicated, momentum considerations can be used. Axial momentum equation is applied to the stream tube and the outer flow separately and angular momentum equation is applied to

stream tube. The calculations for constant circulation distribution along the span shows that the axial velocity on the rotor cannot be reduced as much as expected. The combined effect of wake expansion and static pressure deficit in the wake almost cancels the power-loss due to the wake rotation. This result is used in Glauert theory. Another important conclusion of momentum considerations is that the assumptions which are used generally are valid for high tip speed ratios. The error coming from the assumptions increase with decreasing tip speed ratio.

Another main purpose of this study is to design a horizontal-axis wind turbin rotor. Here, Glauert's Blade Element Theory is used for this purpose. This theory takes the effect of rotation of flow in cylindrical wake into account and depends on some assumptions about the behaviour of the blades: Every blade element behaves independently from the adjacent elements and the profile characteristics are adapted to every blade element. However, this theory is based on the assumption of infinite number of blades. After the performance equations are obtained, a tip correction method is applied to the theory. In this study, lineerized tip correction method is used to take the effect of number of blades into account. This method uses Prandtl's tip correction factor which is related to the reduction of the circulation around a rotor blade. Then the blade geometry is aerodynamically optimized. Aerodynamic optimization for a wind turbine means to design a blade geometry which gives the maximum power output. For a choosen profile and a tip speed ratio, the twist and the taper of the blade can be calculated with the power and force coefficients. The calculations show that power coefficient increases with increasing design lift coefficient and decreasing design drag coefficient. This means that the development in profile data is needed.

Designed optimum blade has a non-linear twist and taper and it's difficult one to produce. In this study, the blade geometry is simplified and performance of new blade is examined. At first, the stongly non-linear taper is replaced with a linear taper. Among the trapeze blades whose surfaces are equal to the optimum blade's, the one which has the highest power output is choosen. Then the large blade twist is replaced with a linear blade setting angle distribution. Under these conditions, the new blade reduces power output approximately 20%. This means that in order to extract the same amount of power with the optimum blade, the blade span must be expanded approximately 10%.

This method can also be used for the prediction of off-design conditions. When the wind turbine is working, wind speed changes. These changes in wind speed change the tip speed ratio of the blade from the design tip speed ratio. For low tip speed ratios, stall begins at the root stations of the blade. For high tip speed ratios, turbulence begins in the wake. In order to prevent these conditions, the limit tip speed ratios are determined. Then the rotor is restricted to work out of these limits. In this study the limit tip speed ratios are calculated at different design tip speed ratios for both optimum blade and the simplified blade. For the blades whose taper or twist is simplified, the working tip speed ratio range is wide. But for the blades whose taper and twist are simplified, this range becomes restricted.

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Yeryüzünde rüzgar gücünden yararlanma düşüncesi çok eskilere dayanmaktadır. Tarihte kullanılan ilk rüzgar türbini basit yapılı ve düşey eksenli olup, M.Ö. 200 yıllarında Persliler tarafından tahıl öğütme işinde kullanıldığı sanılmaktadır. Yeldeğirmenleri sonraları İslam dünyasına yayılmıştır. Daha sonraki tarihlerde tahta ve bez kullanılarak yapılan yatay eksenli yeldeğirmenleri geliştirilmiş, ağaç kesme işlerinde ve gemilerde hareketi sağlamak amacıyla kullanılmıştır.

M.S. 11. yüzyılda yeldeğirmenleri Ortadoğuda yaygın biçimde kullanılmıştır. 13. yüzyılda rüzgar gücünden yararlanma düşüncesi Haçlılar tarafından Ortadoğu'dan Avrupa'ya taşınmıştır. 14. yüzyılda da Hollandalılar yeldeğirmenlerinin geliştirilmesinde öncülük etmiş, bu bölgelerde yeldeğirmenleri bataklıkların, göllerin ve deniz seviyesinin altındaki sulu alanların kurutulmasında, su pompalama amacıyla kullanılmıştır.

Rüzgar gücü, buhar türbinin bulunması ile başlayıp elektrik motoru ya

da jeneratörü ve içten yanmalı motorlarla devam eden endüstrileşme çağının başlangıcına kadar geniş şekilde kullanılmıştır. Ancak endüstrileşme çağının başlangıcı ile birlikte, kömür, petrol ve doğal gaz gibi enerji kaynaklarının kolay elde edilebilmesi, bunların nakliyelerinin kolaylaştırılması, bununla birlikte içten yanmalı motorların küçük bir hacimde, istenen zamanda, büyük miktarda enerjiyi üretebilmeleri nedeniyle yeldeğirmenlerinin modası geçmiştir.

İkinci Dünya Savaşı ve sonrasında yeldeğirmenleri büyük rüzgar türbinleri ile elektrik üretimi açısından kısa bir süre de olsa tekrar ilgi görmüştür. Bu çalışmalara örnek olarak, Almanya'da Ulrich Hütter [1,2,3], Fransa'da Electricite de France [4] ve Neyrpic [5], İngiltere'de Golding [6,7,8], Danimarka'da Gedser yeldeğirmeni ve ABD'de Putnam türbinleri [9] gösterilebilir.

Savaş sonrası yıllarda rüzgar gücüne olan ilginin azalmasına, daha çok düşük fiyatlı petrolün bolluğu karşısında, rüzgar enerjisinin nispeten pahalı bir enerji çeşidi olması ve rüzgar türbinlerinin yorulma gibi bazı teknik problemlerinin bulunması neden olmuştur.

1973-74 yıllarındaki enerji krizi ile gelişen endüstriyel ve ekonomik güçler karşısında fosil yakıtlarının sınırsız olmadığı konusunda yaygınlaşan düşünceler, güneş ve rüzgar enerjisi gibi alternatif enerji kaynakları aranması konusunu yeniden gündeme getirmiştir.

Alternatif enerji kaynaklarının aranması konusunun yaygın bir biçimde kabul edilmesi ile birlikte, İkinci Dünya Savaşı sırasında daha kısıtlı rüzgar

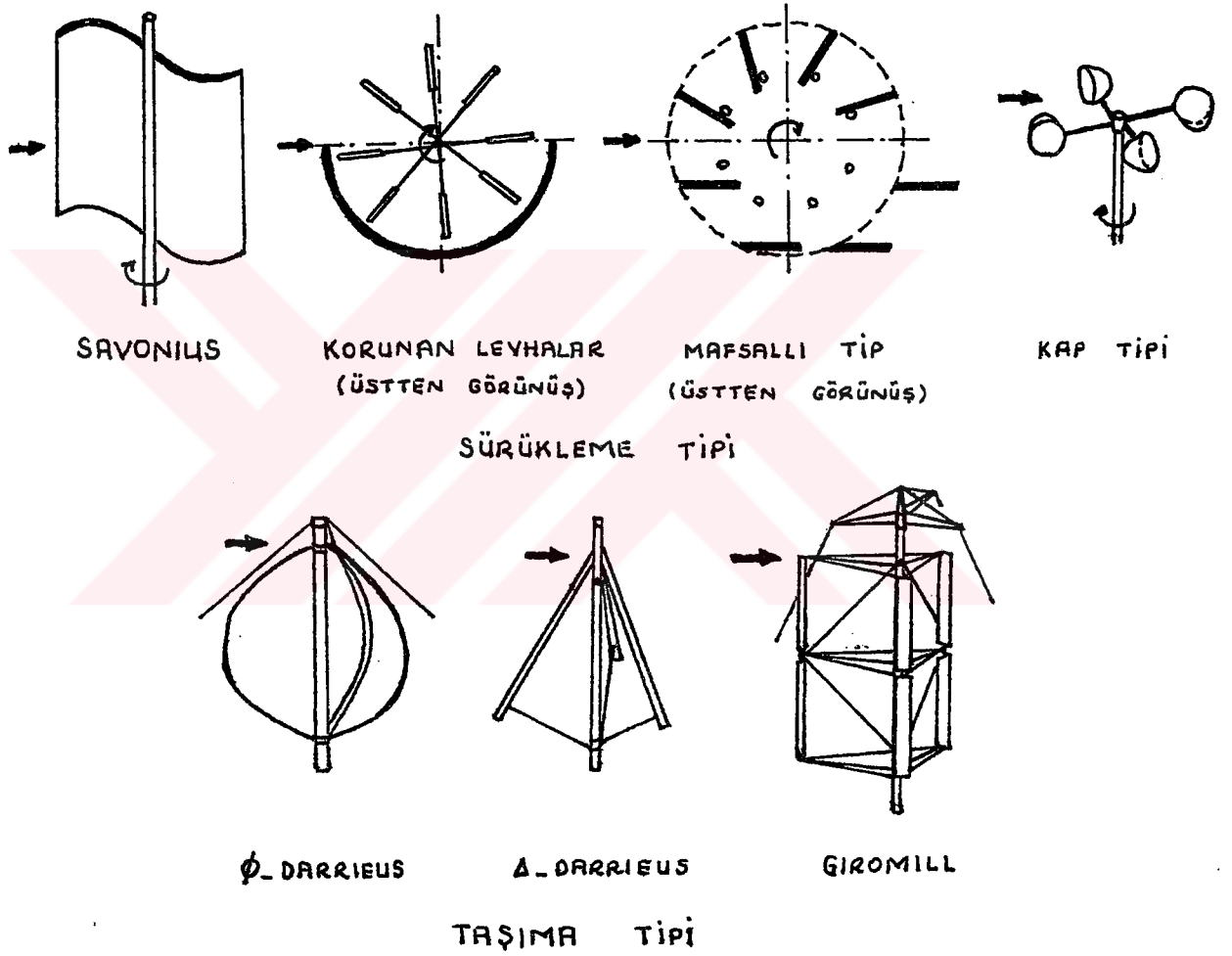
enerjisi projelerine göre uzun vadeli sayılabilecek birçok proje, batılı devletlerin hükümet kuruluşlarınca da desteklenmeye başlamıştır. Bu ülkeler arasında, ABD, İsveç, Hollanda bulunmaktadır. Almanya, Danimarka, İngiltere ve Kanada ile diğer bazı ülkelerde çalışmalar milli programlar olmaksızın çeşitli enstitülerde ve üniversitelerde devam ettirilmiştir. [10,11]

Bunların yanında, 1973-74 yıllarında Washington'da düzenlenen bir konferans sonrasında bir Enerji Koordinasyon Grubu kurulmuş, 18 ülkenin katıldığı bir Uluslararası Enerji Programı Anlaşması gerçekleştirilmiştir. Bu programı yürütmek amacıyla Avrupa Ekonomik İşbirliği Teşkilatınca bir de Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) kurulmuştur. IEA'nın dört çalışma grubundan biri olan Rüzgar Gücü Çalışma Ekibi 1976'da Hollanda öncü ülke olmak üzere çalışmalara başlamıştır.

Rüzgar enerjisi konusunda giderek artan ilginin diğer bazı işaretleri da İngiltere Hidrodinamik Araştırma Birliğinde ilki 1976'da, ikincisi 1978'de gerçekleştirilen Uluslararası Rüzgar Enerjisi Sistemleri Sempozyumları ile bu konuda son yıllarda yayınlanmaya başlanan Wind Engineering gibi pek çok süreli yayın ile Journal of Energy gibi yayınlarda görülen pek çok makalelerdir.

Rüzgar enerjisi dönüştürme sistemleri oldukça geniş kapsamlıdır. Temel olarak, rüzgar akımı içine yerleştirilen herhangi bir konfigürasyon, eksenel simetrik bir kuvvet yaratmak şartı ile döndürülebilir, bu yolla rüzgardan enerji çekmekte kullanılabilir. Bu açıdan bakıldığında rüzgar türbinleri dönme ekseninin rüzgar doğrultusu ile yaptığı açığa göre başlıca iki kısma ayrılır.

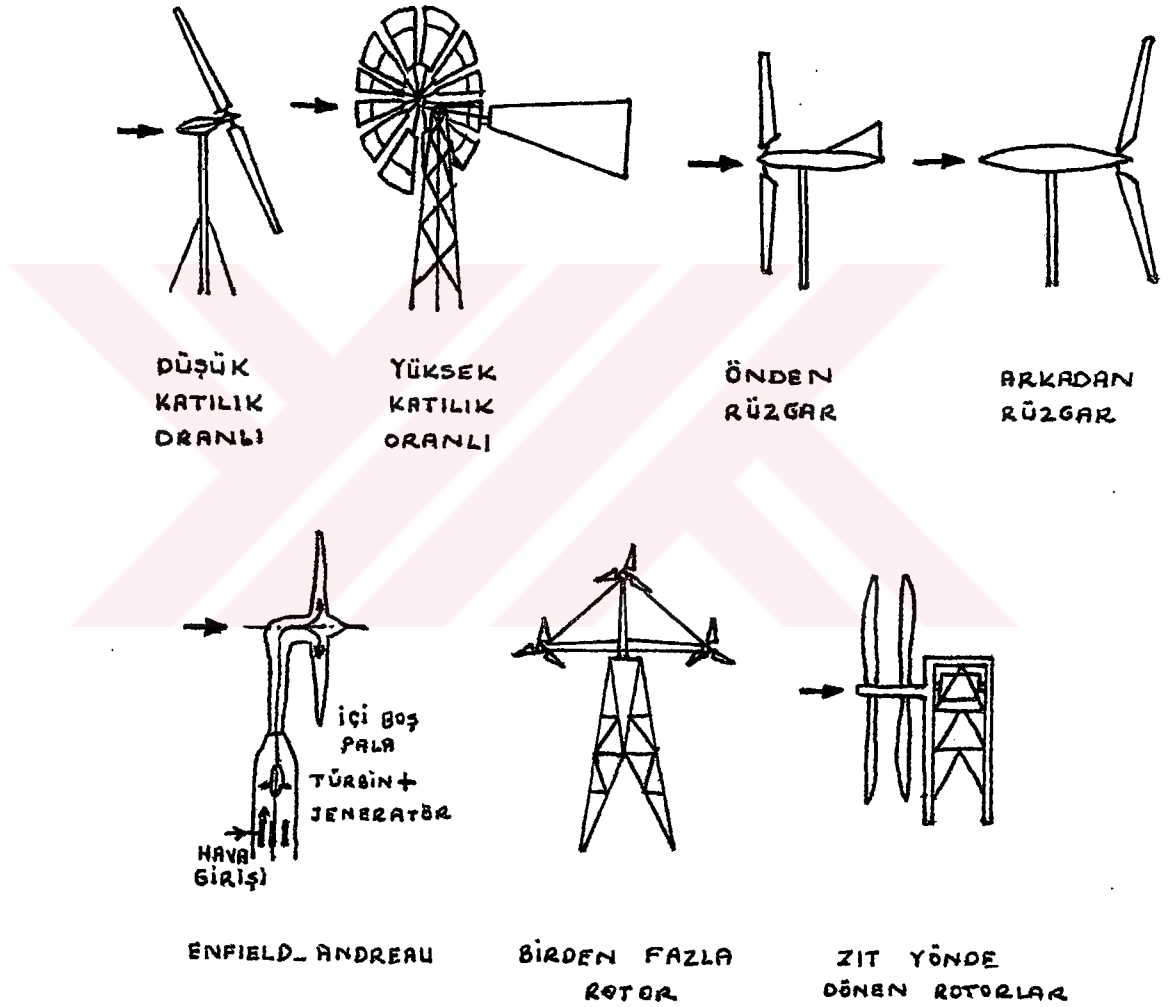
Birincisi, dönme eksenini rüzgar doğrultusuna dik olan düşey eksenli rüzgar türbinleridir. Bu tür rüzgar türbinleri de hareketi sağlayan kuvvet bakımından kendi içinde taşıma ve sürüklenme tipi olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Şekil 1.1).



Şekil 1.1: Düşey eksenli rüzgar türbini tipleri.

İkinci tür rüzgar türbinleri ise, dönme eksenini rüzgar doğrultusuna paralel olup, yatay eksenli rüzgar türbini olarak adlandırılırlar. Bu tür rüzgar

türbinleri de katılık oranına, rüzgarın rotora geliş yönüne, rotor sayısına ve bunların yerleştirilme şekillerine göre kendi içlerinde çeşitlenmektedir (Şekil 1.2). Bu çalışmada küçük katılık oranlı yatay eksenli rüzgar türbinleri ele alınmaktadır.



Şekil 1.2: Yatay eksenli rüzgar türbini tipleri.

Rüzgar türbini ile ilgili olarak yapılmış tam bir çalışma, konuyu pek çok değişik yönden ele almalıdır. Konunun bazı yönleri şunlardır:

- Meteoroloji
- Aerodinamik
- Yapı (Aeroelastisite)
- Enerji dönüşümü (Mekanik enerjiden ısı ya da elektrığe)
- Enerjinin depolanması
- Enerjinin tüketiciye dağıtılması
- Ekonomi
- Çevresel faktörler

Bu çalışmada, olayın akışkanlar dinamiğı yönü ele alınmış, temel bilgi olması bakımından Bölüm 2’de meteorolojik etkiler ile rüzgar enerji potansiyelinden kısaca bahsedilmiştir.

Daha sonraki bölümler ise tamamen olayın aerodinamiğı ile ilgili olup, Bölüm 3’de ideal disk teorisi üzerinde durulmuş, belirli boyutlara sahip bir rüzgar türbininden aerodinamik olarak belli bir limitin üzerinde güç elde edilemeyeceğı gösterilmiştir.

Bölüm 4’de rüzgar türbini etrafındaki akım etrafıca incelenmiş, genelde yapılan kabuller ve bu kabullerin geçerlilik mertebeleri üzerinde durulmuştur.

Bölüm 5’de ise, Pala Elemanı Teorisine yer verilmiştir. Bu teori kullanılarak rüzgar türbini rotorunun dizaynı incelenmiş, dizayn için geliştirilen bir bilgisayar programı, Ek D’de sunulmuştur.

BÖLÜM 2

METEOROLOJİK ETKİLER VE RÜZGAR ENERJİ POTANSİYELİ

2.1. Giriş:

Dünya atmosferi muazzam miktarda bir kinetik enerjiye sahiptir. Yeryüzünde rüzgarların oluşumunun en önemli sebebi, yerkabuğunun her noktasının güneş tarafından eşit olarak ısıtılmamasıdır. Büyük ölçekli rüzgarlar ekvatorun kutuplardan daha iyi ısınması nedeniyle oluşur. Dünyanın dönme hareketi de bu rüzgarları saptırır. Öte yandan dünya ekseninin eğik olması, bu tür rüzgarlarda mevsimsel olarak yerel değişikliklere neden olur. Ayrıca, denizler ve göllerin karalardan, dağlık bölgelerin daha alçak alanlardan farklı ısınması, küçük ölçekli rüzgarların oluşmasına neden olur.

Bunların yanında, oluşan rüzgarların şiddetleri de sürekli sabit olarak kalmaz. Yeryüzünün topografik yapısını ve pürüzlü yüzeyini kateden yatay rüzgarlar zaman zaman yavaşlar, ivmelenir ve dolayısıyla şiddetinde önemli değişimler olur. Bu nedenle, bir rüzgar türbininin inşasından önce, belirlenmiş enerji ihtiyacı miktarına eşit rüzgar enerji potansiyeline sahip olan uygun yerin

seçimi çok büyük önem taşır. Bu amaçla, öncelikle belli yerlerde rüzgar ile ilgili bilgilere ihtiyaç vardır. Bu bilgiler ise, meteoroloji istasyonlarında yapılan ölçmelerden elde edilir.

2.2. Meteoroloji İstasyonlarından Alınan Bilgiler:

Rüzgar enerjisinin kullanılmasıyla ilgili çalışmalar ilk önce rüzgar dağılımının incelenmesiyle başlatılır. Çoğu ülkede, rüzgar hızları meteoroloji istasyonlarında uzun yıllar boyunca kaydedilir. Bu kayıtlardan birinci mertebeden bir yaklaşımla o bölge için rüzgar enerjisinin kullanılabilir miktarı tahmin edilebilir.

Meteorolojik bilgilerin yorumlanmasında pek çok faktör gözönüne alınmalıdır. Bunlardan birincisi, rüzgar hızının ölçüldüğü noktanın yerden yüksekliğidir. Günümüz şartlarına göre standart yükseklik 10 m. dir. Fakat yerel şartlar nedeniyle farklı yüksekliklerde ölçüm yapmak gerekebilir. Ancak uygun yerin doğru olarak belirlenebilmesi için aynı yükseklikte elde edilen datanın karşılaştırılması gerekir.

Farklı istasyonlardan alınan data karşılaştırılırken, yerel etkilerin de düzeltilmesi gerekir. Bu yerel etkiler, bölgedeki bazı engellerden ya da yerel yüzey pürüzlülüğünden kaynaklanabilir.

Diğer bir faktör, yıllık ortalama enerji akısının tahmininde kullanılan

rüzgar hızı örnekleme metodunun etkisidir. Bir bölgeyi etkileyen hava sistemindeki bir değişme nedeniyle rüzgar hızında görülen değişim, fırtınalar hariç, nispeten yavaştır. Ancak rüzgar hızı türbülanslı atmosferik sınır tabakanın alt kısmında ölçüldüğünden, rüzgar hızında büyük çalkantılar olur. Bu nedenle rüzgar hızı yarım saat ya da bir saat gibi zaman aralıkları içinde ortalama olarak ölçülür. Zaman aralığı T ile gösterilecek olursa, ortalama rüzgar hızı

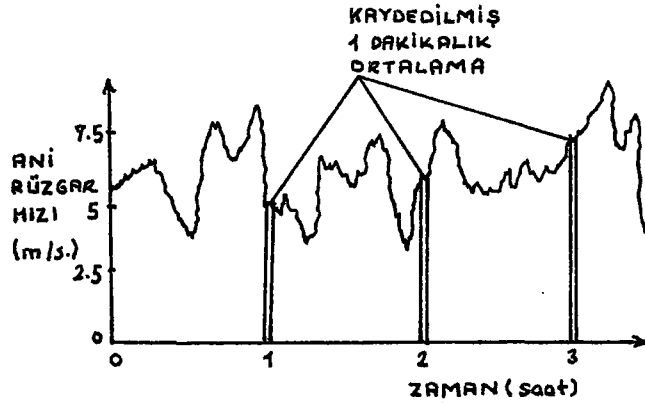
$$\bar{U} = \frac{1}{T} \int_0^T U dt$$

şeklinde tanımlanabilir. Bu aralıkta çalkantı hızı,

$$u = U - \bar{U}$$

şeklinde olup, kabul edilen zaman aralığında ortalama değeri sıfırdır:

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T (U - \bar{U}) dt = 0$$



Şekil 2.1: Tipik rüzgar hızı kaydı.

Bu zaman aralığında ortalama enerji akısı $\bar{U}^3$ terimi ile orantılıdır. Bu

terim,

$$\bar{U}^3 = \frac{1}{T} \int_0^T (\bar{U} + u)^3 dt = \bar{U}^3 + 3\bar{U}^2\bar{u} + 3\bar{U}\bar{u}^2 + \bar{u}^3 \quad (2.1)$$

şeklinde açık biçimde yazılabilir. İfadenin sağ tarafındaki $3\bar{U}^2\bar{u}$ terimi, $\bar{u} = 0$ olduğundan sıfıra eşittir. $\bar{U}^3$ terimi ise olasılık dağılımı simetrik ise sıfıra eşittir; aksi taktirde sıfırdan farklıdır. Bu nedenle (2.1) denklemi

$$\bar{U}^3 = \bar{U}^3 \left(1 + 3\frac{\bar{u}^2}{\bar{U}^2} + \frac{\bar{u}^3}{\bar{U}^3} \right)$$

şeklinde yazılabilir. $\bar{U}^3$ ile $\bar{U}^3$ arasındaki fark, integrasyon zamanı T 'ye büyük ölçüde bağlıdır.

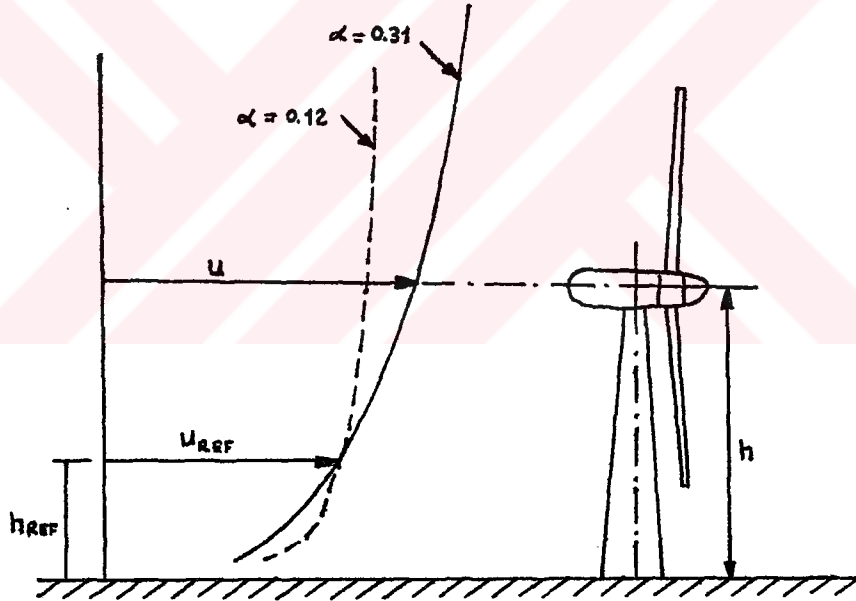
$T = 1$ veya $T = 2$ dakika gibi küçük zaman aralıklarında u çalkantı hızına sınır tabakanın türbülansı neden olur ki bu durumda olasılık dağılımı simetrik konumdan daha az sapar ve son terimin etkisi ihmal edilebilir. Bu durumda $\bar{U}^3$ ile $\bar{U}^3$ arasındaki fark, %12 mertebesindedir.

Ancak $T = 1$ yıl gibi büyük zaman aralıklarında ortalamadan sapmalar çok büyür ve olasılık dağılımı tamamen simetriden sapma gösterir. Bu durumda $\bar{U}^3$ ile $\bar{U}^3$ arasındaki fark 3 veya 4 kattan daha fazladır.

Meteoroloji istasyonlarından alınan data, daha başka bilgiler de içerir. Rüzgar enerjisinin olmadığı, yani havanın sakin olduğu sürenin frekans dağılımı ile belli hız aralığındaki rüzgar esme süresinin frekans dağılımı vb. gibi bilgiler, enerji depolanması konusunda önemlidir.

2.3. Rüzgar Hızı Şiddetinin Düşey Doğrultuda Değişmesi:

Rüzgar hızının şiddeti, atmosferik sınır tabakada yukarı seviyelerde sürtünme etkisinin azalması nedeniyle yükseklikle artar. Daha yüksek seviyeler daha büyük rotor çapları demek olup, bu durumda rotor üzerinde de rüzgar hızı yükseklikle önemli miktarda değişecektir. Dolayısıyla, yıllık enerji akısının yüksekliğe göre de ortalaması alınmalıdır.



Şekil 2.2: Büyük ölçekli rüzgar türbinleri için ideal rüzgar hızı profilleri.

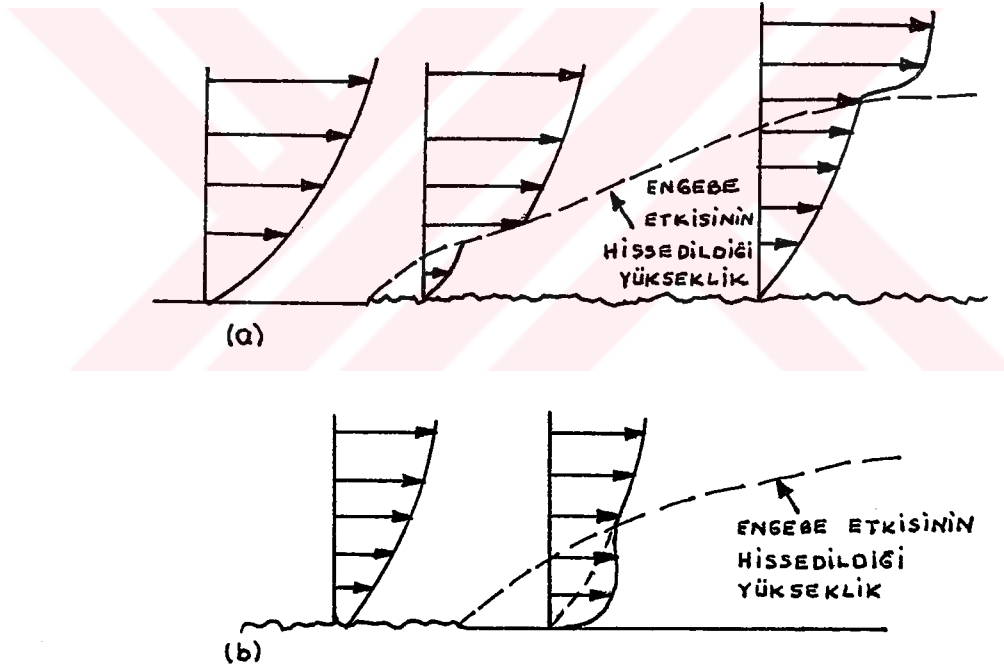
Rüzgar hızı şiddetinin düşey doğrultuda değişmesi iki biçimde belirlenebilir. Birincisi logaritmik formül ile olup, teorik olarak türetilbildiğinden meteorolojistlerce tercih edilir. İkincisi ise kuvvet kanunu formülü olup,

basitliđi nedeniyle burada bu formüle yer verilmiştir.

Rüzgar hızının yükseklikle değişmesi, rüzgar doğrultusuna, rüzgar hızına ve atmosferin kararlılık şartına bağlıdır. H yüksekliği göstermek üzere, kuvvet kanunu formülüne göre ani hız profili bir α üssüyle

$$\frac{U}{U_{ref}} = \left(\frac{H}{H_{ref}} \right)^\alpha$$

şeklinde verilir.



Şekil 2.3: Değişken arazi civarında rüzgar hızı profilleri.

- a) Düz araziden engebeli araziye geçiř
- b) Engibeli araziden düz araziye geçiř

Ancak değişim her zaman aynı şekilde olmaz. Rüzgar hızı şiddetinin düşey doğrultuda değişmesinde görülen farklılıkların nedeni, yüzey pürüzlülük

katsayısının farklı olmasıdır. Düşük rüzgar hızlarında hızların düşey doğrultuda değişmesi arasında görülen büyük farklar, muhtemelen atmosferin kararlılık şartının farklılığından kaynaklanmaktadır.

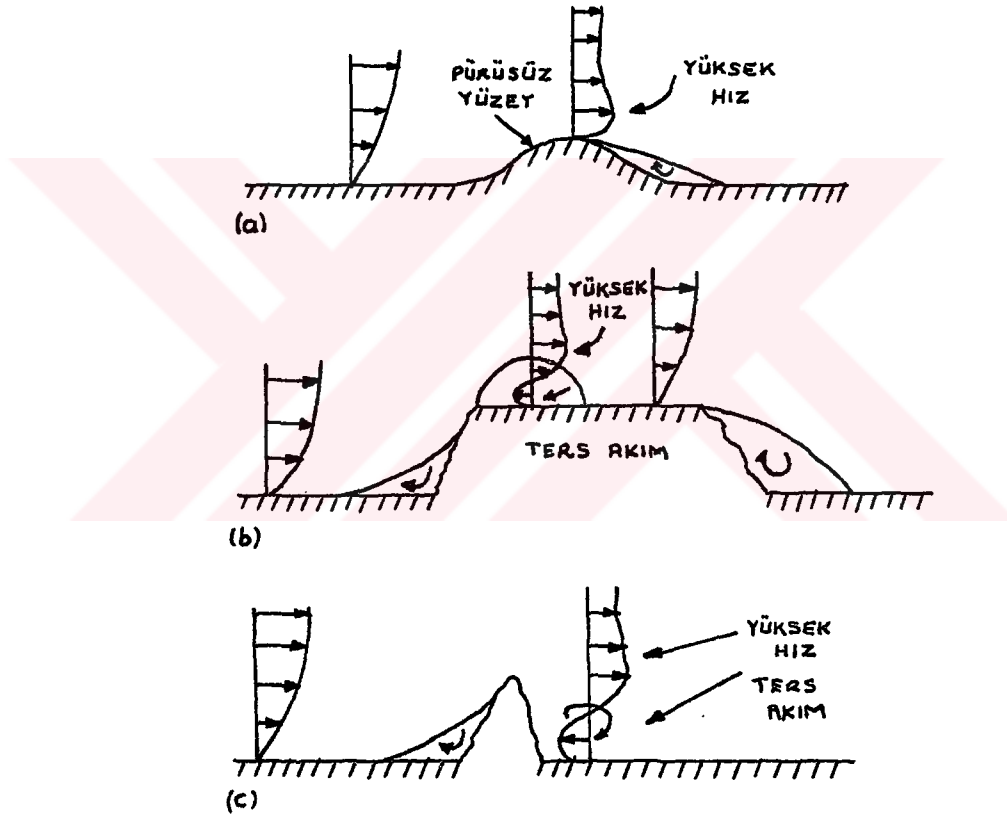
4 veya 5m/sn'nin altındaki rüzgar hızlarının yıllık ortalama enerji akısına olan katkıları ihmal edilebilir olduğundan, sözü edilen büyük farklılıklar enerji dönüştürülmesi açısından fazla önemli değildir.

İstatiksel ortalama anlamında, yüksek rüzgar hızlarında rüzgar hızı şiddetinin düşey doğrultuda değişmesi sadece rüzgar yönündeki yüzey pürüzlülüğü ile ilgilidir. Düşük yükseklikte ölçülen rüzgar hızı, daha büyük yüksekliklerdeki hızların bulunmasında kullanılmak istendiğinde, çeşitli doğrultulardaki yüzey pürüzlülükleri birbirinden farklı ise, rüzgar doğrultusundaki yüzey pürüzlülüğünün hesaba katılması gerekir.

Şekil 2.2'de iki farklı yüzey pürüzlülüğü değeri için rüzgar hız profilleri verilmiştir. Şekildeki profiller, meteoroloji istasyonlarında ölçülen aynı U_{ref} hızı için verildiğinden, bir bakıma yanıltıcıdır. Çünkü gerçekte aynı hava şartlarında yerden oldukça yüksekte rüzgar hızı yüzey pürüzlülüğünden hemen hemen bağımsızdır.

2.4. Uygun Yer Seçimi:

Bir bölgedeki rüzgarın şiddeti ve diğer karakteristikleri üzerinde daha önce de belirtildiği gibi bölgenin meteorolojik ve topografik özelliklerinin etkisi büyüktür. Şekil 2.4'de bu etkilere bazı örnekler verilmektedir.



Şekil 2.4: Bazı arazi çeşitleri ve rüzgar hız profillerinin durumu.

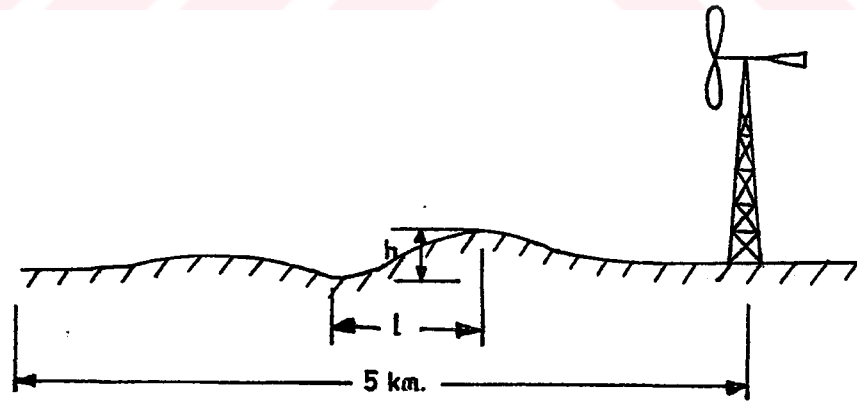
- a) Yuvarlak kenarlı tepeler (uygun yer)
- b) Dik kenarlı tepeler (uygun değil)
- c) Sivri tepeler (uygun olabilir)

Kuvvetli rüzgar alanları:

- Kuvvetli basınç gradyanı
- Hakim rüzgar yönüne paralel vadiler
- Yüksek ova ve platolar
- Sürekli inici akım bölgeleri
- Tepe ve dağ zirveleri
- Termal gradyan oluşan sahil bölgeleri

Zayıf rüzgar alanları:

- Hakim rüzgar yönüne dik vadiler
- Engebelerle gölgelenmiş arazi
- Kısa ve dar vadi ya da kanyonlar
- Pürüzlülük yüksekliğinin büyük olduğu alanlar



Şekil 2.5: Düz arazi tanımı.

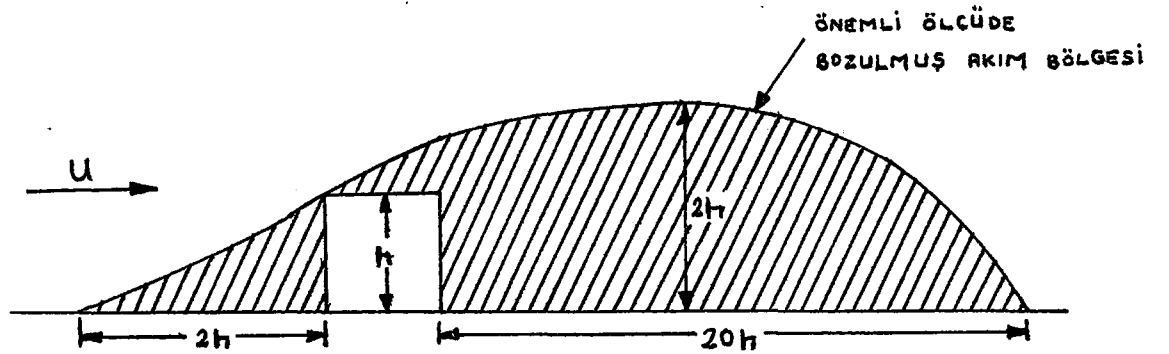
h : En büyük rakım farkı

l : En büyük rakım farkı bulunan bölgenin uzunluğu

Rüzgar türbini öncelikle düz bir araziye yerleştirilmelidir. Düz bir arazi ile 4 ya da 6 km. yarıçapına sahip bir daire içinde rüzgar türbininin yerleştirileceği yer ile civarı arasında yükseklik farkının az olduğu ($h/l < 0.03$) bir arazi anlaşılır.

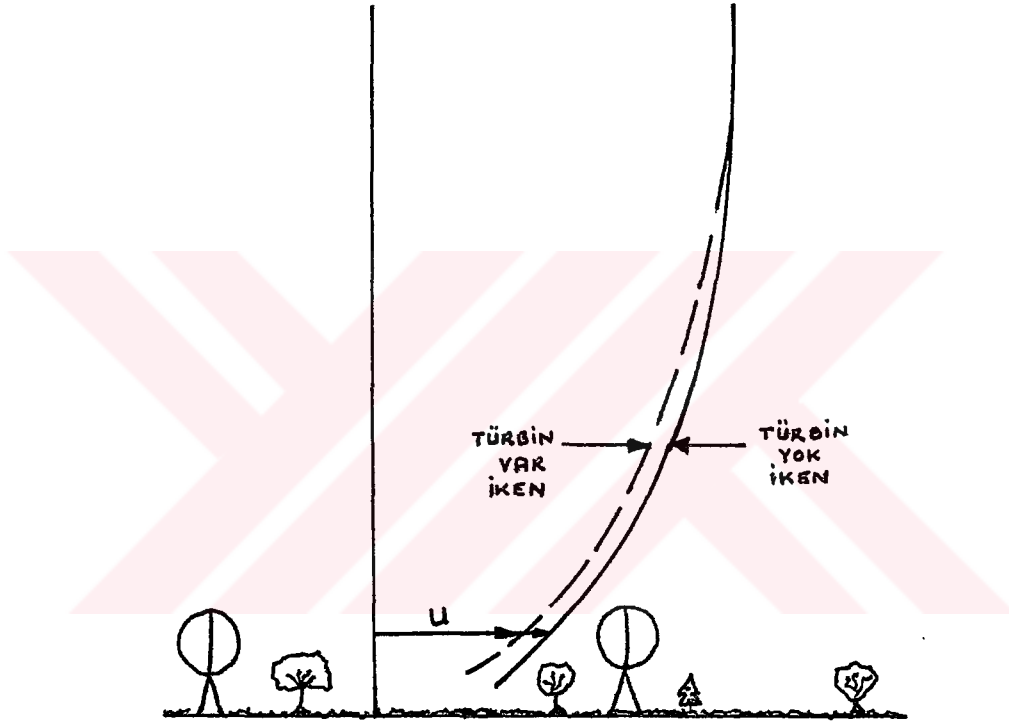
Arazi düz ise ve pürüzlülük yüksekliği 1 km. içerisinde üniform ise bölge homojen kabul edilir. Arazi düzse, fakat homojen değilse, yani engebeler varsa ve pürüzlülük yüksekliği üniform değilse, rüzgar türbinini yerleştirmek için,

- Hakim rüzgar yönünde, engebelerin bastırıcı akış bölgesinde olmayan,
- Türbülans bölgelerinden etkilenmemek için, engebelerin rüzgar üstü ve altı bölgelerinden yeteri kadar uzakta,
- Engbelerden kaçılmıyorsa, bozulma bölgelerinin yukarısında bir yer seçilmelidir.



Şekil 2.6: Küçük bir bina çevresinde akım bozulma bölgesi.

Bunların yanında küçük sistemler güç tüketim bölgelerinin yakınına konmalı, rüzgar türbini tarlası durumunda da türbinlerin birbiri ile girişimi hesaba katılmalı ve türbinler arasında bırakılması gerekli yeterli mesafeler belirlenmelidir.

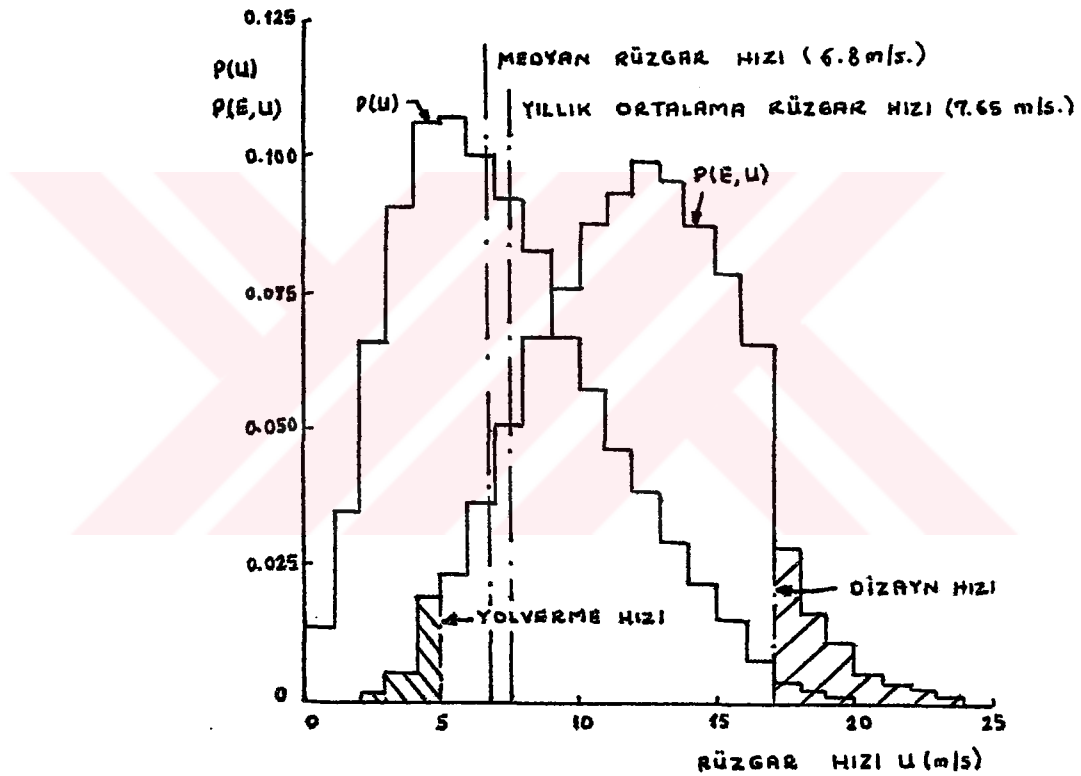


Şekil 2.7: Rüzgar türbininin hız profili üzerine etkisi.

2.5. Rüzgar Enerjisinin Kullanılabilir Miktarı:

Ekonomik açıdan rüzgar enerji dönüşümü işlemini belli bir maksimum hızda sınırlamak avantajlı görülmektedir [8]. Bu dizayn gücü rüzgar türbininin yatırım maliyetini önemli ölçüde etkiler.

Kırsal alanda su pompalama gibi uygulamalarda türbinin çoğu zaman düşük bir hızda çalışmaya başlaması istenir. Ancak yıllık enerji üretimi açısından böyle bir düşük yolverme hızı gerekli değildir. Bu olay, Şekil 2.8’de rüzgar hızı olasılığı eğrisi ele alınarak açıkça görülebilir. (Sol taraftaki taralı alan)



Şekil 2.8: Hollanda kıyılarında yerden 14m. yükseklikte yapılan ölçümlere göre rüzgar hızının olasılık ve enerji dağılımı.

Burada rüzgar hızının olasılık dağılımı,

$$P(U) = \frac{\text{Bir yıl boyunca } U \text{ hızının görüldüğü toplam saat}}{\text{Bir yılı oluşturan toplam saat (8760)}}$$

ve rüzgar hızının enerji dağılımı,

$$P(E, U) = \frac{U \text{ hızında yıllık enerji}}{\text{Yıllık toplam enerji}}$$

olarak verilmektedir. Bu halde, bu iki dağılım U_j ilgili hız aralığı olmak üzere,

$$P(E, U_j) = \frac{U_j^3 P(U_j)}{\sum_i U_i^3 P(U_i)}$$

şeklinde hesaplanabilir. Bu ifadenin paydası, Şekil 2.8'de $P(E, U)$ eğrisi altında kalan alana karşılık gelmekte olup, bir çarpan farkıyla yıllık enerji akısına eşittir. Şekil 2.8'de yıllık enerji 4.37 MW-saat/ m^2 /yıl kadardır.

Şekil 2.8'de düşük rüzgar hızlarının düşük enerji akısına sahip oldukları ve yıllık enerjiye olan katkılarının ihmal edilebilir olduğu görülmektedir. Yüksek rüzgar hızlarında da enerji akısı yüksek olmakla birlikte, olasılığın düşük olması nedeniyle yıllık enerjiye katkıları da düşüktür. (Sağdaki taralı alan)

Dizayn hızının üstündeki rüzgar hızlarında enerji üretimini sağlayabilmek için pala hatvesinin değiştirilmesi yoluyla güç fazlalığı bir miktar azaltıldığında, buna karşılık gelen güç kaybı Şekil 2.8'in sağ tarafındaki taralı alandan daha küçük olur.

2.6. Sonuç:

Bu bölümde, rüzgar türbini dizaynı ve inşasından önce yapılan meteorolojik çalışmalardan kısaca bahsedilmiştir. Bir bölgede rüzgar hız profilinin hangi faktörlerden etkilendiği ve buna bağlı olarak uygun yerin seçiminde

hangi faktörlerin gözönünde bulundurulması gerektiği anlatılmıştır. Ardından, rüzgar enerjisinin kullanılabilir miktarının, mevcut miktārın altında olduğundan sözedilmiştir.

Ancak, bunun yanında rüzgar türbininin aerodinamik verimi, rüzgar enerjisinin kullanılabilir miktarının da altında bir enerjinin rüzgardan çekilebilmesine neden olur. Bu konuya Bölüm 3'den itibaren geniş biçimde yer verilecektir.



BÖLÜM 3

İDEAL DİSK TEORİSİ

3.1. Giriş:

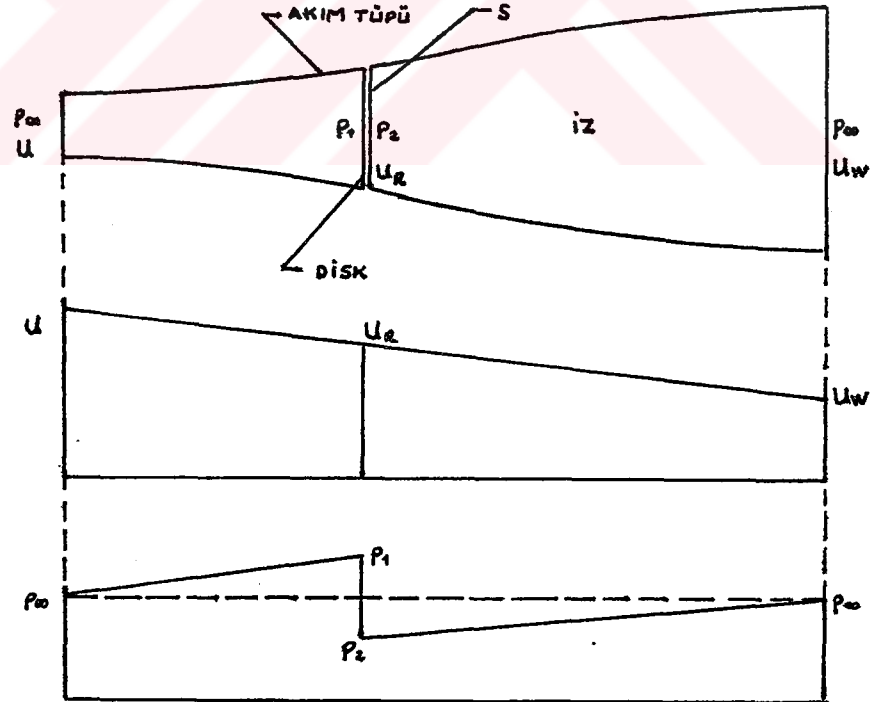
Belli boyutlara sahip bir rüzgar türbini için rüzgar akımından aerodinamik olarak çekilebilecek enerjinin bir üst limiti vardır. Bu limit, 1926'larda Betz tarafından ideal disk teorisi yardımıyla belirlenmiştir. Rüzgar türbini kavramında Betz limitinin önemi çok büyüktür. Bu nedenle, bu bölümde öncelikle ideal disk teorisi üzerinde durulacak, rüzgar türbini ile rüzgardan çekilebilecek gücün türbin boyutları ile direk ilişkisi olduğu gösterilecek, rotor önünde, üzerinde ve gerisindeki akım hızları arasında ilişki kurulacak, daha sonra da Betz limiti üzerinde durulacaktır.

3.2. Temel Denklemler:

Betz tarafından rüzgar türbini için geliştirilen bu yöntemde rüzgar türbini rotoru yerine aynı çapa sahip sonsuz ince bir disk alınarak, diski geçen bir boyutlu akıma üç temel korunum denklemi uygulanmıştır. Enerjinin

korunumu, aksel momentumun korunumu ve kütlenin korunumu kanunları kullanarak diski geçen akımın kaybettiği, dolayısıyla rüzgardan diske transfer olan momentum miktarı belirlenir.

Türbin rotorunun bir diskle değiştirilmesi sonucu şu kabuller yapılmış olur: Diski geçen akımın hızı disk alanının her noktasında birbirine eşittir. Fakat statik basınç, akım diski geçerken ani bir azalmaya maruz kalır. Bu basınç düşmesi, akımda bir enerji düşmesi ve dolayısıyla diskin enerjisinde bir artma ile kendini gösterir. Akım daimidir ve disk civarı dışında akım tüpü boyunca tek boyutludur. Yani rotor gerisindeki girdaplar ihmal edilir.



Şekil 3.1: Rüzgar türbinini geçen akımı içine alan akımtüpü ile bu akımtüpü boyunca aksel hız ile statik basınçın değişimi.

Akım tüpü boyunca akım girdapsız kabul edildiğine göre Bernoulli denklemi diskin  n  ve arkasındaki bölgeler için ayrı ayrı olmak üzere uygulanabilir:

$$p_{\infty} + 1/2 \rho U_{\infty}^2 = p_1 + 1/2 \rho U_R^2$$

$$p_2 + 1/2 \rho U_R^2 = p_{\infty} + 1/2 \rho U_W^2$$

Bu iki bağıntı birbirleri ile karşılaştırılarak,

$$p_1 - p_2 = 1/2 \rho (U_{\infty}^2 - U_W^2) \quad (3.1)$$

yazılabilir. Ayrıca diskin alanı S olmak üzere diskin  n  ve arkası arasındaki basınç farkı disk üzerinde bir sürükleme kuvvetine neden olur. Bu D sürükleme kuvveti için,

$$D = (p_1 - p_2)S$$

veya (3.1) bağıntısı kullanılarak,

$$D = 1/2 \rho (U_{\infty}^2 - U_W^2)S \quad (3.2)$$

bulunur.

Diski geçen havanın kütlesel debisi

$$\dot{m} = \rho U_R S$$

olmak üzere eksenel momentum denklemi şekil (3.1)'deki akım tüpüne uygulandığında,

$$D = \dot{m} (U_{\infty} - U_W) = \rho U_R (U_{\infty} - U_W)S \quad (3.3)$$

yazılabilir. Böylelikle sürükleme kuvveti için biri enerjinin korunumu denkleminin, diğeri ise kütlenin ve eksenel momentumun korunumu denkleminin

olmak üzere iki bağıntı elde edilmiş olur. Bu iki bağıntı (3.2 ve 3.3) karşılaştırılarak diski geçen akımın hızı için,

$$U_R = \frac{U_\infty + U_W}{2} \quad (3.4)$$

olduğu görülür. Yani diski geçen akımın hızı rotorun yeterince önü ve arkasındaki hızların aritmetik ortalamasıdır.

3.3. Betz Limiti:

Rüzgar türbini tarafından rüzgardan elde edilen güç, rotoru geçen kütle akımının kinetik enerjisinde meydana gelen azalmaya eşittir.

$$P = 1/2 \rho U_R S (U_\infty^2 - U_W^2)$$

Güç katsayısı ise,

$$C_P = \frac{P}{1/2 \rho U_\infty^3 S} = \frac{U_R}{U_\infty} \left[1 - \left(\frac{U_W}{U_\infty} \right)^2 \right]$$

şeklinde yazılabilir. Bu bağıntı (3.4) bağıntısı kullanılarak yeniden düzenlenirse,

$$C_P = 4 \left(\frac{U_R}{U_\infty} \right)^2 \left(1 - \frac{U_R}{U_\infty} \right)$$

elde edilir. Buradan görülmektedir ki, $U_R/U_\infty = 2/3$ için güç katsayısı maksimum değerini almaktadır. Bu değer ise,

$$C_P = \frac{16}{27} = 0.59$$

dir. Betz'e göre bu değer teorik olarak rüzgardan çekilebilecek enerji miktarının üst limitidir.

3.4. Sonuç:

Bu bölümde yapılan inceleme göstermektedir ki, bir rüzgar türbini bulunduğu bölgedeki rüzgar enerji potansiyelinin kullanılabilir miktarının ideal şartlar altında ancak % 59'unu çekebilmektedir. Bu enerjinin miktarı, bazı rüzgar yoğunlaştırıcılar kullanılarak bir miktar arttırılabilir.

Bununla birlikte, ideal disk teorisi, rotorun gerisinde oluşan girdaplı akım alanını ve profil sürüklenmesinden kaynaklanan viskoz kayıpları hesaba katmamaktadır. Bu kayıpların miktarı, rüzgar türbininin tipine büyük ölçüde bağlı olmakla birlikte, rüzgardan çekilebilecek enerjiyi Betz limitinin de altına düşürür. O halde, dizayn edilen rüzgar türbininin rüzgardan çekebileceği enerji miktarının belirlenmesinde ve ayrıca uygun palanın dizaynı ile rotora gelen kuvvetlerin hesabında, rotor gerisindeki akımın karakterinin anlaşılması büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla, Bölüm 4'de rotor gerisinde sözü edilen üç boyutlu akım alanının, türbinin güç katsayısı üzerine olan etkilerine geniş biçimde yer verilecektir.

BÖLÜM 4

RÜZGAR TÜRBİNİ ETRAFINDAKİ AKIM VE BU AKIMI KONTROL EDEN DENKLEMLER

4.1. Giriş:

Bir önceki bölümde, rüzgar türbini vasıtasıyla rüzgardan çekilebilecek enerjinin Betz limitinin belirlediği miktarın da altında olduğundan sözedilmişti. Bunun nedeni, rüzgar türbini etrafındaki akımın ideal disk teorisinde ele alındığı biçimden çok farklı olmasıdır. Gerçekte rotor gerisinde iz olarak adlandırılan girdaplı ve son derece karmaşık bir akım bölgesi mevcuttur. Bu girdaplı akım, rotorun önünde, üzerinde ve gerisinde üç eksen doğrultusunda hızlar indükler. Bu bölümde, ilave kayıpların hangi sebeplerden ileri geldiği ve akımın ne şekillerde modellenebileceği üzerinde durulacaktır.

Bu inceleme aksenal simetrik bir akım için yapılacak, bu sayede denklemler üçüncü koordinattan bağımsız hale getirilmiş biçimde kullanılacaktır.

İlk önce, hareket denklemi ele alınarak akımın karakteri hakkında

fikirler verilecek, ardından uygun eksen takımı seçilecektir. Daha sonra rotor gerisindeki akımın modellenmesine geçilecektir. Önce genişleyen yapıya sahip bir iz için temel denklemler çıkartılacak, ardından izin silindirik olması durumu için bu denklemler basitleştirilecektir. Basit sirkülasyon dağılımları için hız dağılımları ve güç katsayısı hesaplanacaktır. Daha sonra olaya başka bir açıdan yaklaşılabilecek, rüzgar türbini etrafındaki akımın momentum dengesi kullanılarak yeni denklemler elde edilecektir. Bu yolla elde edilen denklemler de ancak özel durumlar için çözülebilecek, bu sayede iz genişlemesinin ve akımın dönmesinden kaynaklanan statik basınç kaybının rotor üzerinde indüklenen hızlara ve güç katsayısına olan etkileri incelenecektir.

4.2. Sıkıştırılamaz Daimi Akımdan Enerji Çekilmesi Halinde Zamana Bağımlılığın İncelenmesi:

Sabit hızlı rüzgar içerisine, enerji çekmek amacıyla yerleştirilen bir rüzgar türbini etrafındaki akım alanı gözönüne alınsın. Bu akım alanındaki bir akım çizgisini takip eden bir akışkan parçacığından çekilen enerji, bu parçacığa ait Bernoulli sabiti H 'da bir azalma şeklinde kendisini gösterir. Eğer akışkan parçacığının enerjisinde bir değişiklik olmasaydı, p statik basıncı ve U da hızı göstermek üzere,

$$H = p + 1/2 \rho U^2 \quad (4.1)$$

akım çizgisi boyunca sabit kalırdı. H 'da meydana gelen değişim sıkıştırılamaz akım halindeki momentum denklemi ele alınarak incelenebilir. $\vec{U}$ hızındaki birim akışkan kütleğine etkiyen dış kuvvet $\vec{F}$, akışkanın viskozitesi μ , olmak

üzere momentum denklemi genel halde,

$$\rho \frac{D\vec{U}}{Dt} = \rho \vec{F} - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{U}$$

şeklinde yazılabilir. Denklemin sol tarafı açılarak,

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + (\vec{U} \cdot \nabla) \vec{U} = \vec{F} - 1/\rho \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{U}$$

şeklinde yazmak mümkündür. Bu denklem ise,

$$\nabla^2 \vec{U} = \nabla(\nabla \cdot \vec{U}) - \nabla \times (\nabla \times \vec{U})$$

ya da sıkıştırılmaz halde süreklilik denklemi

$$\nabla \cdot \vec{U} = 0$$

kullanılarak yazılabilen

$$\nabla^2 \vec{U} = -\nabla \times (\nabla \times \vec{U})$$

eşitliği ile birlikte

$$(\vec{U} \cdot \nabla) \vec{U} = \nabla(U^2/2) - \vec{U} \times (\nabla \times \vec{U})$$

eşitliği kullanılarak,

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} = \vec{F} - 1/\rho \nabla p - \nabla(U^2/2) + \vec{U} \times (\nabla \times \vec{U}) - \nu \nabla \times (\nabla \times \vec{U})$$

şeklinde yazılabilir. Ayrıca yine bu denklemde çevri vektörünün

$$\vec{\omega} = \nabla \times \vec{U}$$

şeklindeki tanımı kullanılarak,

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} = \vec{F} - 1/\rho \nabla H + \vec{U} \times \vec{\omega} - \nu \nabla \times \vec{\omega} \quad (4.2)$$

ifadesi bulunur.

Daimi, viskozitesiz ve çevrisiz bir akış için (4.2) denklemi,

$$\vec{F} = 1/\rho \nabla H \quad (4.3)$$

halini alır. Bu ifade, hayali bir akım için akım doğrultusunda H'da bir değişimin, ancak yine akım doğrultusunda akışkana bir dış kuvvet etkimesi ile mümkün olabileceğini göstermektedir.

Daimi, viskozitesiz, ama çevrili bir akım için (4.2) denklemi,

$$1/\rho \nabla H = \vec{F} + \vec{U} \times \vec{\omega}$$

halini alır. Bu denklem, H'nın gradyanının akım doğrultusundaki izdüşümünü bulmak maksadıyla $\vec{U}$ ile skaler olarak çarpılırsa,

$$1/\rho \vec{U} \cdot \nabla H = \vec{U} \cdot \vec{F} + \vec{U} \cdot (\vec{U} \times \vec{\omega}) \quad (4.4)$$

bulunur. Sağ taraftaki ikinci terim matematiksel olarak sifıra özdeştir. Yani (4.4) denklemi (4.3) denklemi ile aynı sonucu vermektedir.

Daimi, viskoz ve çevrili bir akım için ise, (4.2) denkleminin $\vec{U}$ ile skaler olarak çarpılmış hali,

$$1/\rho \vec{U} \cdot \nabla H = \vec{U} \cdot \vec{F} - \nu \vec{U} \cdot (\nabla \times \vec{\omega})$$

şeklinde yazılabilir. Sağ taraftaki ikinci terim viskoz etkilerden dolayı ısıya çevrilerek harcanan enerjiyi temsil etmektedir ve faydalı enerji olarak alınamaz.

Yukarıdaki üç özel hal de göstermektedir ki, ancak akım doğrultusundaki dış kuvvetler akımdan enerji çekilebilmesini sağlamaktadır. Oysa hareket doğrultusundaki kuvvetler sürüklenme kuvvetleri olup, bunlar genellikle küçüktürler. Buna karşılık akım alanında görülen bir diğer kuvvet, taşıma kuvveti, daha büyük olmakla birlikte, hareket doğrultusuna dik olduğundan, H'ya bir katkısı yoktur. Sonuç olarak daimi akım halinde akımdan faydalı bir enerji çekilmesi fazla ilginç olmamaktadır. O halde, akımdan enerji çekilmesi konusunun daimi olmayan akım halinde incelenmesinde yarar vardır. Zamana bağlı, çevrisiz ve viskozitesiz akım halinde H'nın değişimini incelemek amacıyla önce H'nın hareketi takiben türevini ele alalım:

$$\frac{DH}{Dt} = \frac{\partial H}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla H$$

Bu ifadenin sağ tarafındaki ilk terim için (4.1) bağıntısı kullanılarak,

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial p}{\partial t} + \rho \vec{U} \frac{\partial \vec{U}}{\partial t}$$

yazılabilir. Bu son ifade (4.2) denkleminin çevrisiz ve viskozitesiz haldeki şekli $\rho \vec{U}$ ile skaler olarak çarpılarak elde edilen

$$\rho \vec{U} \frac{\partial \vec{U}}{\partial t} = \rho \vec{U} \cdot \vec{F} - \vec{U} \cdot \nabla H$$

eşitliği kullanılarak

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial p}{\partial t} + \rho \vec{U} \cdot \vec{F} - \vec{U} \cdot \nabla H$$

şekline getirilebilir. Bu eşitlik de hareketi takiben türev ifadesinde yerine konarak,

$$\frac{DH}{Dt} = \frac{\partial p}{\partial t} + \rho \vec{U} \cdot \vec{F} \quad (4.5)$$

ifadesi bulunur. Bu ifade göstermektedir ki H, statik basınçtaki dalgalanmalarla ve dış kuvvetler tarafından akışkan üzerine yapılan işle değişebilir.

Daimi olmayan akım kavramında taşıma kuvveti $\vec{U}$ 'ya dik olmak zorunda olmadığından, $\rho \vec{U} \cdot \vec{F}$ terimi de H'nın değişimine katkıda bulunabilir.

4.3. Eksen Takımının Seçimi:

Sabit açısal hızla dönen bir yatay eksenli rüzgar türbinini geçen akım, türbinin uzağındaki akım daimi olsa bile, yere bağlı bir eksen takımına göre daimi değildir. Dolayısıyla problemin bu eksen takımında çözülmesi hayli güçtür. Oysa aynı akım türbin palasına bağlı bir eksen takımında incelenirse bu eksen takımına göre daimi olduğu görülür. Bu da akımın incelenmesinde son derece büyük bir kolaylık sağlar. Daimi akım halinde (4.5) denkleminin sağ tarafındaki statik basıncın zamana göre türevi sıfır olacağından denklem,

$$\frac{DH}{Dt} = \rho \vec{U} \cdot \vec{F}$$

şekline gelir. Bu denklemin sol tarafındaki türevin hareketi takiben alındığı ve daimi hal için bu türev içerisinde zamana bağlı terimin sıfır olduğu hatırlanmalıdır. Diğer taraftan herhangi bir dönen sistem için genel olarak Coriolis ve merkezkaç kuvvetleri de hesaba katmak gerekir. Bu bakımdan, $\vec{\Omega}$ türbinin açısal hız vektörü olmak üzere Coriolis ve merkezkaç kuvvetlerinin hareket doğrultusundaki bileşenleri ilave edilerek bu son denklem,

$$\frac{DH}{Dt} = \rho \vec{U} \cdot \vec{F} - \rho \vec{U} \cdot (2\vec{\Omega} \times \vec{U}) - \rho \vec{U} \cdot [\vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{r})] \quad (4.6)$$

şekline gelir. Bu eşitliğin sağ tarafındaki ikinci terim Coriolis kuvvetinin hız vektörü ile skaler olarak çarpımı olup sıfıra eşit olduğu görülmektedir. Viskoz olmayan akımda tek dış kuvvet taşıma kuvveti olup akımın daimi olması halinde hareket doğrultusuna diktir. Bu yüzden (4.6) denkleminin sağ

tarafındaki ilk terim de sıfır olmaktadır. Aynı denklemdeki üçüncü terime gelince,

$$-\vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{r}) = \nabla [1/2 (\vec{\Omega} \times \vec{r})^2]$$

olup, bu durumda (4.6) denklemi,

$$\frac{DH}{Dt} = \rho \vec{U} \cdot \nabla [1/2 (\vec{\Omega} \times \vec{r})^2] = \frac{D}{Dt} [1/2 \rho (\vec{\Omega} \times \vec{r})^2] \quad (4.7)$$

haline gelir. Bu son ifade, Bernoulli sabitinin (4.1) denklemi ile verilen tanımı göz önüne alınıp integre edilerek

$$p + 1/2 \rho U^2 - 1/2 \rho (\vec{\Omega} \times \vec{r})^2 = \text{sabit} \quad (4.8)$$

şekline gelir.

(4.8) denklemi dünyaya bağlı mutlak bir eksen takımında yeniden incelenebilir. $\vec{U}_r$ türbin palasına bağlı eksen takımındaki hız, $\vec{U}_a$ da yere bağlı eksen takımındaki hız olmak üzere,

$$\vec{U}_r = \vec{U}_a + \vec{\Omega} \times \vec{r}$$

yazılabilir. $\vec{U}_r$ 'nin karesi için

$$U_r^2 = \vec{U}_r \cdot \vec{U}_r = \vec{U}_a \cdot \vec{U}_a + 2 \vec{U}_a \cdot (\vec{\Omega} \times \vec{r}) + (\vec{\Omega} \times \vec{r}) \cdot (\vec{\Omega} \times \vec{r})$$

yazılıp (4.8) denkleminde yerine konursa,

$$p + 1/2 \rho U_a^2 + \rho \vec{U}_a \cdot (\vec{\Omega} \times \vec{r}) = \text{sabit} \quad (4.9)$$

bulunur. Denklem iki bölgede incelenecek olursa,

1. Türbinin yeterince önünde, $\vec{U}_a$ hız vektörü $\vec{\Omega}$ açısal hız vektörüne paraleldir. Bu nedenle skaler çarpımları sıfır verir.

2. Türbinin yeterince gerisinde ise, statik basınç türbinin yeterince önündeki statik basınca eşittir. O halde, akımda enerji kaybı olması, $\vec{U}_a$ 'nın türbini geçerken $\vec{\Omega} \times \vec{r}$ yönünde sapması ile mümkündür.

(4.9) denklemindeki skaler çarpım terimi, birim hacimde açısal momentumdaki değişimin Ω ile çarpımı ya da türbinin momentinin Ω ile çarpımı olarak yorumlanabilir. Bu ise türbin tarafından üretilen enerjidir. Görülmektedir ki, yatay eksenli rüzgar türbininin ürettiği enerji türbin gerisindeki teğetsel hızlarla ilgilidir.

4.4. Türbin Gerisindeki Girdap Sisteminin Yapısı:

Birim genişliğe sahip bir kanat profiline etkiyen taşıma kuvveti ile bu profil etrafındaki sirkülasyon arasında,

$$L = \rho U \Gamma$$

şeklinde bir ilişki vardır. Taşıma kuvveti ayrıca taşıma katsayısı cinsinden,

$$L = 1/2 C_L \rho U^2 c$$

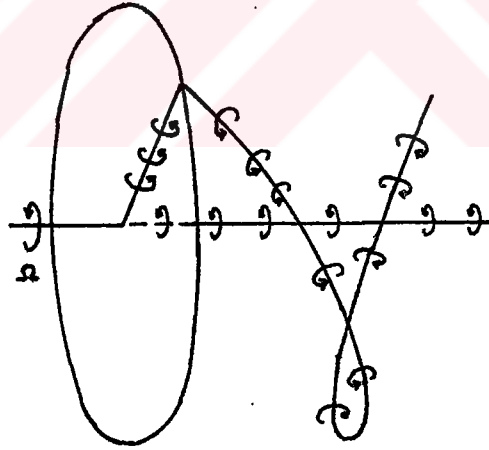
şeklinde yazılabilir. Bu iki bağıntı eşitlenip sirkülasyon çekilirse,

$$\Gamma = 1/2 C_L U c$$

bulunur.

Bu kavram rüzgar türbini problemine uygulandığında, palalara bazı aerodinamik kuvvetlerin etkimesi için palaların etrafında akımın sirkülasyona

uğraması gerektiği açıkça görülür. Genelde sirkülasyon pala açıklığı boyunca değişir. Ama rotor gerisindeki hava hareketlerini anlayabilmek için sirkülasyon dağılımı ilk adımda sabit olarak alınabilir. Pala açıklığı boyunca bir sirkülasyon dağılımı, şiddeti Γ olan ve pala kökünden ucuna doğru uzanan bir girdap çizgisi ile temsil edilebilir. Ancak Helmholtz yasalarına göre bir girdap çizgisi ya kapalı bir halka oluşturabilir, ya da sonsuza doğru gidebilir; akım alanı içinde son bulamaz. Rotor gerisindeki akışkanın içine doğru serbest girdap çizgileri şeklinde kıvrılarak uzatılır. Bu girdap çizgileri de, rotor gerisindeki kaçma girdaplarını temsil eder. Dolayısıyla pala boyunca uzanan bağlı girdap, biri pala ucundan sonsuza, diğeri de pala kökünden sonsuza uzanan iki girdap çizgisi ile devam eder (Şekil 4.1).

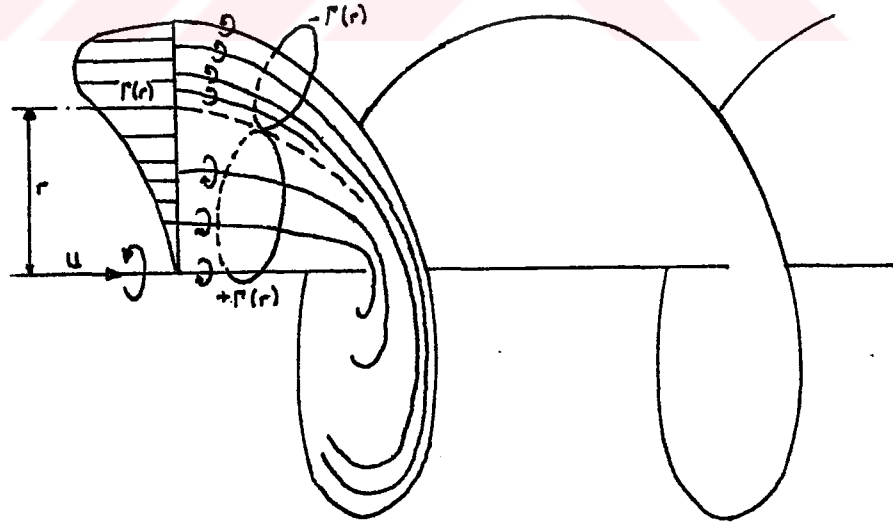


Şekil 4.1: Pala boyunca sabit sirkülasyon halinde rotor gerisinde girdap çizgilerinin durumu.

Kökten uzanan girdap çizgileri B adet palalı bir rotor için şiddeti $B \cdot \Gamma$ olan düz bir girdap çizgisi oluşturur. Uçtan uzanan girdap çizgileri ise, her birinin

şiddeti Γ olan helisel yapıya sahip B adet girdap çizgisi ile bu girdap sistemini tamamlar. Bu girdap çizgilerinin helisel olarak dağılmış olmalarının sebebi, aksenal akım hızı U ile palaların dönme hızı ΩR 'nin ortak etkisi ile sapmış olmalarıdır.

Yukarıda sözü edilen girdap sistemi sabit bir sirkülasyon dağılımı için kurulmuştur. Ancak bu dağılım fiziksel olarak mümkün değildir. Sirkülasyonun pala boyunca değişimine bağlı olarak, girdap çizgileri sadece pala kökü ve ucunu değil, firar kenarının her noktasını terkederler. Palanın r ve $(r + \delta r)$ noktaları arasında sirkülasyonda olan artış $\delta\Gamma$ ile gösterilecek olursa, bu elemanı terkeden helisel girdabın şiddeti $\delta\Gamma$ olmalıdır. Herbir paladan çıkan girdap çizgileri vida yüzeyi şekline sahip bir girdap tabakası oluşturur (Şekil 4.2).



Şekil 4.2: Pala boyunca değişken sirkülasyon halinde rotor gerisinde oluşan kaçma girdabı tabakası.

Böylelikle türbinin gerisindeki akım bölgesi bu girdap tabakaları ile onların arasını dolduran akışkandan oluşmuş olur. İz genişlemesi nedeniyle girdap tabakaları rotorun hemen arkasında palaları terkederken bir miktar sapmaya uğrarlar. Ancak daha geride düzgün bir helisel forma otururlar.

Akım içinde bulunan türbinin yarattığı karışıklık, girdap sisteminin indüklediği hızlarla temsil edilebilir. Girdap sistemi, rotorun önünde, rotor üzerinde ve rotor gerisinde akım hızını değiştiren hızlar indükler. Rüzgar türbini için sözü edilen bu girdap sistemi, dönme eksenini boyunca eksenel hızda sürekli bir azalmaya, teğetsel hızda ise sürekli bir artmaya neden olur.

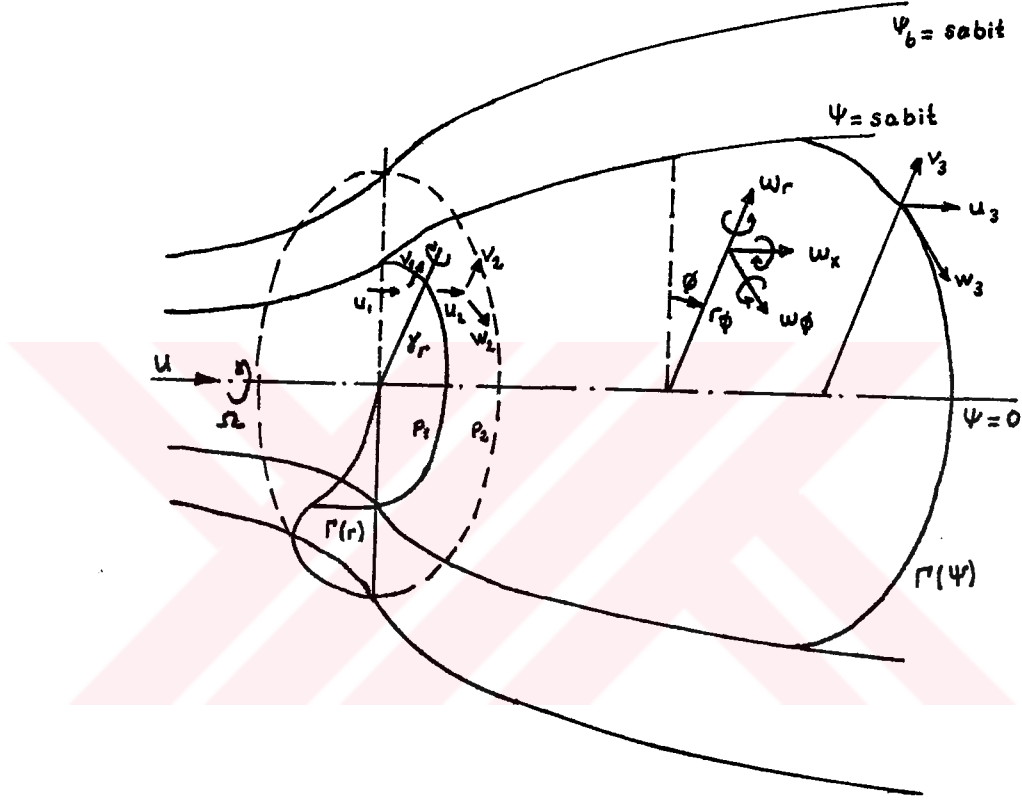
İndüklenmiş hızlar hesaplandıktan sonra diğer türbin karakteristiklerinin hesabına geçilebilir.

4.5. Genişleyen İz Halinde İndüklenmiş Hızların Hesabı:

Bir rüzgar türbininin gerisindeki akımda indüklenmiş hızlar türbinin yeterince önündeki serbest akım hızına kıyasla küçük değillerse bu türbinin izi, giderek genişleyen bir yapıya sahip olacaktır. Bu türden problemler non-lineer tipte olup, çözümü hayli karmaşıktır ve iteratif bir hesaplamayı gerektirirler.

Burada incelenen akış, tüm büyüklüklerin üçüncü koordinat ϕ 'den bağımsız olduğu eksenel simetrik bir akıştır. Bu akış, sonsuz sayıda palaya sahip bir rotor ile temsil edilebilir. Bağlı girdabın toplam şiddeti sabit tutulup

pala sayısı arttırıldığında rotor düzlemi, aksenal simetrik şiddet dağılımına sahip bir girdap tabakası haline gelir.



Şekil 4.3: Sonsuz palaya sahip rotor için aksenal simetrik akım halinde genişleyen akım çizgileri.

Bu sayede, iz bölgesinde birkaç girdap tabakası ile ilgilenmek yerine, akım alanının tümüne dağılmış bir girdapla ilgilenmek mümkün olmaktadır.

Rotor ekseninden r uzaklığında girdap şiddeti γ_r , aynı yerdeki

sirkülasyon şiddetine,

$$\Gamma(r) = 2\pi r \gamma_r \quad (4.10)$$

şeklinde bağlanabilir. Eksenel simetrik akışta herhangi bir noktadaki hız vektörünün x , r ve ϕ yönündeki bileşenleri sırasıyla u , v ve w olmak üzere, silindirik koordinatlarda süreklilik denklemi,

$$\frac{\partial(vr)}{\partial r} + \frac{\partial(ur)}{\partial x} = 0$$

şeklinde dir. Bu denklem

$$u = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \quad (4.11.a)$$

$$v = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (4.11.b)$$

için ve $\psi(x, 0) = 0$ olmak üzere bir $\psi(x, r)$ akım fonksiyonu tarafından özdeş olarak sağlanmaktadır. Görüldüğü gibi eksenel simetrik bir akışta teğetsel hız bileşeni w 'nin kütlelenin korunumuna etkisi yoktur.

İz bölgesinde çevri vektörünün Bölüm 4.2'de yapılan tanımından hareketle çevri vektörü bileşenleri,

$$\omega_x = \frac{1}{r} \frac{\partial(wr)}{\partial r} \quad (4.12.a)$$

$$\omega_r = -\frac{\partial w}{\partial x} \quad (4.12.b)$$

$$\omega_\phi = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial r} \quad (4.12.c)$$

şeklinde yazılabilir. (4.11) bağıntıları (4.12.c)'de kullanılarak,

$$\omega_\phi = -\frac{1}{r} \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} - \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) \quad (4.12.d)$$

ifadesi elde edilir. İz bölgesinin dışında ve rotor önünde akış çevrisizdir. Bu yüzden bu bölgelerde (4.12) bağıntıları,

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} = 0 \quad , \quad w = 0 \quad (4.13)$$

haline gelir.

İz bölgesindeki sıkıştırılamaz, viskozitesiz akım için ise çevri vektörü ile hız vektörü arasındaki ilişki Bölüm 4.2'den hatırlanacak olursa,

$$1/\rho \nabla H = \vec{U} \times \vec{\omega}$$

şeklinde ya da silindirik koordinatlarda,

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial H}{\partial x} = v\omega_\phi - w\omega_r \quad (4.14.a)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial H}{\partial r} = w\omega_x - u\omega_\phi \quad (4.14.b)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{1}{r} \frac{\partial H}{\partial \phi} = u\omega_r - v\omega_x = 0 \quad (4.14.c)$$

olarak yazılabilir.

ds, akım yüzeyi üzerinde doğrusal bir eleman olmak üzere iz bölgesi içinde $\psi = \text{sabit}$ yüzeyi üzerinde Bernoulli sabitinde olan değişimi inceleyebilmek için,

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial H}{\partial s} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial H}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial s} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial H}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial s} \quad (4.15)$$

türevini inceleyelim. Burada, $u_s = (u^2 + v^2)^{1/2}$ olmak üzere,

$$\frac{\partial x}{\partial s} = \frac{u}{u_s}, \quad \frac{\partial r}{\partial s} = \frac{v}{u_s} \quad (4.16)$$

şeklinde alınarak, (4.14.a) ve (4.14.b) ile birlikte (4.15) türevinde yerine yazılırsa,

$$\frac{\partial H}{\partial s} = \rho(v\omega_\phi - w\omega_r) \frac{u}{u_s} + \rho(w\omega_x - u\omega_\phi) \frac{v}{u_s} = -\rho \frac{w}{u_s} (u\omega_r - v\omega_x)$$

olarak bulunur. Dikkat edilecek olursa, parantez içindeki ifade (4.14.c) ifadesinin sağ tarafına eşit olup, sıfıra eşittir. Böylece

$$\frac{\partial H}{\partial s} = 0 \quad H = H(\psi)$$

olduğu görülür. Yani enerji miktarı bir akım yüzeyi boyunca sabittir ve sadece akım yüzeyine dik yönde değişmektedir. Rotor ekseninden r uzaklığındaki bir akım yüzeyi etrafındaki sirkülasyon için,

$$\Gamma(r) = 2\pi r w \quad (4.17)$$

yazılabilir. Sirkülasyonun da sabit bir akım yüzeyi boyunca sabit olduğu gösterilebilir. Bu amaçla, benzer türev işlemi yapılırsa,

$$\frac{1}{2\pi} \frac{\partial \Gamma}{\partial s} = \frac{\partial(wr)}{\partial s} = \frac{\partial(wr)}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial s} + \frac{\partial(wr)}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial s}$$

yazılabilir. (4.12.a), (4.12.b) eşitlikleri ile birlikte (4.16) bağıntıları kullanılarak,

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial s} = - \frac{r}{u_s} (u\omega_r - v\omega_x)$$

bulunur. Yine parantez içindeki ifade (4.14.c) ifadesinin sağ tarafı olup, sıfıra eşittir. Böylece rotor önünde ve iz bölgesinin dışında $\Gamma(r) = 0$, iz bölgesi içinde ise $\Gamma = \Gamma(\psi)$ yazılabilir. Yani sirkülasyon da iz bölgesi içinde bir akım yüzeyi boyunca sabittir ve ancak akım yüzeyine dik yönde değişir.

Bernoulli sabitinin akım yüzeyine dik yöndeki değişimini incelemek için $w_s = (w_r^2 + w_x^2)^{1/2}$ olmak üzere, (4.12.a) ve (4.14.b) denklemlerinden de faydalanarak H 'nın normal yöndeki türevi,

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial H}{\partial n} = w\omega_s - u_s\omega_\phi = \frac{w}{r} \frac{\partial(wr)}{\partial n} - u_s\omega_\phi$$

şeklinde alınabilir. Akım fonksiyonunun normal yöndeki türevi için,

$$\frac{\partial \psi}{\partial n} = \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial n} + \frac{\partial \psi}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial n}$$

eşitliği ve (4.11) bağıntıları kullanılarak,

$$\frac{\partial x}{\partial n} = -\frac{v}{u_s}, \quad \frac{\partial r}{\partial n} = \frac{u}{u_s}$$

olmak üzere,

$$\frac{\partial \psi}{\partial n} = (-vr) \left(-\frac{v}{u_s} \right) + (ur) \left(\frac{u}{u_s} \right) = u_s r$$

ifadesi bulunur. Böylece H'nın değişimi yeniden düzenlenebilir:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial H}{\partial n} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial H}{\partial \psi} \frac{\partial \psi}{\partial n} = \frac{wr}{r^2} \frac{\partial(wr)}{\partial \psi} \frac{\partial \psi}{\partial n} - \frac{\omega_\phi}{r} \frac{\partial \psi}{\partial n}$$

Bu denklem, $\partial \psi / \partial n$ ile bölünüp, (4.17) bağıntısı kullanılarak,

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial H}{\partial \psi} = \frac{\Gamma}{(2\pi r)^2} \frac{\partial \Gamma}{\partial \psi} - \frac{\omega_\phi}{r} \quad (4.18)$$

şeklinde bulunmuş olur.

Sirkülasyon ile akım fonksiyonu arasında H'dan bağımsız bir bağıntı bulabilmek için, H ile Γ arasında bir başka ilişkiye daha ihtiyaç vardır. Bu ilişki türbini temsil eden hayali diske etkiyen dış kuvvetlerle ilgilidir. Bu amaçla diskin varlığından dolayı Bernoulli sabitinde meydana gelen değişimi bulmak için Bölüm 4.3'de dönen sistemler için yazılmış Bernoulli denklemi kullanılabilir. Bernoulli denklemi diskin önü ve arkasında yazılıp eşitlenir:

$$p_1 + 1/2 \rho(u_1^2 + v_1^2 + w_1^2) + \rho w_1 \Omega r = p_2 + 1/2 \rho(u_2^2 + v_2^2 + w_2^2) + \rho w_2 \Omega r$$

Bu eşitlik aynı zamanda,

$$H_1 + \rho w_1 \Omega r = H_2 + \rho w_2 \Omega r$$

şeklinde yazılabilir. H'daki değişim için de

$$\Delta H = H_2 - H_1 = \rho(w_1 - w_2)\Omega r$$

yazılıp, $\gamma_r = w_2 - w_1$ olduğu düşünülerek,

$$\Delta H = -\rho\gamma_r\Omega r$$

ve (4.10) bağıntısı da kullanılarak,

$$\Delta H = -\rho \frac{\Omega}{2\pi} \Gamma \quad (4.19)$$

şeklinde bulunur. Bu bağıntıdan yararlanarak,

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial H}{\partial \psi} = -\frac{\Omega}{2\pi} \frac{d\Gamma}{d\psi} \quad (4.20)$$

türevi hesaplanabilir. (4.20) ve (4.18) bağıntıları taraf tarafa eşitlenerek ve (4.12.c) bağıntısı da kullanılarak iz bölgesi için

$$\left(\frac{\Omega}{2\pi} + \frac{\Gamma}{(2\pi r)^2} \right) \frac{d\Gamma}{d\psi} + \frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) = 0 \quad (4.21)$$

denklemini bulunmuş olur.

Verilen sirkülasyon dağılımı, açısal hız ve uygun sınır koşulları yardımıyla eksenel simetrik akım halinde sonsuz sayıda palaya sahip bir rüzgar türbininin civarındaki akım, (4.13) ve (4.21) denklemleri kullanılarak çözülebilir. Problem nonlineer olduğundan çözüm çok karmaşıktır. Ancak bazı kabullerle denklemlerde bazı basitleştirmeler yapılabilir.

4.6. Silindirik İz Hali:

İzin yapısı ile ilgili olarak yapılan kabullerden en önemlisi indüklenmiş hızların

$$\frac{U - u}{U} \ll 1$$

ve

$$\frac{v}{U} \ll 1$$

şartlarını sağlaması halinde uygulanabilen silindirik iz kabulüdür. Bu kabul iz bölgesi için, rotorun yeterince gerisinde herhangi bir kısıtlama olmaksızın kullanılabilir.

Silindirik izin anlamı, r koordinatı üzerindeki v hızının sıfır olmasıdır. Bu durumda (4.11.b) bağıntısı silindirik iz için $\partial\psi/\partial x = 0$ şartını vermektedir. Bu şart (4.21) denkleminde kullanılarak,

$$\left(\frac{\Omega}{2\pi} + \frac{\Gamma}{(2\pi r)^2} \right) \frac{d\Gamma}{dr} \frac{dr}{d\psi} + \frac{1}{r} \left[\frac{d}{dr} \left(\frac{1}{r} \frac{d\psi}{dr} \right) \right] = 0$$

yazılabilir. Ya da $w = \Gamma/(2\pi r)$ ile (4.11.a) eşitliği kullanılarak,

$$\Omega \frac{d(wr)}{dr} + \frac{w^2}{r} + w \frac{dw}{dr} + u \frac{du}{dr} = 0$$

şeklinde değiştirilebilir. Bu ifade r boyunca integre edilerek,

$$P(r) = \int_0^r \rho \frac{w^2}{r} dr$$

şeklinde gösterilmek üzere,

$$\rho \Omega w r + \frac{1}{2} \rho (u^2 + w^2) + P(r) = \text{sabit} \quad (4.22)$$

bulunur. (4.19) bağıntısı hatırlanarak (4.22) eşitliğinin sol tarafındaki ilk terimin, toplam basınçtaki değişime özdeş olan $-\Delta H$ terimi olarak yorumlanması mümkündür. Serbest akımın toplam basıncı H_0 olmak üzere, iz bölgesi içinde Bernoulli denklemi,

$$H(r) = H_0 + \Delta H = p_0 + 1/2 \rho U^2 + \Delta H = p + 1/2 \rho(u^2 + w^2)$$

şeklinde yazılabilir. Bu eşitliklerden ΔH çekilirse,

$$\Delta H = p + 1/2 \rho(u^2 + w^2) - H_0 \quad (4.23)$$

bulunur. (4.23) bağıntısı da (4.22)'de yerine konarak,

$$p = P(r) + \text{sabit}$$

olduğu görülür. Yani $P(r)$, bir sabit farkıyla iz bölgesi içindeki statik basınca eşittir. Ayrıca $r = R_0$ 'da $p = p_0$ sınır şartından $P(r)$,

$$P(r) = p - p_0 + P(R_0)$$

şeklinde çözülüp, (4.22) denkleminde yerine konarak,

$$-\Delta H + 1/2 \rho(u^2 + w^2) + P(r) - P(R_0) + p_0 = H_0 \quad (4.24)$$

şeklinde bulunur. Bu denklemde, ΔH ile $P(r) - P(R_0)$ w 'ya bağlı olduğundan ve H_0 'da sabit olduğundan iz bölgesi içinde u ile w arasında direk bir ilişki olduğu söylenebilir. Buna bağlı olarak, pala açıklığı boyunca sirkülasyon dağılımının rotor gerisinde yeterince uzaktaki akım bölgesinde aksenal hızı belirlediği de anlaşılmaktadır. Aşağıda pala boyunca sirkülasyonun değişik dağılımları halinde indüklenmiş hızların durumları ile ilgili olarak iki örnek verilmektedir:

1. Sirkülasyon pala boyunca sabittir. Bu halde akım parametreleri aşağıdaki gibi bulunabilir:

$$wr = k, \quad w = k/r, \quad w_0 = k/R_0 = \text{sabit}$$

$$\Delta H = -\rho\Omega wr = -\rho\Omega k = \text{sabit}$$

$$P(r) = \int_0^r \rho \frac{w^2}{r} dr = \int_0^r \rho \frac{k^2}{r^3} dr = -\frac{\rho}{2} \frac{k^2}{r^2} = -\rho \frac{w^2}{2}$$

$$P(r) - P(R_0) = 1/2 \rho (w_0^2 - w^2)$$

Yukarıda bulunan ifadeler (4.24) denkleminde yerine konarak ve

$$p_0 = H_0 - 1/2 \rho U^2$$

olduğu hatırlanarak,

$$\frac{1}{2} \rho u^2 = \frac{1}{2} \rho U^2 - \rho\Omega k - \frac{1}{2} \rho w_0^2 = \text{sabit}$$

olduğu bulunur. Dikkat edilmelidir ki, $P(r) - P(R_0)$ farkı izin dönmesinden dolayı statik basınçta olan değişimlere eşittir.

2. Sirkülasyon $r = R_0$ 'da maksimum olmak üzere pala açıklığı boyunca lineer olarak artmaktadır. Bu durumda ise akım parametreleri aşağıdaki gibidir:

$$w = w_0 = \text{sabit}$$

$$\Delta H = -\rho\Omega w_0 r$$

$$P(r) = \int_0^r \rho \frac{w_0^2}{r} dr = \rho w_0^2 \ln r$$

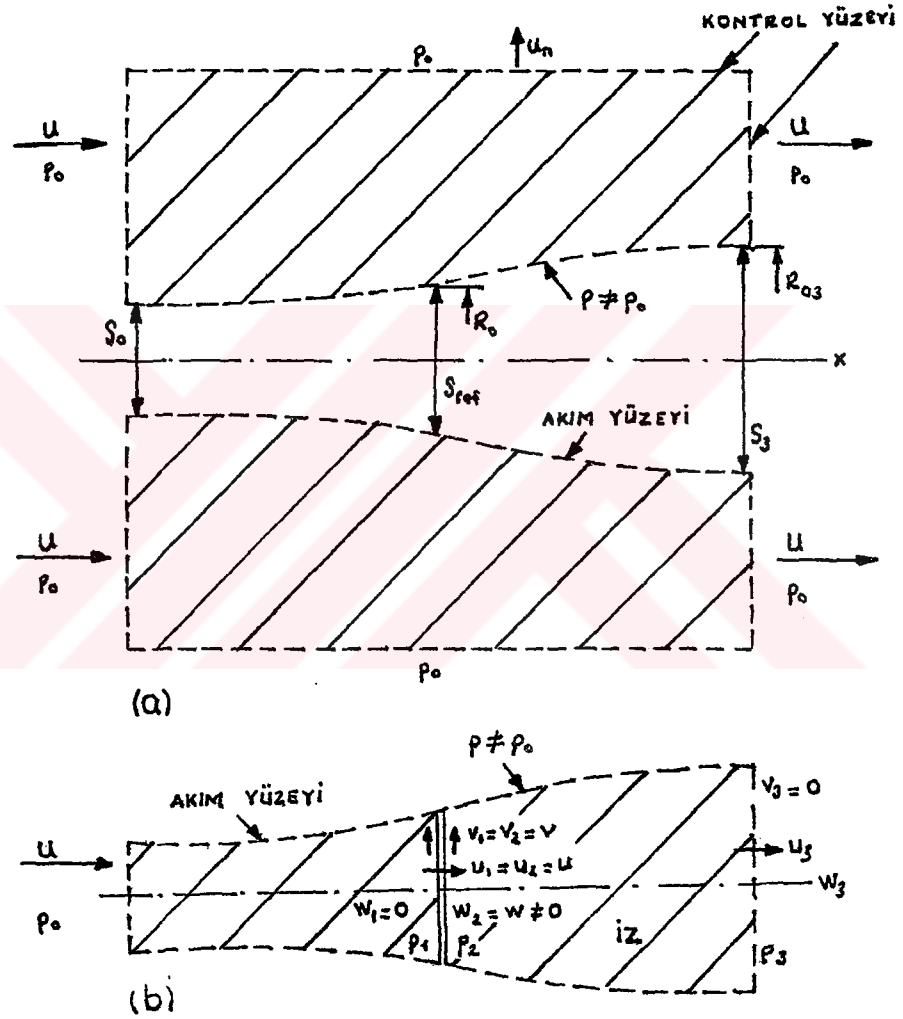
$$P(r) - P(R_0) = 1/2 \rho w_0^2 \ln(r/R_0)^2$$

Bu ifadeler (4.24) denkleminde kullanılarak,

$$\frac{1}{2} \rho u^2 = \frac{1}{2} \rho U^2 - \rho\Omega w_0 r - \frac{1}{2} \rho w_0^2 (1 + \ln(r/R_0)^2)$$

4.7. Momentum Dengesi:

4.7.1. Temel Denklemlerin Elde Edilmesi:



Şekil 4.4: Momentum dengesi için rotor çevresindeki akıma ait kontrol hacimleri.

- a) Akımtüpü dışındaki kontrol hacmi.
- b) Akımtüpünün oluşturduğu kontrol hacmi.

İndüklenmiş hızların (4.13) ve (4.21) denklemleri ile ya da bu denklemlerin silindirik hal için basitleştirilmiş şekilleri ile tam olarak hesabı çok karmaşıktır. Bu nedenle konuya başka bir açıdan yaklaşmak maksadıyla rüzgar türbini etrafındaki akışkanın momentum dengesini ele almakta yarar vardır. Burada yapılan işlem, Bölüm 3’de yapılan işlemden temelde farklı değildir. Ancak burada radyal ve teğetsel yöndeki akım bileşenleri de hesaba katılmaktadır.

Şekil 4.4, hayali bir diskle temsil edilen türbine ait kontrol hacmini göstermektedir. Kontrol yüzeyleri türbinden radyal hız bileşenlerinin ihmal edilebileceği ve basıncın p_0 ’a eşit olduğu belli bir uzaklığa yerleştirilmiştir. Bu kontrol hacmi iki ayrı akış alanına bölünmüştür. Bunlar, Şekil 4.4.b’de görülen ve rotoru geçen akışkanı içine alan akım tüpü ile Şekil 4.4.a’da görülen akımtüpü dışında kalan akım alanıdır.

S_x akım yüzeyinin alanının x eksenine dik doğrultudaki izdüşümü, S_c kontrol yüzeyi, u_n kontrol yüzeyine dik doğrultudaki hız bileşeni olmak üzere, dış akımın kontrol hacmine eksenel doğrultuda momentum denklemi uygulanırsa,

$$p_0 (S_3 - S_0) - \underbrace{\iint (p - p_0) dS_x}_{\text{akım yüzeyi}} = \rho U \underbrace{\iint u_n dS_c}_{\text{kontrol yüzeyi}}$$

yazılabilir. Burada sol taraftaki ilk terim kontrol hacminin 1 ve 3 yüzeylerine etkiyen net kuvveti, ikinci integral terimi akım yüzeyine basınç farkından dolayı etkiyen kuvveti, sağ taraftaki terim ise akışkana etkiyen atalet kuvvetini verir. Akım alanı içinde herhangi bir akışkan kaynağı bulunmadığına göre kontrol hacmine giren ve çıkan akışkan kütlesi birbirine eşit olmalıdır. Bu

nedenle

$$\iint_{\text{kontrol yuzeyi}} u_n dS_c = 0$$

yazılabilir. Bu sayede de

$$I_P = \iint_{\text{akim yuzeyi}} (p - p_0) dS_x = p_0 (S_3 - S_0) \quad (4.25)$$

eşitliği bulunur. Bu eşitlik akım yüzeyi boyunca basınç integralinin aksenal bileşeninin (I_P) sadece akım tüpünün genişleme oranı ($S_3 - S_0$) ile ilgili olduğunu gösterir.

Şekil 4.4.b'de görülen akım tüpüne süreklilik denklemi uygulanarak,

$$u dS_{ref} = u_3 dS_3 \quad (4.26)$$

eşitliğini yazmak mümkündür. Rotora aksenal doğrultuda etkiyen kuvvet D ile gösterilmek üzere ve süreklilik denklemi de kullanılarak aksenal doğrultudaki momentum denklemini bu kez de aynı akım tüpüne uygulayalım:

$$D = \iint_{S_{ref}} (p_1 - p_2) dS_{ref} = I_P + p_0 S_0 - \iint_{S_3} p_3 dS_3 + \rho \iint_{S_{ref}} u(U - u_3) dS_{ref}$$

Bu ifadede sağ taraftaki ilk terim yine akım yüzeyine etkiyen aksenal kuvvet, ikinci ve üçüncü terim giriş ve çıkış kesitlerine etkiyen kuvvetler, son terim ise akım tüpünü geçen akışkana etkiyen atalet kuvvetidir. Bu denklemde (4.25) eşitliği yerine yazılarak,

$$D = \iint_{S_{ref}} (p_1 - p_2) dS_{ref} = \rho \iint_{S_{ref}} u(U - u_3) dS_{ref} - \iint_{S_3} (p_3 - p_0) dS_3 \quad (4.27)$$

bulunur.

Akışkanın rotora etkittiği moment Q ile gösterilmek üzere bu kez de, açısal momentum denklemini akım tüpüne uygulayalım:

$$Q = \rho \iint_{S_3} u_3 w_3 r_3 dS_3 \quad (4.28)$$

Böylelikle rotoru geçen akışkanın momentumundaki değişime ait iki temel momentum denklemi integral halde elde edilmiş olur.

4.7.2. Denklemlerin Rotor Düzlemine Taşınması:

(4.27) ve (4.28) denklemlerini kullanabilmek için, rotorun hemen gerisindeki basınç ve hızlarla, yeterince gerisindeki basınç ve hızlar arasında bir ilişki kurmak mümkündür. Bu amaçla kullanılan eşitliklerden biri (4.26) numaralı süreklilik denklemdir. Bir diğeri de, sirkülasyon Bölüm 4.5’de bulunduğu üzere bir akım yüzeyi boyunca sabit olduğundan

$$wr = w_3 r_3 \quad (4.29)$$

şeklinde yazılabilir.

Enerjinin akımdan sadece diskte çekildiği kabul edilerek, Bernoulli denklemi rotorun önü ve arkasında ayrı ayrı uygulanırsa,

$$H_0 = H_1 = p_0 + 1/2 \rho U^2 = p_1 + 1/2 \rho (u^2 + v^2) \quad (4.30.a)$$

$$H_2 = H_3 = p_2 + 1/2 \rho (u^2 + v^2 + w^2) = p_3 + 1/2 \rho (u_3^2 + w_3^2) \quad (4.30.b)$$

ya da diskin hemen önünde ve hemen arkasında u ve v hızları eşit olduğundan,

$$p_3 - p_0 = -(p_1 - p_2) + 1/2 \rho (U^2 - u_3^2) + 1/2 \rho (w^2 + w_3^2) \quad (4.30.c)$$

bağıntısı kurulabilir.

Diğer taraftan, Bölüm 4.3'de türbin palasına bağlı eksen takımında yazılan (4.9) denklemi

$$p_1 + 1/2 \rho(u^2 + v^2) = p_2 + 1/2 \rho(u^2 + v^2 + w^2) + \rho w \Omega r \quad (4.31)$$

şeklinde kullanılarak,

$$p_1 - p_2 = 1/2 \rho w^2 + \rho w \Omega r \quad (4.32)$$

elde edilir ve bu ifade (4.30.c) eşitliğinde kullanılırsa,

$$p_3 - p_0 = 1/2 \rho(U^2 - u_3^2) - \rho w \Omega r - 1/2 \rho w_3^2 \quad (4.33)$$

bulunur. $r_3 = R_{03}$ 'de $p_3 = p_0$ olduğundan bu bağıntıyı

$$1/2 \rho(U^2 - u_{03}^2) = \rho \Omega w_{03} R_{03} + 1/2 \rho w_{03}^2$$

şeklinde yazmak mümkündür.

Rotorun yeterince gerisinde akım yüzeyi silindirik hale geldiğinden radyal hız bileşeni sıfır olur. Bölüm 4.5'den hatırlanacağı gibi, iz bölgesinde basınç farklılıklarına teğetsel hız bileşenleri ile ilgili olan merkezkaç kuvvetleri neden olur. Bu yüzden $(p_3 - p_0)$ için,

$$p_3 - p_0 = P(r_3) - P(R_{03}) = -\rho \int_{r_3}^{R_{03}} \frac{w_3^2}{r_3} dr_3 \quad (4.34)$$

integrali de yazılabilir.

D kuvveti için yazılmış (4.27) denkleminde $(p_1 - p_2)$ için (4.32) bağıntısı, $(p_3 - p_0)$ için (4.33) bağıntısı ile birlikte (4.26) ve (4.29) eşitlikleri de

kullanılırsa,

$$\frac{1}{2} \rho \iint_{S_3} (U - u_3)^2 dS_3 = \rho \Omega \iint_{S_3} u_3 w_3 r_3 \left[\frac{1 + \frac{w_3}{2\Omega r_3}}{u_3} - \frac{1 + \frac{w}{2\Omega r}}{u} \right] dS_3 \quad (4.35)$$

bulunur. Ayrıca (4.30.a), (4.30.b) ve (4.32) bağıntıları kullanılarak H 'da disk boyunca olan azalma,

$$H_0 - H_2 = (p_1 - p_2) - 1/2 \rho w^2 = \rho w \Omega r$$

şeklinde yazılabilir.

Yukarıdaki bağıntılar, rotorun yeterince gerisindeki iz bölgesinde kabul edilen bir sirkülasyon dağılımı için, türbin gerisindeki akım alanı ile türbin momentini bu sayede de türbinin güç katsayısını hesaplamayı mümkün kılmaktadır. Ancak bu hesaplama değişik sirkülasyon dağılımları için hala zordur. Bu amaçla özel bir durum ele alalım:

$\Gamma = \text{sabit}$ olsun. Yani $wr = \text{sabit}$ ya da $w = k/r$ alınsın. Bu durumda (4.34) integrali çözülür, (4.33) denkleminin sağ tarafına eşitlenirse,

$$1/2 \rho (U^2 - u_3^2) = \rho \Omega k + 1/2 \rho w_{03}^2$$

yazılabilir. Bu ifade, Bölüm 4.6'da da bulunduğu gibi iz bölgesinde sabit bir sirkülasyon dağılımı için u_3 hızının sabit olduğunu gösterir ve şu şekilde de yazılabilir:

$$\Omega k = 1/2 (U^2 - u_3^2) - 1/2 w_{03}^2 \quad (4.36)$$

Eksenel simetriden dolayı, $w_\phi = 0$ olduğundan (4.12.c) bağıntısı,

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial r}$$

sonucunu verir. u ve v hızları hayali diski geçerken sabit değerlere sahip olduklarından, burada $\partial v / \partial x = 0$ yazılabilir. O halde, yukarıdaki eşitlikten $\partial u / \partial r = 0$ olduğu yani disk üzerinde radyal doğrultuda $u = \text{sabit}$ olduğu söylenebilir.

Rotoru temsil eden disk ile yeterince gerideki bir düzlem arasında süreklilik denklemi yeniden,

$$ur \, dr = u_3 r_3 \, dr_3$$

şeklinde yazılabilir. u ve u_3 'ün sabit olduğu düşünülerek integral alınırsa,

$$ur^2 = u_3 r_3^2$$

olduğunu yazmak mümkündür. Bu eşitlik için (4.35) integrali çözülürse,

$$(U - u_3)^2 = 2\Omega k \left(1 - \frac{u_3}{U}\right) \quad (4.37)$$

ifadesi bulunur. (4.36) ve (4.37) bağıntıları arasından Ωk elimine edilerek,

$$u = \frac{1}{2} (U + u_3) \left(\frac{1 - \frac{w_{03}^2}{U^2 - u_3^2}}{1 - \frac{w_{03}^2}{2u_3(U - u_3)}} \right) = \frac{1}{2} (U + u_3) (1 + A) \quad (4.38)$$

bulunur. Burada $A > 0$ olup, $w_{03} = 0$ için izin dönmesinden kaynaklanan basınç düşmesinin rotorda hızın beklendiği kadar azalmaya yol açmadığını göstermektedir. Yani,

$$u > \frac{U + u_3}{2}$$

olmaktadır.

Moment ise, (4.26) eşitliği yardımıyla (4.28) integralinden,

$$Q = \rho \iint u_3 w_3 r_3 \, dS_3 = \rho \iint u k \, dS_{ref} = \rho u k S_{ref}$$

şeklinde bulunabilir.

Türbinin güç katsayısı için de,

$$C_P = \frac{\Omega Q}{1/2 \rho U^3 S_{ref}} = 2 \left(\frac{\Omega k}{U^2} \right) \left(\frac{u}{U} \right)$$

yazılabilir. Son ifadede (4.36) ve (4.38) denklemleri kullanılarak,

$$C_P = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{u_3}{U} \right) (1 + A) \left[1 - \left(\frac{u_3}{U} \right)^2 - \left(\frac{w_{03}}{U} \right)^2 \right] \quad (4.39)$$

bulunur. Bu sonuç, Bölüm 4.6'de bulunan güç katsayısı bağıntısı ile karşılaştırıldığında, $A > 0$ olduğundan, daha önce izin dönmesinden dolayı C_P 'de olan azalmanın statik basınç kaybı nedeniyle beklendiği kadar fazla olmadığı görülür.

4.7.3. Denklemlerin Boyutsuz Katsayılar Cinsinden Yazılması:

Bir önceki bölümde bulunan bağıntıların bazı boyutsuz katsayılar cinsinden yazılmasında yarar vardır. Bu amaçla

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{\Omega R_0}{U} \\ q &= \frac{k}{U R_0} \\ \mu &= \frac{u}{u_3} = \left(\frac{R_{03}}{R_0} \right)^2 \\ t &= \frac{u_3}{U} \end{aligned}$$

şeklinde tanımlanan boyutsuz katsayılar (4.36), (4.37) ve (4.39) denklemlerinde kullanılarak,

$$2\lambda q = (1 - t^2) - \frac{q^2}{\mu} \quad (4.40.a)$$

$$(1-t)^2 = 2\lambda q \left(1 - \frac{1}{\mu}\right) \quad (4.40.b)$$

$$C_P = 2\lambda q \mu t = \left(\frac{\mu^2}{\mu-1}\right) t (1-t)^2 \quad (4.40.c)$$

bağıntıları bulunur. (4.40.a) ve (4.40.b) bağıntılarından q elimine edilerek μ çekilirse,

$$\mu = \frac{1}{4t} \left\{ 1 + 3t + \frac{(1-t)^3}{4\lambda^2} + \left[\left(1 + 3t + \frac{(1-t)^3}{4\lambda^2} \right)^2 - 8t(1+t) \right]^{1/2} \right\} \quad (4.41)$$

denklemini bulunur. Burada $\mu \neq 1$ için, $\lambda \rightarrow \infty$ için, $\mu \rightarrow (1+t)/2t$ olmaktadır.

Bu sonuç, (4.40.c)'de yerine konarak güç katsayısı,

$$C_{P_{\lambda \rightarrow \infty}} = \frac{1}{2} (1-t)(1+t)^2 = 4 \left(1 - \frac{u}{U}\right) \left(\frac{u}{U}\right)^2 = 4a(1-a)^2$$

şeklinde bulunur. Bu sonuç, Betz tarafından bulunan ideal güç katsayısına eşittir.

$\lambda \rightarrow 0$ için ise, (4.41) denklemi $\mu \rightarrow \infty$ sonucunu verir. Bu halde (4.40.b) denklemi $2\lambda q \rightarrow (1-t)^2$, (4.40.a) denklemi de $q \rightarrow \infty$ sonucunu verir. Bu ise, sonsuz sirkülasyon anlamına gelip, fiziksel olarak mümkün değildir. $\lambda \rightarrow 0$ için q 'nin sonlu olabilmesi durumu (4.40.b) denkleminde incelenirse, λ 'nin $(1-t)^2$ ifadesi ile aynı mertebede olması gerektiği görülür. Buradan, $t \rightarrow (1-\lambda^{1/2})$ olarak yazılabilir. Bu durumda (4.41) denklemi $\mu \rightarrow 2+1/(8\lambda^{1/2})$ ve (4.40.b) denklemi de $q \rightarrow 1/2$ sonuçlarını verirler. Bu sonuçlar (4.40.c) denkleminde kullanılarak, güç katsayısı,

$$C_{P_{\lambda \rightarrow 0}} \rightarrow 0$$

şeklinde bulunur.

4.7.4. Basitleştirilmiş Teoriler:

Genelde, kullanılan teorilerde aşağıdaki kabuller yapılır:

1. $(p_3 - p_0) = 0$
2. $u = (U + u_3)/2 \quad u_3 = 2u - U$
3. $u \, dS_{ref} = u_3 \, dS_3$
4. İz genişlemesi yoktur. Rotor üzerinde $w_{rotor} = 1/2w$ ve rotorun önünde $w = 0$ 'dır.
5. Momentum denklemleri diferansiyel formda kullanılır.

Yukarıdaki kabullerden (4.1) ve (4.2) ile birlikte (4.32) denkleminin yardımıyla, (4.27) denklemi diferansiyel formda,

$$2u(U - u) \, dr = \Omega w r \, dr + 1/2 \, w^2 \, dr \quad (4.42.a)$$

ve (4.27) denklemi ise,

$$dQ = 2\pi \rho u w r^2 \, dr \quad (4.42.b)$$

şeklinde yazılabilir. İlk denklemden görülmektedir ki, pala boyunca u ve wr 'nin her ikisini birden sabit tutmak mümkün değildir. Yukarıda yapılan kabullerin sonuçlarını görebilmek için $u = \text{sabit}$ alalım:

$$X = \frac{\Omega r}{U} = \lambda \frac{r}{R_0}$$

Şeklinde tanımlanmak üzere (4.42) denklemleri,

$$2 \left(\frac{u}{U} \right) \left(1 - \frac{u}{U} \right) = \lambda q + \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda}{X} \right)^2 q^2 \quad (4.43.a)$$

$$dQ = \frac{2\pi\rho U^2 R_0^3}{\lambda^2} \frac{u}{U} q X dX \quad (4.43.b)$$

şeklinde yazılabilir.

Rotorun sürüklenme katsayısı,

$$C_D = \frac{D}{1/2 \rho U^2 \pi R_0^2}$$

şeklinde tanımlanmak üzere, (1) ve (2) kabulü ile birlikte (4.27) integrali kullanılarak,

$$C_D = 4 \left(\frac{u}{U} \right) \left(1 - \frac{u}{U} \right) \quad (4.44)$$

şeklinde yeniden yazılabilir. (4.44) ile (4.43.a) denklemlerinden $(u/U)(1-u/U)$ ifadesi yok edilerek,

$$q = \frac{X^2}{\lambda} \left[\left(1 + \frac{C_D}{X^2} \right)^{1/2} - 1 \right]$$

yazılabilir. Bu eşitlik de güç katsayısının hesabında kullanılarak,

$$C_P = \frac{4}{\lambda^2} \frac{u}{U} \int_0^\lambda X^3 \left[\left(1 + \frac{C_D}{X^2} \right)^{1/2} - 1 \right] dX \quad (4.45)$$

bulunur. λ ve X 'in yüksek değerleri için köşeli parantez içindeki ifade yerine,

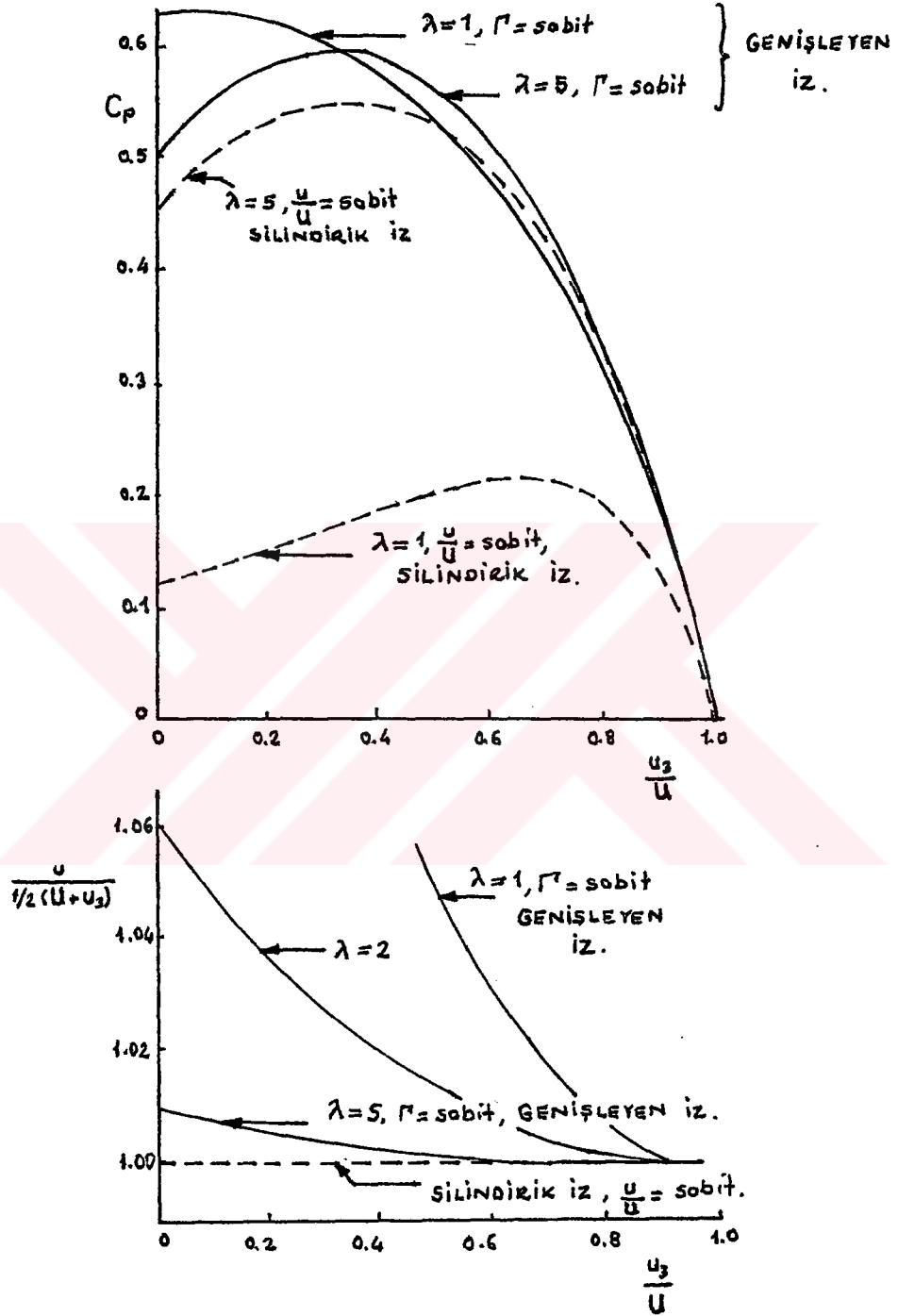
$$\left(1 + \frac{C_D}{X^2} \right)^{1/2} - 1 \simeq 1 + \frac{1}{2} \frac{C_D}{X^2} - 1 \simeq \frac{1}{2} \frac{C_D}{X^2}$$

ifadesi kullanılabilir ve böylece,

$$C_P = \frac{2}{\lambda^2} C_D \frac{u}{U} \int_0^\lambda X dX = \frac{u}{U} C_D = 4 \left(\frac{u}{U} \right)^2 \left(1 - \frac{u}{U} \right)$$

şeklinde bilinen Betz ifadesine ulaşılmış olur. (4.45) integrali çözüldüğünde ise,

$$C_P = \frac{1}{\lambda} \frac{u}{U} \left(\lambda^2 + \frac{1}{2} C_D \right) (\lambda^2 + C_D)^{1/2} - \lambda^3 - \frac{C_D}{\lambda} \ln \left\{ \frac{\lambda + (\lambda^2 + C_D)^{1/2}}{C_D^{1/2}} \right\} \quad (4.46)$$

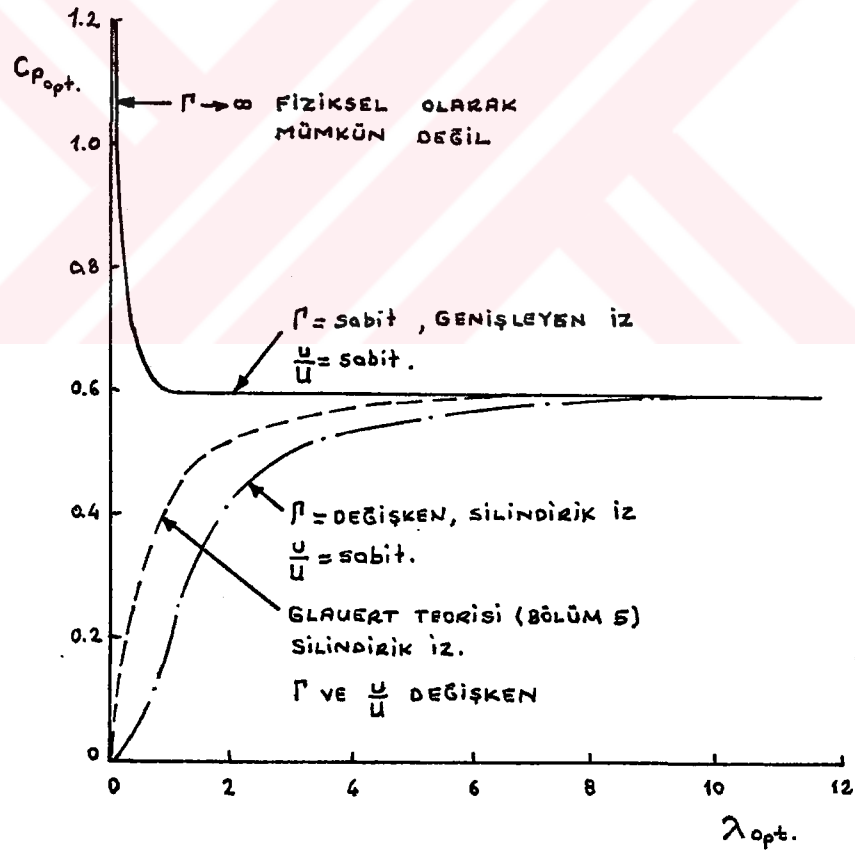


Şekil 4.5: İz genişlemesinin etkisi.

- $\Gamma = \text{sabit}$ için genişleyen iz (4.40.c ve 4.41 denklemleri).
- $u/U = \text{sabit}$ için silindirik iz (4.46 denklemi)

sonucu bulunur.

(4.40.c), (4.41) ve (4.46) bağıntıları ele alınarak rotor gerisinde iz genişlemesini ve basınç kaybını ihmal etmenin etkisini incelemek mümkündür. Aslında bu iki durumu kıyaslamak pek doğru değildir. Çünkü, genişleyen iz halinde hem Γ hem de u pala boyunca sabittir. Oysa, silindirik iz halinde sadece u sabittir.



Şekil 4.6: İzin genişlemesi ya da genişlememesi durumlarında optimum güç katsayısının λ ile değişimi.

(4.40.c, 4.41 ve 4.46 denklemleri)

Şekil 4.5.a'da genişleyen iz halinde u eksenel hızının, silindirik haldeki $1/2(U + u_3)$ hızına oranının değişimi görülmektedir. Görüldüğü gibi λ' 'nın genelde kullanılan değerleri için farklılık azdır.

Şekil 4.5.b ise, iz genişlemesi hesabının C_P üzerine etkisini göstermektedir. λ' 'nın her değeri için C_P 'yi maksimum yapan bir u_3/U değeri vardır. Şekil 4.6'de ise bu optimum değerlerin yapılan kabullere göre durumları görülmektedir. İz genişlemesi etkisi ve basınç kaybı dikkate alındığında optimum güç katsayısı, λ' 'nın, sirkülasyonun pala boyunca sabit tutulduğu basit teoremin geçerli olmadığı düşük değerlerine kadar Betz limitine eşittir. Şekil 4.6'da aynı zamanda Glauert teorisi sonucu C_{opt} 'un aldığı değerler de görülmektedir.

İzdeki statik basınç kaybının ve iz genişlemesinin dengeleyici etkileri göz önüne alınarak, iz dönmesinin rotorun güç katsayısı üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir olduğu, enerji denklemi kullanılmak suretiyle gösterilebilir. Rotor eksenel kuvvet D ile moment Q 'nun ortak etkileri sayesinde

$$dP = \Omega dQ = u dD - \frac{1}{2} \frac{w}{r} dQ \quad (4.47)$$

şeklinde bir güç etkisi. Bu eşitlik, türbinin absorbe ettiği gücün (ΩdQ), eksenel kuvvet ($u dD$) ve moment ($1/2 w/r dQ$) vasıtasıyla, havanın rotor üzerine yaptığı işe eşit olması gerektiğini gösterir. Burada hatırlanması gereken nokta eksenel hız u 'nun dD ile aynı yönde, açısal hız $1/2 w/r$ 'nin ise dQ 'ya zıt yönde olduğudur. (4.27) denklemine göre, sürüklenme kuvveti bir momentum ve izdeki statik basınç kaybını temsil eden bir basınç teriminden oluşmaktadır. Bu nedenle (4.27) denklemi diferansiyel formda,

$$dD = \rho u (U - u_3) dS_{ref} + \Delta p_3 dS_3$$

ve (4.28) denklemi diferansiyel formda,

$$dQ = \rho u_3 w_3 r_3 dS_3 = \rho u w r dS_{ref}$$

şeklinde yazılabilir. Ayrıca,

$$\Delta p_3 dS_3 \simeq 1/2 \rho w_3^2 dS_3 \simeq 1/2 \rho w^2 dS_{ref}$$

şeklinde alınarak yukarıdaki denklemlerle birlikte (4.47) denkleminde kullanılarak

$$dP = \rho u^2 (U - u_3) dS_{ref}$$

şeklinde bulunur. Bu ifade, iz genişlemesi ihmal edildiğinde bulunan Betz ifadesine özdeştir. Böylelikle iz içinde basınç kaybının etkisinin izin dönmesinden kaynaklanan etkiyi sönümlediği görülür.

4.8. Sonuç:

Yapılan çalışmalar göstermiştir ki, eksenel simetrik bir akım ve silindirik bir iz için bile indüklenmiş hızların hesabı çok karmaşıktır. Momentum denklemlerinin bazı basitleştirmelerle kullanılması sayesinde, indüklenmiş hızların durumu hakkında bilgi edinmek mümkün olabilmektedir.

İz bölgesindeki akım girdaplı bir yapıya sahiptir. Girdabı yaratan sirkülasyon ile palalara etkiyen aerodinamik kuvvetler arasında bir ilişki vardır. Girdap sistemi, biri rotoru temsil eden disk üzerinde radyal doğrultuda uzanan bağlı girdap, diğeri de pala uçlarından iz bölgesine doğru uzanan ve helisel yapıya sahip kaçma girdapları olmak üzere iki tür girdaptan oluşmaktadır.

Aynı akımçizgisi üzerinde olmak koşulu ile, rotor gerisindeki teğetsel hız w , rotor üzerindeki bağlı girdapla ilgilidir. Rotorun çok gerisindeki izde radyal hızlar sıfır olmalıdır ve teğetsel hızlardan kaynaklanan merkezkaç kuvvetleri de statik basınç kaybı ile dengelenir. Bu yolla, eksenel ve teğetsel hızlar arasında bir ilişki kurulur.

Rotorun çok gerisindeki akım parametrelerini, rotorun hemen gerisindeki akım parametrelerine dönüştürmek mümkündür. Çünkü, Bernoulli sabiti ve sirkülasyon iz içerisinde her akım yüzeyi üzerinde sabittir.

Rotoru geçen akımı içine alan akım tüpü için geçerli olan momentum denklemleri, genellikle elementer akım tüpü için de doğru olarak kabul edilirler. λ 'nın küçük değerleri dışında statik basınç kaybının eksenel hıza olan küçük etkisi gözönüne alındığında, bu kabulden doğan hatanın fazla olmadığı görülür.

Momentum denklemleri göstermektedir ki, izin dönmesinden kaynaklanan basınç kaybı, rotorda eksenel hızın beklendiği kadar azaltılamamasına neden olmaktadır. Ancak bu durum, statik basınç kaybından doğan güç kaybının da sanıldığından az olduğunu gösterir.

Rotorda eksenel hızın, rotorun yeterince önünde ve gerisindeki eksenel hızların aritmetik ortalaması olduğu kabulü, λ 'nın geniş bir aralığı için uygulanabilir. Ancak, düşük λ değerleri için bu kabul de eksenel hızların hesabında bir miktar hataya yol açacaktır.

Bu bölümden çıkan önemli sonuçlardan biri de, iz genişlemesinin ve statik basınç kaybının ortak etkisiyle, iz dönmesinden kaynaklanan güç kaybının sönümlenmesidir. Bu güç kaybı sadece λ 'nın düşük olduğu hallerde ve/veya lokal katılık oranının yüksek olduğu palanın göbeğe yakın kısımlarında önemli olur. O halde, bu bölümde yer verilen incelemelerde kullanılan taşıma çizgisi yaklaşımı ($c \ll R$) da katılık oranı arttıkça geçerliliğini yitirecek ve hatalara neden olacaktır. Bu yüzden, geçmişte hesaplama ve deney sonuçları karşılaştırıldığında, iz genişlemesi ve statik basınç kaybının güç kaybını sönümleyici etkisi bir süre anlaşılamamıştır.



BÖLÜM 5

PALA ELEMANI TEORİSİ

5.1. Giriş:

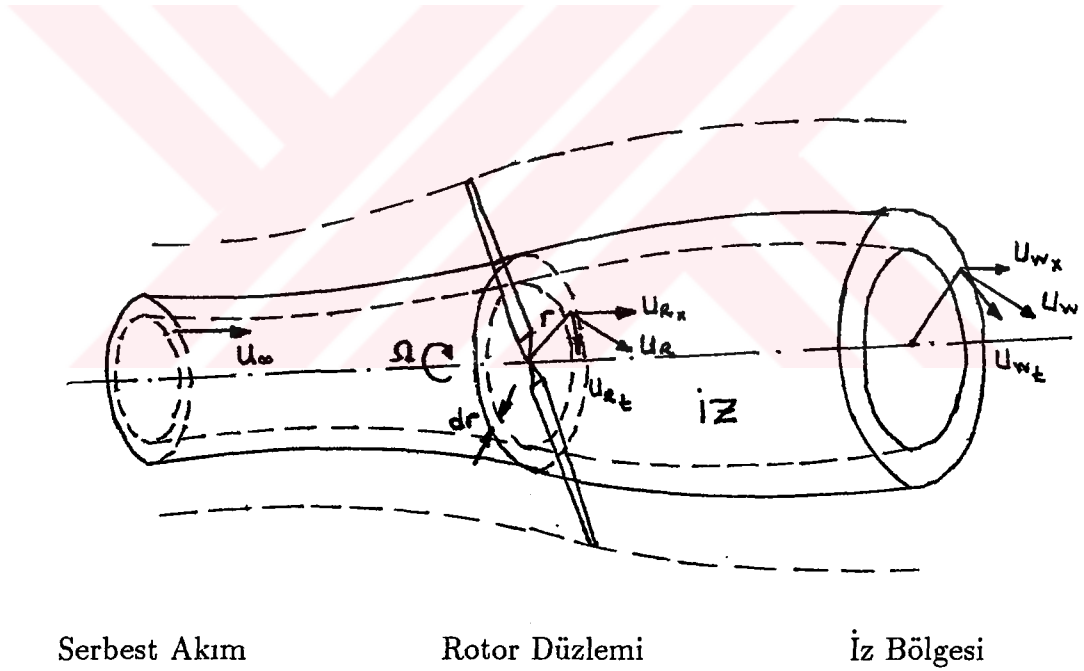
Betz'in basit teorisi Glauert tarafından rotor gerisindeki iz bölgesinin dönme etkisi hesaba katılarak bir miktar düzeltilmiştir. Bu teori, pala profilinin veter uzunluğunun pala açıklığı yanında ihmal edildiği temel kabulüne dayanmaktadır. Bunun yanında, daimi, homojen ve türbülanssız rüzgar akımı için kurulmuş olup, atmosferik sınır tabakanın etkisi ihmal edilmiştir. Ayrıca pala elemanı teorisine göre rotor gerisinde silindirik bir iz vardır. Bu teori, palaların davranışları ile ilgili bazı kabullere de dayanmaktadır. Bu kabullerden biri, palanın her bir elemanının kendisine komşu diğer elemanların davranışından bağımsız olmasıdır. Bir diğeri de, dizaynda kullanılacak profilin karakteristiklerinin her bir elemana adapte edilmesidir.

Optimum dizayn şartı olarak, rüzgardan maksimum miktarda güç çekilmesi esas alınmaktadır. Analiz, başlangıçta sonsuz sayıda palaya sahip bir rotor için yapılmakta, ardından sonlu pala etkisini hesaba katabilmek için

lineerleştirilmiş uç düzeltme teorisi kullanılmaktadır.

Hesaplama, pala geometrisini, bu palaya açıklığı boyunca etkiyen yüklemeyi ve bu pala geometrisine sahip rotor kullanılarak rüzgardan çekilebilecek gücü, uç hız oranının fonksiyonu olarak vermektedir.

5.2. Sonsuz Sayıda Palaya Sahip Rotor için Temel Denklemlerin Elde Edilmesi:



Şekil 5.1: Rotoru geçen akımı içine alan akım tüpü ve uç kesitte hız bileşenleri.

a eksenel indüklenme faktörü, a' teğetsel indüklenme faktörü olmak üzere, sonsuz sayıda palaya sahip bir rotor için rotoru geçen akışkanın eksenel ve

teğetsel hızları,

$$U_{R_x} = (1 - a) U_\infty$$

$$U_{R_t} = (1 + a') \Omega r$$

şeklindedir. Rotorun arkasındaki iz bölgesi içinde yeterince uzaktaki eksenel ve teğetsel hızlarsa,

$$U_{W_x} = (1 - 2a) U_\infty$$

$$U_{W_t} = 2a' \Omega r$$

şeklinde olmaktadır.

Rotor düzleminde r yarıçapında ve δr genişliğinde bir halka elemanı göz önüne alalım (Şekil 5.2). Bu halka elemanı üzerinden geçen akışkanın kütleli debisi

$$\delta \dot{m} = \rho U_{R_x} \cdot \delta S = \rho (1 - a) U_\infty (2\pi r \delta r) = 2\pi r \rho (1 - a) U_\infty \delta r$$

şeklindedir. Bilindiği gibi bu akışkan kütlesi rotor düzlemini geçerken eksenel ve açısal momentumunda değişimler olur. Bu değişimler ise sırasıyla akışkan kütlesine etkiyen eksenel kuvvete ve momente eşittir. Ayrıca momentin halka yarıçapına oranı akışkan kütlesine etkiyen teğetsel kuvvete eşittir. Akışkanın momentumundaki bu değişimler ortamda yer alan türbin rotorundan kaynaklandığına göre bu kuvvetler aynı zamanda halka elemanı boyunca rotora etkiyen eksenel ve teğetsel kuvvetlere de eşit olacaktır. Buna göre eksenel ve teğetsel kuvvetler için sırasıyla,

$$\delta N = \delta \dot{m} \Delta U_x$$

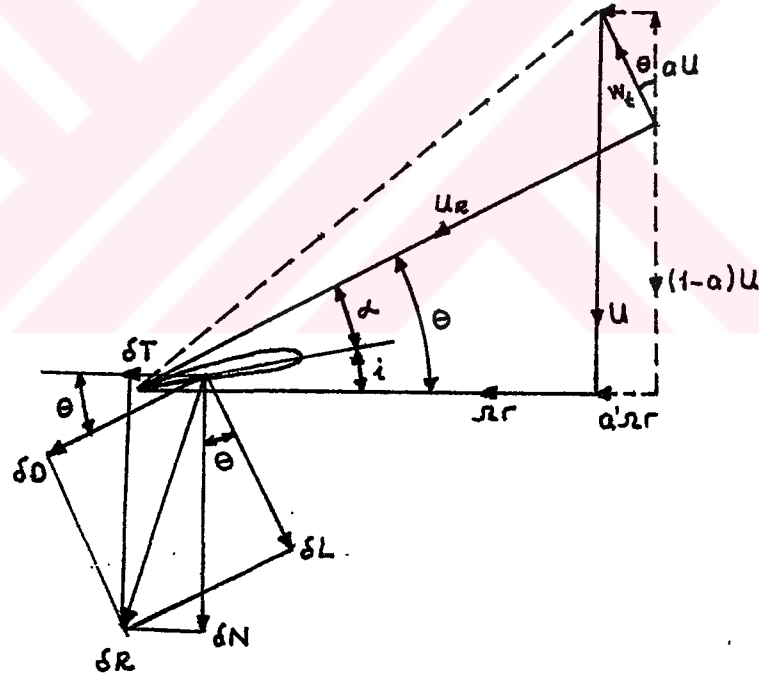
$$\delta T = \frac{\delta M}{r} = \frac{\delta \dot{m} \cdot r \cdot \Delta U_t}{r} = \delta \dot{m} \Delta U_t$$

yazmak mümkündür. Burada, ΔU_x ve ΔU_t rotor düzleminin yeterince önünde ve arkasındaki eksenel ve teğetsel hızlar arasındaki farkları göstermekte olup bunlar için serbest akım hızı U_∞ , rotorun açısal hızı Ω ve eksenel ve teğetsel indüklenme parametreleri a ve a' cinsinden

$$\Delta U_x = [U_\infty] - [(1 - 2a) U_\infty] = 2aU_\infty$$

$$\Delta U_t = [2a'\Omega r] - 0 = 2a'\Omega r$$

yazmak mümkündür.



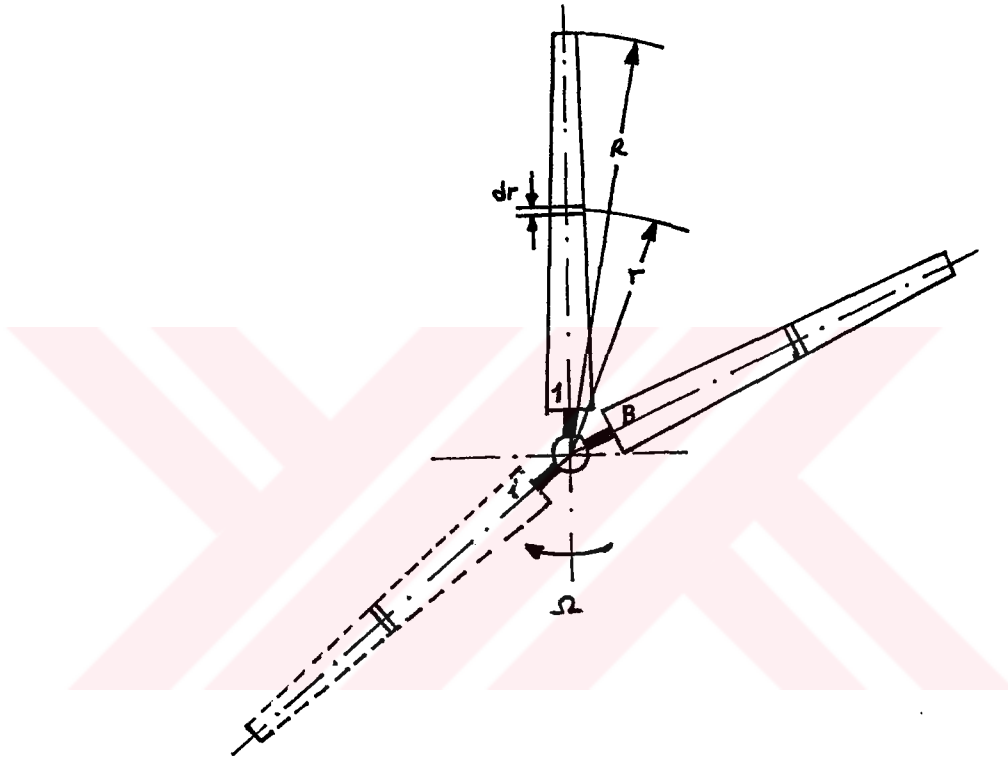
Şekil 5.2: Rüzgar türbini palasına etkiyen hız ve kuvvet bileşenleri.

Buna göre halka elemanının kalınlığı $\delta r \rightarrow dr$ olacak şekilde çok küçültüldüğü taktirde,

$$dN = 4\pi r \rho U_\infty^2 a(1 - a) dr \quad (5.1.a)$$

$$dT = 4\pi r^2 \rho U_{\infty} \Omega a' (1 - a) dr \quad (5.1.b)$$

elde edilir.



Şekil 5.3: Rüzgar türbini rotoru.

Diğer yandan rotor düzlemindeki r yarıçaplı halka içerisinde yer alan bir rotor elemanının ve buna etkiyen akımın geometrisi göz önüne alınırsa (Şekil 5.2), bu rotor elemanına etkiyen eksenel ve teğetsel kuvvetler dN ve dT , aynı elemana etkiyen taşıma ve sürüklenme kuvvetleri dL ve dD cinsinden,

$$dN = dL \cos \theta + dD \sin \theta$$

$$dT = dL \sin \theta - dD \cos \theta$$

şeklinde ifade edilebilir.

Şimdi türbin rotorunun B adet palası olduğu farzedilirse (Şekil 5.3), dr genişlikli halka elemanı içerisinde geçen akışkanın rotora etkittiği kuvvetin, bu halka içerisindeki B adet rotor palası üzerine etkiyen taşıma ve sürüklenme kuvvetleriyle ilgisi olduğu düşünülerek yukarıdaki bağıntı tüm halka için,

$$dN = B/2 \rho U_R^2 c (C_L \cos \theta + C_D \sin \theta) dr$$

$$dT = B/2 \rho U_R^2 c (C_L \sin \theta - C_D \cos \theta) dr$$

şeklinde yazılabilir. Veya rotor elemanlarının halka içerisinde kapladıkları alanın $(B \cdot c \cdot dr)$, halkanın toplam alanına $(2\pi r dr)$ oranı,

$$\sigma = \frac{B c}{2\pi r} \quad (5.2)$$

halkanın lokal katılık oranı olmak üzere ve Şekil 5.2'deki akım hızlarının geometrisinden,

$$U_R = \frac{(1-a)U_\infty}{\sin \theta} \quad (5.3)$$

yazılarak bu son bağıntılar,

$$dN = \pi r \rho \sigma C_L \frac{(1-a)^2 U_\infty^2 \cos \theta}{\sin^2 \theta} [1 + (C_D/C_L) \tan \theta] dr \quad (5.4.a)$$

$$dT = \pi r \rho \sigma C_L \frac{(1-a)^2 U_\infty^2 \sin \theta}{\sin^2 \theta} [1 - (C_D/C_L) \cot \theta] dr \quad (5.4.b)$$

şekline getirilebilir. (5.1) ve (5.4) bağıntıları karşılıklı olarak eşitlenerek,

$$\frac{a}{1-a} = \sigma C_L \frac{\cos \theta}{4 \sin^2 \theta} [1 + (C_D/C_L) \tan \theta] \quad (5.5.a)$$

$$\frac{a'}{1-a} r \Omega = \sigma C_L \frac{\sin \theta U_\infty}{4 \sin^2 \theta} [1 - (C_D/C_L) \cot \theta] \quad (5.5.b)$$

yazılabilir. Ayrıca Şekil 5.2'deki hızların geometrisinden,

$$\tan \theta = \frac{(1 - a) U_{\infty}}{(1 + a') r \Omega} \quad (5.5.c)$$

yazılarak, (5.5.b) bağıntısı yeniden düzenlenirse,

$$\frac{a'}{1 + a'} = \sigma C_L \frac{1}{4 \cos \theta} [1 - (C_D/C_L) \cot \theta] \quad (5.5.d)$$

elde edilir.

Çoğu rüzgar türbininde fines oldukça büyük olup (5.5.a) ve (5.5.d) bağıntılarındaki C_D/C_L oranı ihmal edilebilir. Bu durumda,

$$\frac{a}{1 - a} \simeq \frac{\sigma C_L \cos \theta}{4 \sin^2 \theta} \quad (5.6.a)$$

$$\frac{a'}{1 + a'} \simeq \frac{\sigma C_L}{4 \cos \theta} \quad (5.6.b)$$

yazılabilir.

Öte yandan pervaneler için uç hız oranı, pervane yarıçapı R olmak üzere

$$\lambda = \frac{\Omega R}{U_{\infty}} \quad (5.7)$$

şeklinde tanımlanır. r yarıçaplı halka içerisinde kalan rotor elemanı için de benzeri bir hız oranı

$$X = \lambda \frac{r}{R} = \frac{\Omega r}{U_{\infty}} \quad (5.8)$$

şeklinde tanımlanabilir. Bu tanım kullanılarak (5.5.c) bağıntısı

$$X \tan \theta = \frac{1 - a}{1 + a'} \quad (5.9)$$

şeklinde yeniden düzenlenebilir. a ve a' büyüklükleri sırası ile (5.6.a) ve (5.6.b) bağıntılarından çekilip (5.9) bağıntısında kullanılarak,

$$\sigma C_L = 4 \sin \theta \frac{\cos \theta - X \sin \theta}{\sin \theta + X \cos \theta} \quad (5.10)$$

elde edilir.

Türbinin güç katsayısı

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^3 \pi R^2}$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Diğer taraftan pala elemanı tarafından rüzgardan çekilen güç

$$dP = U_t \cdot dT = \Omega r dT$$

olup, dT 'nin değeri (5.4.b) bağıntısından alınarak,

$$C_P = 2 \int_{X_0}^{\lambda} \frac{r^2}{R^2} (\sigma C_L) \frac{(1-a)^2}{\sin \theta} [1 - (C_D/C_L) \cot \theta] d \left(\frac{\Omega r}{U_\infty} \right)$$

yazılır. σC_L için bulunan (5.10) bağıntısı (5.6.a)'da kullanılarak

$$(1-a) = \sin \theta (\sin \theta + X \cos \theta)$$

ve bu bağıntı, (5.10) bağıntısıyla birlikte C_P için bulunan bağıntıda yerleştirilerek

$$C_P = \frac{8}{\lambda^2} \int_{X_0}^{\lambda} \sin^2 \theta (\cos \theta - X \sin \theta)(\sin \theta + X \cos \theta) [1 - (C_D/C_L) \cot \theta] X^2 dX \quad (5.11)$$

ifadesi elde edilir.

Normal ve teğetsel kuvvetler de,

$$C_N = \frac{N}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 \pi R^2 B}$$

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 \pi R^2 B}$$

şeklinde boyutsuzlaştırılarak, kuvvet katsayıları (5.4) denklemlerinin yardımıyla,

$$C_N = \frac{1}{\lambda} \int_{X_0}^{\lambda} \frac{c}{R} \frac{C_L}{\pi} (\sin \theta + X \cos \theta)^2 \cos \theta [1 + (C_D/C_L) \tan \theta] dX$$

$$C_T = \frac{1}{\lambda} \int_{X_0}^{\lambda} \frac{c}{R} \frac{C_L}{\pi} (\sin \theta + X \cos \theta)^2 \sin \theta [1 - (C_D/C_L) \tan \theta] dX$$

biçiminde hesaplanabilir.

5.3. Lineerleştirilmiş Uç Düzeltme Teorisi

Glauert teorisi sonsuz sayıda palaya sahip bir rotor için geçerlidir. Bu kabul, gerçekte iz bölgesinde oluşan radyal hız bileşenlerini ihmal ederek, olayın fizliğini ve matematiğini basitleştirir. Prandtl bu etkinin hesabı için basit bir metod önermiştir (Ek A). Bu metod, belli bir radyal konumda sonlu pala sayısı ile sonsuz pala sayısı halinde sirkülasyon değerlerini bir F uç düzeltme faktörü ile birbirine bağlar. Bu faktör,

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left\{ \exp \left[-\frac{\frac{B}{2} (1 - \frac{r}{R})}{(r/R) \sin \theta} \right] \right\} \quad (5.12)$$

şeklinde verilmektedir.

Sonsuz sayıda palaya sahip rotorun pala açıklığı boyunca merkezinden r uzaklığında sirkülasyonun değeri Γ_∞ iken, B adet palaya sahip rotor için bu sirkülasyonun değeri

$$\Gamma = F \Gamma_\infty \quad (5.13)$$

şeklinde yazılabilir. Sonsuz sayıda palaya sahip bir rotorun sirkülasyonu için, γ_r merkezden r uzaklığındaki girdap şiddeti olmak üzere ve rotor gerisindeki teğetsel hız bileşeni göz önüne alınarak,

$$\Gamma_\infty = 2\pi r \gamma_r = 2\pi r 2a' \Omega r = 4\pi r a' \Omega r \quad (5.14)$$

yazmak mümkündür. Şekil 5.2'de görüldüğü gibi indüklenmiş bileşke hız w_t , U_R 'ye diktir. Bu bilgi kullanılarak,

$$w_t = \frac{a' \Omega r}{\sin \theta}$$

yazılır. (5.14) bağıntısı kullanılarak,

$$w_t = \frac{\Gamma_\infty}{4\pi r \sin \theta}$$

ya da (5.13) bağıntısı kullanılarak,

$$w_t = \frac{\Gamma}{4\pi r F \sin \theta} \quad (5.15)$$

bulunur.

Bölüm 4.4'den hatırlanacağı gibi sirkülasyon ile taşıma katsayısı,

$$\Gamma = B/2 C_L U_R c$$

şeklinde birbirine bağlanabilir. Bu bağıntı (5.15) bağıntısında kullanılarak türbin performansının temel denklemi şu şekilde bulunur:

$$w_t = \frac{\sigma C_L}{4F \sin \theta} U_R \quad (5.16)$$

Şekil 5.2'deki hız ilişkilerinden,

$$U_R \sin \theta = U_\infty - w_t \cos \theta \quad (5.17)$$

olduğu gösterilebilir. (5.16) ve (5.17) bağıntıları U_∞ ile bölünüp her iki denklemde U_R/U_∞ yok edilerek,

$$\frac{w_t}{U_\infty} = \left(\frac{4F}{\sigma C_L} \sin^2 \theta + \cos \theta \right)^{-1} \quad (5.18)$$

bulunur. Yine Şekil 5.2'deki hız üçgeninden,

$$\tan \theta = \frac{U_\infty - w_t \cos \theta}{\Omega r + w_t \sin \theta} = \frac{1 - (w_t/U_\infty) \cos \theta}{X + (w_t/U_\infty) \sin \theta}$$

olduğu yazılır ve w_t/U_∞ yerine (5.18) bağıntısındaki değeri yazılarak σC_L 'nin değeri çekilirse,

$$\sigma C_L = 4 F \sin \theta \frac{\cos \theta - X \sin \theta}{\sin \theta + X \cos \theta} \quad (5.19)$$

bulunur. Güç katsayısı için Bölüm 4.2'deki analiz tekrar yapılarak,

$$C_P = \frac{8}{\lambda^2} \int_{X_0}^{\lambda} F \sin^2 \theta (\cos \theta - X \sin \theta) (\sin \theta + X \cos \theta) [1 - (C_D/C_L) \cot \theta] X^2 dX \quad (5.20)$$

olduğu bulunur. Görüldüğü gibi sonuç, integral ifadesi içinde yer alan F çarpanı dışında sonsuz sayıda pala hali için bulunan sonuca özdeştir.

5.4. Aerodinamik Optimizasyon ve Hesaplama Yöntemi:

Rüzgar türbini için aerodinamik optimizasyonun anlamı, rotor pala geometrisinin C_P çıkış güç katsayısının maksimum olacak şekilde tespit edilmesidir. Yani (5.19) denklemi ile verilen güç katsayısı ifadesini açıklık boyunca her istasyonda maksimum yapmak için sağlanması gereken şart F faktörü (5.12) bağıntısı ile verilmek üzere,

$$\theta_{opt} \rightarrow \text{MAX} \{ F \sin^2 \theta (\cos \theta - X \sin \theta) (\sin \theta + X \cos \theta) [1 - (C_D/C_L) \cot \theta] \}$$

şeklindedir.

Optimizasyon işlemi uç hız oranının belli bir değeri için yapılır. Hesabı kolaylaştırmak bakımından işlem boyunca C_L/C_D için sabit bir değer alınmaktadır. Bu şekilde açıklık boyunca θ_{opt} dağılımı belirlendikten sonra veter dağılımı (5.2) bağıntısının (5.19) bağıntısında kullanılmasıyla bulunan,

$$\left(\frac{c}{R} C_L\right)_{opt} = \left(\frac{8\pi}{B} \frac{r}{R} F \sin \theta \frac{\cos \theta - X \sin \theta}{\sin \theta + X \cos \theta}\right)_{\theta=\theta_{opt}}$$

bağıntısı ile hesaplanır. Ancak bu şekilde ilk aşamada oturma açısı ve veter için bir dağılım hesaplamak mümkün değildir. Çünkü oturma açısı hücum açısına, veter uzunluğu da taşıma katsayısına, dolayısıyla hücum açısına bağlı olarak bulunabilmektedir. Bu nedenle, profil seçimi yapıldıktan sonra bir dizayn taşıma katsayısı seçilir. Seçilen profilin bu taşıma katsayısına karşılık gelen hücum açısı belirlenir ve böylelikle,

$$i = \theta - \alpha$$

$$\frac{c}{R} = \left(\frac{c}{R} C_L\right)_{opt} \cdot \frac{1}{C_{L_{diz}}}$$

eşitlikleri kullanılarak palanın sivrilmesi ve burulması hesaplanmış olur.

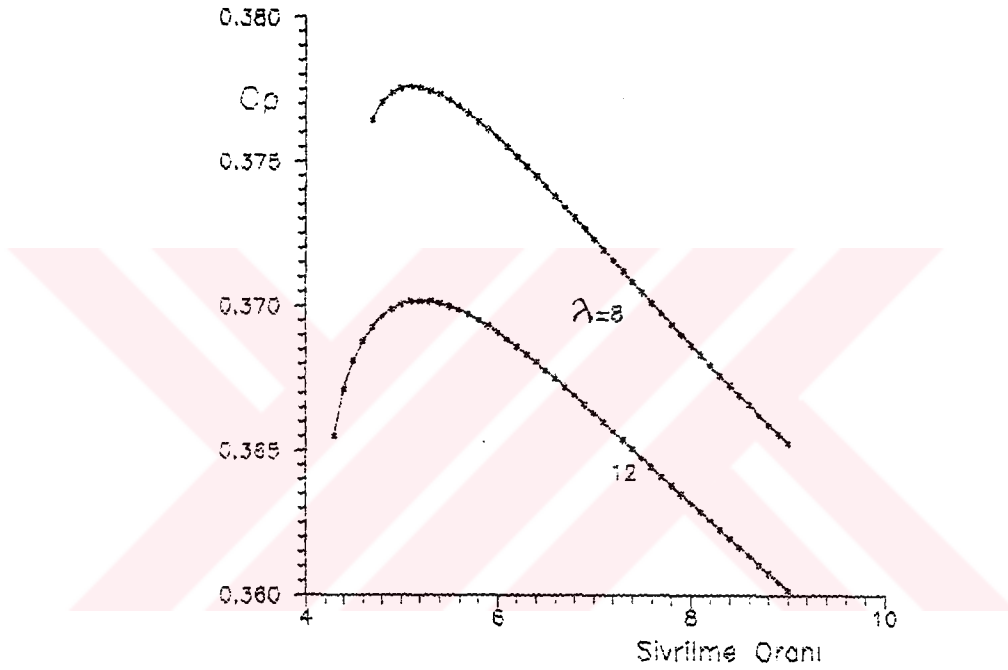
Şekil 5.6'da optimum palaya ait hesaplanan oturma açısı dağılımı, Şekil 5.7'de de veter dağılımı değişik uç hız oranı değerleri için verilmektedir. Veter dağılımı grafiği, her bir profilin hesaplanan boyutsuz veter değerlerinin çeyrek veterden birleştirilmesi sonucu elde edilmiştir.

5.5. Pala Geometrisinin Düzeltilmesi:

Aerodinamik optimizasyon sayesinde bulunan pala, Şekil 5.6 ve 5.7'de de görüldüğü gibi imali oldukça güç bir geometriye sahiptir. Bu nedenle, bu

bölümde pala geometrisinin basitleştirilmesi ile bu basitleştirme sonucu palanın yüklemesi ve güç katsayısının yeniden hesabına yer verilmektedir.

5.5.1. Veter Dağılımının Düzeltilmesi:



Şekil 5.4: Güç katsayısının iki değişik uç hız oranı için trapez palanın sivrilme oranı ile değişimi.

İlk önce, lineer olmayan ve özellikle de göbeğe yakın kısımlarda şiddetli biçimde sivrilmeye uğrayan pala, trapez biçiminde bir palaya dönüştürülmektedir. (Ek D) Bu dönüşüm yapılırken kullanılan bilgi pala alanıdır. Alanı optimum palanın alanına eşit, fakat lineer olarak sivrilen ve sivrilme oranı optimum palanın kine yakın olan pala ele alınmaktadır. Bu kez bilinen veter uzunluğu değeri için (5.19) denklemini sağlayan θ değerleri belirlenmektedir. θ açısı dağılımı belirlendikten sonra güç katsayısı hesaplanmaktadır. Daha

sonra sivrilme oranı azaltılmakta ve her sivrilme oranı için güç katsayısının değerleri incelenmektedir. Şekil 5.4'de görüldüğü gibi sivrilme oranı azaldıkça güç katsayısı önce artmakta, bir maksimum değer aldıktan sonra yeniden azalmaktadır. Bu durumda, güç katsayısını en büyük yapan sivrilme oranına sahip pala uygun pala olarak seçilir. Ardından θ açısı ve veter dağılımı ile güç katsayısı bilinen bu palanın oturma açısı dağılımı ve yüklemesi hesaplanır. Şekil 5.8 ve 5.9'da bu halde hesaplanan palaya ait geometri verilmektedir.

5.5.2. Oturma Açısı Dağılımının Düzeltilmesi:

Yine Şekil 5.6'da görüldüğü gibi, optimum pala özellikle göbeğe yakın kısımlarda şiddetli bir burulmaya uğramaktadır. Bu nedenle istenirse oturma açısı dağılımı da basitleştirilebilir. Bu çalışmada, bu dağılım En Küçük Kareler Yöntemi kullanılarak lineer hale getirilmektedir (Ek C). Bu kez, palanın veter ve burulma açısı dağılımı bilinmekte, ancak performans katsayıları aranmaktadır. Bu durumda şu şekilde bir hesaplama yöntemi kullanılmaktadır:

(5.19) denkleminde taşıma katsayısı için

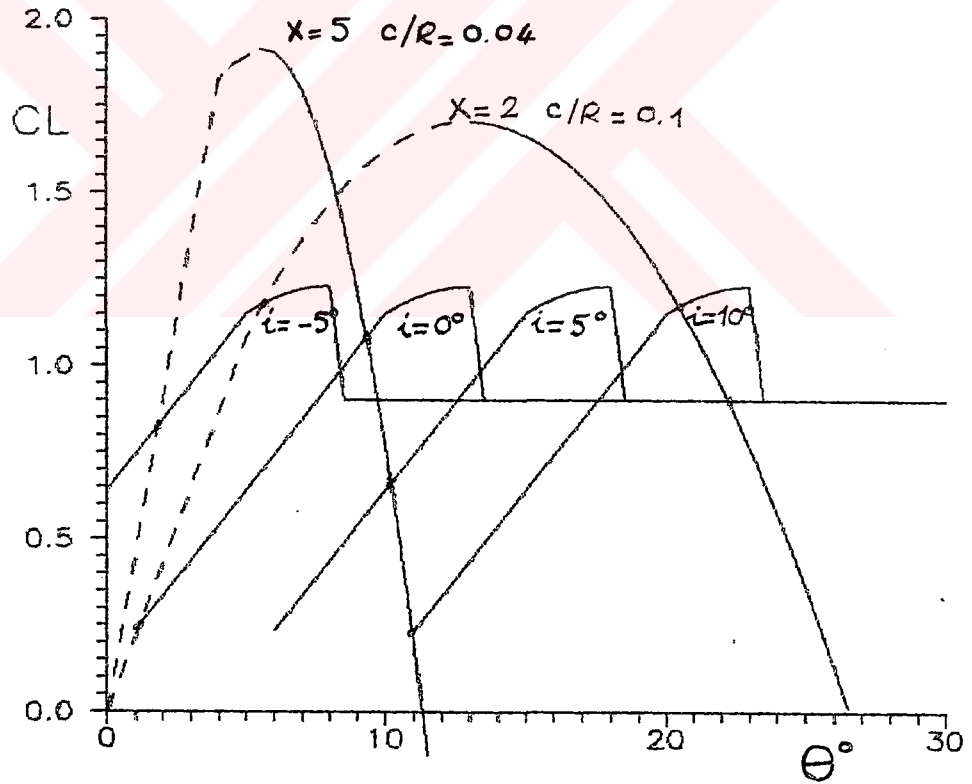
$$C_L = \frac{8\pi r/R}{B c/R} F \sin \theta \frac{\cos \theta - X \sin \theta}{\sin \theta + X \cos \theta} \quad (5.21)$$

şeklinde bir bağıntı elde etmek mümkündür. Ayrıca $C_L(\alpha)$ şeklindeki poler eğrisi yardımıyla,

$$C_L = f(\theta - i) \quad (5.22)$$

yazılabilir. C_L katsayısının her iki fonksiyon yardımıyla θ açısı ile olan değişim eğrilerinin kesişim noktası uygun θ değerini vermektedir. Şekil 5.5'de iki

fonksiyonun θ açısı ile değişimine bazı örnekler verilmektedir. Ancak görüldüğü gibi, iki eğri genellikle birden fazla noktada kesişmektedir. Şekil 5.5'deki eğrinin kesikli kısmı, rüzgar türbininin ekseni doğrultusundaki α indüklenme faktörünün $1/2$ 'den küçük değerleri için geçerli olup, bu kısımdaki kesişim noktaları fiziksel olarak kabul edilemez. Eğrinin kesikli olmayan kısmında da, poler eğrisinin stall noktasından sonra yer alan kesişim noktaları tercih edilmemelidir. Ayrıca (5.22) denklemi ile verilen eğri, (5.21) denklemi ile verilen eğrinin altında kaldığında, hiçbir kesişim noktası olmayabilir. Bu durum türbülanslı izi temsil etmekte olup, burada bu konuya yer verilmeyecektir.



Şekil 5.5 : Taşıma katsayısının değişik hallerde hücum açısı ile değişimi.

Şekil 5.5'de görüldüğü gibi, negatif hücum açılarında kesişim noktası genellikle stall bölgesinde olmaktadır. Bu mahzuru ortadan kaldırmak

için bu çalışmada oturma açısı negatif değerler almaya başlayana kadar lineer olarak azaltılmakta, daha sonra da pala ucuna kadar sabit olarak alınmaktadır. (Şekil 5.10) Bu sayede oturma açısı değerleri hep pozitif olarak tutulmaktadır. Şekil 5.11’de oturma açısı dağılımı düzeltilmiş palanın açıklığı boyunca hücum açısının değişimi görülmektedir.

Bu çalışmada ayrıca hem veter hem de oturma açısı dağılımı düzeltilmiş pala hesabına da yer verilmektedir. Şekil 5.12’de bu durumda oturma açısının lineer dağılımı, Şekil 5.13’de de hücum açısı dağılımı görülmektedir. Şekil 5.13’den görüldüğü gibi yüksek uç hız oranı değerleri için kök kesiti ve civarında stall gerçekleşebilmektedir.

5.6. Uygun Çalışma Aralığının Belirlenmesi:

Rüzgar türbininin çalışması sırasında rüzgar hızında sürekli değişimler olur. Bu durumda pala, dizayn uç hız oranından farklı şartlara maruz kalabilir, performansı değişir, hatta pala stall’a uğrayabilir ya da iz bölgesinde akım türbülanslı hale gelebilir. Bu mahzuru ortadan kaldırabilmek için rotorun uygun çalışma uç hız oranı aralığı belirlenmelidir. Böylece rüzgar türbininin hangi rüzgar hızı aralığında çalıştırılabileceği belirlenir. Bu çalışmada belli bir uç hız oranlarında geometrileri belirlenen palaların, uç hız oranı çalışma aralıkları incelenmiştir. Bu inceleme sonuçlarına Şekil 5.14, 5.15, 5.16 ve 5.17’de bazı örnekler verilmektedir.

5.7. Sonuç:

Bu bölümde pala elemanı teorisi yardımıyla yatay eksenli rüzgar türbini palasının dizaynı üzerinde durulmuştur. Pala elemanı teorisi, pala kesitini oluşturan profilin karakteristiklerini, pala elemanı ile ilgili parametrelere bağlamaktadır. Şekil 5.18’de profilin fines değerlerinin optimum palanın güç katsayısına etkisi görülmektedir. Fines değeri arttıkça, pala ile rüzgardan çekilebilecek güç miktarı artmaktadır. Yani, pala dizaynında taşıması daha yüksek, sürüklemesi daha düşük profillerin geliştirilmesine ihtiyaç vardır.

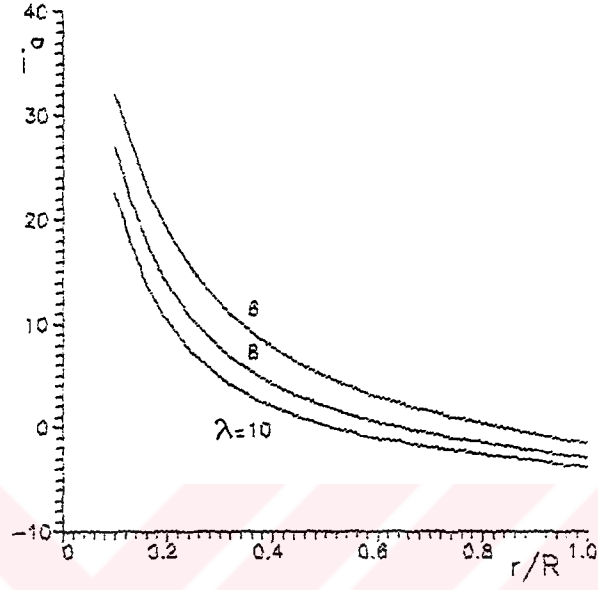
Şekil 5.19’den görüldüğü gibi, pala sayısının artması güç katsayısında bir miktar artış sağlamaktadır. Ayrıca Şekil 5.20’de de pala göbeği için ayrılan uzunluk arttırıldıkça, güç katsayısında yapılan kaybın arttığı görülmektedir.

Bu çalışmada ayrıca, yüksek performans göstermekle birlikte, imali güç geometriye sahip optimum pala şekli basitleştirilmiştir. Önce veter dağılımı, daha sonra burulma açısı dağılımı ve daha sonra da her iki dağılımı birden lineer hale getirilen palaların performansı incelenmiştir. Şekil 5.21’de geometrisi düzeltilmiş ve düzeltilmemiş palalar için normal kuvvet katsayısının, Şekil 5.22’de de teğetsel kuvvet katsayısının açıklık boyunca değişimleri karşılaştırılmaktadır. Veter dağılımı düzeltilen pala için optimum pala halinde olduğu gibi, her iki dağılım da düzgün olmasına rağmen oturma açısı dağılımı düzeltilen palaların yükleme dağılımı bir miktar değişmektedir.

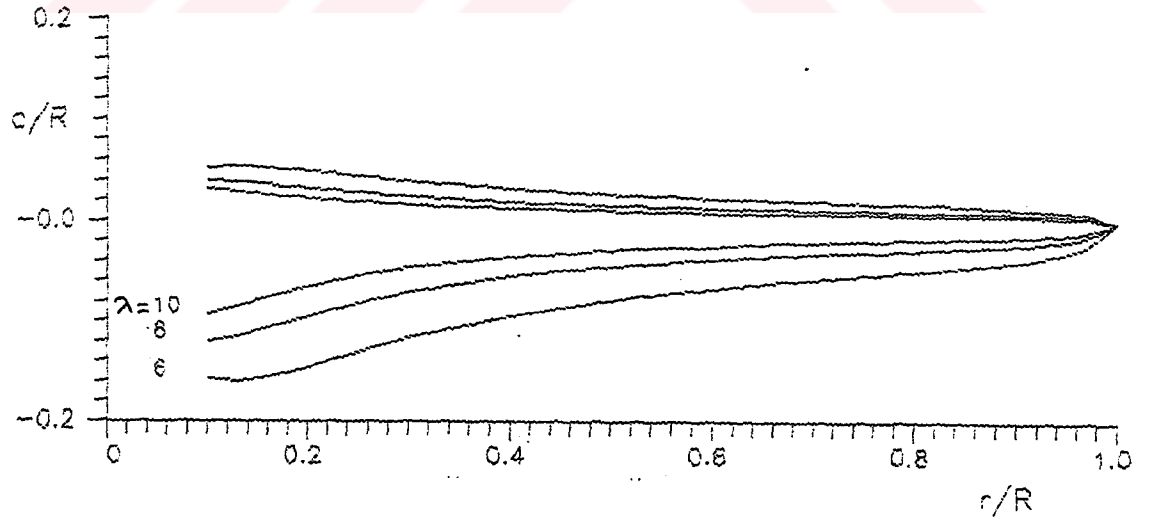
Ayrıca, dizayn edilen palaların off-dizayn şartları da incelenmiştir. Şekil 5.14, 5.15, 5.16 ve 5.17’de belli bir uç hız oranında geometrisi düzeltilmeden ve düzeltilerek dizayn edilen palalara ait çalışma aralıklarında güç katsayısının değişimi verilmektedir. Görülmektedir ki, veter ya da oturma açısı dağılımı düzeltilen palanın çalışma aralığı optimum palanınki kadar geniş olmakla birlikte, her iki dağılımı düzeltilen palanın çalışma aralığı çok daralmaktadır.

Şekil 5.23’de optimum pala ile geometrisi düzeltilen palaların güç katsayıları, karşılaştırılmaktadır. Anlaşılmaktadır ki, pala geometrisinin düzeltilmesi ile rüzgardan çekilebilecek güç ortalama olarak % 20 oranında azalmaktadır. Bu da optimum pala ile rüzgardan çekilebilecek enerjiye eşit miktar enerjiyi geometrisi basitleştirilmiş pala ile elde edebilmek için rotor çapının yaklaşık olarak % 10 oranında arttırılmasını gerektirir.

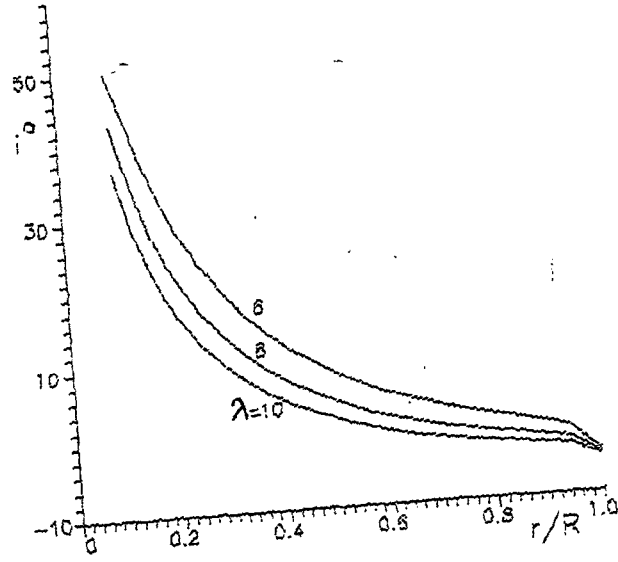
Bölüm 5 ile İlgili Bazı Grafikler:



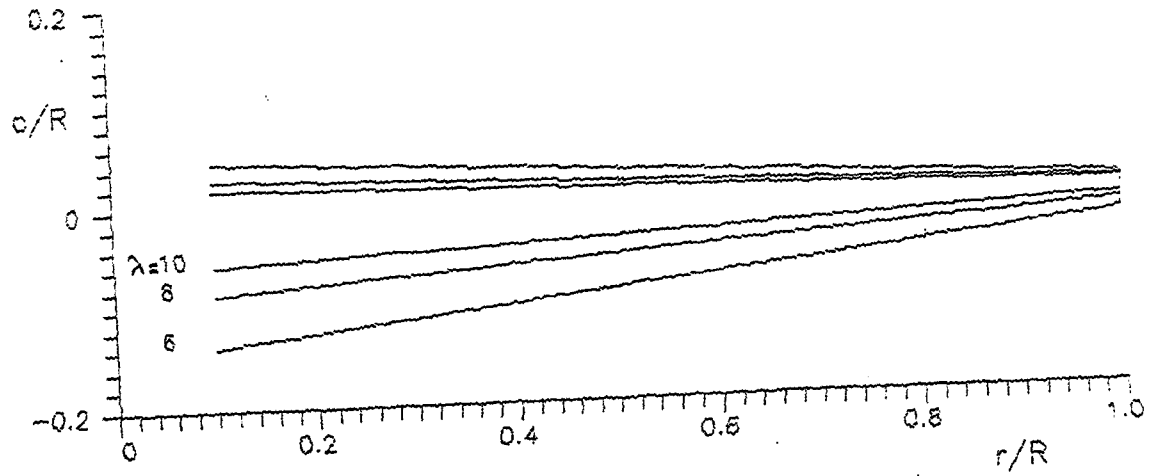
Şekil 5.6: Optimum palanın açıklığı boyunca oturma açısı dağılımı.



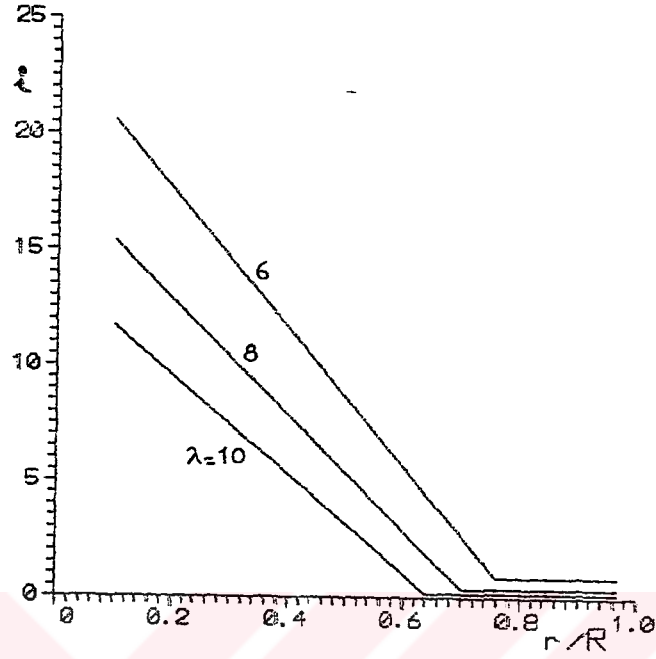
Şekil 5.7: Optimum palanın açıklığı boyunca veter uzunluğu dağılımı.



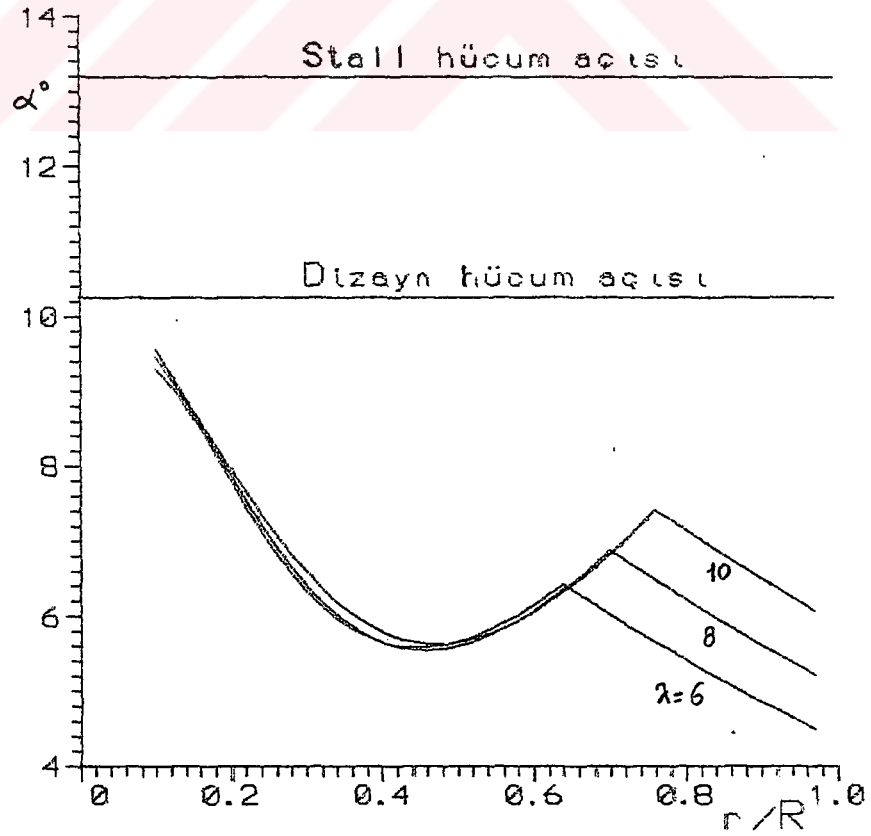
Şekil 5.8: Trapeze dönüştürülmüş palanın değişik uç hız oranı değerleri için açıklık boyunca oturma açısı dağılımları.



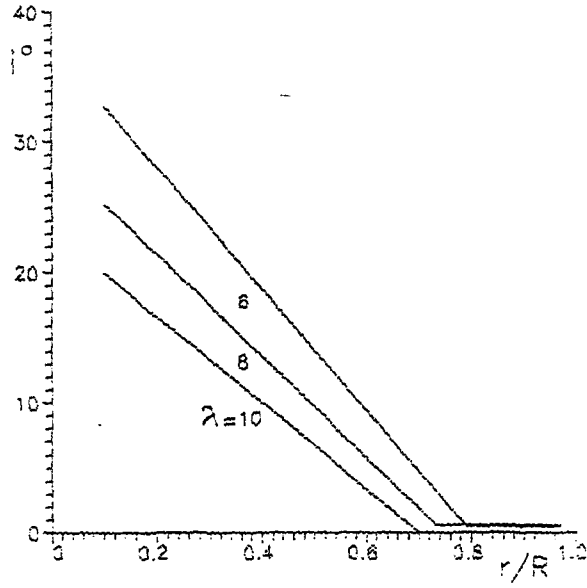
Şekil 5.9: Trapeze dönüştürülmüş palanın değişik uç hız oranı değerleri için açıklık boyunca veter dağılımları.



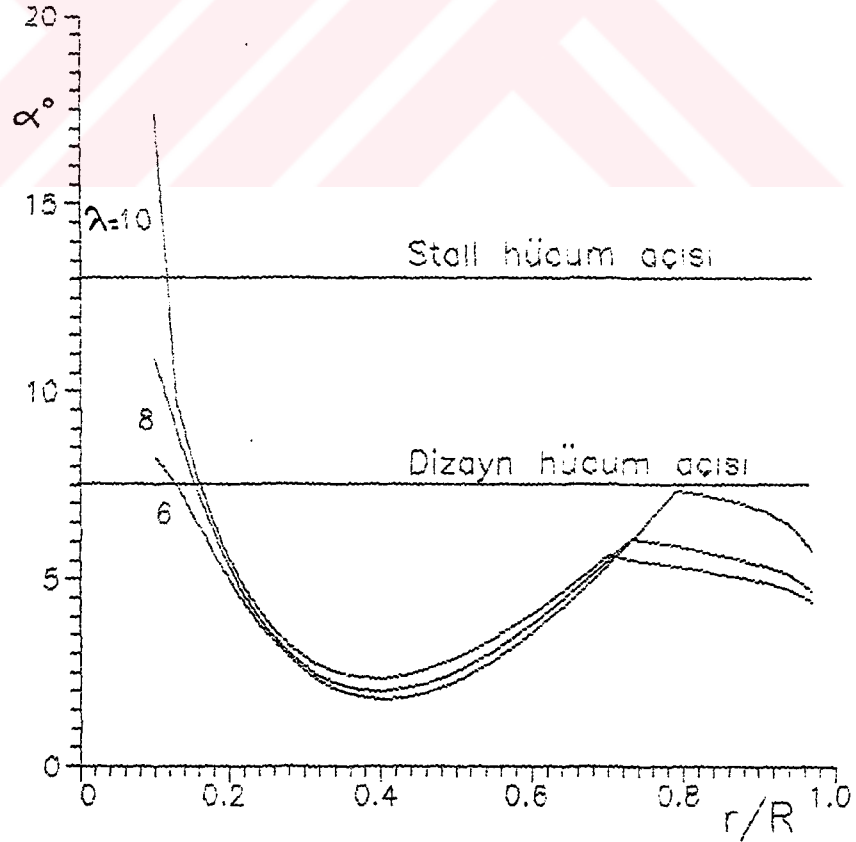
Şekil 5.10: Oturma açısı dağılımı düzeltilmiş palanın değişik uç hız oranı değerleri için oturma açısı dağılımları.



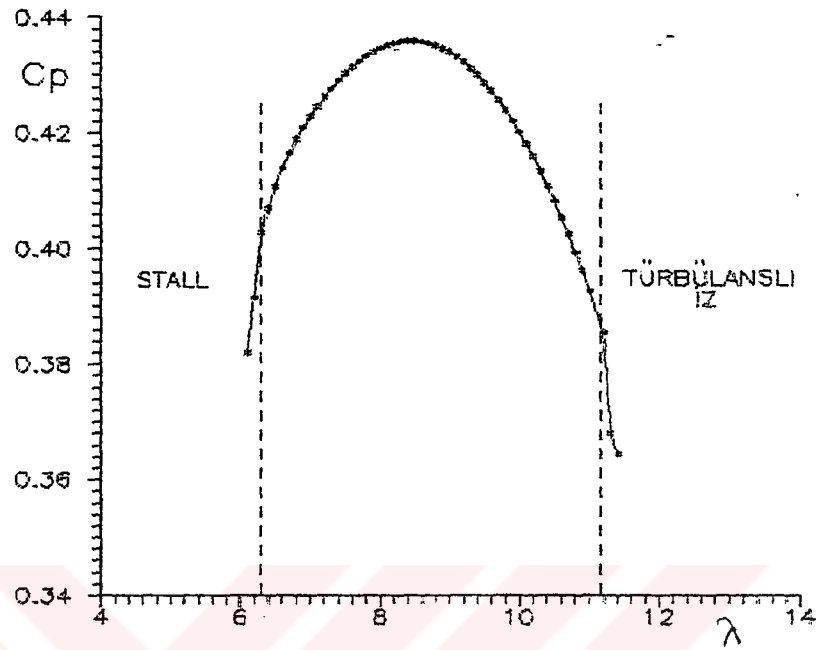
Şekil 5.11: Oturma açısı dağılımı düzeltilmiş palanın değişik uç hız oranı değerleri için hücum açısı dağılımları.



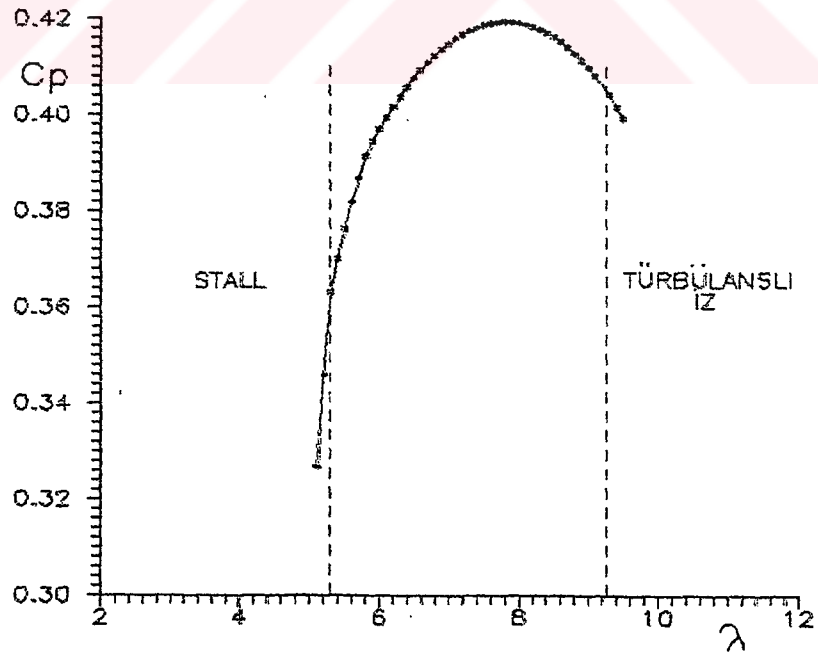
Şekil 5.12: Hem veter hem de oturma açısı dağılımı düzeltilmiş palanın değişik uç hız oranı değerleri için oturma açısı dağılımları.



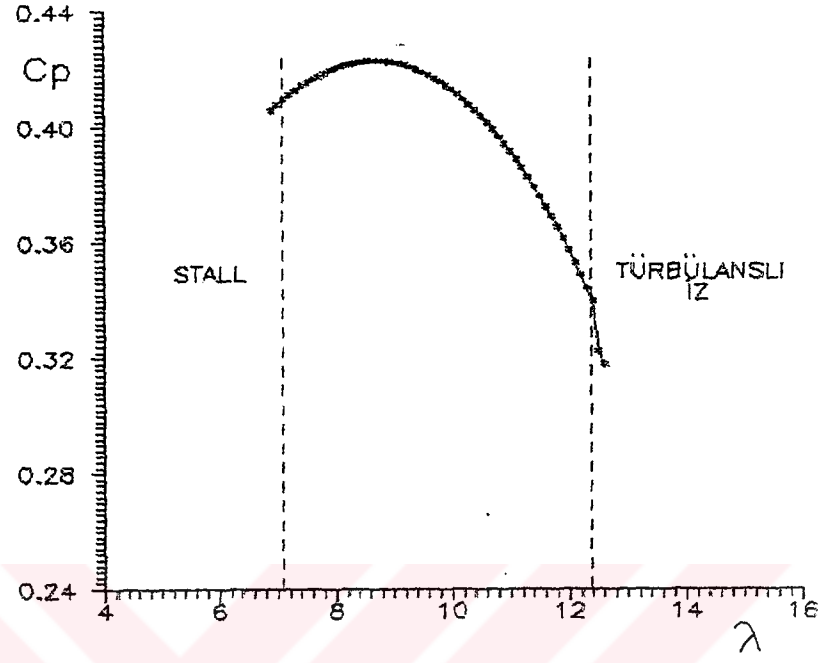
Şekil 5.13: Hem veter hem de oturma açısı dağılımı düzeltilmiş palanın değişik uç hız oranı değerleri için hücum açısı dağılımları.



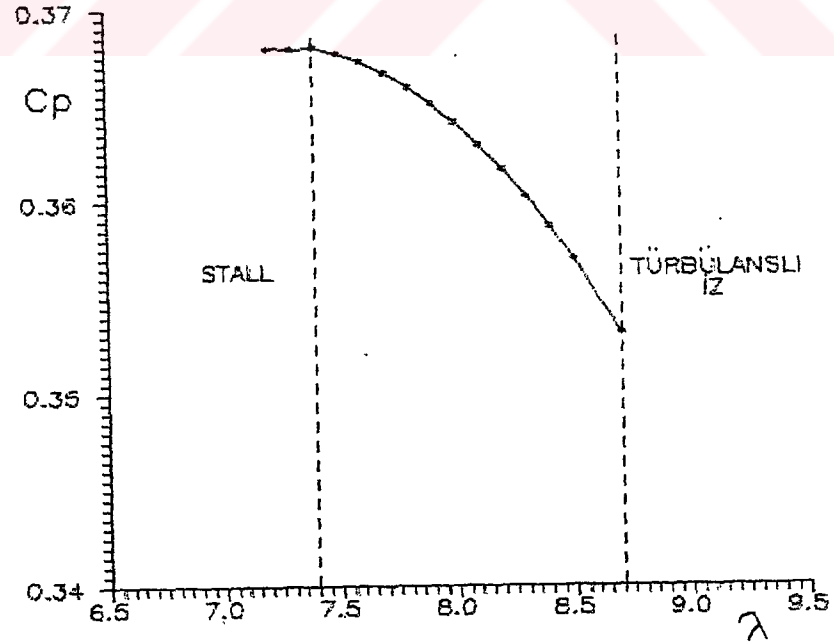
Şekil 5.14: $\lambda_{dizayn} = 8$ için optimum palanın çalışma uç hız oranı aralığında güç katsayısı değişimi.



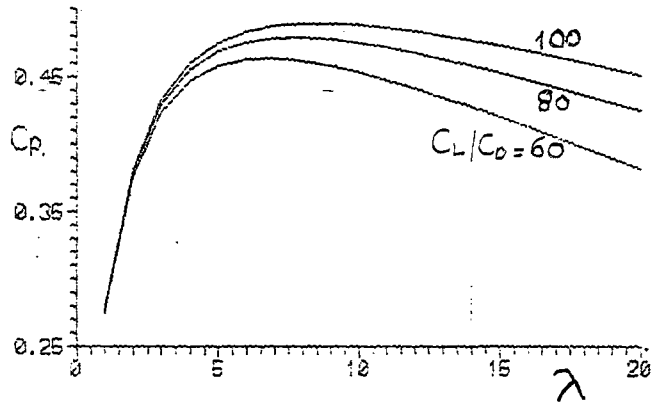
Şekil 5.15: $\lambda_{dizayn} = 8$ için veter dağılımı düzeltilmiş palanın çalışma uç hız oranı aralığında güç katsayısı değişimi.



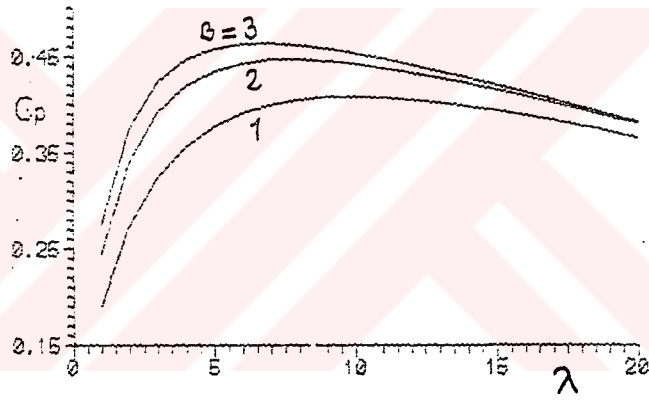
Şekil 5.16: $\lambda_{dizayn} = 8$ için oturma açısı değişimi düzeltilmiş palanın çalışma uç hız oranı aralığında güç katsayısı değişimi.



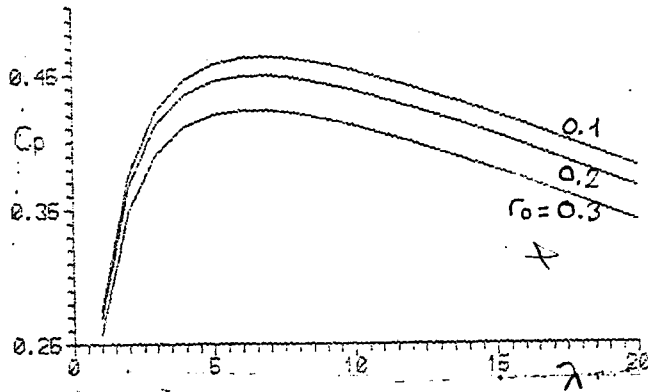
Şekil 5.17: $\lambda_{dizayn} = 8$ için hem veter hem de oturma açısı dağılımı düzeltilmiş palanın çalışma uç hız oranı aralığında güç katsayısı değişimi.



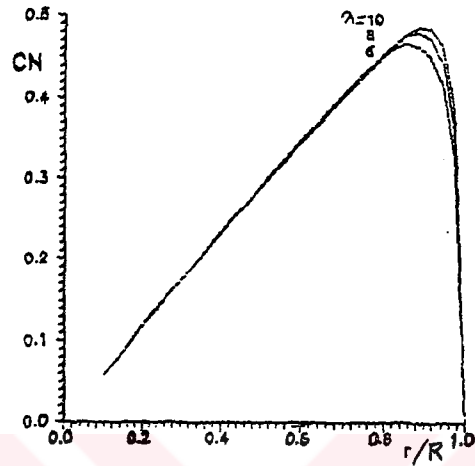
Şekil 5.18: Değişik fines değerleri için güç katsayısının uç hız oranı ile değişimi.



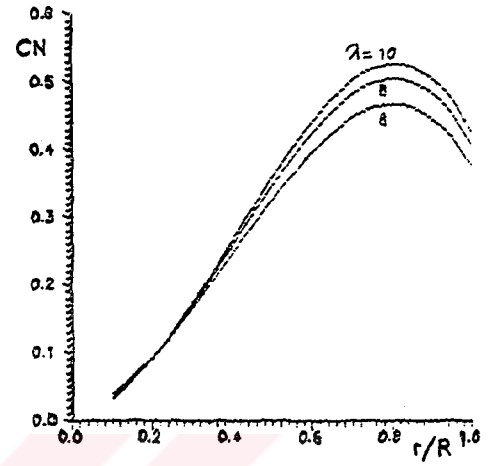
Şekil 5.19: Değişik pala sayıları için güç katsayısının uç hız oranı ile değişimi.



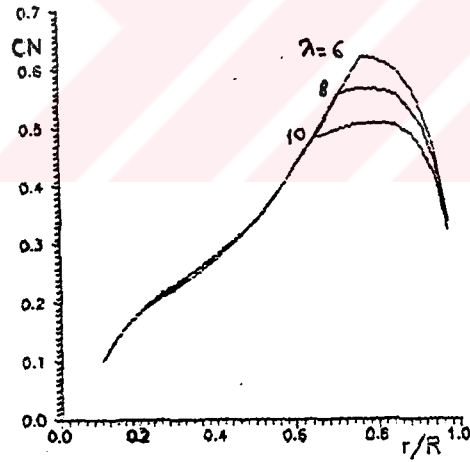
Şekil 5.20: Pala başlangıç noktasının değişik değerleri için güç katsayısının uç hız oranı ile değişimi.



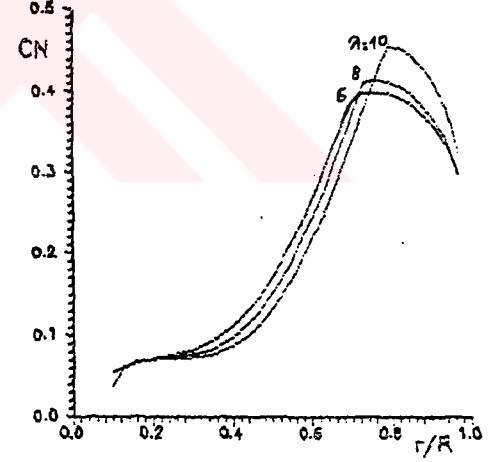
(a)



(b)

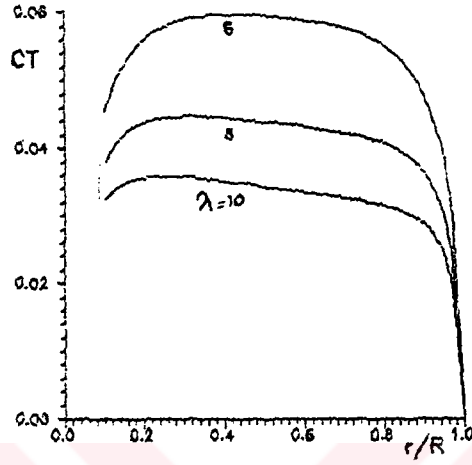


(c)

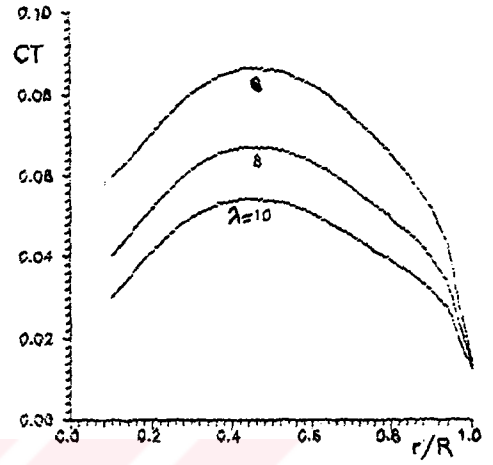


(d)

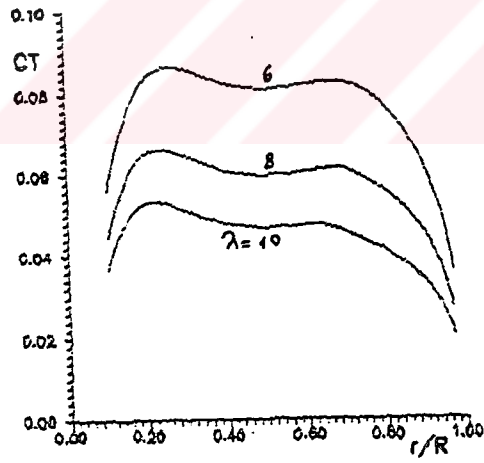
Şekil 5.21: a) Optimum, b) Trapez, c) Lineer burulmalı, d) Trapez ve lineer burulmalı palalara ait normal kuvvet katsayısının değişik uç hız oranı değerleri için açıklık boyunca değişimi.



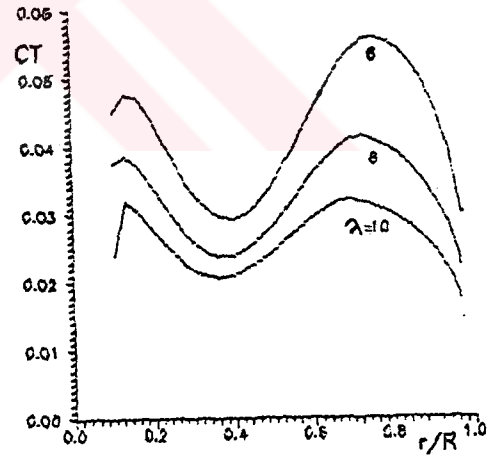
(a)



(b)

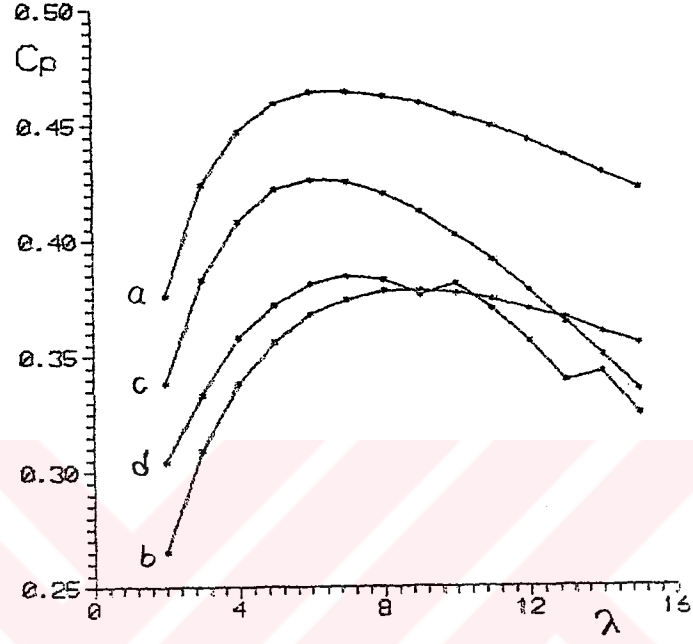


(c)



(d)

Şekil 5.22: a) Optimum, b) Trapez, c) Lineer burulmalı,
d) Trapez ve lineer burulmalı palalara ait teğetsel
kuvvet katsayısının değişik uç hız oranı değerleri
için açıklık boyunca değişimi.



Şekil 5.23: a) Optimum, b) Trapez, c) Lineer burulmalı, d) Trapez ve lineer burulmalı palalara ait güç katsayılarının uç hız oranı ile değişimi.

SONUÇLAR

Bu çalışmada, düşük katılık oranlı, yatay eksenli rüzgar türbininin aerodinamiği ile ilgili olarak geliştirilen yöntemler ele alınmış, türbin etrafındaki akımın yapısı etraflıca incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda, genelde türbin palalarının dizaynı için kullanılan yöntemlerde yapılan yaklaşımların küçük dizayn uç hız oranları dışında büyük hatalara yol açmadığı görülmüştür.

Ayrıca Pala Elemanı Teorisi yardımıyla pala dizaynı için Fortran dilinde bir bilgisayar programı hazırlanmıştır. Bu programa ait sonuçlar, literatürde verilmiş olan sonuçlarla büyük benzerlik göstermektedir. Ayrıca ters metod uygulanarak, geometrisi basitleştirilen palaların performansı da incelenmiştir. Hem burulması, hem de sivrilmesi düzeltilen palaların yükleme dağılımının ne şekilde değiştiği ve ne kadar güç kaybı olduğu hesaplanmıştır. Bu palalar kullanılarak inşa edilecek rüzgar türbini ile, optimum geometriye sahip rotorun rüzgardan çekebileceği güce eşit miktar güç çekebilmek için, rotor çapının yaklaşık olarak %10 mertebesinde büyütülmesi gerektiği görülmüştür. Bunun yanında, dizayn edilen palaların uygun çalışma uç hız oranı aralıkları da belirlenmiş, burulması ve sivrilmesi düzeltilen palaların çalışma aralığının çok daraldığı ortaya konmuştur.

KAYNAKLAR

- [1] Hütter, U. : Beitrag zur Schaffung von Gestaltungsgrundlagen für Windkraftwerke. Dissertation TH Wien, 1942.
- [2] Hütter, U. : Windkraftmaschinen Hütte, des Ingenieurs Taschenbuch, Band IIA, Berlin, 1954.
- [3] Hütter, U. : Optimum Design Concept for Windelectric Converters. Proc. Workshop on Advanced Windenergy Systems. Stockholm, 29-30 Aug. 1974.
- [4] Bonnefille, R. : Les Realisations d'Electricite de France Concernant l'Energie Eolienne. d'Electricite de France, Rapport, F 40/74 No.4, Avril, 1974.
- [5] — : Aerogenerateurs Neyrpic de Grande Puissance. Etablissements Neyrpic, Grenoble, France, Oct. 1961.
- [6] Golding, E. W. : Electricity from the Wind Discovery. March 1950.
- [7] Golding, E. W. : Harnessing the Wind. Discovery, Dec. 1953.
- [8] Golding, E. W. : The Influence of Aerodynamics in Wind Power Development. AGARD Report 401, 1961.
- [9] Putnam, P. C. : Power from the Wind. V. Nostrand Cy., N. Y., 1948.
- [10] Rangi, R. S.,
South, P.,
Templin, R. J. : Wind Power and the Vertical-Axis Wind Turbine Developed at the National Research Council. NRC Canada Quart. Bull., Report No. DME/NAE, 1974.
- [11] Templin, R. J.,
South, P. : Some Design Aspects of High-Speed Vertical-Axis Wind Turbines. Proc. Intern. Symp. on Wind Energy Systems, St. John-s College, Cambridge, England, 7-8 Sept. 1976.

- [12] Eldridge, F. R. : Wind Machines. The MITRE Energy Resources and Environments Series. Second Press, 1980.
- [13] — : Çanakkale Civarında Rüzgar Potansiyelinin Belirlenmesi ve Yöreye Uygun Küçük Güçlü Bir Rüzgar Türbini Dizaynı. Ön Rapor. İ.T.Ü., Mayıs 1991.
- [14] Glauert, H. : Aerodynamic Theory, edited W. F. Durand. Vol IV, Dover Publications, 1963.
- [15] Bairstow, L. : Applied Aerodynamics. Novographic Process, Second Edition, Jan. 1944.
- [16] Glauert, H. : The Elements of Airfoil and Airscrew Theory. Cambridge Univ. Press, Second Edition, 1947.
- [17] de Vries, O. : Fluid Dynamic Aspects of Wind Energy Conversion. AGARD Report 243, 1979.
- [18] de Vries, O. : On the Theory of the Horizontal Axis Wind Turbine. Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 15, 1983.
- [19] Griffiths, R. T. : The Effect of Airfoil Characteristics on Windmill Performance. Technical Note, Aeronautical Journal, July 1977.
- [20] Rijs, R. P. P., Smulders, P. T. : Blade Element Theory for Performance Analysis of Slow Running Wind Turbines. Wind Engineering, Vol.14 No.2, 1990.
- [21] Lilley, G. M. : The Aerodynamic Efficiency of Windmills. The Aeronautical Quarterly, Feb. 1978.
- [22] Pandey, M. M., Pandey, K. P., Ojha, T. P. : An Analytical Approach to Optimum Design and Peak Performance Prediction for Horizontal-Axis Wind Turbines. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Vol.32 No:3 Oct. 1989.
- [23] Yükselen, M. A. : Sayısal Analiz Ders Notları. İ.T.Ü., 1989.

EK A

PALA SAYISININ ETKİSİ

Glauert teorisinde rotoru temsil eden diskin sonsuz sayıda paladan oluştuğu kabul edildiğinden, silindirik iz pala uçlarını terkeden sonsuz sayıda girdap çizgisi ile sınırlanmaktadır. Bu girdap çizgileri düzgün bir vida yüzeyine sarılırlar ve izin dış yüzeyinde hayali bir zar oluştururlar. İzin içindeki akımın önemli şiddete sahip eksenel ve teğetsel bileşenleri vardır. Oysa bu akımın radyal bileşeni olması söz konusu değildir.

Ancak gerçekte türbini oluşturan pala sayısı sonludur. Palaları terkeden girdap çizgileri, sonsuz pala halindeki gibi birbirlerine sonsuz yakın değildirler. Bu nedenle iz bölgesi katı bir cisim gibi düşünülemez. Akım bu girdap çizgileri etrafında dönme eğilimindedir. O halde, gerçekte iz bölgesi içinde dönme ekseninden iz sınırına doğru şiddeti gittikçe artan radyal hız bileşenleri mevcuttur. Ancak bu hızlar herbir girdap çizgisinin önünde ve arkasında şiddet olarak eşit, ancak birbirlerine zıt yönde olduklarından silindirik iz kabulünü bozmamaktadırlar.

Akım alanında aynı hız dağılımını yaratacak bir model Prandtl tarafından şu şekilde kurulmuştur: Rotoru terkeden akım yerine, izin dışındaki akıma göre aU_∞ yatay hızıyla ilerleyen ve aralarında s uzaklığı bulunan birbirine paralel levhalar etrafındaki akım alanı ele alınır.

Birim bileşke indüklenmiş hıza sahip ve aralarında 2π uzaklığı bulunan paralel levhalar etrafındaki akımın kompleks hız potansiyeli z kompleks koordinat cinsinden,

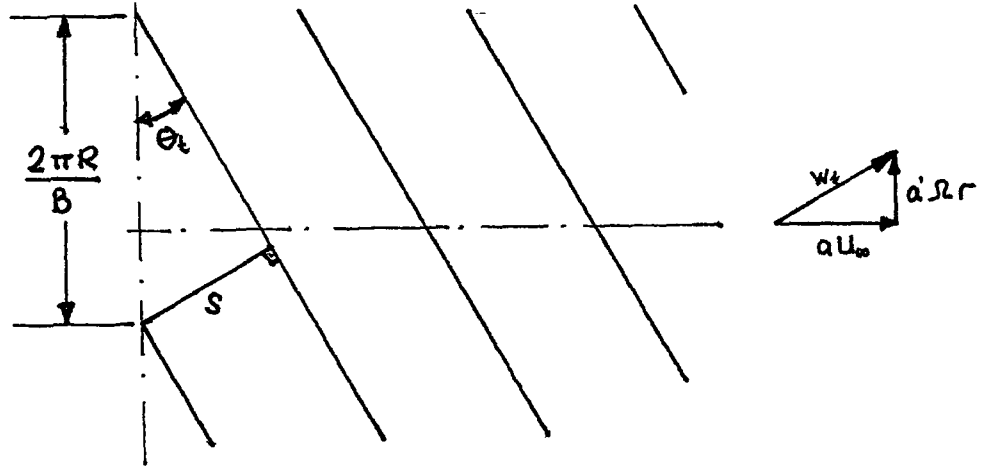
$$f(z) = \cos^{-1}(e^{-iz})$$

şeklinde verilmektedir. [15]

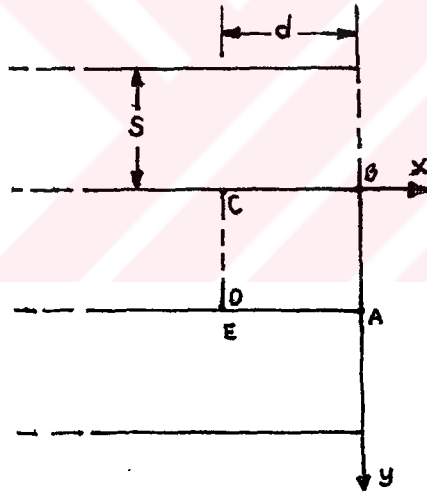
Bu fonksiyon,

$$\cos f = e^{-iz}$$

şeklinde de yazılabilir.



(a)



(b)



(c)

Şekil A.1: Paralel levhalar etrafında akım.

Kompleks potansiyel fonksiyonunun z 'ye göre türevi

$$\frac{df}{dz} = u - iv$$

şeklinde kompleks eşlenik hızı verdiği için, türev işlemi yapılarak

$$u - iv = \frac{i e^{iz}}{(1 - e^{-2iz})^{1/2}}$$

ve tekrar düzenlenerek,

$$u - iv = \frac{e^z}{(1 - e^{2z})^{1/2}}$$

şeklinde bulunur. Levhalar arasındaki uzaklık s ve indüklenmiş hız da w_t ise kompleks eşlenik hız ifadesi,

$$u - iv = \frac{w_t e^{\pi z/s}}{(1 - e^{2\pi z/s})^{1/2}} \quad (A.1)$$

haline gelmektedir.

Bu form, kompleks değişkenlere göre periyodik olması ve levhaların üzerinde normal hızı sıfır vermesi bakımından, genel akış teorisine uygundur. Şekil A.1.a'de görüldüğü gibi levhalar hareketli, akışkan durgun olduğu durumda levha kenarlarından uzakta herhangi bir radyal hız bileşeni yoktur. Oysa levhalara yaklaştıkça radyal hız bileşenleri görülmeye ve hızları da gittikçe artmaya başlar.

Şekil A.1.b'de CD doğrusu üzerinde aşağı doğru ortalama hızı bulmak için, önce bir F noktasından herhangi bir G noktasına giderken hız potansiyelinde olan artmayı $\Phi(FG)$ ile göstereyim. Bu durumda v aşağı doğru hızının C noktasından D noktasına kadar integrali,

$$\int_0^s v dy = \Phi(CD)$$

olmalıdır. Hız potansiyelindeki bu fark, başka bir yoldan gidilerek,

$$\Phi(CD) = \Phi(CB) + \Phi(BA) + \Phi(AD)$$

şeklinde de yazılabilir. Burada,

$$\Phi(CB) = \Phi(EA)$$

$$\Phi(BA) = w_t s$$

$$\Phi(AD) = \Phi(EA)$$

olduğu kullanılarak,

$$\int_0^s v dy = w_t s + 2 \Phi(EA) \quad (A.2)$$

bulunur. d , EA doğru parçasının uzunluğunu belirtmek üzere ve (A.1) denklemi yardımıyla,

$$\Phi(EA) = w_t \int_{-d}^0 \frac{e^{\pi x/s} dx}{(1 - e^{2\pi x/s})^{1/2}}$$

yazılabilir. İntegral, $e^{\pi x/s}$ yerine $\cos \theta$ yazılarak çözülürse,

$$\Phi(EA) = \frac{w_t s}{\pi} \cos^{-1}(e^{-\pi d/s})$$

olarak bulunur. Bu ifade, (A.2) denkleminde yerine yazılarak ve denklem s ile bölünerek,

$$\frac{1}{s} \int_0^s v dy = w_t \left[1 + \frac{2}{\pi} \cos^{-1}(e^{-\pi d/s}) \right]$$

CD doğrusu üzerinde aşağı doğru ortalama hız bulunmuş olur. Bu durumda, levhalar hareketsiz olarak durmakta dış akım w_t hızıyla aşağı doğru hareket etmektedir. Şimdi tüm sistem üzerine yukarıya doğru bir w_t hızı süperpoze edilirse, dış akım hareketsiz, levhalar hareketli hale gelir. Bu durumda akımın levha kenarından d kadar içeride levhalara göre aşağıya doğru düşey hızı,

$$\bar{v} = \frac{2}{\pi} w_t \cos^{-1}(e^{-\pi d/s})$$

olarak bulunur. Burada $d = R - r$ olup, Şekil A.1.a yardımıyla

$$s = \left(\frac{2\pi R}{B} \right) \sin \theta_t \simeq \left(\frac{2\pi r}{B} \right) \sin \theta$$

ve

$$f = \frac{\pi d}{s} = \frac{B}{2} \left(1 - \frac{r}{R} \right) \frac{1}{(r/R) \sin \theta}$$

yazılabilir. Uç düzeltme faktörü,

$$F = \frac{\bar{v}}{w_t}$$

şeklinde tanımlanmak üzere,

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1}(e^{-f})$$

şeklinde bulunur.

EK B

TETA DEĞERLERİNİN DEĞİŞKEN KESEN (REGULA FALSI) YÖNTEMİ İLE HESAPLANMASI

B.1. Optimum θ Değerlerinin Hesaplanması:

Rüzgar jeneratörünün C_P güç katsayısının maksimum olması, bu katsayının hesaplanmasında kullanılan integral ifade (5.20) içerisindeki

$$f(\theta) = F \sin^2 \theta (\cos \theta - X \sin \theta)(\sin \theta + X \cos \theta)[1 - (C_D/C_L) \cot \theta]$$

ifadesinin maksimum olmasını gerektirir. Bu fonksiyonu maksimum yapacak θ_{opt} değeri fonksiyonun türevi sıfıra eşitlenerek elde edilebilir. Bu amaçla önce

$$F(\theta) = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left\{ \exp \left[-\frac{\frac{B}{2} (1 - \frac{r}{R})}{(r/R) \sin \theta} \right] \right\} \quad (B.1.a)$$

$$f_1(\theta) = \sin^2 \theta \quad (B.1.b)$$

$$f_2(\theta) = (\cos \theta - X \sin \theta)(\sin \theta + X \cos \theta) \quad (B.1.c)$$

$$f_3(\theta) = 1 - \frac{C_D}{C_L} \cot \theta \quad (B.1.d)$$

olmak üzere $f(\theta)$ fonksiyonu,

$$f(\theta) = F(\theta) \cdot f_1(\theta) \cdot f_2(\theta) \cdot f_3(\theta) \quad (B.1.e)$$

şeklinde yazılır. $f(\theta)$ fonksiyonunun türevi kolaylıkla

$$f'(\theta) = f \cdot \left(\frac{F'}{F} + \frac{f'_1}{f_1} + \frac{f'_2}{f_2} + \frac{f'_3}{f_3} \right) \quad (B.2.a)$$

şeklinde yazılabilir. Burada fonksiyonların türevleri ise,

$$F'(\theta) = -\frac{2}{\pi} \frac{B}{2} \frac{1 - r/R}{r/R} \frac{1}{\sin \theta \tan \theta \tan(\pi/2 F)} \quad (B.2.b)$$

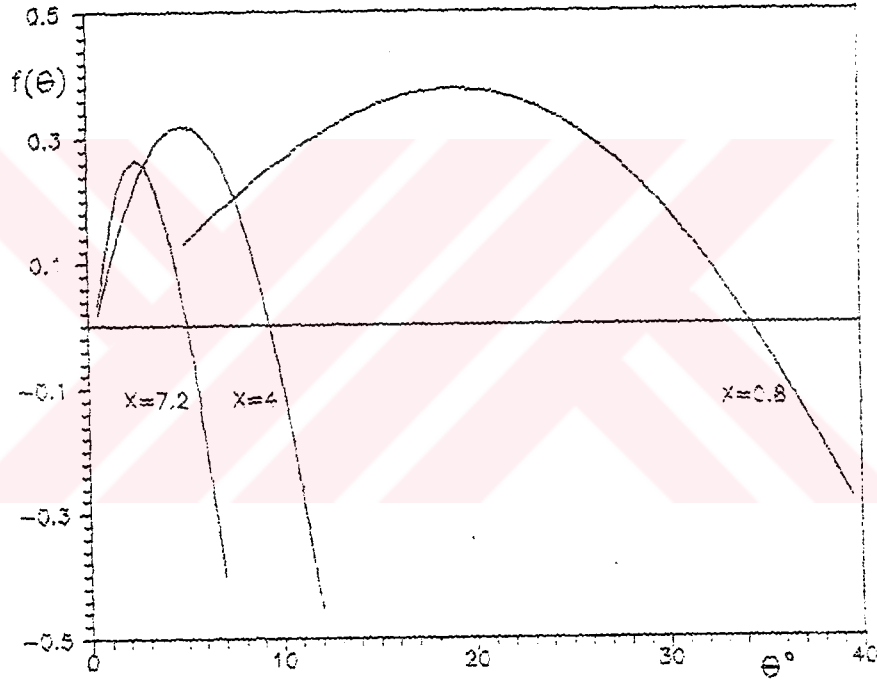
$$f'_1(\theta) = \sin 2\theta \quad (B.2.c)$$

$$f'_2(\theta) = (\cos \theta - X \sin \theta)^2 - (\sin \theta + X \cos \theta)^2 \quad (B.2.d)$$

$$f_3'(\theta) = \frac{1}{C_L/C_D \sin^2 \theta} \quad (B.2.e)$$

şeklindedir.

$f'(\theta)$ türevi yüksek mertebeden bir fonksiyon olup, bu türevi sıfır yapacak θ değerinin analitik olarak çözümü mümkün görülmemektedir. Uygun bir nümerik çözüm yöntemi seçmek için, fonksiyonun karakteristiğini incelemekte yarar vardır.



Şekil B.1: Değişik hız oranı değerleri için $f(\theta)$ fonksiyonunun değişimleri.

Şekil B.1'deki eğriler göstermektedir ki, kökün nümerik olarak bulunması için uygun bir yöntem Değişken Kesen yöntemidir. Ancak bunun için birisi kökün muhtemel değerinden küçük, diğeri ise büyük olan iki uygun başlangıç değerinin seçilmesi gerekmektedir.

Yapılan incelemeler göstermiştir ki, $f'(\theta)$ fonksiyonunun kökü, genellikle $f(\theta)$ fonksiyonunu sıfır yapan θ değerine yakındır. Rüzgar türbini için geçerli olan çalışma aralığında $f(\theta)$ 'yı sıfır yapan değer ise $f_2(\theta)$ fonksiyonunun kökü olup, değeri

$$f_2(\theta) = \cos \theta - X \sin \theta = 0$$

eşitliğinden,

$$\theta_{f=0} = \tan^{-1} \left(\frac{1}{X} \right)$$

şeklinde bulunabilir.

Yine yapılan incelemeler göstermektedir ki, parametrelerin geniş bir aralığı için, $\theta_{f=0}/\theta_{opt}$ değeri genellikle (1.40-1.65) aralığında değişmektedir. Buna göre yukarıda sözü edilen başlangıç değerleri için

$$\theta_0 = 1.40 \theta_{f=0}$$

$$\theta_1 = 1.65 \theta_{f=0}$$

değerlerini almak mümkündür.

Değişken kesen yönteminde işlem sırası ise şöyledir:

Herhangi bir iterasyon adımında kökün solunda ve sağında bilinen noktalar θ_{k-1} ile θ_k ve bu noktalardaki fonksiyon değerleri ise sırasıyla f_{k-1} ile f_k olmak üzere bir sonraki çözüm,

$$\theta_{k+1} = \theta_k - \frac{\theta_k - \theta_{k-1}}{f_k - f_{k-1}} \cdot f_k$$

şeklinde elde edilir.

B.2. Veter Dağılımı Düzeltilmiş Pala için θ Değerlerinin Hesabı:

Optimum palanın veter dağılımı düzeltildikten sonra, her istasyonda yeni bulunan veter uzunlukları için

$$\sigma C_L = 4 F \sin \theta \frac{\cos \theta - X \sin \theta}{\sin \theta + X \cos \theta} \quad (5.19)$$

denklemini sağlayan θ değerleri hesaplanmaktadır. Bu durumda $f(\theta)$ fonksiyonu için,

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left\{ \exp \left[-\frac{\frac{B}{2} (1 - \frac{r}{R})}{(r/R) \sin \theta} \right] \right\} \quad (B.1.a)$$

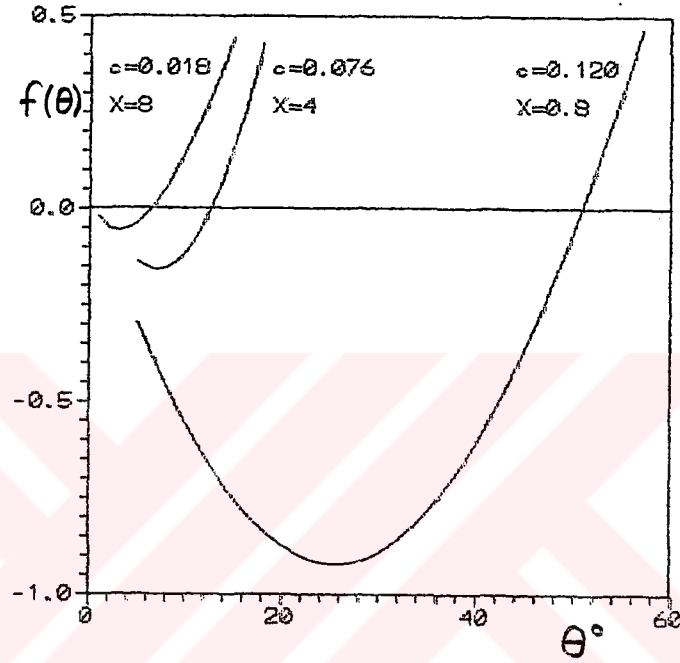
$$f_1(\theta) = (\sin \theta + X \cos \theta) \quad (B.3.a)$$

$$f_2(\theta) = \sin \theta (\cos \theta - X \sin \theta) \quad (B.3.b)$$

olmak üzere,

$$f(\theta) = \frac{B C_L}{2\pi} \frac{c}{r} f_1(\theta) - 4 F(\theta) f_2(\theta) \quad (B.3.c)$$

yazılabilir. Bu fonksiyonu sıfır yapan θ değerlerinin hesabı, analitik olarak mümkün görülmemektedir. Şekil B.2'de fonksiyonun değişik X ve c/R değerleri için değişimi görülmektedir.



Şekil B.2: Değişik hız oranı ve boyutsuz veter uzunluğu değerleri için $f(\theta)$ fonksiyonunun değişimleri.

Şekil B.2'deki eğriler göstermektedir ki, Değişken Kesen Yöntemi bu kez de trapez palanın hesabı için kullanılabilir. Yine uygun başlangıç değerlerinin seçilmesi gerekir.

İncelemeler, fonksiyonu sıfır yapan uygun θ değerlerinin her durumda boyutsuz veter uzunluğu ile aynı mertebede olmakla birlikte, pala kökünden uzaklaştıkça, bu değere yaklaştığını göstermektedir. Bu durumda, başlangıç değerleri için

$$\theta_0 = c/R + 0.02/R$$

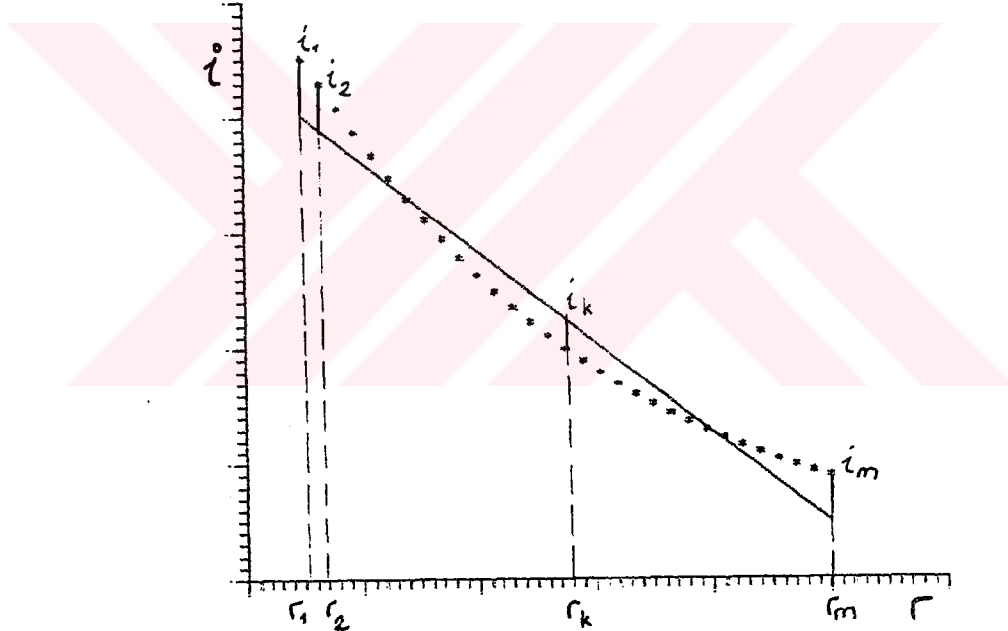
$$\theta_1 = c/R + 0.06/R$$

bağıntıları kullanılabilir. Böylece θ değerleri B.1'de sözü edilen iterasyon kullanılarak hesaplanır.

EK C

OTURMA AÇISI DAĞILIMININ EN KÜÇÜK KARELER YÖNTEMİ İLE DÜZELTİLMESİ

Bölüm 5.5.2’de bahsedildiği gibi optimum pala özellikle pala kökü yakınında şiddetli bir burulmaya uğramaktadır. Bu dağılımın düzeltilerek bir doğru denklemi ile değiştirilmesi için uygun bir yöntem, En Küçük Kareler Yöntemidir.



Şekil C.1 : En küçük kareler yönteminde iki eğriye ait noktalar ve aralarındaki uzaklıklar.

Şekil C.1’de görülen eğriye ait noktalar ile denklemi aranan doğrunun noktaları arasındaki uzaklıkların karelerinin toplamı,

$$T = \sum_{k=1}^m [i(r_k) - i_k]^2$$

ve

$$i(r) = ar + b$$

için

$$T = \sum_{k=1}^m [ar_k + b - i_k]^2$$

şeklinde yazılabilir. Yöntemin esası T değerinin minimum yapılmasına dayanmaktadır. Bu amaçla, T'nin a ve b katsayılarına göre türevleri alınıp,

$$\frac{\partial T}{\partial a} = 0$$

$$\frac{\partial T}{\partial b} = 0$$

şeklinde sıfıra eşitlenerek,

$$\sum_{k=1}^m (ar_k + b - i_k) r_k = 0$$

$$\sum_{k=1}^m (ar_k + b - i_k) = 0$$

şeklinde iki denklem bulunur. Denklemler düzenlenerek,

$$a \sum_{k=1}^m r_k^2 + b \sum_{k=1}^m r_k = \sum_{k=1}^m r_k i_k$$

$$a \sum_{k=1}^m r_k + bm = \sum_{k=1}^m i_k$$

şeklinde yazılır ve bu iki denklemden a ve b katsayıları

$$a = \frac{m \sum_k r_k i_k - \sum_k i_k \sum_k r_k}{m \sum_k r_k^2 - (\sum_k r_k)^2}$$

$$b = \frac{\sum_k r_k^2 \sum_k i_k - \sum_k r_k i_k \sum_k r_k}{m \sum_k r_k^2 - (\sum_k r_k)^2}$$

şeklinde çözülerek yeni oturma açısı dağılımı hesaplanabilir.

EK D

BİLGİSAYAR PROGRAMI

Bu kısımda 5. bölümde yer verilen pala elemanı teorisi ile ilgili olarak geliştirilen bilgisayar programı tanıtılmaktadır. Fortran dilinde yazılmış olan PALA isimli bu bilgisayar programı, bazı giriş bilgileri için aerodinamik olarak rüzgar türbini palası dizayn etmektedir. Bir ana program ve on adet SUBROUTINE ve FUNCTION altprogramlarından oluşmaktadır.

Ana Program: PALA

Güç katsayısını maksimum yapan optimum palayı dizayn eder; bu palaya ait sivrilme oranını yaklaşık olarak belirler; pala alanını, güç katsayısını, normal kuvvet ve teğetsel kuvvet katsayılarını hesaplar. İsteğe göre TRAP, DUZ ve OFFDIZ altprogramlarını kullanır.

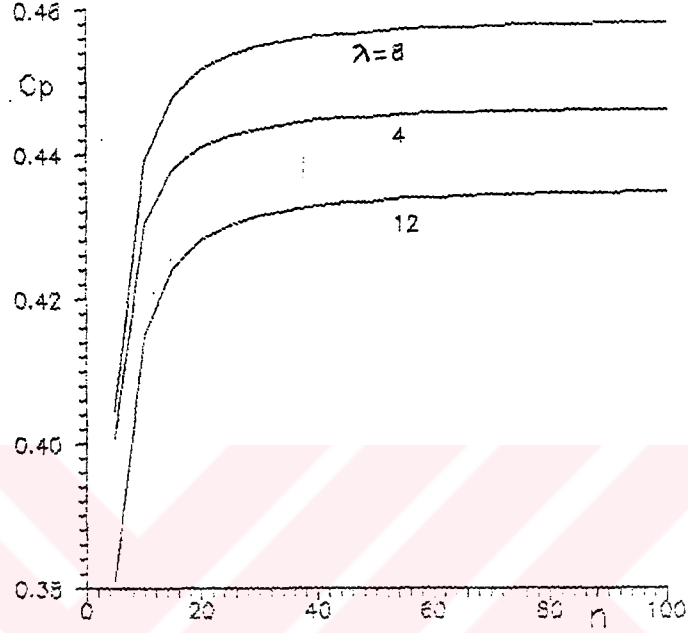
Giriş bilgileri: Bu program giriş bilgileri olarak, uç hız oranını, pala sayısını, profile ait fines değerini, dizayn taşıma katsayısını, taşıma ve sürüklenme eğrilerinin denklemlerini, dizayn hücum açısını, boyutsuz göbek uzunluğunu ve hesabın yapılacağı istasyon sayısını kullanır. Ayrıca eğer dizayn edilen palanın dizayn uç hız oranından farklı bir uç hız oranında performansı incelenmek istenirse, bu uç hız oranı da verilmelidir.

Uygun istasyon sayısının belirlenmesi:

Bu programda, istasyon sayısının değeri önemlidir. Çünkü, güç ve kuvvet katsayılarının hesabında lineer integrasyon yöntemi kullanılmaktadır. İstasyon sayısının yetersiz olarak verilmesi, yalnız bu katsayıların olduğundan küçük hesaplanmasına değil, TRAP altprogramında daha sonra yer verilecek olan optimum trapez palanın da yanlış olarak hesaplanmasına neden olur. Bu nedenle uygun istasyon sayısının belirlenmesine ilişkin basit bir analiz yapılmıştır.

Şekil D.1'de görüldüğü gibi güç katsayısı istasyon sayısı ile belli bir değerden sonra fazla değişim göstermemektedir. Yapılan hesaba göre istasyon sayısının 30'dan büyük olduğu durumda, güç katsayısında yapılan hata %1'den

küçük olmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada bu değer 30 olarak alınmaktadır.



Şekil D.1: Değişik uç hız oranı değerleri için güç katsayısının istasyon sayısı ile değişimi

Çıkış bilgileri: Bu program, optimum palanın istenen her istasyonunda θ açısının, boyutsuzlaştırılmış veter uzunluğunun ve oturma açısının değerlerinden başka, güç katsayısının, normal ve teğetsel kuvvet katsayılarının değerlerini de çıkış bilgileri olarak vermektedir.

Önemli parametreler:

N	: İstasyon sayısı
LAMDA	: Uç hız oranı
R(I)	: Hesabın yapıldığı istasyonun pala kökünden boyutsuz uzaklığı
R0	: Hesabın başlatıldığı istasyonun pala kökünden boyutsuz uzaklığı
DR	: İki istasyon arası boyutsuz uzaklık
X	: Hız oranı
DX	: İki istasyon arasında hız oranları arasındaki fark
E	: C_L/C_D
B	: Pala sayısı
A(I)	: Taşıma ve sürükleme eğrisine ait katsatılar
CLDIZ	: Dizayn taşıma katsayısı

ALFA	: Hücüm açısı
TOPT(I)	: Optimum θ değeri
CP(I)	: Güç katsayısı ifadesinin integral içerisindeki kısmının değeri
CPMAX	: Güç katsayısı
US	: F faktörünün eksponensiyel kısmının üssü
F	: Uç düzeltme faktörü
C(I)	: Boyutsuz veter uzunluğu
CN(I)	: Normal kuvvet ifadesinin integral içerisindeki kısmının değeri
CNTOP	: Normal kuvvet katsayısı
CT(I)	: Teğetsel kuvvet ifadesinin integral içerisindeki kısmının değeri
CTTOP	: Teğetsel kuvvet katsayısı
OA(I)	: Oturma açısı
SO	: Optimum palaya ait sivrilme oranının yaklaşık değeri
S	: Optimum palanın alanı

Altprogramlar:

TRAP

Bu altprogram, istenirse ana programda hesaplanan boyutsuz veter dağılımını bir doğru ile değiştirip, alanı optimum palaninkine eşit, ancak sivrilme oranı farklı olan trapez palalar arasında güç katsayısı maksimum olan palayı seçer. Daha sonra bu palaya ait oturma açısı dağılımı ile normal ve teğetsel kuvvet katsayılarını hesaplar.

Giriş bilgileri: Bu altprogram ana programdan uç hız oranı, fines, dizayn taşıma katsayısı ve hücüm açısı, boyutsuz göbek uzunluğu, pala alanı, sivrilme oranı ve istasyon sayısı ile bir COMMON deyimi yardımıyla hesabın yapıldığı her istasyonda boyutsuz radyal uzunluk ve veter uzunluğu bilgilerini giriş bilgileri olarak ana programdan alır.

Çıkış bilgileri: Optimum trapez palaya ait boyutsuz veter uzunluğu, θ açısı, oturma açısı dağılımları ile güç katsayısı, normal ve teğetsel kuvvet katsayılarıdır.

Önemli parametreler:

SSO	: Optimum palanın sivrilme oranı
AA(I),BB(I)	: Veter dağılımını belirten doğruların katsayıları
TETA(I,J)	: Sivrilme oranı değişen palalara ait θ açıları

L : Optimum trapez palaya ait şartlar
 VET(I) : Optimum trapez palaya ait boyutsuz veter uzunlukları

DUZ

İstendiği taktirde, TRAP altprogramı ile bulunan palanın oturma açısı dağılımını bir doğru denklemi ile değiştirir. Bu işlemi En Küçük Kareler Yöntemini kullanarak yapar (Ek C). Yeni palaya ait oturma açılarını belirledikten sonra, θ açılarını, yeni hücum açılarını, taşıma ve sürüklenme katsayıları dağılımlarını ve yeni palaya ait güç katsayısı ile normal ve teğetsel kuvvet katsayılarını hesaplar. CLKOK altprogramını kullanır.

Giriş bilgileri: Bu altprogram, ana programdan uç hız oranı, pala sayısı, boyutsuz göbek uzunluğu ve istasyon sayısı ile bir COMMON deyimi yardımıyla optimum trapez palaya ait boyutsuz veter uzunluklarını ve oturma açısı dağılımını, bir başka COMMON deyimi yardımıyla da profilin taşıma ve sürüklenme eğrilerine ait katsayıları alır.

Çıkış bilgileri: Düzeltilmiş palaya ait güç katsayısını, normal kuvvet ve teğetsel kuvvet katsayılarını çıkış bilgileri olarak verir.

OFFDIZ

Bu altprogram, dizayn edilen palanın dizayn uç hız oranından farklı çalışma şartlarında (farklı bir uç hız oranında) performansını hesaplar. Bunun yanında herhangi bir palanın stall'a uğramadan ya da izinde türbülans oluşmadan çalışabileceği uç hız oranı aralığının belirlenmesinde de kullanılabilir. DUZ altprogramının hemen hemen aynısıdır. Ancak bu altprogramda oturma açısı dağılımı yeniden hesaplanmaz. Program, oturma açısı ve boyutsuz veter uzunluğu dağılımını ana program ya da TRAP veya DUZ altprogramından alır. Ayrıca dizayn uç hız oranı yerine palanın performansının araştırıldığı uç hız oranını kullanır.

CLKOK

Bu altprogram, her istasyon için (5.20) ve (5.21) eğrilerinin uygun kesişme noktalarını bularak, her istasyonda geometrinin, yani boyutsuz veter uzunluğu ve oturma açısının verilen değerleri için göreceli rüzgar açısının değerini belirler. Bu işlemi yaparken, (5.20) eğrisinin artan değerler aldığı kısmındaki kesişim noktalarını dikkate almamak için hesaba bu eğrinin azalan değerler almaya başladığı noktadan başlar. Ayrıca iki eğrinin kesişme noktaları arasından, taşıma katsayısının en büyük olduğu θ açısını belirler ve bu kesişme

noktasında profilin stall'a uğrayıp uğramadığını kontrol eder. HH ve CLX FUNCTION programlarını kullanır.

Giriş bilgileri: Bu program, uç hız oranını, pala sayısını, hesabın yapıldığı istasyonun boyutsuz olarak pala kökünden uzaklığını, bu istasyonda oturma açısının, boyutsuz veter uzunluğunu giriş bilgisi olarak kullanmaktadır. Ayrıca, bir COMMON deyimi ile taşıma ve sürüklenme eğrilerine ait bilgileri DUZ altprogramından almaktadır.

Çıkış bilgileri: Hesabın yapıldığı istasyonda, θ açısını, yeni hücum açısını ve taşıma katsayısını, bunun yanında kesişme noktasının kaç adımda bulunduğunu verir. Ayrıca bir K kontrol parametresi ile kesişme noktası olup olmadığı bilgisini DUZ altprogramına gönderir.

Önemli parametreler:

- CL1 : (5.20) denklemi ile verilen taşıma katsayısı değeri
CL2 : (5.21) denklemi ile verilen taşıma katsayısı değeri

FUNCTION Altprogramları:

REGULA : Bu FUNCTION programı, PALA ve TRAP programları tarafından çağırılarak, θ açılarını hesaplar. Değişken Kesen Yöntemini (Ek B) kullanarak, TT ya da GG FUNCTION programları ile hesaplanan fonksiyon değerlerini sıfır yapan açı değerlerini belirler. Giriş bilgilerinden M kontrol parametresi, bu programın ana programdan çağırıldığında TT'yi, TRAP altprogramından çağırıldığında GG'yi kullanmasını sağlar. Bunun dışında uç hız oranı, fines değeri, pala sayısı, dizayn taşıma katsayısı, hız oranı ve boyutsuz veter uzunluğu giriş bilgileridir.

CLX : Bu program, verilen hücum açısı değeri için taşıma katsayısını hesaplar. Hücum açısı ve bir COMMON deyimi ile taşıma-hücum açısı eğrisine ait katsayıları giriş bilgisi olarak alır. Bu çalışmada, $C_L(\alpha)$ eğrisi üç parçaya bölünmüştür. Stall civarına kadar $C_L = a_1\alpha + a_2$ denklemlerle bir doğru ile, stall civarında, $C_L = a_3\alpha^2 + a_4\alpha + a_5$ şeklinde bir eğri ile, stall noktasından itibaren $C_L = a_6$ şeklinde bir doğru ile hesaplanmıştır. Bu katsayıları içeren dosyada sürüklenme katsayısını hücum açısına $C_D = a_7\alpha^3 + a_8\alpha^2 + a_9\alpha + a_{10}$ şeklinde bağlayan denkleme ait katsayılar da yer almaktadır.

FF : Bu program, (5.19) denkleminde integral içerisindeki ifadeyi hesaplar. PALA, TRAP, DUZ ve OFFDIZ programları tarafından çağırılarak güç katsayısının hesabında kullanılır. Uç hız oranı, fines, pala sayısı, hız oranı

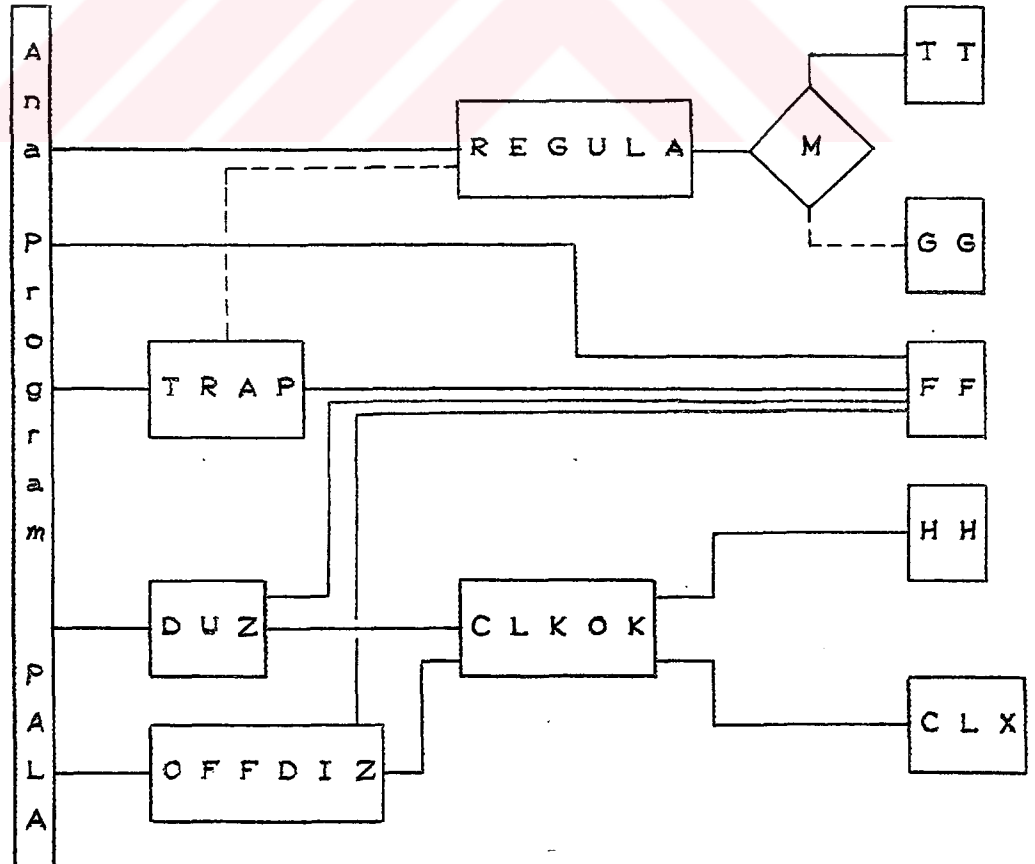
ve θ açısını giriş bilgisi olarak kullanır.

TT : Bu program, (B.2) denklemi ile verilen türev ifadesini hesaplayarak REGULA programına gönderir. REGULA programı bu fonksiyonu sıfır yapan θ açısını hesaplar. Bu şekilde optimum θ açısının hesabı mümkün olur. Uç hız oranı, fines, pala sayısı, hız oranı ve θ açısını giriş bilgisi olarak kullanır.

GG : Bu program, verilen boyutsuz veter uzunluğu için (B.3) fonksiyonunun değerini hesaplayarak bu bilgiyi REGULA fonksiyon programına gönderir. REGULA programı bu fonksiyonu sıfır yapan θ açısını hesaplar. Uç hız oranı, fines, pala sayısı, hız oranı, dizayn taşıma katsayısı, boyutsuz veter uzunluğu ve θ açısını giriş bilgisi olarak kullanır.

HH : Bu program, (5.21) fonksiyonunu hesaplayarak taşıma katsayısının değerini belirler. Uç hız oranı, pala sayısı, pala kökünden boyutsuz olarak uzaklığı, boyutsuz veter uzunluğu ve θ açısını giriş bilgisi olarak kullanır.

Bilgisayar Programının Çalışma Şeması:



BİLGİSAYAR PROGRAMI

```

*****
*
*   BU PROGRAM SEÇİLEN BİR PROFİL VE BİR
*   UÇ HIZ ORANI İÇİN OPTİMUM PALA DİZAYN EDER
*
*****

```

```

PROGRAM PALA
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
REAL LAMDA,LYENI
DIMENSION XX(100),TOPT(100),CP(100),CN(100),CT(100)
COMMON/BLOK1/R(100),C(100),OA(100)
COMMON/BLOK2/A(10)

```

C BAŞLANGIÇ DEĞERLERİ

```

PI=3.141592654
READ(1,*) LAMDA,LYENI,E,B,CLDIZ,ALFA,RO,N
DO 4 I=1,10
4 READ(2,*) A(I)

```

```

DR=(1-RO)/N
DO 1 I=1,N
1 R(I)=RO+(I-1)*DR
R(N+1)=0.999999999DO

```

```

WRITE(11, '(//,4X,1HI,5X,1HR,8X,1HF,8X,2HCP,9X,3HC/R,6X,
/4HTETA,3X,12HOTURMA AÇISI/)' )
WRITE(11, '(//,4X,1HI,5X,1HR,8X,1HF,8X,2HCP,9X,3HC/R,6X,
/4HTETA,3X,12HOTURMA AÇISI/)' )

```

```

DO 2 I=1,N+1

```

C PALA BOYUNCA OPTİMUM TETA AÇILARININ VE GÜÇ DAĞILIMININ HESAPLANMASI

```

XX(I)=LAMDA*R(I)
X=XX(I)
M=1
TOPT(I)=REGULA(M,LAMDA,E,B,CLDIZ,X,C,Q)
Z=TOPT(I)
CP(I)=FF(LAMDA,E,B,X,Z) *X*X

```

C OPTİMUM VETER UZUNLUKLARININ HESAPLANMASI

```

US=-B/2*(1-R(I))/R(I)
F=2/PI*DACS(EXP(US/DSIN(TOPT(I))))
PAY    = DCOS(TOPT(I)) - X * DSIN(TOPT(I))
PAYDA  = DSIN(TOPT(I)) + X * DCOS(TOPT(I))
CCLOPT = 8*PI/B*F*R(I)*DSIN(TOPT(I)) * PAY/PAYDA
C(I) = CCLOPT/CLDIZ

```

C PALA BOYUNCA NORMAL VE TEĞETSEL KUVVET DAĞILIMLARININ HESAPLANMASI

```

CN(I)=C(I)*CLDIZ/PI*(DSIN(Z)+X*DCOS(Z))**2*DCOS(Z)*(1+DTAN(Z)/E)
CT(I)=C(I)*CLDIZ/PI*(DSIN(Z)+X*DCOS(Z))**2*DSIN(Z)*(1-
/      1/DTAN(Z)/E)

```

C OTURMA AÇISININ HESAPLANMASI

OA(I)=TOPT(I)-ALFA*PI/180

2 WRITE(11, '(I5,6F10.6)') I,R(I),F,CP(I),C(I),TOPT(I)*180/PI,
/OA(I)*180/PI

SO=INT(C(1)/C(N))+1

C MAKSİMUM GÜÇ KATSAYISININ LINEER İNTEGRASYONLA HESAPLANMASI

DX=LAMDA*DR

CPMAX=(CP(1)+CP(N+1))/2

DO 3 I=2,N

3 CPMAX=CPMAX+CP(I)

CPMAX=8/LAMDA/LAMDA*CPMAX*DX

C NORMAL KUVVET KATSAYISININ LINEER İNTEGRASYONLA HESAPLANMASI

CNTOP=(CN(1)+CN(N+1))/2

DO 6 I=2,N

6 CNTOP=CNTOP+CN(I)

CNTOP=CNTOP*(1-RO)/N

C TEĞETSEL KUVVET KATSAYISININ LINEER İNTEGRASYONLA HESAPLANMASI

CTTOP=(CT(1)+CT(N+1))/2

DO 7 I=2,N

7 CTTOP=CTTOP+CT(I)

CTTOP=CTTOP*(1-RO)/N

WRITE(11, '(/' CPMAX =',F10.6,3X,' CN =',F10.6,3X,' CT =',
/F10.6)') CPMAX,CNTOP,CTTOP

C PALA ALANININ HESABI

CTOP=C(1)+C(N+1)

DO 8 I=2,N

8 CTOP=CTOP+2*C(I)

S=CTOP*(1-RO)/N/2

WRITE(*, '(' -YAKLAŞIK ÇÖZÜM- ') ')

CALL TRAP(LAMDA,E,B,CLDIZ,ALFA,RO,S,SO,N)

CALL DUZ(LAMDA,B,N,RO)

CALL OFFDIZ(LYENI,B,N,RO)

STOP

END

```

*****
*
*      BU PROGRAM VERİLEN PALANIN VETER DAĞILIMINI
*      BASİTLEŞTİREREK YENİ PALANIN PERFORMANSINI HESAPLAR
*
*****

```

```

      SUBROUTINE TRAP(LAMDA,E,B,CLDIZ,ALFA,RO,S,SSO,N)
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
      REAL LAMDA
      DIMENSION SO(50),CP(50,100),CPMAX(50),TETA(50,100),C(50,100)
      /,AA(50),BB(50),CN(100),CT(100)
      COMMON/BLOK1/R(100),VET(100),OA(100)

      PI=3.141592654
      DX=LAMDA*(1-RO)/N
      WRITE(*, '(/' ' TRAP ALT PROGRAMI' ')')

      I=0
      DO 1 SOI=SSO,1,-.1
      I=I+1
      SO(I)=SOI
      CU=2*S/(1-RO)/(SO(I)+1)
      CK=SO(I)*CU

      AA(I)=(CK-CU)/(RO-1)
      BB(I)=(RO*CU-CK)/(RO-1)

      DO 5 J=1,N+1
      5 C(I,J)=AA(I)*R(J)+BB(I)

C  TRAPEZ PALA İÇİN TETA AÇILARININ HESABI
      DO 2 J=1,N+1
      IF(J.EQ.N+1) THEN
        TETA(I,N+1)=2*TETA(I,N)-TETA(I,N-1)
      ELSE
        X=LAMDA*R(J)
        CRO=C(I,J)
        M=2
        TETA(I,J)=REGULA(M,LAMDA,E,B,CLDIZ,X,CRO,Z)
      ENDIF
      T=TETA(I,J)
      2 CP(I,J)=FF(LAMDA,E,B,X,T) *X*X

C  GÜÇ KATSAYISININ LINEER İNTEGRASYON İLE HESABI
      TOP1=CP(I,1)/2+CP(I,N+1)/2
      DO 3 K=2,N
      3 TOP1=TOP1+CP(I,K)
      CPMAX(I)=8/LAMDA/LAMDA*TOP1*DX

```

C OPTİMUM TRAPEZ PALANIN SEÇİMİ

```

      IF(CPMAX(I).LT.CPMAX(I-1)) GOTO 4
1  CONTINUE
4  L=I-1

```

```

      WRITE(15, '(//''          TRAPEZE DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ PALAYA AİT''')')
      WRITE(15, '( ''          HESAPLANAN DEĞERLER''')')
      WRITE(15, '(//'' LAMDA ='',F5.2)') LAMDA
      WRITE(15, '(/' 'ADIM ='',I3,4X, ''SİVRİLME ORANI='',F5.1,//)')
/L,SO(L)
      WRITE(15, '( ''A ='',F6.3,4X, ''B ='',F6.3,//)') AA(L),BB(L)
      WRITE(15, '(4X,1HI,5X,1HR,8X,5HCP(I),5X,3HC/R,6X,4HTETA,4X,
/12HOTURMA AÇISI/)'')

```

```

      DO 6 I=1,N+1
      VET(I)=C(L,I)
      IF(R(I).EQ.R(N+1)) THEN
        OA(N+1)=OA(N)+(OA(N)-OA(N-1))*(1-R(N))/(R(N)-R(N-1))
      ELSE
        OA(I)=TETA(L,I)-ALFA*PI/180
      ENDIF

```

```

      X=LAMDA*R(I)
      CN(I)=VET(I)*CLDIZ/PI*(DSIN(TETA(L,I))+X*DCOS(TETA(L,I)))*2*
/      DCOS(TETA(L,I))*(1+DTAN(TETA(L,I))/E)
      CT(I)=VET(I)*CLDIZ/PI*(DSIN(TETA(L,I))+X*DCOS(TETA(L,I)))*2*
/      DSIN(TETA(L,I))*(1-1/DTAN(TETA(L,I))/E)

```

```

6  WRITE(15, '(I5,6F10.6)') I,R(I),CP(L,I),C(L,I),TETA(L,I)*180/PI,
/OA(I)*180/PI

```

C NORMAL KUVVET KATSAYISININ LINEER İNTEGRASYONLA HESAPLANMASI

```

      CNTOP=(CN(1)+CN(N+1))/2
      DO 8 I=2,N
8  CNTOP=CNTOP+CN(I)
      CNTOP=CNTOP*(1-R0)/N

```

C TEĞETSEL KUVVET KATSAYISININ LINEER İNTEGRASYONLA HESAPLANMASI

```

      CTTOP=(CT(1)+CT(N+1))/2
      DO 7 I=2,N
7  CTTOP=CTTOP+CT(I)
      CTTOP=CTTOP*(1-R0)/N

```

```

      WRITE(15, '(//'' CP ='',F10.6,3X, ''CN ='',F10.6,3X, ''CT ='',
/F10.6)') CPMAX(L),CNTOP,CTTOP

```

```

      RETURN
      END

```

```

*****
*
*      BU PROGRAM VERİLEN PALANIN OTURMA AÇISI DAĞILIMINI
*      DÜZELTEREK YENİ PALANIN PERFORMANSINI HESAPLAR
*
*****

```

```

SUBROUTINE DUZ(LAMDA,B,N,RO)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
REAL LAMDA
DIMENSION CP(100),CN(100),CT(100)
COMMON/BLOK1/R(100),VET(100),OA(100)
COMMON/BLOK2/A(10)

```

```

PI=3.141592654
DX=LAMDA*(1-RO)/N
WRITE(*, '(/' ' DUZ ALT PROGRAMI' ')')
WRITE(10, '( ' ' OTURMA AÇISI DAĞILIMI DÜZELTİLEN' ')')
WRITE(10, '( ' ' PALAYA AİT HESAPLANAN DEĞERLER' ',//)')
WRITE(10, '( ' ' LAMDA = ' ',F5.2)') LAMDA
WRITE(10, '(//,2X,4HADIM,4X,1HR,6X,3HC/R,3X,7HOT. AÇ.,2X,
/4HTETA,4X,4HALFA,5X,3HCL1,5X,3HCL2/)' )

```

C OTURMA AÇISI DAĞILIMININ DOĞRU DENKLEMİ İLE DEĞİŞTİRİLMESİ

```

DO 2 I=1,N+1
TXY=TXY+R(I)*OA(I)
TX=TX+R(I)
TY=TY+OA(I)
2 TX2=TX2+R(I)**2

```

```

AA=((N+1)*TXY-TX*TY)/((N+1)*TX2-TX**2)
BB=(TX2*TY-TXY*TX)/((N+1)*TX2-TX**2)

```

```

DO 3 I=1,N+1
3 OA(I)=AA*R(I)+BB

```

C NEGATİF AÇILARIN POZİTİF YAPILMASI

```

DO 5 I=1,N
IF(OA(I).LT.0) THEN
    OA(I)=OA(I-1)
    O=OA(I)
ELSE
    O=OA(I)
ENDIF

```

```

RR=R(I)
X=LAMDA*RR
C=VET(I)
CALL CLKOK(LAMDA,B,RR,O,C,TETA,CL,ALFA,K)
CD=A(7)*ALFA**3+A(8)*ALFA**2+A(9)*ALFA+A(10)
IF(K.EQ.1) THEN
    CP(I)=0
    CN(I)=0
    CT(I)=0
    GOTO 5
ELSE
    E=CL/CD
    CP(I)=FF(LAMDA,E,B,X,TETA) *X*X
    CN(I)=C*CL/PI*(DSIN(TETA)+X*DCOS(TETA))**2*DCOS(TETA)*(1+
/      DTAN(TETA)/E)
    CT(I)=C*CL/PI*(DSIN(TETA)+X*DCOS(TETA))**2*DSIN(TETA)*(1-
/      1/DTAN(TETA)/E)
ENDIF
5 CONTINUE

C GÜÇ KATSAYISININ LİNEER İNTEGRASYONLA HESAPLANMASI
CPTOP=(CP(1)+CP(N+1))/2
DO 4 I=2,N
4 CPTOP=CPTOP+CP(I)
CPTOP=8/LAMDA/LAMDA*CPTOP*DX

C NORMAL KUVVET KATSAYISININ LİNEER İNTEGRASYONLA HESAPLANMASI
CNTOP=(CN(1)+CN(N+1))/2
DO 6 I=2,N
6 CNTOP=CNTOP+CN(I)
CNTOP=CNTOP*(1-RO)/N

C TEĞETSEL KUVVET KATSAYISININ LİNEER İNTEGRASYONLA HESAPLANMASI
CTTOP=(CT(1)+CT(N+1))/2
DO 7 I=2,N
7 CTTOP=CTTOP+CT(I)
CTTOP=CTTOP*(1-RO)/N

WRITE(10, '(/' CP =',F10.6,3X,' CN =',F10.6,3X,' CT =',
/F10.6)') CPTOP,CNTOP,CTTOP

RETURN
END.

```

```

*****
*
*      BU PROGRAM GEOMETRİSİ VERİLEN PALANIN FARKLI BİR
*      UÇ HİZ ORANINDA PERFORMANSINI HESAPLAR
*
*****

```

```

SUBROUTINE OFFDIZ(LAMDA,B,N,R0)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
REAL LAMDA
DIMENSION CP(100),CN(100),CT(100)
COMMON/BLOK1/R(100),VET(100),OA(100)
COMMON/BLOK2/A(10)

```

```

PI=3.141592654
WRITE(*, '(/' OFFDIZ ALT PROGRAMI'')')
WRITE(10, '(///' DİZAYN EDİLEN PALANIN FARKLI BİR'')')
WRITE(10, '( ' UÇ HİZ ORANINDA PERFORMANSI'',//)')
WRITE(10, '( ' LAMDA =',F5.2)' ) LAMDA
WRITE(10, '(///,2X,4HADIM,4X,1HR,6X,3HC/R,3X,7HOT. AÇ.,2X,
/4HTETA,4X,4HALFA,5X,3HCL1,5X,3HCL2/)' )

```

C NEGATİF AÇILARIN POZİTİF YAPILMASI

```

DO 5 I=1,N
IF(OA(I).LT.0) THEN
    OA(I)=OA(I-1)
    O=OA(I)
ELSE
    O=OA(I)
ENDIF

```

```

RR=R(I)
K=LAMDA*RR
C=VET(I)
CALL CLKOK(LAMDA,B,RR,O,C,TETA,CL,ALFA,K)
CD=A(7)*ALFA**3+A(8)*ALFA**2+A(9)*ALFA+A(10)
IF(K.EQ.1) THEN
    CP(I)=0
    CN(I)=0
    CT(I)=0
    GOTO 5

```

```

ELSE
    E=CL/CD
    CP(I)=FF(LAMDA,E,B,K,TETA) *X*X
    CN(I)=C*CL/PI*(DSIN(TETA)+X*DCOS(TETA))**2*DCOS(TETA)*(1+
/      DTAN(TETA)/E)
    CT(I)=C*CL/PI*(DSIN(TETA)+X*DCOS(TETA))**2*DSIN(TETA)*(1-
/      1/DTAN(TETA)/E)

```

```

    ENDIF
5 CONTINUE

```

C GÜÇ KATSAYISININ LINEER İNTEGRASYONLA HESAPLANMASI

DX=LAMDA*(1-R0)/N

CPTOP=(CP(1)+CP(N+1))/2

DO 4 I=2,N

4 CPTOP=CPTOP+CP(I)

CPTOP=8/LAMDA/LAMDA*CPTOP*DX

C NORMAL KUVVET KATSAYISININ LINEER İNTEGRASYONLA HESAPLANMASI

CNTOP=(CN(1)+CN(N+1))/2

DO 6 I=2,N

6 CNTOP=CNTOP+CN(I)

CNTOP=CNTOP*(1-R0)/N

C TEĞETSEL KUVVET KATSAYISININ LINEER İNTEGRASYONLA HESAPLANMASI

CTTOP=(CT(1)+CT(N+1))/2

DO 7 I=2,N

7 CTTOP=CTTOP+CT(I)

CTTOP=CTTOP*(1-R0)/N

WRITE(10, '(/' CP =',F10.6,3X,' CN =',F10.6,3X,' CT =',
/F10.6)') CPTOP,CNTOP,CTTOP

RETURN

END

FUNCTION CLX(ALFA)

IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)

COMMON/BLOK2/A(6)

IF(ALFA.LT.10) GOTO 10

IF(ALFA.LE.13) GOTO 20

GOTO 30

10 CLX=A(1)*ALFA+A(2)

GOTO 40

20 CLX=A(3)*ALFA**2+A(4)*ALFA+A(5)

GOTO 40

30 CLX=A(6)

40 RETURN

END

```

*****
*
*   BU PROGRAM GEOMETRİSİ VERİLEN PALANIN HER İSTASYONUNDA
*   TAŞIMA KATSAYISININ DEĞERİNİ HESAPLAR
*
*****

```

```

SUBROUTINE CLKOK(LAMDA,B,R,OA,C,TOPT,YCL1,ALFA,K)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
REAL LAMDA
DIMENSION TETA(500),CL1(500),CL2(500)
COMMON/BLOK2/A(6)

RAD=3.141592654/180
T=OA+RAD
CL11=HH(LAMDA,B,R,C,T)
2 T=T+RAD/10
CL12=HH(LAMDA,B,R,C,T)

IF(CL12.GT.CL11) THEN
    CL11=CL12
    GOTO 2
ELSE
    TETA(1)=T
    CL1(1)=CL12
    ALFA=(TETA(1)-OA)/RAD
    CL2(1)=CLX(ALFA)
ENDIF

IF(CL1(1).GT.CL2(1)) THEN
    I=1
5    I=I+1
    IF(I.GT.500) GOTO 14

    TETA(I)=TETA(I-1)+RAD/10
    T=TETA(I)
    CL1(I)=HH(LAMDA,B,R,C,T)
    ALFA=(TETA(I)-OA)/RAD
    CL2(I)=CLX(ALFA)
    IF(CL1(I).GT.CL2(I)) THEN
        GOTO 5
    ELSE
        AA=CL1(I-1)-CL2(I-1)
        BB=CL2(I)-CL1(I)
        CC=CL1(I-1)+CL2(I)
        DD=CL2(I-1)+CL1(I)
        TOPT=(TETA(I)*AA+TETA(I-1)*BB)/(CC-DD)
        YCL1=HH(LAMDA,B,R,C,TOPT)
        ALFA=(TOPT-OA)/RAD
        IF(ALFA.GT.13) WRITE(10,('( 'STALL DURUMU' '))
        YCL2=CLX(ALFA)
    ENDIF
    GOTO 15

```

```

ELSE
    I=1
10  I=I+1
    IF(I.GT.400) GOTO 14

    TETA(I)=TETA(I-1)+RAD/10
    T=TETA(I)
    CL1(I)=HH(LAMDA,B,R,C,T)
    ALFA=(TETA(I)-OA)/RAD
    CL2(I)=CLK(ALFA)

    IF(CL1(I).LT.CL2(I)) THEN
        GOTO 10
    ELSE
        AA=CL2(I-1)-CL1(I-1)
        BB=CL1(I)-CL2(I)
        CC=CL2(I-1)+CL1(I)
        DD=CL1(I-1)+CL2(I)
        TOPT=(TETA(I)*AA+TETA(I-1)*BB)/(CC-DD)
        YCL1=HH(LAMDA,B,R,C,TOPT)
        ALFA=(TOPT-OA)/RAD
        IF(ALFA.GT.13) WRITE(10, '(' 'STALL DURUMU' ')')
        YCL2=CLX(ALFA)
    ENDIF
    GOTO 15

ENDIF

14 WRITE(10, '(3X,F10.3,2X, ' ' KESİŞME NOKTASI YOKTUR.' ')') R
    K=1
    GOTO 16
15 WRITE(10, '(15,8F8.3)') I,R,C,OA/RAD,TOPT/RAD,(TOPT-OA)/RAD,
    /YCL1,YCL2
    K=2

16 RETURN
END

```

```

FUNCTION REGULA(M,LAMDA,E,B,CLDIZ,X,C,OA)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
REAL LAMDA

PI=3.1415926
R=X/LAMDA

IF(M.EQ.1) THEN
  T2=DATAN(1/X)
  TO=T2/1.55
  T1=T2/1.4
ELSE
  TO=C+0.02/R
  T1=C+0.06/R
ENDIF

IF(M.EQ.1) THEN
  FO=TT(LAMDA,E,B,X,TO)
  F1=TT(LAMDA,E,B,X,T1)
ELSE
  FO=GG(LAMDA,E,B,CLDIZ,X,C,TO)
  F1=GG(LAMDA,E,B,CLDIZ,X,C,T1)
ENDIF

KMAX=31
K=0
10 K=K+1
IF(K.GT.KMAX) THEN
  WRITE(*, '(' ' İTERASYON' ',I3,' ' ADIMDA YAKINSAMAMIŞTIR.' ')') KMAX
  GOTO 11
ENDIF

EM=(F1-FO)/(T1-TO)
T=T1-F1/EM

IF(M.EQ.1) THEN
  F=TT(LAMDA,E,B,X,T)
ELSE
  F=GG(LAMDA,E,B,CLDIZ,X,C,T)
ENDIF

IF(ABS(F).LE.0.00001) THEN
  REGULA=T
  RETURN
ENDIF

```

```

IF(F*F0.LT.0) THEN
  T1=T
  F1=F
ELSE
  T0=T
  F0=F
ENDIF
GOTO 10

```

```

11 RETURN
END

```

```

FUNCTION FF(LAMDA,E,B,X,T)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
REAL LAMDA

```

```

PI=3.1415926
XL=X/LAMDA
US=-B/2*(1-XL)/XL

```

```

F1=2/PI*DACOS(EXP(US/DSIN(T)))
F2=DSIN(T)**2
F3=(DCOS(T)-X*DSIN(T))*(DSIN(T)+X*DCOS(T))
F4=1-1/E/DTAN(T)
FF=F1*F2*F3*F4

```

```

RETURN
END

```

```

FUNCTION TT(LAMDA,E,B,X,T)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
REAL LAMDA

```

```

PI=3.141592654
XL=X/LAMDA
US=-B/2*(1-XL)/XL

```

```

F1=2/PI*DACOS(EXP(US/DSIN(T)))
F2=DSIN(T)**2
F3=(DCOS(T)-X*DSIN(T))*(DSIN(T)+X*DCOS(T))
F4=1-1/E/DTAN(T)
FF=F1*F2*F3*F4

```

```

T1=2/PI*US/DSIN(T)/DTAN(T)/DTAN(F1*PI/2)
T2=DSIN(2*T)
T3=(DCOS(T)-X*DSIN(T))**2-(DSIN(T)+X*DCOS(T))**2
T4=1/E/DSIN(T)**2
TT=FF*(T1/F1+T2/F2+T3/F3+T4/F4)

```

```

RETURN
END

```

```

FUNCTION GG(LAMDA,E,B,CLDIZ,X,C,T)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
REAL LAMDA

```

```

PI=3.1415926
R=X/LAMDA
US=-B/2*(1-R)/R

```

```

F=2/PI*DACOS(EXP(US/DSIN(T)))
F1=DSIN(T)+X*DCOS(T)
F2=DCOS(T)-X*DSIN(T)
SIGU=B*C/2/PI
GG=SIGU*CLDIZ*F1-4*F*DSIN(T)*F2

```

```

RETURN
END

```

```

FUNCTION HH(LAMDA,B,R,C,T)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
REAL LAMDA

```

```

PI=3.1415926
X=R*LAMDA
US=-B/2*(1-R)/R

```

```

F=2/PI*DACOS(EXP(US/DSIN(T)))
F1=DSIN(T)+X*DCOS(T)
F2=DCOS(T)-X*DSIN(T)
HH=8*PI*R/B/C*F*DSIN(T)*F2/F1

```

```

RETURN
END

```

UYGULAMA: Burada, (PALA D) ve (CL D) data dosyalarındaki başlangıç değerleri için, programın bir uygulamasına yer verilmektedir. PALA programına ait dosyalar aşağıda görülmektedir:

DOSYA ADI: PALA EXEC

FI 01 DISK PALA D
 FI 02 DISK CL D
 FI 10 DISK DUZ S
 FI 11 DISK PALA S
 FI 15 DISK TRAP S
 LOAD PALA(CLEAR START NOMAP

DOSYA ADI: PALA D

8 , 7.5, 61, 3, .9, 7.5, 0.1, 30

: lamda, lyeni, e, b, cldiz, alfa, r0, n

DOSYA ADI: CL D

.1016667
 .1333333
 -.0083333
 .2183333
 -.2
 .9
 .000007361
 .000028193
 .000015838
 .01

DOSYA ADI: PALA S

OPTIMUM PALAYA AİT HESAPLANAN DEĞERLER

LAMDA = 8.00

I	R	F	CP	C/R	TETA	OTURMA AÇISI
1	0.100000	1.000000	0.091144	0.160271	34.385030	26.885030
2	0.130000	1.000000	0.127508	0.153309	29.409970	21.909970
3	0.160000	1.000000	0.163462	0.142185	25.491755	17.991755
4	0.190000	1.000000	0.198731	0.130369	22.386845	14.886845
5	0.220000	1.000000	0.233273	0.119228	19.896454	12.396454
6	0.250000	1.000000	0.267118	0.109204	17.870639	10.370639
7	0.280000	0.999999	0.300310	0.100354	16.199290	8.699290
8	0.310000	0.999999	0.332893	0.092591	14.801882	7.301882
9	0.340000	0.999997	0.364903	0.085785	13.619150	6.119150
10	0.370000	0.999995	0.396370	0.079804	12.606984	5.106984
11	0.400000	0.999990	0.427317	0.074525	11.732125	4.232125
12	0.430000	0.999981	0.457762	0.069846	10.969151	3.469151
13	0.460000	0.999966	0.487720	0.065678	10.298367	2.798367
14	0.490000	0.999939	0.517199	0.061947	9.704243	2.204243
15	0.520000	0.999892	0.546204	0.058591	9.174629	1.674629
16	0.550000	0.999809	0.574734	0.055560	8.699551	1.199551
17	0.580000	0.999665	0.602776	0.052810	8.270933	0.770933
18	0.610000	0.999415	0.630304	0.050305	7.882086	0.382086
19	0.640000	0.998984	0.657264	0.048013	7.527381	0.027381
20	0.670000	0.998244	0.683557	0.045906	7.201983	-0.298017
21	0.700000	0.996976	0.709006	0.043958	6.901639	-0.598361
22	0.730000	0.994816	0.733298	0.042142	6.622499	-0.877501
23	0.760000	0.991147	0.755884	0.040428	6.360976	-1.139024
24	0.790000	0.984936	0.775811	0.038774	6.113634	-1.386366
25	0.820000	0.974446	0.791423	0.037119	5.877119	-1.622881
26	0.850000	0.956733	0.799841	0.035365	5.648173	-1.851827
27	0.880000	0.926714	0.795999	0.033345	5.423756	-2.076244
28	0.910000	0.875268	0.770762	0.030756	5.201381	-2.298619
29	0.940000	0.784638	0.706509	0.027009	4.979771	-2.520229
30	0.970000	0.612538	0.562207	0.020705	4.759872	-2.740128
31	1.000000	0.000124	0.000115	0.000004	4.548914	-2.951086

CPMAX = 0.462473 CN = 0.265925 CT = 0.036713

DOSYA ADI: TRAP S

TRAPEZE DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ PALAYA AIT
HESAPLANAN DEĞERLER

LAMDA = 8.00

ADIM = 25 SİVRİLME ORANI= 5.6

A = -0.105 B = 0.125

I	R	CP(I)	C/R	TETA	OTURMA AÇISI
1	0.100000	0.009822	0.114588	50.425156	42.925156
2	0.130000	0.018011	0.111450	42.868380	35.368380
3	0.160000	0.029524	0.108313	35.300100	29.388103
4	0.190000	0.044736	0.105175	32.123314	24.623314
5	0.220000	0.063879	0.102038	28.278880	20.778880
6	0.250000	0.087047	0.098900	25.131831	17.631831
7	0.280000	0.114183	0.095763	22.518517	15.018517
8	0.310000	0.145118	0.092625	20.319005	12.819005
9	0.340000	0.179552	0.089488	18.445219	10.945219
10	0.370000	0.217073	0.086350	16.831760	9.331760
11	0.400000	0.257209	0.083213	15.429126	7.929126
12	0.430000	0.299370	0.080075	14.200083	6.700083
13	0.460000	0.342934	0.076938	13.115782	5.615782
14	0.490000	0.387284	0.073800	12.153529	4.653529
15	0.520000	0.431750	0.070662	11.295900	3.795900
16	0.550000	0.475696	0.067525	10.529050	3.029050
17	0.580000	0.518486	0.064387	9.842381	2.342381
18	0.610000	0.559626	0.061250	9.226888	1.726888
19	0.640000	0.598640	0.058112	8.675772	1.175772
20	0.670000	0.635109	0.054975	8.183742	0.683742
21	0.700000	0.668734	0.051837	7.745692	0.245692
22	0.730000	0.699154	0.048700	7.357354	-0.142646
23	0.760000	0.725911	0.045562	7.013945	-0.486055
24	0.790000	0.748277	0.042425	6.709451	-0.790549
25	0.820000	0.765011	0.039287	6.435698	-1.064302
26	0.850000	0.774031	0.036150	6.181048	-1.318952
27	0.880000	0.771833	0.033012	5.927802	-1.572198
28	0.910000	0.752180	0.029875	5.642662	-1.857338
29	0.940000	0.700393	0.026737	5.242523	-2.257477
30	0.970000	0.548873	0.023600	4.314775	-3.185225
31	1.000000	0.447279	0.020462	3.387027	-4.112973

CP = 0.383645 CN = 0.294868 CT = 0.048917

JOŞYA ADI: DÜZ S

OTURMA AÇISI DAĞILIMI DÜZELTİLEN
PALAYA AİT HESAPLANAN DEĞERLER

LAMDA = 8.00

ADIM	R	C/R	OT. AÇ.	TETA	ALFA	CL1	CL2
98	0.100	0.115	25.180	35.913	10.733	1.183	1.183
79	0.130	0.111	24.018	32.859	8.842	1.032	1.032
62	0.160	0.108	22.855	30.052	7.198	0.865	0.865
48	0.190	0.105	21.692	27.455	5.763	0.719	0.719
36	0.220	0.102	20.530	25.126	4.597	0.601	0.601
27	0.250	0.099	19.367	23.057	3.690	0.508	0.508
21	0.280	0.096	18.204	21.218	3.014	0.440	0.440
16	0.310	0.093	17.041	19.577	2.535	0.391	0.391
13	0.340	0.089	15.879	18.104	2.225	0.360	0.360
11	0.370	0.086	14.716	16.773	2.057	0.342	0.342
11	0.400	0.083	13.553	15.564	2.010	0.338	0.338
11	0.430	0.080	12.391	14.457	2.066	0.343	0.343
13	0.460	0.077	11.228	13.440	2.211	0.358	0.358
15	0.490	0.074	10.065	12.499	2.433	0.381	0.381
18	0.520	0.071	8.903	11.625	2.722	0.410	0.410
21	0.550	0.068	7.740	10.809	3.069	0.445	0.445
25	0.580	0.064	6.577	10.045	3.468	0.486	0.486
30	0.610	0.061	5.415	9.327	3.913	0.531	0.531
32	0.640	0.058	4.252	8.650	4.398	0.581	0.581
28	0.670	0.055	3.089	8.010	4.920	0.634	0.634
24	0.700	0.052	1.927	7.402	5.475	0.690	0.690
20	0.730	0.049	0.764	6.824	6.060	0.750	0.749
21	0.760	0.046	0.764	6.724	5.960	0.739	0.739
22	0.790	0.042	0.764	6.623	5.859	0.729	0.729
23	0.820	0.039	0.764	6.519	5.755	0.719	0.718
24	0.850	0.036	0.764	6.407	5.643	0.707	0.707
25	0.880	0.033	0.764	6.279	5.515	0.694	0.694
26	0.910	0.030	0.764	6.122	5.358	0.678	0.678
27	0.940	0.027	0.764	5.903	5.139	0.656	0.656
27	0.970	0.024	0.764	5.495	4.731	0.614	0.614

CP = 0.979319 CN = 0.188692 CT = 0.028721

DOSYA ADI: DUZ S

DİZAYN EDİLEN PALANIN FARKLI BİR
UÇ HIZ ORANINDA PERFORMANSI

LAMDA = 7.50

ADIM	R	C/R	OT. AÇ.	TETA	ALFA	CL1	CL2
117	0.100	0.115	25.180	37.804	12.623	1.228	1.228
90	0.130	0.111	24.018	33.918	9.900	1.140	1.140
73	0.160	0.108	22.855	31.138	8.284	0.975	0.975
59	0.190	0.105	21.692	28.524	6.832	0.828	0.828
47	0.220	0.102	20.530	26.156	5.626	0.705	0.705
37	0.250	0.099	19.367	24.039	4.672	0.608	0.608
30	0.280	0.096	18.204	22.151	3.946	0.535	0.535
25	0.310	0.093	17.041	20.463	3.421	0.481	0.481
21	0.340	0.089	15.879	18.946	3.067	0.445	0.445
19	0.370	0.086	14.716	17.576	2.860	0.424	0.424
18	0.400	0.083	13.553	16.332	2.778	0.416	0.416
19	0.430	0.080	12.391	15.195	2.804	0.418	0.418
20	0.460	0.077	11.228	14.150	2.922	0.430	0.430
22	0.490	0.074	10.065	13.187	3.121	0.451	0.451
24	0.520	0.071	8.903	12.294	3.391	0.478	0.478
28	0.550	0.068	7.740	11.463	3.723	0.512	0.512
32	0.580	0.064	6.577	10.687	4.110	0.551	0.551
36	0.610	0.061	5.415	9.961	4.546	0.596	0.596
35	0.640	0.058	4.252	9.279	5.027	0.644	0.644
31	0.670	0.055	3.089	8.638	5.549	0.698	0.698
28	0.700	0.052	1.927	8.035	6.109	0.754	0.754
24	0.730	0.049	0.764	7.467	6.703	0.815	0.815
24	0.760	0.046	0.764	7.338	6.574	0.802	0.802
25	0.790	0.042	0.764	7.210	6.446	0.789	0.789
27	0.820	0.039	0.764	7.080	6.316	0.776	0.775
27	0.850	0.036	0.764	6.942	6.178	0.762	0.761
28	0.880	0.033	0.764	6.790	6.026	0.746	0.746
29	0.910	0.030	0.764	6.610	5.846	0.728	0.728
30	0.940	0.027	0.764	6.368	5.604	0.703	0.703
29	0.970	0.024	0.764	5.931	5.167	0.659	0.659

CP = 0.383658 CN = 0.185280 CT = 0.031305

ÖZGEÇMİŞ

Mühendis Göksun Beşerik, 1969 yılında Eskişehir’de doğmuştur. Orta öğrenimini 1986’da İstanbul Yeşilköy 50. Yıl Lisesi’nde tamamlayarak, aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi Uçak Mühendisliği Bölümünde yüksek öğrenimine başlamıştır. Bu bölümden 1990 yılında 6.lıkla mezun olduktan sonra aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Uçak Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans öğrenimine başlamıştır. Temmuz 1991’den beri aynı fakültenin Uçak Mühendisliği Kürsüsünde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.