İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PERVANE ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Lütfi ÖNER

Anabilim Dalı : Uçak ve Uzay Mühendisliği

Programı : Uçak ve Uzay Mühendisliği

HAZİRAN 2010

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PERVANE ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Lütfi ÖNER
(511061016)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 05 Mayıs 2010
Tezin Savunulduğu Tarih : 10 Haziran 2010

Tez Danışmanı : Prof. Dr. M. Adil YÜKSELEN (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. M. Şerif KAVSAOĞLU (İTÜ)
Prof. Dr. Seyhan ONBAŞIOĞLU (İTÜ)

HAZİRAN 2010

İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇİNDEKİLER ..... **vii**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xi**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xiii**
ÖZET ..... **xv**
SUMMARY ..... **xvii**
1. GİRİŞ **1**
1.1. Genel Bilgiler 4
1.1.1. Pervane geometrisi 4
1.1.2. Pervane hareketi 6
1.1.3. İndükleme faktörleri 7
2. PERVANE TEORİSİ **11**
2.1. Eksenel Momentum Teorisi 11
2.2. Genel Momentum Teorisi 16
2.2.1. Froude teorisi 16
2.2.2. Glauert teorisi 18
2.3. Pala Elemanı Teorisi 19
2.4. Pala Elemanı-Momentum Teorisi 23
3. OPTİMUM PERVANE **25**
3.1. Minimum İndüklenmiş Sürükleme 25
3.2. Pala Sayısının Minimum Enerji Kaybına Etkisi 29
3.3. Helisel Girdap Katmanının Etrafındaki Potansiyel Akım 30
3.4. Ağır Yüklü Pervaneler İçin Düzeltme 30
4. PERVANE ANALİZİ **31**
4.1. Klasik Yöntem İle Analiz Prosedürü 31
4.2. Analiz Prosedürü İçin Akış Diyagramı 33
4.3. CFD Yöntemi İle Analiz Prosedürü 35
4.3.1. Problemin tanımlanması 36
4.3.2. Ağ oluşturulması 37
4.4. Test Pervaneleri Ve Sonuçlar 39
4.5. Kesit Karakteristikleri 40
5. SONUÇLAR **43**
KAYNAKLAR **47**
EKLER **51**
ÖZGEÇMİŞ **61**

KISALTMALAR

$\mathbf{B}$: Pala sayısı
$\mathbf{R_{hub}}$: Göbek yarıçapı (m)
$\mathbf{R_{prop}}$: Pervane yarıçapı (m)
$\mathbf{D_{prop}}$: Pervane çapı (m)
$\mathbf{c}$: Veter (m)
$\bar{\mathbf{c}}$: Boyutsuz veter
$\mathbf{r}$: Dönme düzleminde yarıçap (m)
$\mathbf{r'}$: Uzak izde yarıçap (m)
$\boldsymbol{\xi}$: Boyutsuz yarıçap
$\boldsymbol{\sigma}$: Katılık oranı
$\mathbf{RPM}$: Devir sayısı $(devir/dakika)$
$\mathbf{n}$: Devir sayısı $(devir/saniye)$
$\mathbf{V_\infty}$: Serbest akım hızı (m/s)
$\boldsymbol{\Omega, \omega}$: Açısal hız (rad/s) $(2\pi n)$
$\mathbf{V_A}$: Eksenel hız (m/s)
$\mathbf{V_T}$: Çizgisel hız (m/s)
$\mathbf{W}$: Local etkin akım hızı (m/s)
$\mathbf{x}$: Lokal hız oranı $(r\Omega/V_\infty)$
$\boldsymbol{\lambda}$: Uç Hız oranı $\left(V_\infty/R_{prop}\Omega\right)$
$\boldsymbol{\beta_{prop}}$: Pala oturma açısı (°)
$\boldsymbol{\beta}$: Kesit oturma açısı (°)
$\boldsymbol{\alpha}$: Hücum açısı (°)
$\boldsymbol{\phi}$: İndüklenmiş akım hızı doğrultusu (°)
$\boldsymbol{\phi_{tip}}$: Pala ucundaki indüklenmiş akım hızı doğrultusu (°)
$\mathbf{I_a}$: Eksenel indükleme faktörü (Dönme düzleminde)
$\mathbf{I_t}$: Çizgisel indükleme faktörü (Dönme düzleminde)
$\mathbf{I_r}$: Radyal indükleme faktörü (Dönme düzleminde)
$\mathbf{I_a'}$: Eksenel indükleme faktörü (Uzak izde)
$\mathbf{I_t'}$: Çizgisel indükleme faktörü (Uzak izde)
$\mathbf{I_r'}$: Radyal indükleme faktörü (Uzak izde)
$\mathbf{C_d}$: Sürükleme katsayısı (İki boyutlu)
$\mathbf{C_D}$: Sürükleme katsayısı (Üç boyutlu)
$\mathbf{C_l}$: Taşıma katsayısı (İki boyutlu)
$\mathbf{C_{ld}}$: Tasarım taşıma katsayısı (İki boyutlu)
$\mathbf{C_L}$: Taşıma katsayısı (Üç boyutlu)
$\mathbf{C_T}$: İtki katsayısı (Açısal hız tanımlı)
$\mathbf{C_x}$: Tork kuvveti katsayısı
$\mathbf{C_y}$: İtki kuvveti katsayısı
$\mathbf{T_C}$: İtki katsayısı (Eksenel hız tanımlı)
$\mathbf{C_P}$: Güç katsayısı (Açısal hız tanımlı)
$\mathbf{P_C}$: Güç katsayısı (Eksenel hız tanımlı)

J **:** İlerleme oranı
η **:** Pervane verimi
ρ **:** Akışkan yoğunluğu (kg/m^3)
μ **:** Akışkan viskozitesi (Ns/m^2)
ṁ **:** Kütlesel debi (kg/s)
F : Prandtl faktörü
K : Goldstein faktörü
K′ : Goldstein faktörünün boyutsuz yarıçapa göre türevi
ζ : Girdap ilerleme oranı
δ : Yakınsama kriteri

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Çeşitli uçak pervanelerinin göbek yarıçapları 4
Çizelge 4.1 : Deneylerin hata oranları (Yaggy, 1960)..... 36
Çizelge 4.2 : CFD Simülasyonları..... 36
Çizelge 4.3 : Test pervanelerinin geometrik özellikleri..... 39
Çizelge 4.4 : Tasarım noktalarında incelenen pervaneler..... 39
Çizelge 4.5 : NACA 0009 kesitinin deney verileri aralığı..... 40
Çizelge A.1 : Pervane (1)'in geometrisi (Adkins, 1994)..... 53
Çizelge A.2 : Pervane (2)'nin geometrisi (Sholar, 1985)..... 53
Çizelge A.3 : Pervane (3a)'nın geometrisi (Bauer, 1997)..... 54
Çizelge A.4 : Pervane (3b)'nin geometrisi (Bauer, 1997)..... 54
Çizelge A.5 : Pervane (3c)'nin geometrisi (Bauer, 1997)..... 54
Çizelge A.6 : Pervane (3d)'nin geometrisi (Bauer, 1997)..... 55
Çizelge A.7 : Pervane (3e)'nin geometrisi (Bauer, 1997)..... 55
Çizelge A.8 : Pervane (4)'ün geometrisi, $\beta prop = 26.6$, (Yaggy, 1960)..... 56
Çizelge A.9 : Pervane (4)'ün geometrisi, $\beta prop = 6$, (Yaggy, 1960)..... 56
Çizelge A.10 : Pervane (4)'ün geometrisi, $\beta prop = 12$, (Yaggy, 1960)..... 57
Çizelge A.11 : Pervane (4)'ün geometrisi, $\beta prop = 18$, (Yaggy, 1960)..... 57
Çizelge A.12 : Pervane (4)'ün geometrisi, $\beta prop = 24$, (Yaggy, 1960)..... 58
Çizelge A.13 : Pervane (4)'ün geometrisi, $\beta prop = 30$, (Yaggy, 1960)..... 58
Çizelge A.14 : Pervane (4)'ün geometrisi, $\beta prop = 36$, (Yaggy, 1960)..... 59
Çizelge A.15 : Pervane (4)'ün geometrisi, $\beta prop = 40$, (Yaggy, 1960)..... 59

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Pala boyunca hızların ve kesit oturma açısının ilişkisi (İndüklemeler ihmal edilmiştir.) 5
Şekil 1.2 : Taşıma ve sürükleme kuvvetlerinin itki ve torka katkısı 6
Şekil 1.3 : Eksenel ve çizgisel indükleme faktörleri..... 8
Şekil 2.1 : Eksenel momentum transferinde hız ve basınç değişimleri 12
Şekil 2.2 : Dönme düzleminde alınan bir diferansiyel şerit ve ondan geçen havanın debisi..... 13
Şekil 2.3 : Eksenel momentum teorisinde ideal verimin itki ve güç katsayısı ile değişimi 15
Şekil 2.4 : Genel momentum teorisinde hızlar ve indüklemeler (Gur, 2008)..... 19
Şekil 2.5 : r yarıçapsal konumundaki bir pala elemanı ve ona etkiyen etkin akım doğrultusu..... 20
Şekil 2.6 : Pala elemanı ve momentum teorilerinde ideal verim çelişkisi (Glauert, 1948) 22
Şekil 3.1 : Kanat ve pervane arkasında oluşan girdaplar (Larrabee, 1979)..... 26
Şekil 3.2 : Rijit ve helisel bir girdap katmanının hareketindeki hızlar (Larrabee, 1979)..... 27
Şekil 3.3 : Rijit olmayan bir girdap katmanının yayılması (Larrabee, 1984)..... 27
Şekil 3.4 : Rijit olmayan bir girdap katmanının itki ve tork yönündeki hız bileşenleri (Larrabee, 1984) 28
Şekil 3.5 : Pala sayısı kadar yarı-sonsuz düz plakanın etrafındaki analitik akıştan alınan Prandtl faktörü (Larrabee, 1979)..... 29
Şekil 4.1 : Elde edilen analiz akış diyagramı..... 34
Şekil 4.2 : CFD simülasyonları gerçekleştirilen pervane modeli (Yaggy, 1960)..... 35
Şekil 4.3 : (a) Kesitler (b) Dönme ekseni (c) Göbek (d) Genel görünüm 37
Şekil 4.4 : CFD simülasyonlarında çözüm hacmi 38
Şekil 4.5 : Göbek ve pala üzerindeki yüzey elemanları..... 38
Şekil 4.6 : NACA 0009 kesitinin $\alpha - Cl$ grafiği (Sheldahl, 1981) 40
Şekil 4.7 : NACA 0009 kesitinin $\alpha - Cd$ grafiği (Sheldahl, 1981) 41
Şekil 4.8 : NACA 0009 kesitinin $\alpha - Cl$ grafiği (Abbott, 1945) 41
Şekil 4.9 : NACA 0009 kesitinin $Cd - Cl$ grafiği (Abbott, 1945)..... 42
Şekil 5.1 : Pervane-4 için $CT - J$ grafiği..... 43
Şekil 5.2 : Pervane-4'ün 24° oturma açısında çeşitli ilerleme oranları için pala boyunca hücum açısı dağılımı..... 44
Şekil 5.3 : Pervane-4 için $CP - J$ grafiği..... 45

,

PERVANE ANALİZİ

ÖZET

Bu çalışmada pervane analizi üzerine bir inceleme sunulmuştur. Akustik konuları kapsam dışında tutulmuş ve analiz yöntemleri olarak klasik pala elemanı-momentum teorisi ve CFD simülasyonları ele alınmıştır.

Literatürde klasik teorinin iki kısımda incelendiği görülmektedir. Bunlar pala elemanı-basitleştirilmiş momentum ve pala elemanı-genel momentum teorileridir. (Gur, 2008) Bu teorilerin karşılaştırılması Gur (2008) tarafından yapılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda daha karmaşık olmasına rağmen pala elemanı-genel momentum teorisinin pala elemanı-basitleştirilmiş momentum teorisi ile benzer sonuçlar verdiği görülmüş ve bu bağlamda basitleştirilmiş teorinin analiz problemlerinde tercih edilmesinin daha mantıklı olacağı yargısına varmıştır. Fakat unutulmamalıdır ki bu yargı ok açısı bulunmayan ya da düşük ok açılı palalara sahip pervaneler için geçerlidir.

Gur'un çalışmasının verdiği bilgiler bir bütün olarak ele alınırsa klasik teorinin geldiği noktayı işaret etmektedir. Bu noktanın pervane analizinde nasıl bir yer edindiğini görmek için bir analiz aracı bilgisayar ortamında elde edilmiştir. Bu araç elde edilirken Larrabee (1979) ve Adkins (1994) tarafından önerilen denklemler esas alınmıştır. Bu hesaplama aracı tasarım noktalarında performans değerleri teorik olarak bilinen yedi adet pervanenin analizi ile test edilmiştir. Test sonucunda klasik teorinin (tasarım noktasında) itki, güç ve verim hesaplamalarında başarılı olduğu gözlenmiştir. Söz konusu pervane bilgileri Adkins (1994), Larrabee (1979) ve Bauer (1997)'den alınmıştır.

Klasik teorinin tasarım noktası dışındaki hesaplama başarısını görmek için deney verilerine ihtiyaç duyulmuştur. Bu bağlamda Yaggy (1960) tasarım noktası ve dışında performans değerleri verilen bir pervane için çeşitli ilerleme oranları ve oturma açılarında klasik teori ile analiz yapılmıştır. Bu pervane NACA 0009 kesitinden imal edilmiştir. Klasik teoride ihtiyaç duyulan kesit karakteristikleri çeşitli Reynolds sayısı ve hücum açısı aralıklarında Abbott (1945) ve Sheldahl (1981)'den alınmıştır. Sonuç olarak tasarım noktasından uzaklaşıldıkça hata payının arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca düşük ilerleme oranları için itki eğrisinin eğilimi deney verileri ile uyum sağlamamıştır.

Klasik teorinin yanı sıra pervane analizinde kullanılan bir diğer yöntem de hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) simülasyonlarıdır. Yaggy (1960)'da sunulan ve klasik teori ile analiz edilen pervane üç oturma açısı ve çeşitli ilerleme oranlarında toplam on dört CFD simülasyonu ile analiz edilmiştir. Simülasyonlar sonucunda tasarım noktasında yalnızca itki düşük hata payı ile hesaplanabilmiştir. Güç ve dolayısıyla verim hesabının hatası yüksek çıkmıştır. Bu durumun simülasyonların optimize edilmesi ile giderilebileceği ifade edilmiştir. Ayrıca tasarım noktasından uzaklaşıldıkça hatanın yükseldiği ve düşük ilerleme oranları için itki eğiliminin klasik teoriye nazaran deney verilerine uyduğu görülmüştür.

ANALYSIS OF PROPELLERS

SUMMARY

This study presents a review of propeller aerodynamics. Analysis methods are summarized excluding acoustics phenomenoa. These methods are classical blade element-momentum theory and computational fluid dynamics (CFD) simulations.

In general opinion, blade element-momentum theory is separated into two point of views; blade element-general momentum and blade element-simplified momentum theory. (Gur, 2008) Gur (2008) also evaluates the comparison of these theories. As a result of this evaluation, Gur states that general momentum theory is based on very complicated equations though its results are almost same with the results of the simplified theory. Consequently, simplified momentum theory can be very practical on propeller analysis. He also states that this choice is significant only for straight-blades that have zero or small sweep angles.

Gur's study points out the status of the classical blade element-momentum theory. In order to see the value of this status on the analysis problems of the propellers, a calculation software is written. The software is generated based on the equations presented by Larrabee (1979) and Adkins (1994). Seven analysis calculations are done on the design points thus the validation of this calculation software is done. The main result of this validation is that the calculation of thrust, power and efficiency is very satisfactory at the design point of the propellers. Related propeller data is taken from Adkins (1994), Larrabee (1979) and Bauer (1997).

In order to test the classical theory around the design point of propellers experimental data is required. In this respect, the study of Yaggy (1960) which presents the performance data of a few propellers tested in wind tunnel is considered. One of these propellers has NACA 0009 airfoil sections. The classical theory needs section characteristics in several Reynolds number and angle of attack ranges and this data is taken from Abbott (1945) and Sheldahl (1981). As a result of this test, it is seen that the error percentage increases while leaving the design points. Additionally, the trend of the thrust constant curve disagrees with the experimental one for low advance ratios.

Besides the classical theory, CFD method is also used on the analysis problems. In this study CFD simulations are applied to the propeller analyzed with the classical theory. The configurations of these simulations are set at three blade-pitch angles and several advance ratios. Fourteen simulations are executed. Consequently, only thrust coefficient could be calculated with minor error. It is stated that this problem can be overcame by optimizing CFD simulations. Also, the trend of the thrust constant curve agrees with the experimental one for low advance ratios.

1. GİRİŞ

Bir motora bağlı olarak dönen bir pervane kinetik enerjisini havaya aktararak dönme düzleminin önü ile arkası arasında bir basınç farklılığı oluşturur. Bu fark sayesinde oluşan itiş kuvveti uçağın veya geminin ihtiyacı olan ilerleme hızını sağlar. Pervaneler basit çalışma prensiplerinden ötürü uçaklarda ve gemilerde yaygın olarak tercih edilmektedir.

Bilindiği üzere pervane teorisi momentum ve pala elemanı olmak üzere iki yaklaşım ile ele alınmaktadır. Momentum teorisi sürtünmesiz akışkan hareketini ve sonsuz pala sayısını incelediğinden, ideal sınırı temsil etmektedir. (Rankine, 1865) (Froude, 1889) (Carlton, 2007) Fakat momentum teorisi bir pervanenin verimiyle ilgili yararlı bilgi vermekle birlikte pervane palalarının tasarımı için gerekli bilgiyi üretemez. Sadece, çok palalı pervanelerde palalara etkiyen akım hızları ortalama akım hızından çok farklı olmadığından akım hızları ile ilgili bilgi verebilir. (Theodorsen, 1948)

Pala elemanı teorisi ise geometrik büyüklükleri ve kesit karakteristiklerini hesaplar içerisine kattığından tasarım problemlerinde öne çıkmaktadır. (Froude, 1878) (Drzewiecki, 1904) (Carlton, 2007) Pala elemanı yaklaşımında etkin akım hızının tayini için gerekli olan indükleme faktörleri girdi olarak kullanılır. (Gur, 2008) İndükleme faktörlerinin ise tasarım parametrelerine bağlı olması ve fiziksel eşitliklerde kapalı formda bulunması pala elemanı yaklaşımı ile momentum yaklaşımının birlikte kullanıldığı pala elemanı-momentum yaklaşımını doğurmuştur. Bu yaklaşımda momentum transferinden elde edilen enerji ve palalara etkiyen aerodinamik kuvvetlerin yaptığı iş indüklemeler vasıtasıyla hesaplanarak birbirlerine eşitlenir. Bu aşamada iteratif hesaplama tekniğine gerek duyulur.

Aerodinamik kuvvetler zamana bağlı ve zamandan bağımsız olmak üzere iki farklı sınıfta incelenebilir. Zamana bağlı yükler temel olarak pervaneden geçen akımın indüklemeler sebebiyle yarıçap boyunca değişim göstermesinden kaynaklanır. Bu değişim itki ve torkun yarıçap boyunca çalkantılaşmasına bu da zamana bağlı yüklere neden olur.

Bu problem modern pervanelerde değişken hatve tekniği ile aşılmaya çalışılır. (Gur, 2005) Tasarım koşulları altındaki çalışma rejimlerinde ise indüklemelerin minimum olduğu kabul edilerek aerodinamik yüklerin zamandan bağımsız olduğu varsayılır ve bu yüklerin bilinmesi tasarım problemleri için oldukça önemlidir.

Aerodinamik kuvvetlerin bir kısmı arzu edilen itki kuvvetini sağlarken bir kısmı da kayıplar olarak akım alanına transfer edilir. Söz konusu kayıplar sürtünmeli akıştan kaynaklanmaktadır ve iki bileşene sahiptir: Profil sürüklemesi ve indüklenmiş sürükleme. (Carlton, 2007) Profil sürüklemesi tasarım aşamasında minimize edilebilirken indüklenmiş sürüklemenin hesabı için iz bölgesindeki girdapların hareketinin incelenmesi gerekir. Bu bağlamda bir pervanenin minimum indüklenmiş sürüklemeye maruz kalması için iz bölgesine yaydığı girdapların rijit (ve helisel) bir yörünge izlemesi gerektiği Betz tarafından ifade edilmiştir. (Betz, 1919) Böylece optimum pervane veya minimum enerji kaybı şartı ortaya konularak kanatlardaki eliptik yükleme gibi pervane palası boyunca optimum bir yükleme bulunması gerektiği anlaşılmıştır. (Theodorsen, 1948) (Carlton, 2007)

Betz'in optimum pervane yaklaşımında pala sayısı sonsuz kabul edilmiştir. Prandtl Betz'in çalışmasına ilaveten pala sayısının sonlu değerleri için (açısal) momentum kayıp faktörünü formüle etmiştir. (Prandtl, 1919) 1929 yılına gelindiğinde ise Goldstein hafif yüklü ve küçük ilerleme oranlarında işlev gören pervaneler için potansiyel akım problemini analitik olarak çözmüştür. (Goldstein, 1929) Theodorsen'in belirttiği üzere bu çözüm pervane teorisinin gelişmesinde en önemli aşamadır. (Theodorsen, 1948) Goldstein'in hafif yükleme koşulu altında elde ettiği (açısal) momentum kayıp faktörlerinin ağır yükleme altındaki pervaneler için de kullanılabileceği Theodorsen tarafından ispatlanmıştır. (Theodorsen, 1948)

Optimum pervane şartının iz bölgesindeki girdap hareketi ile ortaya konması analiz ve tasarım terimleri arasına bir yenisini daha eklemiştir. Bu terim rijit-girdap katmanının pervaneden uzaklaşma hızının serbest akım hızına oranı olan ilerleme oranıdır. Girdap ilerleme oranı pervane düzlemindeki veya uzak izdeki sirkülasyonun dağılımından elde edilir ve bilindiği takdirde itki, tork ve verim hesaplanabilir. (Theodorsen, 1948)

Optimum pervanelerin analizi ve tasarımı için girdap ilerleme oranını da içeren basit ve doğru bir prosedür Larrabee (1979) tarafından ortaya konmuştur.

Fakat bu prosedürde yalnızca hafif yüklü pervaneler göz önünde bulundurulmuş ve küçük açı kabulleri ile etkin akım doğrultusu boyutsuz lokal hız oranına bağlanmıştır. Ayrıca indüklemeler hesap edilirken kesit sürüklemeleri ihmal edilmiştir. Bu eksiklikler Adkins tarafından giderilmiştir. (Adkins, 1994)

Adkins küçük açı kabullerini ortadan kaldırarak etkin akım doğrultusunu hem lokal hız oranına hem de girdap ilerleme oranına bağlamıştır. Küçük açı kabullerinin ortadan kalkması analiz ve tasarım prosedürlerinin tam uyuşan sonuçlar vermesini de sağlamıştır. Ayrıca Adkins'in prosedürleründe kesit sürüklemesinin girdap ilerleme oranı üzerindeki etkisi görülebilmektedir.

Bilindiği üzere geometrisi bilinen bir pervanenin performansının hesaplamalı analizi için klasik pala elemanı teorisinin sunduğu prosedür ve CFD yöntemi seçenekler arasındadır. Klasik teori ile analiz hesapları yapabilmek için iki boyutlu kesit karakteristiklerinin geniş hücum açısı ve Reynolds sayısı aralıklarında bilinmesi gereklidir. Bu takdirde analiz hesaplarını kısa sürelerde yapmak mümkündür. CFD yöntemi ise pahalı yazılımlar ve güçlü bilgisayarlar ile uzun sürelerde gerçekleştirilir. Fakat klasik teorinin aksine kesit karakteristiklerinin bilinmesine gerek yoktur.

Literatürde klasik teorinin pala elemanı-genel momentum ve pala elemanı-basitleştirmiş momentum teorisi olmak üzere iki kısımda incelendiği görülmektedir. (Gur, 2008) Pala elemanı-genel momentum teorisi eksenel, çizgisel ve radyal indüklemelerin hem dönme düzleminde hem de uzak izde hesaplanmasına dayanmaktadır. Dolayısıyla daha fazla bilinmeyen içeren karmaşık eşitlikler ile karşılaşılır. Bu yüzden eşitliklerin bazı sadeleştirmeler ile basitleştirilebileceği düşünülmüş ve ortaya basitleştirilmiş teori çıkmıştır. (Gur, 2008)

Basitleştirilmiş teoride ortaya çıkan itki teriminin eksenel momentum teorisindeki itki terimi ile tork teriminin ise Froude'un genel momentum teorisindeki tork terimi ile aynı olduğu göze çarpmaktadır. Bu durumda her iki teori de Glauert'in teorisinin özel halleri olarak nitelenebilir. Basitleştirilmiş teori ile genel teorinin deney verileri ile karşılaştırılması Gur (2008) tarafından verilmektedir. Sonuç olarak ok açısız veya düşük ok açılı palaların analizinde basitleştirilmiş teorinin genel teori ile benzer sonuçlar verdiği belirtilmiştir.

Bu bağlamda daha pratik olduğu için basitleştirilmiş teorinin söz konusu problemlerde tercih edilmesinin mantıklı olacağı ifade edilmiştir. (Gur, 2008)

Bu çalışmanın amacı klasik ve modern yöntemlerin analiz problemlerindeki yerinin incelenmesidir. Gur'un sunduğu bilgiler ışığında klasik teorinin pala elemanı-basitleştirilmiş momentum teorisi ile temsil edilebileceği düşünülerek Larrabee (1979) ve Adkins (1994) tarafından önerilen denklemler ile bir hesaplama aracı bilgisayar ortamında elde edilmiştir. CFD simülasyonlarında ise FLUENT ticari çözücüsü tercih edilmiştir. Literatürden seçilen çeşitli pervaneler bu araç ile ve CFD yöntemi ile analiz edilmiştir.

1.1. Genel Bilgiler

1.1.1. Pervane geometrisi

Tipik bir pervane birden fazla palanın bir göbek yardımıyla birleştirilmesinden oluşur. Uçak pervanelerinde göbek yarıçapı genellikle pervane yarıçapının %10'u ila %20 arasında değişmektedir. Bazı pervaneler için bu değerler Çizelge 1.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 1.1 : Çeşitli uçak pervanelerinin göbek yarıçapları

$R_{hub}\ (m)$	$R_{prop}\ (m)$	$(R_{hub})/(R_{prop})$	Kaynak
0.1524	0.8763	0.1739	Adkins, 1994
0.1780	0.8890	0.2002	Bauer, 1997
0.1829	1.8288	0.1000	Yaggy, 1960
0.3048	1.5240	0.2000	Yaggy, 1960
0.2320	1.4480	0.1602	Yaggy, 1960
0.2100	1.4000	0.1500	Reid, 1949
0.2591	1.5240	0.1700	Evans, 1951

Bir pervanenin yarıçapı, pervane içinden geçen akışkan debisini belirlediğinden tasarım aşamasında göz önünde bulundurulan birincil geometrik büyüklük olur. Bir tasarım probleminde pervane çapını olabildiğince yüksek tutmak iyi bir yaklaşım gibi görünebilir. Fakat pervane çapı arttıkça palaların sürtünme nedeniyle kaybettiği enerji de artacaktır. Sonuç olarak çapı ne kadar artarsa artsın bir pervanenin pratik veriminin belirli bir sınırı geçemeyeceği ifade edilir. (Weick, 1930)

Bir pervanede toplam pala alanı katı alan olarak tabir edilir. Katı alanın toplam pervane alanına bölümü ise katılık oranı olarak bilinir. Katılık oranı,

$$\sigma = Toplam\ pala\ alan\text{ı}\ (izd\text{üş}\ddot{u}m)/\pi R_{prop}^2 \qquad \textbf{(1.1)}$$

ve pervane düzlemi üzerinde alınan herhangi bir şerit için yerel katılık oranı (Şekil 1.2),

$$\sigma(r) = \frac{B(cdr)}{2\pi r dr} = \frac{Bc}{2\pi r} \tag{1.2}$$

şeklinde ifade edilir.

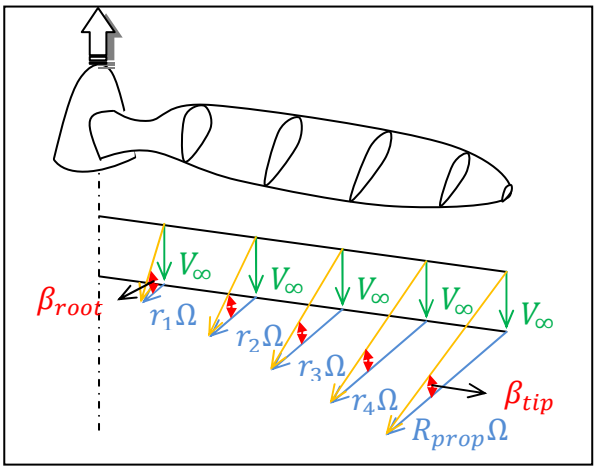
Bir pervane palasının çeşitli kanat dilimlerinin açıklık boyunca bir araya getirilmesinden oluştuğu varsayılabilir. Bir kesitin pervane dönme düzleminde yatay eksen ile yaptığı açıya oturma açısı veya hatve adı verilir. İndüklemelerin ihmal edildiği durumda pala açıklığı boyunca kesitlerin eksenel ve çizgisel hızları lineer olarak değişeceğinden oturma açısı dağılımı için,

$$\beta(r) = tan\left(\frac{V_A}{V_C}\right) = tan\left(\frac{V_\infty}{r\Omega}\right) \tag{1.3}$$

şeklinde yaklaşık bir eşitlik önerilebilir. (Şekil 1.1) Bu eşitlik iteratif analiz ve tasarım problemlerinde kesit oturma açısı dağılımı için başlangıç değer olarak kullanılır. (Adkins, 1994)

Bir pala üzerindeki kesitlerin oturma açılarının yanı sıra pervane oturma açısından da (β_{prop}) bahsedilebilir. Bir pala üzerinde 0.75 yarıçap uzaklıktaki kesit oturma açısı pervane oturma açısı olarak kabul görmektedir. (Yaggy, 1960)

$$\beta_{prop} = \beta(0.75) \tag{1.4}$$



Şekil 1.1 : Pala boyunca hızların ve kesit oturma açısının ilişkisi (İndüklemeler ihmal edilmiştir.)

1.1.2. Pervane hareketi

Şekil 1.2'de üç palalı bir pervane görülmektedir. İlerleme düzlemi, dr genişliğinde şeritler ile bölünerek palalar üzerinde kesitler alınsın. Kesitlerden biri dönme düzleminde incelenirse taşıma kuvvetinin büyük bir kısmının itkiye, sürükleme kuvvetinin büyük bir kısmının torka katkı sağladığı ifade edilir.

İtki ve tork kuvveti katsayısı,

$$C_y = C_l cos\alpha - C_d sin\alpha \quad \textbf{(1.5)}$$

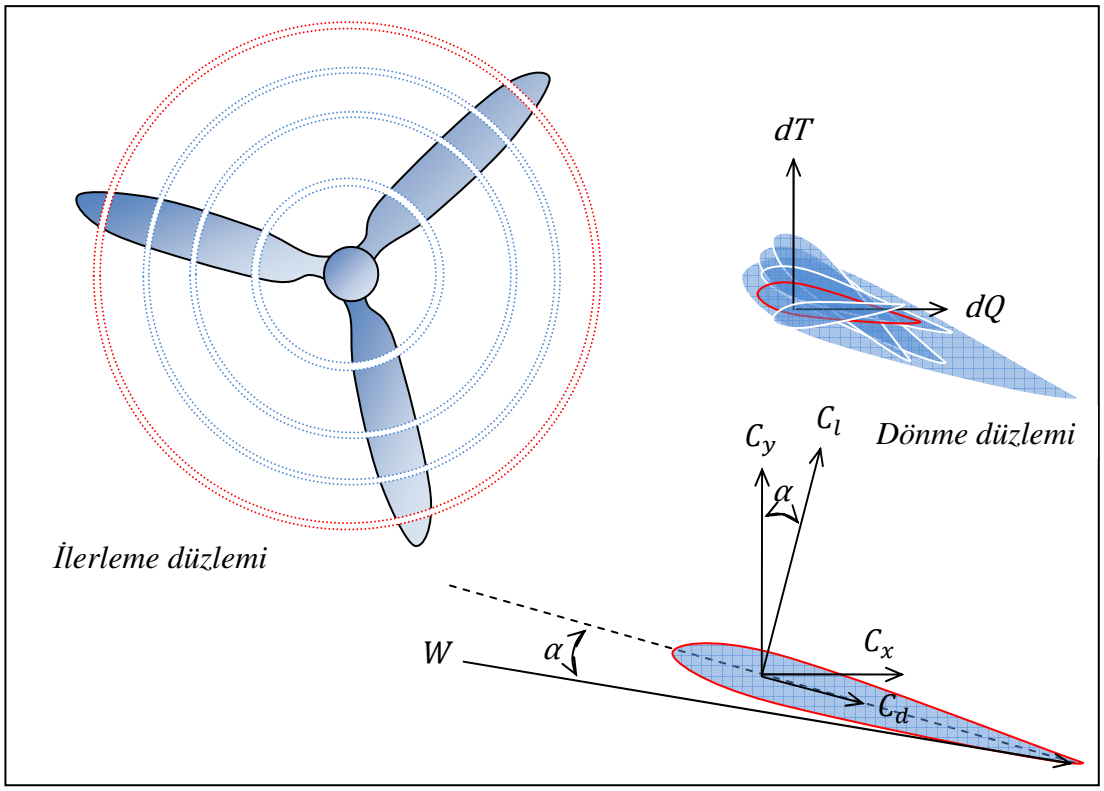
$$C_x = C_d cos\alpha + C_l sin\alpha \quad \textbf{(1.6)}$$

olacaktır. Bu durumda itki ve tork,

$$dT = B\left[\frac{1}{2}\rho W^2 (cdr) C_y\right] \quad \textbf{(1.7)}$$

$$dQ = B\left[\frac{1}{2}\rho W^2 (cdr) C_x\right] r \quad \textbf{(1.8)}$$

eşitlikleri ile ifade edilir.



Şekil 1.2 : Taşıma ve sürükleme kuvvetlerinin itki ve torka katkısı

Bir pervane yaptığı dönme hareketi ile çevresindeki akışkanı döndürerek geriye doğru iter. Firar kenarından ve pala uçlarından çıkan girdaplar bu döndürme ve itme etkisi altında pervane arkasında bir girdap alanı oluşturur. Bu girdap alanı ilk çıkışta helisel bir geometriye sahiptir.

Fakat pervaneden uzaklaştıkça sürtünme nedeniyle daralarak bu benzerlik bozulur. Bu durumda pervaneden yeterince uzak bölgelerde girdapların sönümlenmiş olması beklenir.

Pervaneye yakın bölgelerde ise akım alanının bu girdaplar tarafından ne kadar indüklendiği önemli olmakla beraber bu husus iz bölgesi modelleri ile Betz (1919), Prandtl (1919), Goldstein (1929) ve Theodorsen (1948), açıklanmaya çalışılır.

1.1.3. İndükleme faktörleri

Bir pervane etrafındaki akım temel olarak dört kısımda incelenir: (Weick, 1930)

- Pervane düzleminin hemen önündeki akım; Giriş (inflow) akımı,
- Pervane düzleminin hemen arkasındaki akım; Çıkış (outflow) akımı,
- Pervane düzleminin üzerindeki akım; Girişim (interference) akımı,
- Pervaneden yeterince uzak bölgedeki akım; Uzak iz (wake) akımı.

Girişim akımı pervane düzlemi üzerindeki herhangi bir noktada periyodik özellikler taşır ve bu özellikler her pala geçişinde tekrarlanır. Bahsi geçen bu periyodik akımın tam çözümü oldukça karmaşık olmakla beraber Glauert bunun yerine akımı ortalaması ile temsil etmiştir. (Weick, 1930) (Glauert, 1948)

Bu akımlar eksenel, çizgisel ve radyal olmak üzere üç adet indükleme faktörü ile ele alınmaktadır. Giriş, çıkış ve girişim hızları,

- Eksenel momentum teorisine göre akım yalnızca eksenel indüklenmiş kabul edilir ve hepsi de uzak iz akım hızının yarısına eşit bir değer alır. (Weick, 1930)
- Genel momentum teorisine göre eksenel ve çizgisel doğrultularda indüklenmiş kabul edilir ve bu değerler uzak iz akım hızının yarısına yakındır.

Uzak iz akım hızı ise genel momentum teorisinde incelenir.

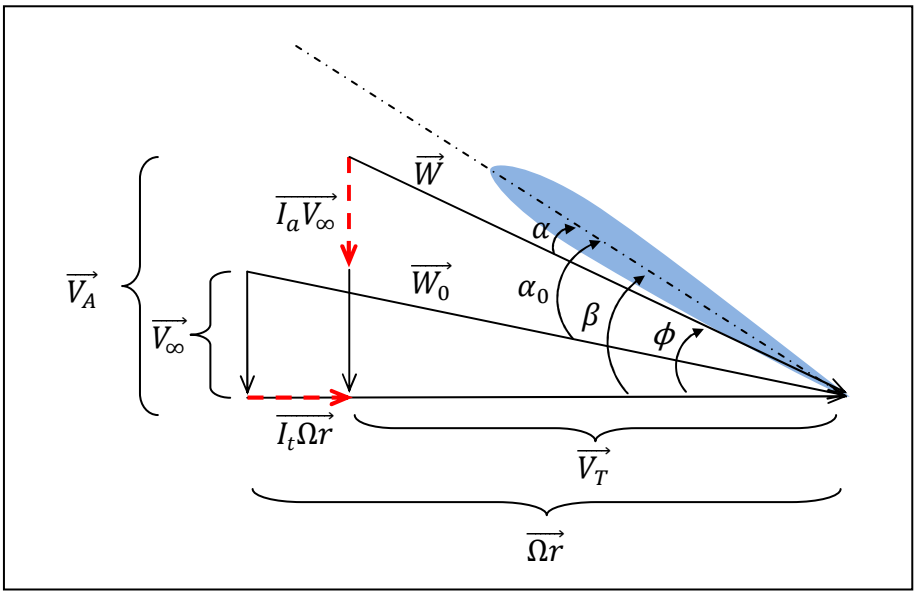
Eksenel indükleme pervanenin akışkan hacmini eksenel yönde hareketlendirip onu hızlandırması şeklindeki bir etkidir. Çizgisel indükleme ise akışkan taneciklerinin dönen palalar sayesinde edindikleri çizgisel hızlar olup pervaneden uzaklaştıkça azalmaktadır.

Çizgisel hızların pala uçlarına doğru artması ise radyal bir akım yaratacaktır. Eksenel momentum teorisinde ihmal edilen bu radyal akım genel momentum teorisinde dikkate alınır.

Fakat pratikte radyal indüklemenin düz palalı pervaneler için kesit hızları üzerinde bir etkisi olmadığı ve dolayısıyla analiz problemlerinde bir rolü olmadığı ifade edilmektedir. (Gur, 2008)

Radyal indükleme aynı zamanda düşük ok açılı palalara sahip pervaneler için de ihmal edilebilir. Yüksek ok açılı palaların hesaplanmasında ise *girdap kafesi* gibi modern yöntemler kullanılarak dikkate alınabilir. (Gur, 2008)

İndüklemelerin etkin akım doğrultusunu nasıl değiştirdikleri Şekil 1.3'de indüklenmemiş $(\overrightarrow{W_0})$ ve indüklenmiş $(\overrightarrow{W})$ akım vektörleri arasındaki fark ile görülebilir. (Radyal indükleme ihmal edilmiştir.)



Şekil 1.3 : Eksenel ve çizgisel indükleme faktörleri

İndüklemelerin eksenel hızda meydana getirdiği artış,

$$V_A = V_\infty(1 + I_a) \quad \textbf{(1.9)}$$

ve çizgisel hızda neden olduğu yavaşlama,

$$V_T = \Omega r(1 - I_t) \quad \textbf{(1.10)}$$

şeklinde ifade edilir. Burada I_a ve I_t eksenel ve çizgisel indükleme faktörleridir.

İndükleme faktörleri ile etkin akım hızının doğrultusu arasındaki ilişki,

$$tan\phi = \frac{V_A}{V_T} = \frac{V_\infty(1 + I_a)}{\Omega r(1 - I_t)} \quad \textbf{(1.11)}$$

olur. Etkin akım hızı ϕ cinsinden,

$$W = \frac{V_\infty(1 + I_a)}{sin\phi} \quad \textbf{(1.12)}$$

$$W = \frac{\Omega r(1 - I_t)}{cos\phi} \quad \textbf{(1.13)}$$

veya indüklemeler cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$W = \sqrt{[V_\infty(1 + I_a)]^2 + [\Omega r(1 - I_t)]^2} \quad \textbf{(1.14)}$$

2. PERVANE TEORİSİ

2.1. Eksenel Momentum Teorisi

Pervane teorisi 19.yy sonlarında momentum teorisi ile gelişmeye başlamıştır. İskoçyalı mühendis Rankine gerçek bir pervane yerine aynı yarıçapa sahip, kalınlığı olmayan ve sonsuz adet palanın oluşturduğu bir diski ele almıştır. Bu disk momentum diski veya eyleyici disk olarak da anılır.

Eksenel momentum teorisinde bu diskin içerisinde hareket ettiği ideal akışkanı döndürmeden itki sağladığı kabul edilir. (Carlton, 2007) Diğer bir deyişle pervane problemi, içerisinde yalnızca eksenel momentum transferi yapılan bir akım alanının incelenmesi şekline indirgenmiştir. (Durand, 1935) (Carlton, 2007) Bu yüzden eksenel momentum teorisinde tork terimi ile karşılaşılmaz.

Akışkan taneciklerinin eksenel V_∞ hızı ile hareket ettiği bir akım alanında bir momentum diski ele alınsın. Taneciklerin diskten aldıkları momentum ile hızlanması ve diski V_∞ hızından daha yüksek bir hızla geçmesi beklenir. Bernoulli prensibi gereği akışkanın statik basıncı diske yaklaştıkça hızın karesi ile orantılı olarak azalır. Disk üzerinde momentumun artması disk arkasında statik basıncın artmasına neden olur. Bu durumda oluşan basınç farkı istenilen itki kuvvetini oluşturur. Diski geçen akım hızı eksenel indükleme faktörü, I_a cinsinden $V_1 = V_\infty(1 + I_a)$ olarak ifade edilir.

Diski geçen akımın basıncının uzak iz bölgesinde tekrar çevre basıncına inmesi için hızı artmaya devam eder. Uzak izdeki akım hızı eksenel momentum teorisinde $V_2 = V_\infty(1 + I'_a)$ ve $I'_a = 2I_a$ olarak kabul edilir. (Durand, 1935) (Adkins, 1994) (Carlton, 2007)

Birim zamandaki eksenel momentum artışı itkiyi,

$$T = \dot{m}(V_2 - V_\infty) \tag{2.1}$$

şeklinde ve birim zamandaki kinetik enerji artışı da gücü,

$$P = \frac{1}{2}\dot{m}(V_2^2 - V_\infty^2) \tag{2.2}$$

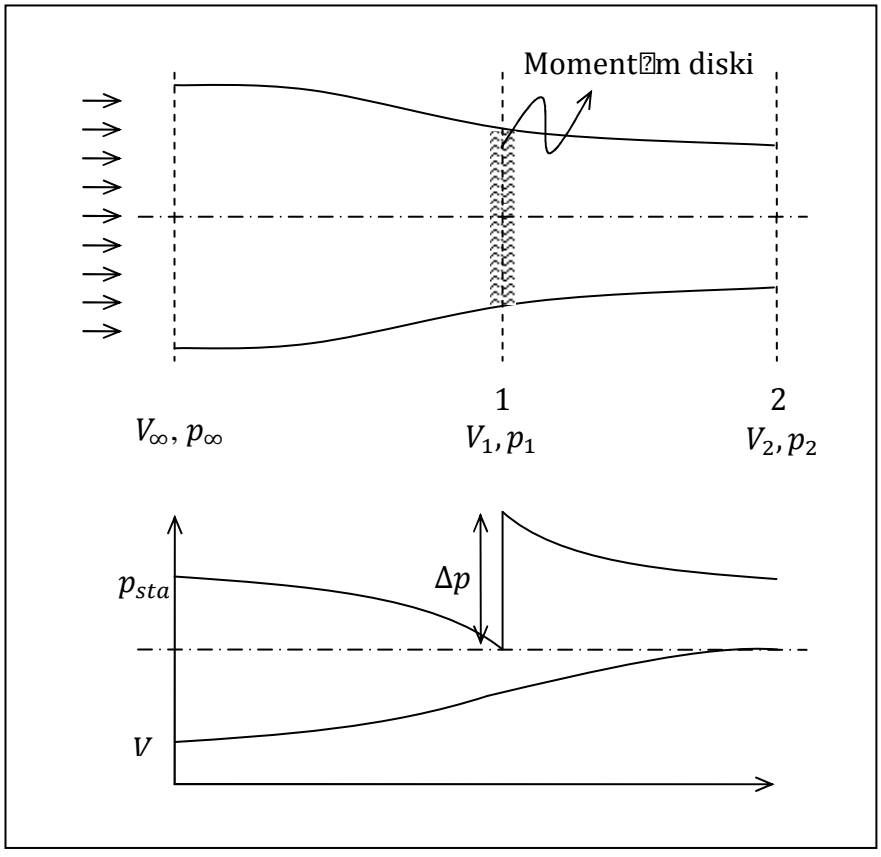
şeklinde verir. İtkiye harcanan güç toplam güce bölünerek verim,

$$\eta_i = \frac{TV_\infty}{P} \tag{2.3}$$

$$\eta_i = \frac{2V_\infty}{(V_2 + V_\infty)} \tag{2.4}$$

$$\eta_i = \frac{1}{1 + I_a} \tag{2.5}$$

şeklinde elde edilir. Yapılan kabuller nedeniyle bu verim ideal verim olarak nitelendirilir.



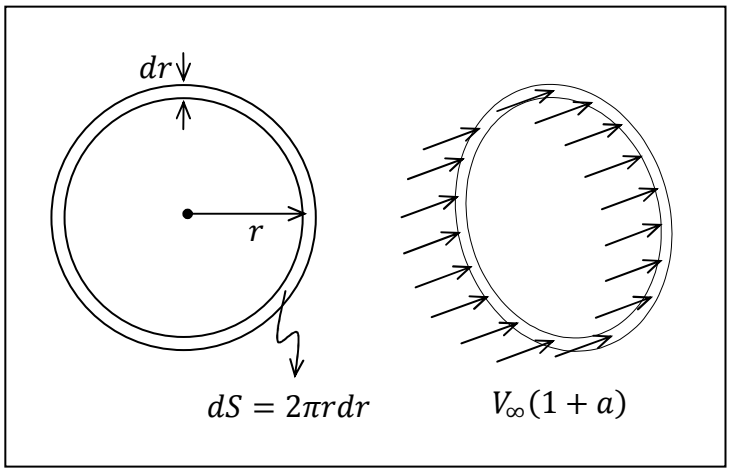
Şekil 2.1 : Eksenel momentum transferinde hız ve basınç değişimleri

Eksenel momentum teorisinde yarıçap boyunca itki dağılımının sabit olması durumunda enerji kaybının minimum gerçekleşeceği bilinmektedir. (Durand, 1935)

Bunun için,

$$I_a(r) = I_a = sbt \tag{2.6}$$

şartı sağlanmalıdır. (Durand, 1935) Bu bilginin ışığında itki ve güç için yukarıdaki eşitlikler diferansiyel formda da ifade edilebilir.



Şekil 2.2 : Dönme düzleminde alınan bir diferansiyel şerit ve ondan geçen havanın debisi

Momentum diski üzerinde r yarıçapında ve dr genişliğindeki bir şeridi geçen akışkanın debisi,

$$\dot{m} = \rho V_\infty (1 + I_a) dS = \rho V_\infty (1 + I_a) 2\pi r dr \tag{2.7}$$

olur. (2.7) ile (2.1) kullanılarak diferansiyel itki,

$$dT = \dot{m}[V_\infty (1 + 2I_a) - V_\infty] \tag{2.8}$$

$$dT = \dot{m}\, 2I_a V_\infty \tag{2.9}$$

$$dT = \rho V_\infty (1 + I_a) 2\pi r dr (2I_a V_\infty) \tag{2.10}$$

şeklinde yazılabilir. İntegrali alınırsa,

$$T = \int_0^{R_{prop}} dT = \int_0^{R_{prop}} \rho V_\infty (1 + I_a) 2\pi r dr (2I_a V_\infty) \tag{2.11}$$

$$T = \rho V_\infty (1 + I_a)(2I_a V_\infty) \int_0^{R_{prop}} 2\pi r dr \tag{2.12}$$

$$T = \rho V_\infty (1 + I_a)(2I_a V_\infty) \pi R_{prop}^2 \tag{2.13}$$

elde edilir.

(2.7) ile (2.2) kullanılarak diferansiyel güç için,

$$dP = \frac{1}{2}\dot{m}\{[V_\infty(1+2I_a)]^2 - V_\infty^2\} \quad \textbf{(2.14)}$$

$$dP = \frac{1}{2}\dot{m}V_\infty^2\left(4I_a + 4{I_a}^2\right) \quad \textbf{(2.15)}$$

$$dP = 2\dot{m}V_\infty\left(I_a + {I_a}^2\right) \quad \textbf{(2.16)}$$

$$dP = 2\rho V_\infty(1+I_a)2\pi r dr V_\infty\left(I_a + {I_a}^2\right) \quad \textbf{(2.17)}$$

$$dP = 2\rho V_\infty^2 I_a(1+I_a)^2 2\pi r dr \quad \textbf{(2.18)}$$

yazılır. İntegrali alınırsa,

$$P = \int_0^{R_{prop}} dP = \int_0^{R_{prop}} 2\rho V_\infty^2 I_a(1+I_a)^2 2\pi r dr \quad \textbf{(2.19)}$$

$$P = 2\rho V_\infty^2 I_a(1+I_a)^2 \int_0^{R_{prop}} 2\pi r dr \quad \textbf{(2.20)}$$

$$P = 2\rho V_\infty^2 I_a(1+I_a)^2 \pi R_{prop}^2 \quad \textbf{(2.21)}$$

elde edilir. İtki ve güç katsayıları,

$$T_c = \frac{2T}{\rho V_\infty^2 \pi R_{prop}^2} \quad \textbf{(2.22)}$$

$$P_c = \frac{2P}{\rho V_\infty^3 \pi R_{prop}^2} \quad \textbf{(2.23)}$$

olarak tanımlanıp sırasıyla (2.14) ve (2.23) eşitlikleri ile birlikte kullanılırsalar,

$$T_c = 4I_a(1+I_a) \quad \textbf{(2.24)}$$

$$P_c = 4I_a(1+I_a)^2 \quad \textbf{(2.25)}$$

elde edilir. (2.5) eşitliğinden indükleme faktörü verim cinsinden,

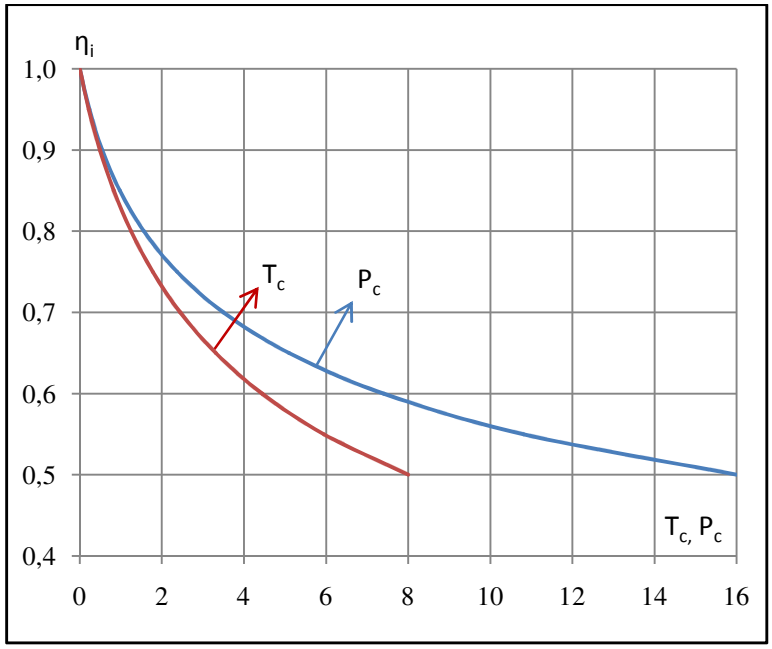
$$I_a = \frac{1-\eta_i}{\eta_i} \tag{2.26}$$

şeklinde çekilerek (2.29) ve (2.30) eşitliklerinde kullanılırsa,

$$T_c = 4\left(\frac{1-\eta_i}{\eta_i^2}\right) \tag{2.27}$$

$$P_c = 4\left(\frac{1-\eta_i}{\eta_i^3}\right) \tag{2.28}$$

bulunur. Şekil 2.3'deki grafikten görüleceği üzere herhangi bir itki veya güç katsayısı için ideal verim 1'den küçük bir değere sahiptir. Eksenel momentum teorisinde akışkan sürtünmesinin ihmal edilmiş olmasına rağmen, ideal verimin 1'den küçük değerlerde seyir etmesi dikkat çekicidir. (Carlton, 2007) Ayrıca ideal verimin, itki ve güç ile ters, serbest akım hızı, akışkan yoğunluğu ve pervane çapı ile doğru orantılı olarak değiştiği ifade edilebilir. (Weick, 1930)



Şekil 2.3 : Eksenel momentum teorisinde ideal verimin itki ve güç katsayısı ile değişimi

Eksenel momentum teorisinde ideal verim tanımlanırken harcanan enerji miktarı için akım alanının yalnızca eksenel yöndeki kinetik enerjisi hesaba katılmıştır. Daha gerçekçi bir verim için,

- Palaların sürtünmesinden ötürü kaybedilen enerji,

- Akım alanının açısal hareketine harcanan kinetik enerji,
- Akım özelliklerinin palalar ve disk üzerinde uniform dağılım göstermemesinden dolayı, diğer bir deyişle radyal akış sebebiyle oluşan kayıplara harcanan enerji,

de hesaba katılmalıdır. (Glauert, 1948)

İlerleyen yıllarda pervane teorisi hesaplar içerisine katılmak istenen bu hususlar doğrultusunda geliştirilmiştir. Palaların sürtünmesinden ötürü kaybedilen enerji pala elemanı teorisi, akım alanının açısal hareketine harcanan kinetik enerji ise genel momentum teorisi ile incelenmeye çalışılmıştır. Radyal akıştan kaynaklanan problemler ise Betz, Prandtl, Goldstein ve Theodorsen gibi isimler tarafından yapılan iyileştirmeler ile hesaplanmaya çalışılmıştır.

2.2. Genel Momentum Teorisi

Rankine'nin ardından Robert Edmund Froude eksenel momentum teorisini geliştirerek hem eksenel hem de açısal momentum transferini incelemiştir. (Froude, 1889) Froude'un ardından Glauert de genel momentum teorisi üzerinde çalışmıştır. Glauert ek olarak radyal indüklemenin etkisini incelemiş ve pervanenin yeterince uzak bölgesindeki indüklemeleri de hesaplar içerisine katmıştır. (Glauert, 1935)

2.2.1. Froude teorisi

Akışkan taneciklerinin bir momentum diski üzerinde Ω açısal hızı ile döndürüldüğü düşünülsün. Taneciklerin diski terk ederken açısal hızlarını kaybetmeleri ve diskten çok uzak bir noktada tamamen yitirmeleri beklenir. Bu bağlamda disk üzerinde alınan bir şerit önündeki açısal hız Ω ve arkasındaki açısal hız $(\Omega - \omega)$ olsun. (Ω ve ω tüm disk üzerinde sabit) Disk üzerinde alınan bir şeridin önünde ve arkasında Bernoulli prensibi uygulanarak,

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho(\Omega r)^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho[(\Omega - \omega)r]^2 \quad \textbf{(2.29)}$$

$$\Delta p = \frac{1}{2}\rho\Omega^2 r^2 - \frac{1}{2}\rho[\Omega^2 r^2 - 2\Omega\omega r^2 + \omega^2 r^2] \quad \textbf{(2.30)}$$

$$\Delta p = \rho\omega r^2\left(\Omega - \frac{1}{2}\omega\right) \quad \textbf{(2.31)}$$

şeklinde elde edilir. Bu bağlamda yalnızca açısal hız değişiminden ötürü oluşacak itki,

$$dT = 2\pi r(\Delta p)dr \quad \textbf{(2.32)}$$

yazılabilir. Kolaylık sağlaması açısından ω, çizgisel indükleme faktörü, I_t, cinsinden $\omega = 2I_t\Omega$ yazılırsa,

$$dT = 2\pi r\left[\rho\omega r^2\left(\Omega - \frac{1}{2}\omega\right)\right]dr \quad \textbf{(2.33)}$$

$$dT = 4\pi\rho r^3\Omega^2[I_t(1 - I_t)]dr \quad \textbf{(2.34)}$$

olarak bulunur. Benzer şekilde yalnızca açısal hız değişiminden ötürü oluşacak tork,

$$dQ = \dot{m}(r\omega)r \quad \textbf{(2.35)}$$

$$dQ = [\rho V_\infty(1 + I_a)2\pi r dr](r2I_t\Omega)r \quad \textbf{(2.36)}$$

$$dQ = 4\pi\rho r^3[V_\infty(1 + I_a)](I_t\Omega)dr \quad \textbf{(2.37)}$$

şeklinde elde edilir. Şerit başına düşen (ideal) verim,

$$\eta = \frac{V_\infty dT}{\Omega dQ} \quad \textbf{(2.38)}$$

$$\eta = \frac{1 - I_t}{1 + I_a} \quad \textbf{(2.39)}$$

bulunur. Dikkat edileceği üzere Froude'un teorisinde akışkanın yalnızca döndüğü kabul edilerek Bernoulli prensibi yalnızca açısal hızlar için uygulanmıştır. Daha gerçekçi durum olan ilerleme ve dönme hali için Bernoulli prensibi Glauert tarafından uygulanmıştır. (Durand, 1935) Glauert'in hesaplarının yalnızca bir kısmı; analiz hesaplarında ihtiyaç duyulan diferansiyel itki ve tork terimleri aşağıdaki kısımda sunulmaktadır.

2.2.2. Glauert teorisi

Glauert'in teorisinde prensip eksenel, çizgisel ve radyal indükleme faktörlerinin momentum diski üzerinde ve onun yeterince uzağında hesaplanmasıdır. Diğer momentum teorilerinde olduğu gibi viskozite ihmal edilir.

Froude teorisine benzer şekilde disk üzerindeki,

- Eksenel hız $V_\infty(1+I_a)$
- Açısal hız $\Omega(1-I_t)$ (dolayısıyla çizgisel hız $\Omega(1-I_t)r$)
- Radyal hız $I_r V_\infty$

olsun. Diskin yeterince uzağında ise,

- Eksenel hız $V_\infty(1+I_a^{'})$
- Açısal hız $\Omega(1-I_t')$ (dolayısıyla çizgisel hız $\Omega(1-I_t')r'$)
- Radyal hız $I_r' V_\infty$

olsun. (Şekil 2.4)

Radyal indükleme terimi Glauert tarafından önerilse de ifadelere sadelik kazandırmak amacıyla ihmal edilebileceği Gur (2008) tarafından ifade edilmiştir.

Bu bağlamda genel momentum teorisine göre diferansiyel itki ve torkun,

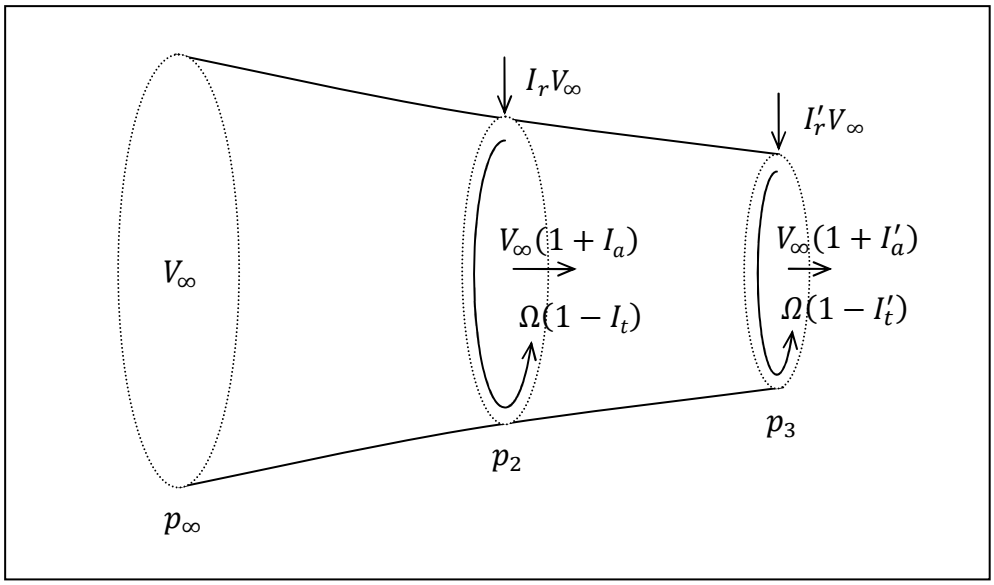
$$dT = 2\pi\rho r'[V_\infty(1+I_a')]I_a' V_\infty dr' - 2\pi r'[p_\infty - p_3]dr' \quad \textbf{(2.40)}$$

$$dQ = 2\pi\rho r[V_\infty(1+I_a)]I_t \Omega r dr \quad \textbf{(2.41)}$$

şeklinde olduğu bilinmektedir. Uzak izde radyal yöndeki kuvvetlerin eşitliğinden,

$$\frac{dp_3}{dr'} = \rho\frac{(I_t'\Omega r')^2}{r'} : dp_3\left(r'\left(R_{prop}\right)\right) = p_\infty \quad \textbf{(2.42)}$$

yazılabilir. (Gur, 2008)



Şekil 2.4 : Genel momentum teorisinde hızlar ve indüklemeler (Gur, 2008)

Momentum teorileri viskoziteyi ihmal ederek pervanelerin ideal verimini ortaya koyduğu için oldukça önemlidir. Ayrıca pervanenin disk olarak ele alınması problemin basitleştirilmesi adına yarar sağlamıştır. (Carlton, 2007) Fakat geometrik büyüklüklerin performansa olan etkileri görülmediği için momentum teorileri analiz ve tasarım aşamalarında pratik görülmemektedir. (Weick, 1930) (Durand, 1935) (Carlton, 2007) Bu aşamada kanat aerodinamiğinden esinlenilerek pervane palalarının birer kanat olarak ele alınıp incelenmesi fikri pala elemanı teorisi olarak karşımıza çıkmaktadır.

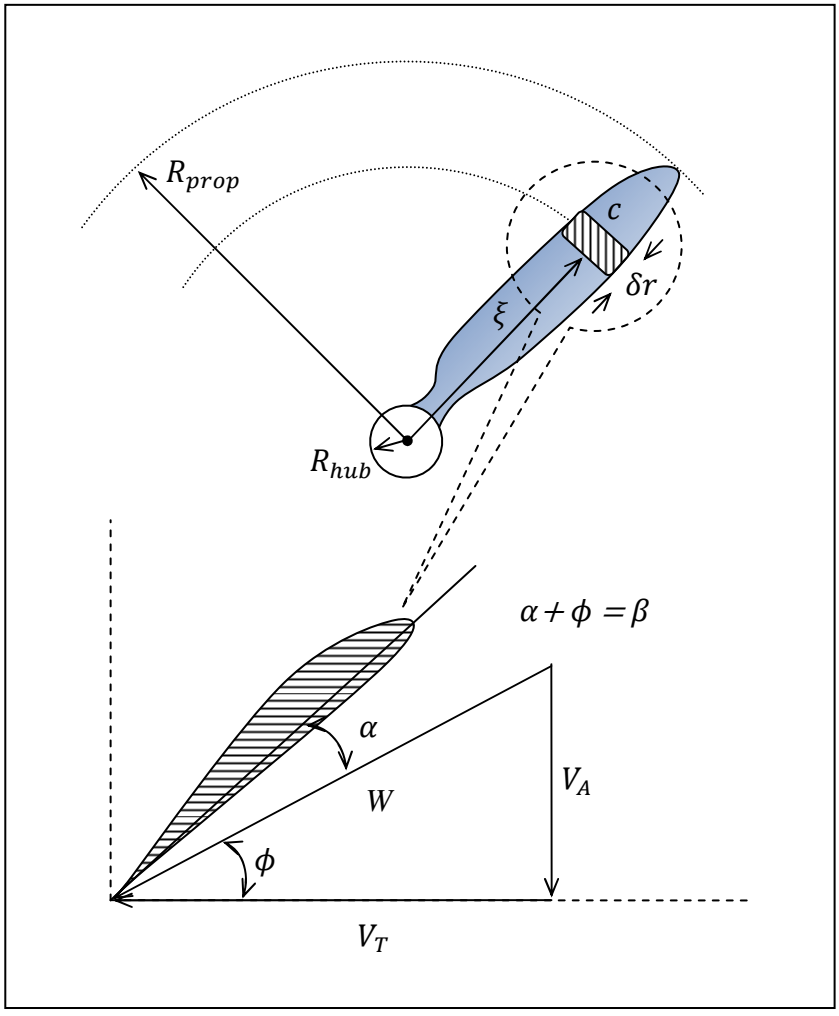
2.3. Pala Elemanı Teorisi

Bir pervane palasının kesitlere bölünerek analiz edilmesi fikri ilk kez William Froude tarafından ortaya konmuştur. (Froude, 1878) (Weick, 1930) Froude'dan bağımsız olarak Drzewiecki tarafından da konu üzerinde çalışma yapılmış ve ilk olarak 1885 yılında Rusya'da basılan bir uçuş mekaniği kitabında yayınlanmıştır. (Drzewiecki, 1904) (Weick, 1930) Drzewiecki'nin çalışması pala elemanı teorisini pratik bir formda ve kullanıma uygun bir biçimde sunmuştur. (Weick, 1930)

Ayrıca kesitler başına düşen kuvvetlerin pala boyunca toplanarak tüm pervane için itki ve tork hesabının yapılması ve bunun için de kesit karakteristiklerinin kullanılması fikri de ilk kez Drzewiecki (1904) tarafından önerilmiştir. (Weick, 1930)

Pala elemanı teorisinde her bir pala elemanı etrafındaki akım iki boyutlu kabul edilir. Ayrıca kökten uca pala elemanları arasında etkileşim olmadığı ve bunun bir sonucu olarak radyal akış olmadığı varsayılır. Her bir pala bağımsız kabul edilerek bir diğeri tarafından etkilenmediği düşünülür. Bu yaklaşımlar doğrultusunda pala elemanı teorisinin analiz ve tasarım problemlerinde hata payı yüksek sonuçlar verdiği bilinmektedir. (Weick, 1930)

Şekil 2.5'de pervane düzleminde r uzaklığında ve dr genişliğinde alınan bir şeritteki kanat kesiti ve ona etkiyen etkin akım doğrultusu görülmektedir.



Şekil 2.5 : r yarıçapsal konumundaki bir pala elemanı ve ona etkiyen etkin akım doğrultusu

Pala elemanına etkiyen taşıma ve sürükleme kuvvetleri,

$$dL = \frac{1}{2}\rho W^2 (cdr) C_l \qquad \textbf{(2.43)}$$

$$dD = \frac{1}{2}\rho W^2 (cdr) C_d \tag{2.44}$$

şeklinde hesaplanır. Etkin akım doğrultusunun yatay ile yaptığı açı ϕ ve o kesitteki oturma açısı β olsun. Bu durumda kesitin hücum açısı $\alpha = \beta - \phi$ olur. İtki ve tork için diferansiyel ifadeler Şekil 1.2 yardımıyla,

$$dT = B(dLcos\phi - dDsin\phi)dr \tag{2.45}$$

$$dQ = B(dLsin\phi + dDcos\phi)rdr \tag{2.46}$$

yazılarak pala boyunca integre edilebilir. Kesitin lokal verimi,

$$d\eta = \frac{V_\infty}{\Omega}\frac{dT}{dQ} \tag{2.47}$$

ve pervane verimi,

$$\eta = \frac{V_\infty}{\Omega}\frac{T}{Q} \tag{2.48}$$

olacaktır.

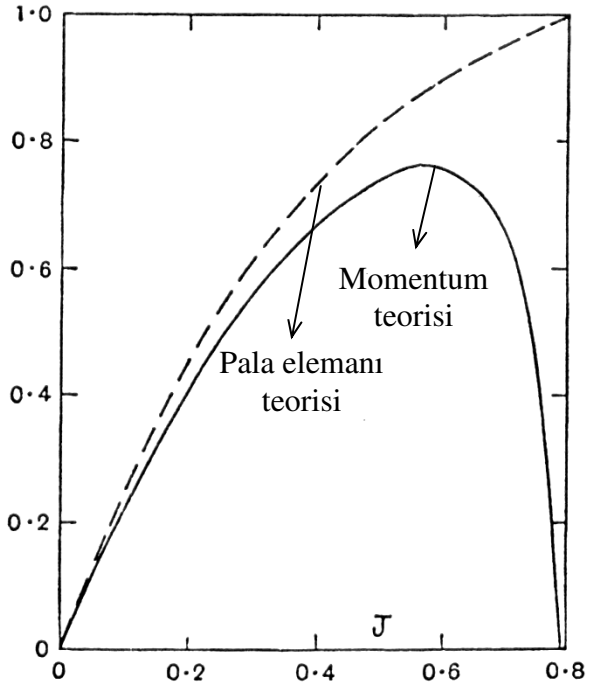
Bu teoride de momentum teorisine benzer şekilde viskozite ihmal edilerek ideal verim hesaplamak mümkündür. Bu değer momentum teorisi ile hesaplanan değer ile karşılaştırılırsa iki teori arasındaki bir çelişki ile karşılaşılır. (Glauert, 1948) (Carlton, 2007) Şekil 2.6'daki grafikte bir pervane için ideal verimin pala elemanı ve momentum teorileri ile hesaplanmış sonuçları sunulmaktadır.

İki teori arasındaki dikkat çeken bir diğer husus ise pala sayısı üzerinedir. Pala elemanı teorisinde yalnızca bir pala üzerinde hesap yapıldığı için sonsuz pala sayısı için itki, tork ve güç de sonsuz olur. Fakat bilindiği gibi momentum teorisinde pala sayısı sonsuz kabul edildiği halde itki, tork ve güç sonsuz değildir.

İki boyutlu kesit özellikleri ile üç-boyutlu pala karakterinin tespit edilmesi pala elemanı teorisinin taşıyıcı çizgi teorisi ile arasındaki bir benzerliktir. (Prandtl, 1923) (Carlton, 2007) (Gur, 2008)

Sonlu kanatlar için Lanchester-Prandtl taşıyıcı çizgi teorisi açıklık boyunca aşağı saptırma hızlarının nasıl hesaplanacağı üzerine sirkülasyon esaslı bir yaklaşım sunmuştur. (Prandtl, 1923)

Bu yaklaşımda firar kenarından kopan girdapların analizi sürtünmesiz ve irrotasyonel koşullarda incelenmiş ve indükleme dağılımı elde edilmiştir. (Carlton, 2007)



Şekil 2.6 : Pala elemanı ve momentum teorilerinde ideal verim çelişkisi (Glauert, 1948)

Dikkat edileceği üzere pala elemanı teorisinde prensip her bir palanın kesitlere bölünerek kesit başına oluşan taşıma ve sürükleme kuvvetlerinin hesaplanması ve bunların pala boyunca integre edilmesidir. Fakat bu kuvvetlerin hesaplanması için etkin akım doğrultusunun tespit edilmesi, bunun için ise indükleme faktörlerinin bilinmesi gerekmektedir. (Gur, 2008) Bu bağlamda momentum teorisindeki diferansiyel ifadeler ile pala elemanı teorisindekiler eşleştirilirse bir çözüm elde edilebilir. Bu yöntem pala elemanı-momentum teorisi olarak bilinir. Pala elemanı-momentum teorisi ile her iki teorinin de eksikleri ve çelişkileri giderilmeye çalışılır. (Carlton, 2007)

2.4. Pala Elemanı-Momentum Teorisi

Eksenel momentum teorisine göre pervaneyi geçen akışkanın hızı eksenel indükleme faktörü ile genel momentum teorisine (Froude) göre ise pervane düzleminde alınan bir şeride birim zamanda aktarılan açısal momentum, yani tork çizgisel indükleme faktörü ile hesaplanmaktadır. Pala elemanı teorisinde ise itki ve tork indükleme faktörleri ve kesit karakteristikleri ile hesaplanmaktadır. Bu bağlamda momentum denklemleri pala elemanı denklemleri ile birlikte yazılabilir. Şöyle ki, (2.10), (2.37), (2.45) ve (2.46) eşitlikleri yardımıyla,

$$dT = 4\pi\rho r V_\infty (1 + I_a)(I_a V_\infty) = B(dL cos\phi - dD sin\phi) \quad \textbf{(2.49)}$$

$$dQ = 4\pi\rho r^3 V_\infty (1 + I_a)\Omega I_t = B(dL sin\phi + dD cos\phi)r \quad \textbf{(2.50)}$$

yazılır. Bu eşitlikler (1.2), (1.9) ve (1.10) kullanılarak düzenlenirse,

$$\frac{I_a}{1 + I_a} = \frac{\sigma}{4}\left(\frac{C_l cos\phi + C_d sin\phi}{sin^2\phi}\right) \quad \textbf{(2.52)}$$

$$\frac{I_t}{1 - I_t} = \frac{\sigma}{2}\left(\frac{C_l cos\phi + C_d sin\phi}{2 sin\phi cos\phi}\right) \quad \textbf{(2.53)}$$

elde edilir. Bu durumda geometrisi ve kesit karakteristikleri bilinen bir pervanenin belirli çalışma şartlarındaki performansı son iki eşitlik yardımıyla iteratif olarak çözülebilir.

Pala elemanı-momentum teorisi ile analiz ve tasarım problemlerinde pratik bir prosedür ortaya konulmaktadır. Prosedür doğrultusunda analiz ve tasarım için ihtiyaç duyulan başlıca bilgi kesit karakteristikleridir. NACA 16-serisi en yaygın bilinen pervane kesiti ailesidir. Ayrıca Clark Y, NACA 4412 ve 4415 pervanelerde sıkça tercih edilen profiller arasındadır. Pala elemanı-momentum teorisi ile pervane tasarlanırken indüklenmiş sürüklemenin hesabı doğrudan yapılmaz. Bunun yerine indükleme faktörleri hesaplandıktan sonra ortaya çıkan kuvvetlerin integrasyonu ile itkinin ve torkun istenen değerlerde olup olmadığı kontrol edilir. Dolayısıyla indüklenmiş sürüklemenin minimize edilmesi problemi yalnızca deneme yanılma yöntemi ile mümkün olur. Bunu aşmak için pala elemanı-momentum teorisine minimum indüklenmiş sürükleme kriterinin dahil edilmesi gerekmektedir. Bu kriter iz bölgesindeki girdap sisteminin pervane düzlemindeki etkisini temsil edecek şekilde Betz tarafından önerilmiştir.

3. OPTİMUM PERVANE

3.1. Minimum İndüklenmiş Sürükleme

Bir pervanenin harcadığı toplam güç viskozitenin neden olduğu profil sürüklemesine ve indüklenmiş sürüklemeye harcanan güç olmak üzere iki bileşene sahiptir. (Carlton, 2007) Bilindiği üzere profil sürüklemesi tasarım aşamasında minimize edilebilir. Fakat indüklenmiş sürüklemenin minimize edilmesi için tasarım parametreleri arasında kapalı formda olan indüklemelerin hesaplanması gereklidir.

Şekil 3.1'de bir kanat ve bir palanın uçlarından çıkan kaçma girdapları görülmektedir. Her iki durumda da oluşan girdaplar kesitlerdeki indüklenmiş hızların şiddetini artırır ve onları aşağı doğru saptırır. (Larrabee, 1979) Bilindiği üzere taşıyıcı çizgi teorisinde bu saptırma yalnızca hücum açısını değiştiriyormuş gibi düşünülür ve kanat açıklığı boyunca (taşıyıcı çizgiler üzerinde) girdap bölgesindeki enerji kaybını minimize edecek bir sirkülasyon dağılımı aranır. (Larrabee, 1979) Bu ideal dağılım eliptik yükleme olarak adlandırılır. Kaçma girdaplarının neden olduğu saptırma ve ideal sirkülasyon dağılımı pervaneler için Betz tarafından incelenmiştir. (Betz, 1919)

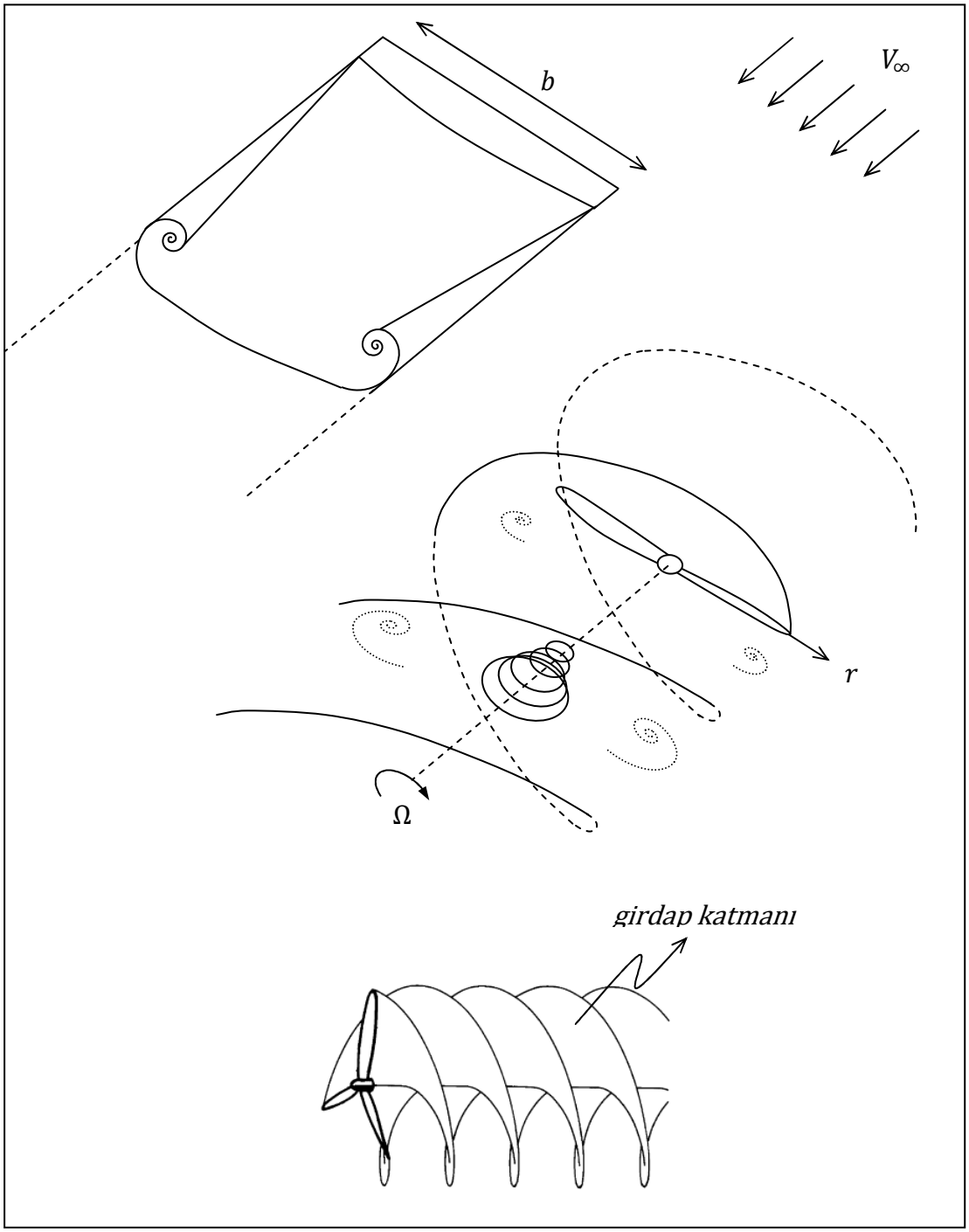
Betz disk şeklindeki bir pervanenin minimum indüklenmiş sürüklemeye maruz kalması için iz bölgesine yaydığı kaçma girdaplarının helisel bir yörünge izlemesi gerektiğini ifade etmiştir. (Betz, 1919) (Carlton, 2007) (Şekil 3.2) Bu ifade minimum enerji kaybı veya optimum pervane şartı olarak da bilinmektedir. Bir palanın tüm açıklığı boyunca oluşan kaçma girdaplarının o pala için bir girdap katmanını oluşturduğu ifade edilir.

Helisel bir yüzey için yer değiştirme hızı, v', yarıçap boyunca değişmez ve bunun bir sonucu olarak radyal doğrultuda akım görülmez. Dolayısıyla radyal indüklemeden de bahsedilmez. Bu durumda indüklenmiş çizgisel hız etkin akım doğrultusuna dik olur. (Carlton, 2007) (Şekil 1.3)

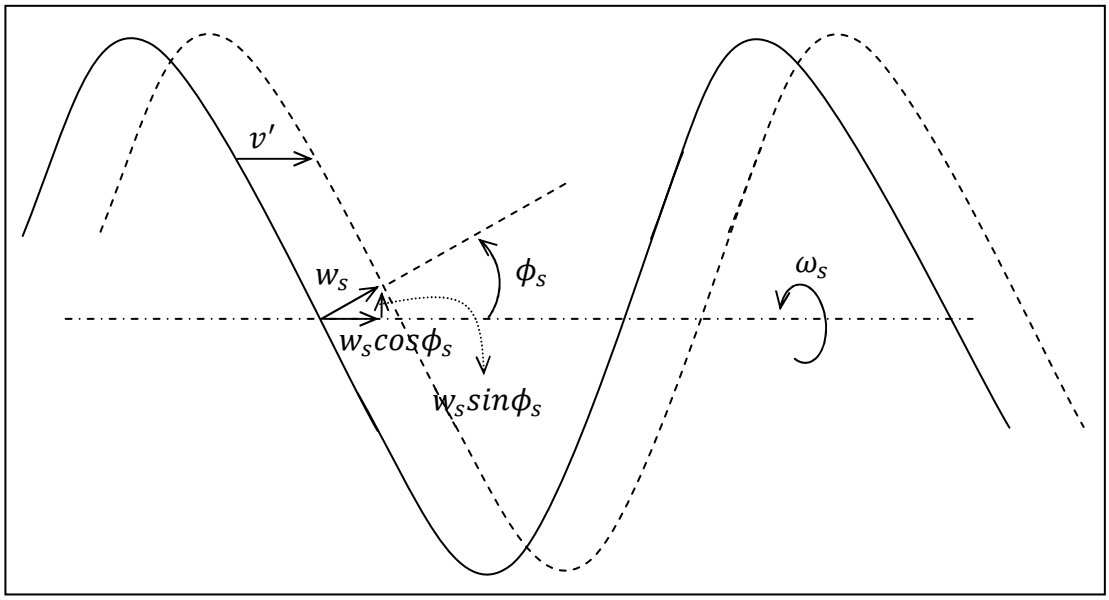
Helis yer değiştirme hızı serbest akım hızı ile boyutsuzlaştırılarak ζ hız oranı elde edilir. (Larrabee, 1979) (Larrabee, 1984) (Adkins, 1994)

$$\zeta = \frac{v'}{V_\infty} \quad \textbf{(3.1)}$$

$$v' = v'(r) = sabit \rightarrow \zeta(r) = \zeta = sabit\ (Optimum\ pervane\ için) \quad \textbf{(3.2)}$$

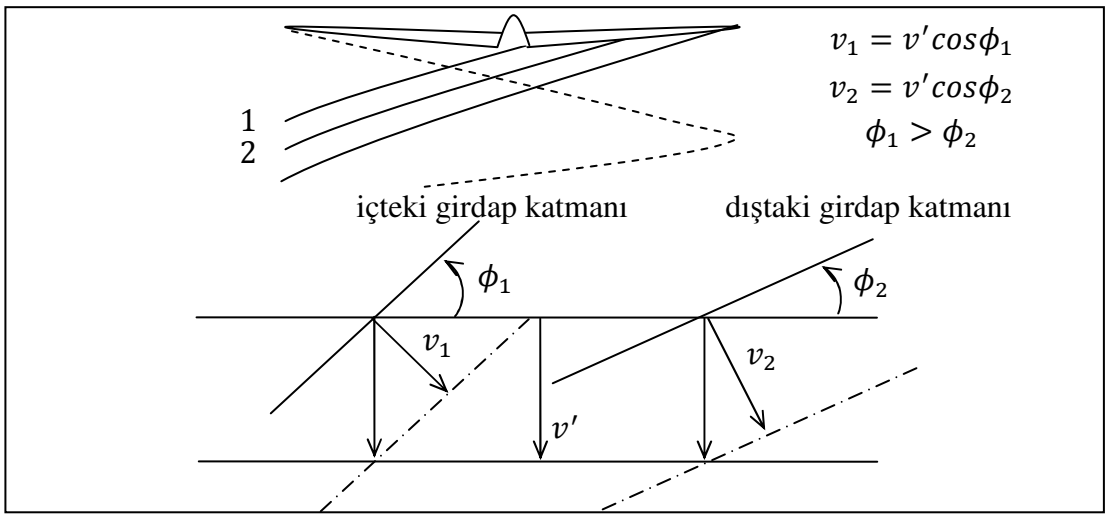


Şekil 3.1 : Kanat ve pervane arkasında oluşan girdaplar (Larrabee, 1979)

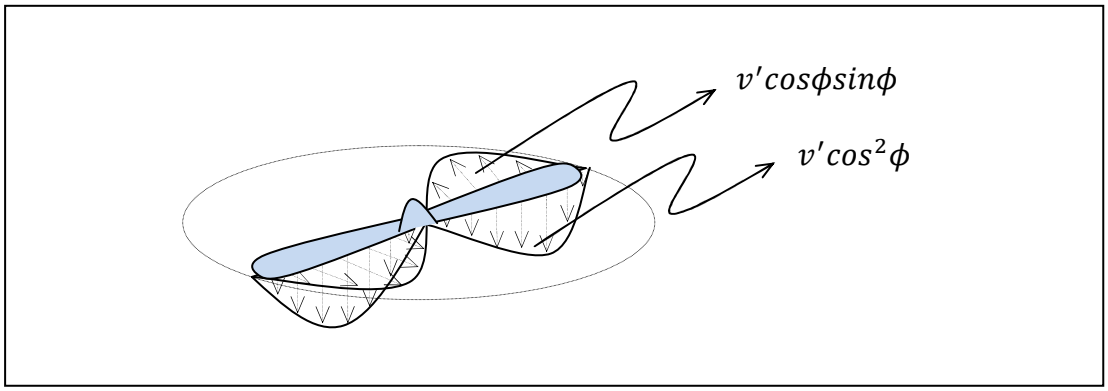


Şekil 3.2 : Rijit ve helisel bir girdap katmanının hareketindeki hızlar (Larrabee, 1979)

Girdap katmanları minimum indüklenmiş enerji kabulü ile eksenel yönde sabit v' hızıyla hareket ediyor varsayılırken gerçek durumda $v'cos^2\phi$ eksenel hızı ve $v'cos\phi sin\phi$ açısal hızı ile hareket ederler. Böylece her bir girdap katmanı kendisine dik yöndeki bir hız ile yayılır. (Larrabee, 1984) Bu yüzden girdap katmanlarının şekli tam olarak helis olmayıp pervane düzleminden uzaklaştıkça yarıçapları bir miktar azalmaktadır. Bu azalma çok küçük olduğundan sirkülasyonun pervane düzlemindeki ve yeterince uzak izdeki radyal dağılımları arasında önemli bir fark yoktur. Fakat yeterince uzak iz ile ilgili bilgilerden itki, tork ve verim hesaplanabileceğinden iz bölgesi önemlidir. (Theodorsen, 1948)



Şekil 3.3 : Rijit olmayan bir girdap katmanının yayılması (Larrabee, 1984)



Şekil 3.4 : Rijit olmayan bir girdap katmanının itki ve tork yönündeki hız bileşenleri (Larrabee, 1984)

Betz'in çalışması minimum enerji kaybını temsil eden yeni bir parametreyi tasarım kriterleri arasına getirmiştir. Fakat iz parametrelerini tasarım parametrelerinin arasına sokmak prosedürde bir zıtlık doğurmaktadır. İtki kuvvetinin uzak izdeki helis çapına bağlanması buna bir örnek olarak verilebilir. (Theodorsen, 1948) Fakat daha sonraları iz parametrelerinin de dahil edildiği organize bir tasarım prosedürü Glauert tarafından geliştirilmiştir. (Glauert, 1948) (Adkins, 1994)

Betz'in çalışmasında dikkat çeken bir diğer husus ise pervanelere getirilen hafif yüklü ve ağır yüklü sıfatlarıdır. Hafif yüklü bir pervane için itki katsayısı ve helis yer değiştirme hızı düşüktür. (Goldstein, 1929) (Larrabee, 1979) Hafif yüklü pervane kabulü sayesinde küçük açı yaklaşımları yapmak mümkündür. (Larrabee, 1979) Bu kabuller etkin akım doğrultusunun lokal hız oranı ile hesaplanmasına olanak sağlamaktadır. Şöyle ki:

$$x = \frac{r\Omega}{V_\infty} \tag{3.3}$$

$$sin\phi \approx \frac{1}{\sqrt{1+x^2}} \tag{3.4}$$

$$cos\phi \approx \frac{x}{\sqrt{1+x^2}} \tag{3.5}$$

$$tan\phi \approx \frac{1}{\sqrt{1+x^2}} \frac{\sqrt{1+x^2}}{x} \approx \frac{1}{x} \tag{3.6}$$

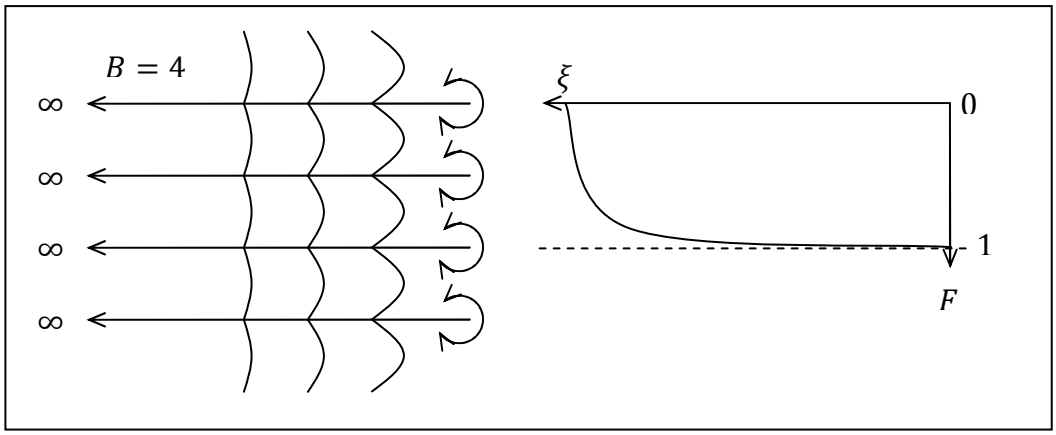
Etkin akım doğrultusunun daha doğru ifadesi küçük açı kabullerinin ortadan kaldırılmasıyla Adkins (1994) tarafından,

$$tan\phi \approx \frac{1+\frac{\zeta}{2}}{x} \tag{3.7}$$

şeklinde elde edilmiştir. Bu eşitliğe dikkat edilirse etkin akım doğrultusunun yalnızca girdap ilerleme oranı ile değiştiği görülür. (Herhangi bir yarıçapsal konumda lokal hız oranı sabittir) Böylece iz bölgesindeki girdap katmanının dönme düzlemindeki akım doğrultularını nasıl indüklediği üzerine bir yaklaşım getirildiği kabul edilir.

3.2. Pala Sayısının Minimum Enerji Kaybına Etkisi

Disk şeklindeki bir pervaneye getirilen minimum enerji kaybı koşullarının sonlu pala sayısına sahip pervaneler için düzeltilmesi Prandtl tarafından Betz'in çalışmasında ek olarak sunulmuştur. (Prandtl, 1919) Sonlu pala sayısına sahip bir pervanede pala uçlarına doğru gidildikçe sirkülasyonun azalması ve tam uçta sıfır olması beklenir. Bu durum sonlu kanatlarda da geçerli olmakla beraber pervaneler için girdap hesapları daha karmaşıktır. (Vries, 1979) Prandtl aralarında eşit boşluklar bulunan, bir ucu sonlu ve diğer ucu sonsuza giden düz levhaların v hızı ile hareket ettirildiği bir akımı analitik olarak incelemiştir. (Larrabee, 1979) Sonuç olarak hem pala sayısının hem de uçlardaki kayıpların hesaba katıldığı bir düzeltme faktörü önermiştir.



Şekil 3.5 : Pala sayısı kadar yarı-sonsuz düz plakanın etrafındaki analitik akıştan alınan Prandtl faktörü (Larrabee, 1979)

$$f = \frac{B}{2}\frac{1-\xi}{sin\phi_t} \tag{3.5}$$

$$\phi_t = \lambda\left(1+\frac{\zeta}{2}\right) \tag{3.6}$$

$$F = \frac{2}{\pi} cos^{-1}(e^{-f}) \quad \textbf{(3.7)}$$

Buradaki F, girdap aralığı faktörü, Prandtl faktörü veya momentum kayıp faktörü olarak bilinir. (Larrabee, 1979) (Adkins, 1994) Burada bahsedilen momentum kaybı radyal akıştan kaynaklanır. Dolayısıyla Prandtl faktörü açısal momentum kaybının hesaplanmasında radyal indüklemeler yerine kullanılan bir yaklaşım olarak kabul edilebilir.

3.3. Helisel Girdap Katmanının Etrafındaki Potansiyel Akım

Goldstein iki ve dört adet paladan ayrılan girdap katmanlarının etrafındaki potansiyel akım problemini düşük ilerleme oranları için analitik olarak çözmüştür. (Goldstein, 1929) (Wald, 2006) Bunun için minimum enerji kaybı şartını kullanarak sonsuz uzunluktaki helisel bir geometri etrafındaki akımı incelemiştir. Sonuç olarak pervane düzleminde alınan herhangi bir şerit etrafındaki sirkülasyon ile helisel yüzeyin etrafındaki sirkülasyonun oranını hesaplamıştır. Bu oran Goldstein faktörü veya Goldstein (açısal) momentum kayıp faktörü olarak bilinir. (Adkins, 1994) (Carlton, 2007) Göbek etkisi ihmal edilmiştir.

Goldstein faktörünün belirli pala sayısı ve ilerleme oranı değerleri için hesaplanması karmaşık olup Bessel ve Lommel fonksiyon analizlerini içerir. Literatürde bu konuda çeşitli yayınlarla karşılaşmak mümkündür. (Helmbold, 1931) (Wrench, 1955) (Wrench, 1957) Ayrıca çeşitli pala sayıları için hesaplanmış Goldstein faktörünün tablolar halinde sunulduğu çalışmalar da bulunmaktadır. (Tibery, 1964) (Wald, 2006) Goldstein faktörünün hesaplanmasında göbek yarıçapının etkisi ise Tachmindji tarafından incelenmiştir. (Tachmindji, 1957)

3.4. Ağır Yüklü Pervaneler İçin Düzeltme

Ağır yükleme halinde pervanenin hemen gerisinde izde bir daralma görülür. Pervanenin yeterince uzak izindeki helis yüzeyi ise etkilenmez. Minimum enerji şartının sağlanması için heliste sabit bir yer değiştirme hızının elde edilmesi yeterlidir. Bu bağlamda ağır yüklü pervaneler için sirkülasyonun radyal dağılımı Goldstein'in hafif yükleme haline uygun elde ettiği sonuçların aynısıdır. (Theodorsen, 1948)

4. PERVANE ANALİZİ

4.1. Klasik Yöntem İle Analiz Prosedürü

Klasik pala elemanı-momentum teorisi ile ortaya konan çeşitli prosedürler literatürde dikkat çekmektedir. (Glauert, 1943) (Thedorsen, 1948) (Larrabee, 1979) (Adkins, 1994) (Bauer, 1997) (Wald, 2006) (Gur, 2008) Bu çalışmada Larrabee ve Adkins'in çalışmaları ile olgunlaşan analiz prosedürü esas alınmıştır. Bunun nedeni Gur (2008) tarafından belirtildiği üzere pala elemanı-genel momentum teorisinin basitleştirilmiş halinin tatmin edici sonuçlar vermesidir.

Geometrisi bilinen bir pervanenin aerodinamik analizi etkin akım doğrultusunun yarıçap boyunca bilinmesini gerektirmektedir. Etkin akım doğrultusu, boyutsuz helis yer değiştirme hızı ve yerel hız oranı cinsinden,

$$tan\phi = \left(1 + \frac{\zeta}{2}\right)/x = \left(1 + \frac{\zeta}{2}\right)\lambda/\xi \qquad \textbf{(4.1)}$$

şeklinde yazılabilir. Burada ζ iz bölgesine ait bir büyüklüktür ve bilinmesi durumunda tüm performans büyüklükleri hesaplanabilir. (Theodorsen, 1948) Bu bağlamda ϕ, ζ'nın değişimi ile iteratif olarak çözülmelidir. Başlangıç değeri için $\zeta = 0$ değeri seçilerek elde edilen ϕ ve yerel oturma açısı, β ile hücum açısı elde edilebilir. Bu hücum açısındaki taşıma ve sürükleme katsayıları yardımıyla itki ve tork kuvveti katsayıları, C_y ve C_x hesaplanabilir. Goldstein faktörü ve onun boyutsuz yarıçapa göre türevi,

$$K = \frac{C_y}{4sin^2\phi} \qquad \textbf{(4.2)}$$

$$K' = \frac{C_y}{4cos\phi sin\phi} \qquad \textbf{(4.3)}$$

eşitlikleri ile hesaplanır.

Pala sayısı, ilerleme hızı ve açısal hız (3.2), (3.3) ve (3.4) eşitliklerinde yerine konularak Prandtl faktörü bulunabilir.

Bilinen büyüklükler vasıtasıyla eksenel ve çizgisel indükleme faktörleri,

$$a = \frac{\sigma K}{F - \sigma K} \tag{4.4}$$

$$a' = \frac{\sigma K'}{F + \sigma K'} \tag{4.5}$$

eşitlikleri ile elde edilir. İndükleme faktörleri ile eksenel ve çizgisel indüklenmiş hızlar hesaplanarak yeni bir etkin akım doğrultusu bulunur.

$$tan\phi_{yeni} = \frac{V_A}{V_T} = \frac{V_\infty(1 + I_a)}{\Omega r(1 - I_t)} \tag{4.6}$$

Etkin akım doğrultusunun yeni ve eski değerleri karşılaştırılarak iterasyonun yakınsamasına karar verilir. Yakınsamış ϕ için,

$$dT = \frac{1}{2}\rho W^2 BcC_y \tag{4.7}$$

$$dQ = \frac{1}{2}\rho W^2 BcC_x r \tag{4.8}$$

hesaplanarak veya, itki ve güç katsayılarının boyutsuz yarıçapa göre türevleri,

$$\frac{dC_T}{d\xi} = \frac{\pi^3}{4}\frac{\sigma C_y \xi F^{3/2}}{[(F + \sigma K')cos\phi]^2} \tag{4.9}$$

$$\frac{dC_P}{d\xi} = \frac{dC_T}{d\xi}\frac{\pi\xi C_x}{C_y} \tag{4.10}$$

kullanılarak hesap yapılabilir. Toplam itki ve güç katsayıları sayısal integrasyon ile,

$$\xi_0 = \frac{R_{hub}}{R_{prop}} \tag{4.11}$$

$$C_T = \int_{\xi_0}^{1} dC_T \tag{4.12}$$

$$C_P = \int_{\xi_0}^{1} dC_P \tag{4.13}$$

elde edilir. Bu katsayılar,

$$C_T = T/\rho n^2 D_{prop}^4 \tag{4.14}$$

$$C_P = P/\rho n^3 D_{prop}^5 \tag{4.15}$$

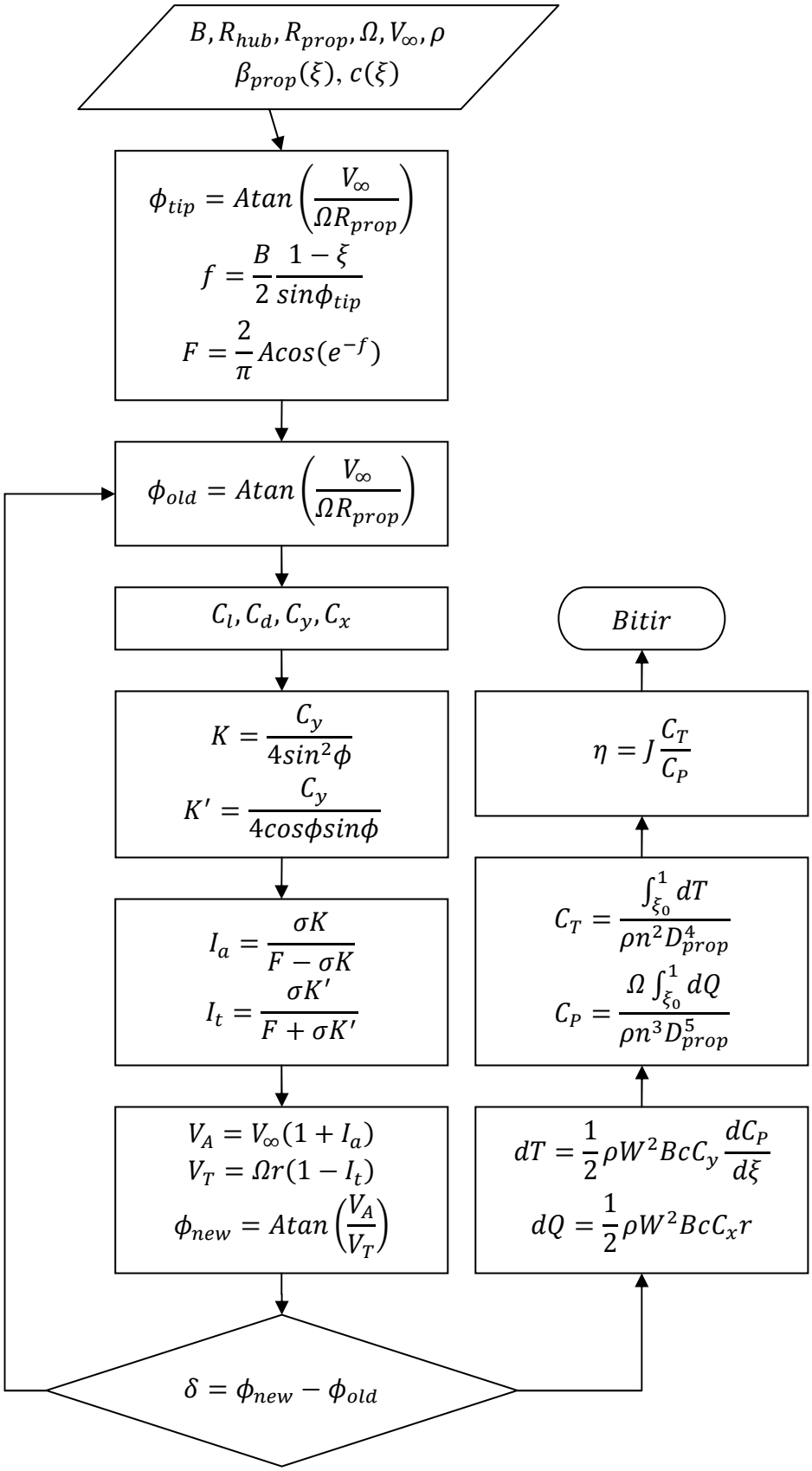
şeklinde tanımlandığından itki ve güç hesaplanabilir. Ayrıca her bir ilerleme oranı için verim,

$$\eta = J\frac{C_T}{C_P} \tag{4.16}$$

bulunur.

4.2. Analiz Prosedürü İçin Akış Diyagramı

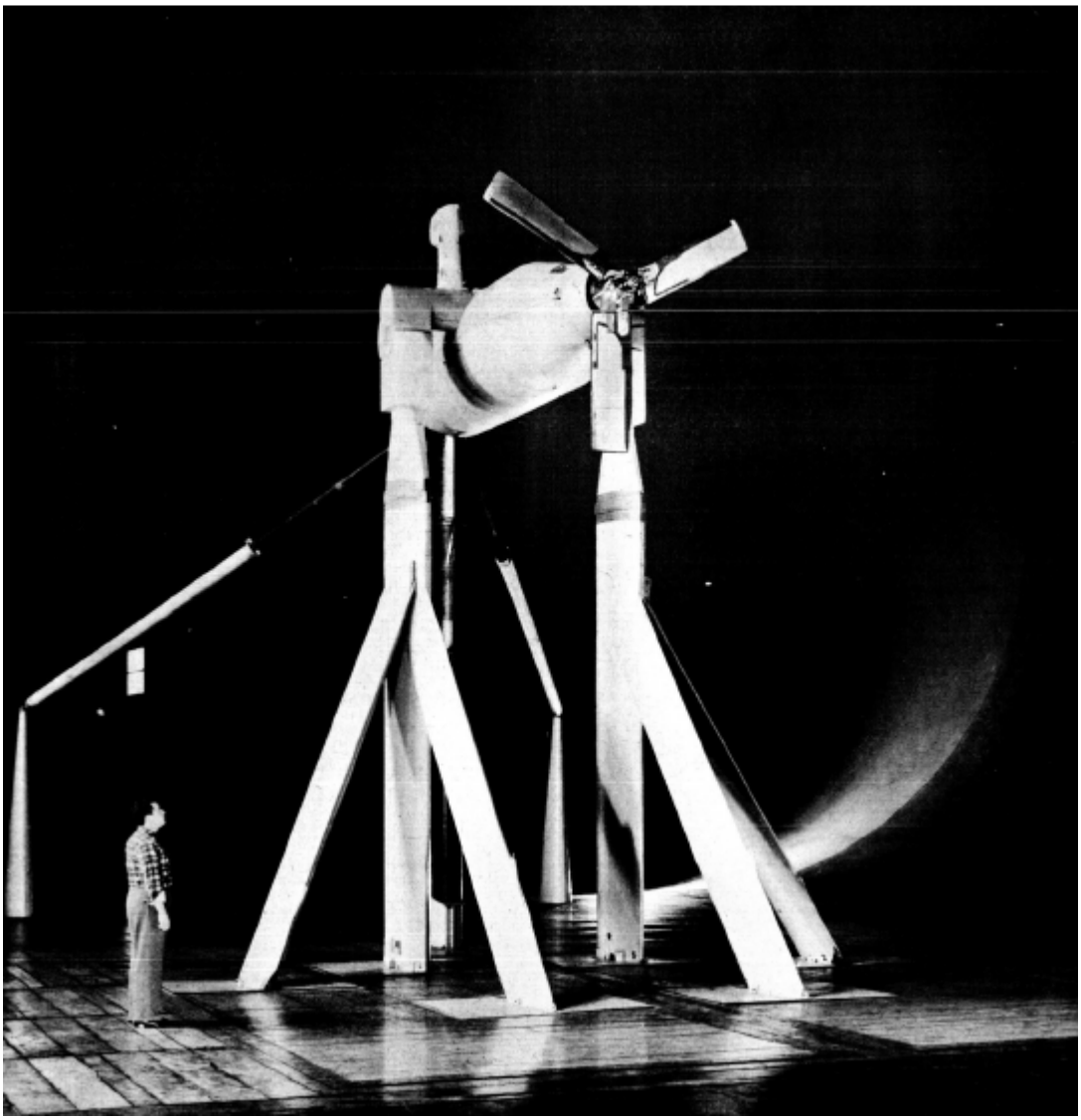
Bilindiği üzere akış diyagramları bilgisayar programlarının oluşturulmasında kolaylık sağlamaktadır. Bu çalışma için yazılan bilgisayar programının akış diyagramı Şekil 4.1'de verilmektedir. Diyagrama dikkat edilirse akışkan yoğunluğu, pala sayısı, göbek ve pervane yarıçapları ile açısal ve eksenel hızlar girdi olarak kullanılmaktadır. Ayrıca kökten uca çeşitli yarıçapsal konumlarda veter uzunlukları ve oturma açıları da bilinmelidir. Sonuç olarak etkin akım doğrultusu için kurulan iterasyon yakınsadığı takdirde performans katsayıları elde edilmektedir. Yakınsama kriteri olarak $\delta = 0.001$ seçilebilir.



Şekil 4.1 : Elde edilen analiz akış diyagramı

4.3. CFD Yöntemi İle Analiz Prosedürü

Bu çalışmada Yaggy (1960) tarafından çeşitli oturma açılarında geometrisi verilmiş bir pervane modeli için CFD simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Bu model orijinal belge Yaggy (1960)'da, üç numaralı pervane olup bu çalışmada Pervane-4 olarak adlandırılmıştır. Pervane Şekil 4.2'de AMES 12.19 m – 24.38 m'lik rüzgar tüneli içerisinde görülmektedir. Pervane yarıçapı 1.4478 m'dir.



Şekil 4.2 : CFD simülasyonları gerçekleştirilen pervane modeli (Yaggy, 1960)

Rüzgar tüneli deneyleri 7 farklı oturma açısı ve 0° - 85° hücum açısı aralığında yapılmıştır. Deneylerde itki ve güç katsayıları ölçülerek verim hesaplanmıştır. Bu büyüklükleri hata oranları Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Deneylerin hata oranları (Yaggy, 1960)

Büyüklük	Hata oranı (%)
C_T	± 8
C_P	± 7

4.3.1. Problemin tanımlanması

Bu çalışmada pervane etrafındaki akışı tanımlamak için pervaneye uzak bir bölgede serbest akım hızı ve pervaneyi içine alacak küçük bir hacim içerisinde dönme hareketi tanımlanmıştır. Bunun için FLUENT programında hareketli referans sistemi (moving reference frame) sınır şartı kullanılmıştır. Pervaneyi içine alacak hacim 1.6 m yarıçapında, 0.4 m derinliğinde bir silindir olarak oluşturulmuştur.

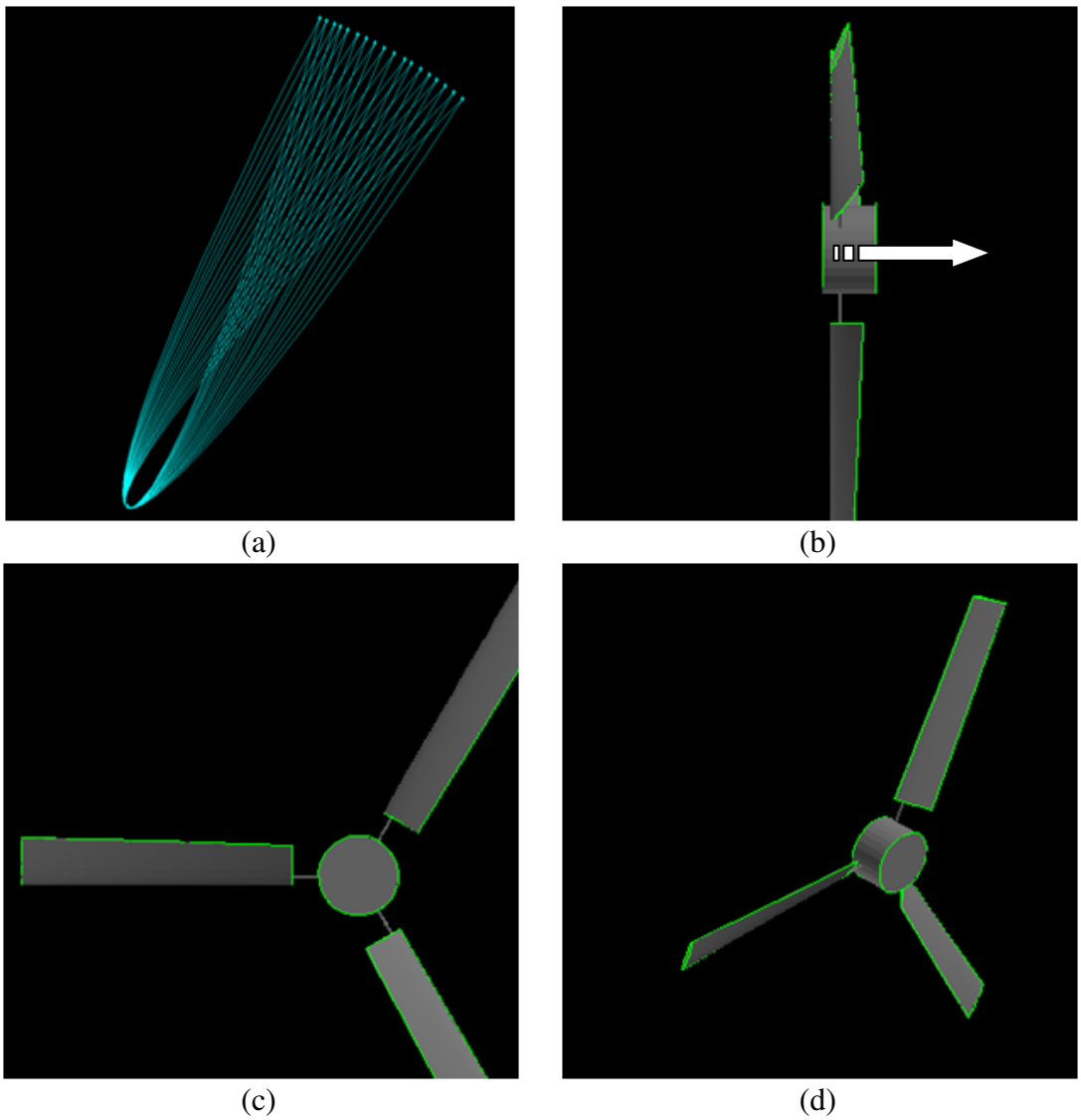
Bilgisayar hafızası ihtiyacını ve çözüm süresini minimum tutmak için sıkıştırılabilirlik etkileri ihmal edilmiştir. Bu bağlamda Navier-Stokes denklemleri için yoğunluk esaslı formülasyonlar yerine basınç esaslı formülasyonlar kullanılmıştır. Ortam şartları deniz seviyesinde kabul edilmiştir. Türbülans modeli olarak Spalart-Allmaras tercih edilmiş ve ağ $y+\approx 1$ civarında sonuç verecek şekilde düzensiz elemanları ile örülmüştür. (Dymarski, 2008) (Ma, 2009) (Wang, 2006) Flaszynski (2009) Yakınsamış çözümlere ikinci dereceden ayrıklaştırmalar ile varılmıştır. Yakınsama kriteri olarak itki kuvvetinin değişimi esas alınmıştır. Sekiz işlemciye ve on altı GB çabuk hafızaya sahip bir iş istasyonu ile bir simülasyon altı buçuk saat sürmüştür. Simülasyonların ilerleme oranları, eksenel ve açısal hızları Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2 : CFD simülasyonlarındaki ilerleme oranları ve hızlar

$\beta_{prop}(°)$	J	$\Omega\ (rad/s)$	$n\ (devir/s)$	$V_\infty(m/s)$
24°	0.3	119.38	19	16.5
24°	0.5	119.38	19	27.5
24°	0.7	119.38	19	38.5
24°	0.9	119.38	19	49.5
30°	0.5	119.38	19	27.5
30°	0.6	119.38	19	33.0
30°	0.7	119.38	19	38.5
30°	0.8	122.10	19.43	45
30°	1.0	119.38	19	55
30°	1.2	117.50	18.70	65
36°	0.9	119.38	19	49.5
36°	1.1	119.38	19	60.5
36°	1.3	100.97	16.07	60.5
36°	1.5	87.50	13.93	60.5

4.3.2. Ağ oluşturulması

Simülasyonlarındaki sonlu hacim ağları GAMBIT 2.4 ve TGRID 5 ile oluşturulmuştur. İlk olarak model GAMBIT ortamında çizilerek bilgisayar ortamında temsil edilmiştir. NACA 0009 kesiti XFOIL aracılığıyla elde edilen 200 adet koordinat kullanılarak çizilmiştir. (Drela, 2001) Bu kesitler on sekiz adet yarıçap uzaklığında uygun oturma açılarında birbirlerine bağlanmışlardır. (Şekil 4.3a) Göbeğin temsili için bir silindir seçilmiştir. (Şekil 4.3c)

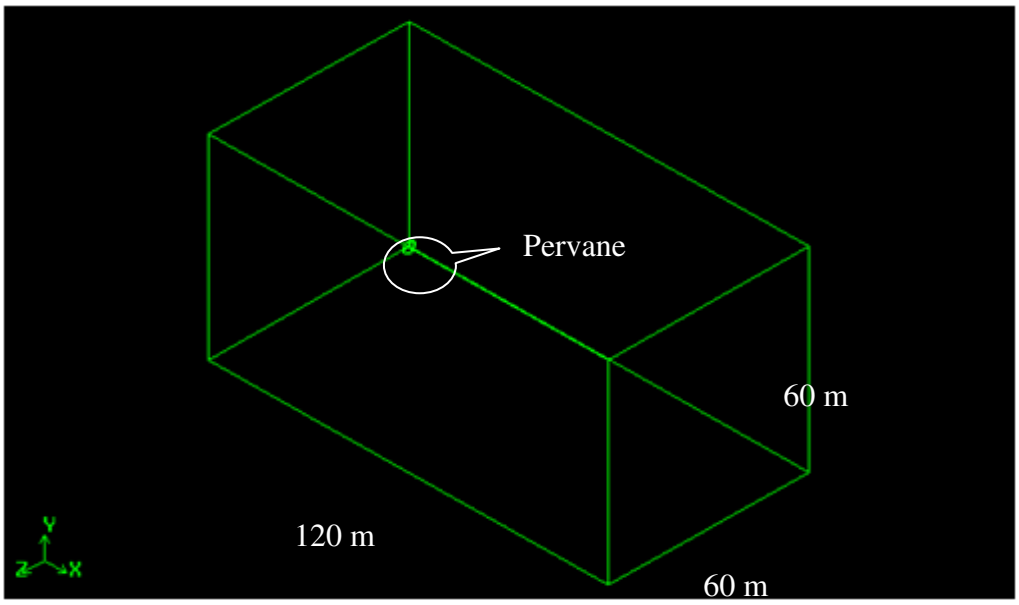


Şekil 4.3 : (a) Kesitler (b) Dönme ekseni (c) Göbek (d) Genel görünüm

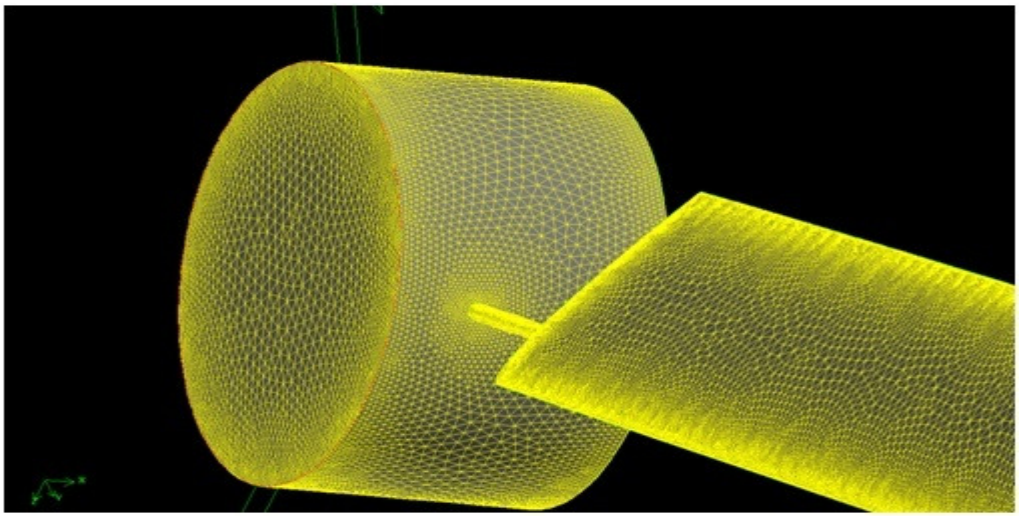
GAMBIT ortamındaki model 60x60x120 m ebatlarındaki bir çözüm hacmi içerisine konulmuştur. (Şekil 4.4) Bu ebat pervane çapı (yaklaşık olarak 3 m) ile oranlanırsa

20x20x40 büyüklüğü elde edilir. Modelin yüzeyleri, büyüklükleri 1 ila 12 mm arasında değişen üçgenler ile örülmüştür.

Bu üçgenlerin eşkenar üçgene olan benzerlikleri çarpıklık adı verilen bir büyüklük ile temsil edilmektedir. Eşkenar üçgen için 1 olan çarpıklık, bir doğru için 0'dır. CFD çalışmalarında genellikle çarpıklığın (problemin karmaşıklığına göre değişmekle beraber) 0.98'in altında kalması tercih edilir. Bu çalışmadaki iki boyutlu elemanların maksimum çarpıklığı 0.58'dir. (Şekil 4.5) Model çevresindeki sınır tabaka hacmi bu üçgenler vasıtasıyla sekiz katman halinde TGRID ortamında prizmatik hücrelerden oluşturulmuştur. Sınır tabaka hücrelerinin akıma dik doğrultudaki uzunlukları $y+\approx 1$ eşitliğine uygun seçilmiştir. Üç boyutlu elemanların maksimum çarpıklığı 0.95'dir.



Şekil 4.4 : CFD simülasyonlarında çözüm hacmi



Şekil 4.5 : Göbek ve pala üzerindeki yüzey elemanları

4.4. Test Pervaneleri Ve Sonuçlar

Şekil 4.1'de verilen akış diyagramına dayalı bir bilgisayar programı Visual Basic 6.0 ortamında geliştirilerek çeşitli analiz uygulamaları yapılmıştır. Bunun için literatürden geometrisi ve performans değerleri bilinen test pervaneleri seçilmiştir. (Çizelge 4.1) Bu pervanelerin geometrileri Ek A.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.3 : Test pervanelerinin geometrik özellikleri

Kod	B	$R_{prop}\ (m)$	$\beta_{prop}\ (°)$	Kesit	Kaynak
1	2	0.8763	18.42	$C_{l_d} = 0.7$	Adkins (1994)
2	2	1.5500	23.65	$C_{l_d} = 0.7$	Larrabee (1979)
3a	2	0.8890	27.99	$C_{l_d} = 0.6$	Bauer (1997)
3b	2	0.8890	27.61	$C_{l_d} = 0.6$	//
3c	2	0.8890	27.79	$C_{l_d} = 0.6$	//
3d	2	0.8890	29.04	$C_{l_d} = 0.6$	//
3e	2	0.8890	28.65	$C_{l_d} = 0.6$	//
4	3	1.4480	26.60	NACA 0009	Yaggy (1960)

Çizelge 4.3'ün kesit sütununa dikkat edilirse ilk yedi pervane için yalnızca tasarım taşıma katsayısının verildiği görülür. Bu pervaneler çizelgede belirtilen kaynaklarda farklı analiz prosedürleri ile yalnızca tasarım noktalarında incelenmiştir. Bu sonuçlar Adkins (1994) tarafından önerilen analiz prosedürünün tutarlılığı için karşılaştırmada kullanılmıştır. Sonuçlar Çizelge 4.4'de verilmiştir.

Çizelge 4.4 : Tasarım noktalarında incelenen pervaneler

Kod	J	Bu Çalışma			Kaynak		
		C_T	C_P	η	C_T	C_P	η
1	0.70	0.050	0.040	0.87	0.047	0.040	0.83
2	0.85	0.031	0.029	0.90	0.031	0.030	0.90
3a	1.31	0.059	0.074	0.90	0.060	0.070	0.90
3b	1.31	0.070	0.092	0.86	0.071	0.084	0.91
3c	1.31	0.065	0.082	0.89	0.066	0.076	0.91
3d	1.31	0.060	0.076	0.90	0.061	0.076	0.90
3e	1.31	0.060	0.077	0.90	0.061	0.075	0.90

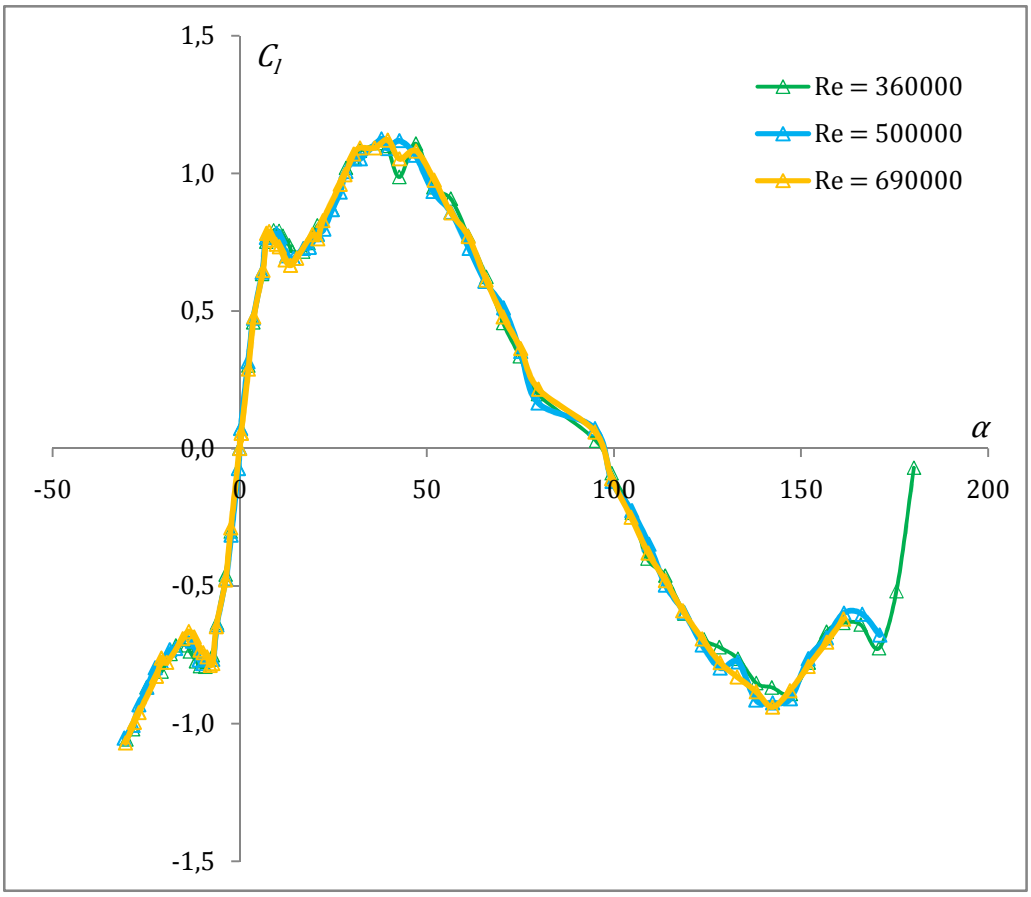
Sonuçlardan görüleceği üzere tasarım noktalarında yapılan hesaplar tatmin edicidir. Hesapların tasarım noktaları dışındaki başarısını incelemek için Pervane-4 ele alınmıştır. Bu bağlamda yedi oturma açısında ve çeşitli ilerleme oranlarında hesaplar yapılmıştır. (Şekil 5.1) (Şekil 5.3)

4.5. Kesit Karakteristikleri

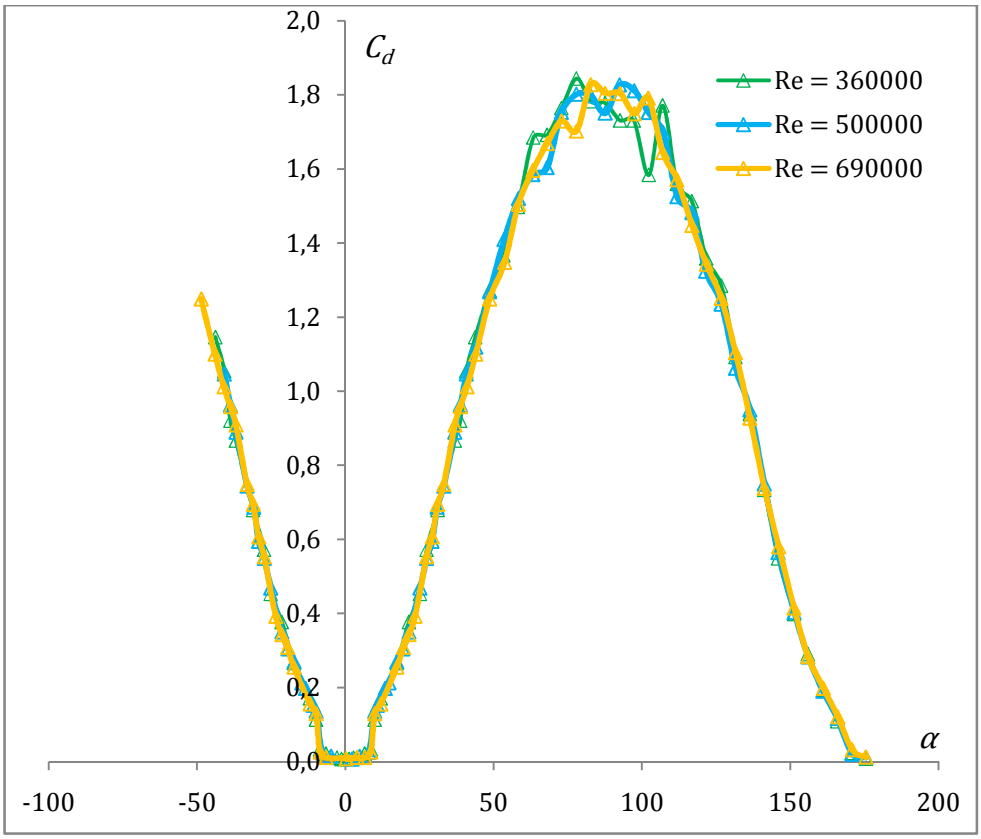
Pervane-4'ün palaları NACA 0009 kesitinden imal edilmiştir. (Şekil 4.2) NACA 0009'un deney verileri Abbott (1945) ve Sheldahl (1981) den alınmıştır. Bu verilerin Reynolds sayısı ve hücum açısı aralıkları Çizelge 4.5'de verilmiştir. Ara değerler için lineer interpolasyon yapılmıştır. Şekil 4.6, 4.7, 4.8 ve 4.9'da deney verileri grafik olarak verilmiştir.

Çizelge 4.5 : NACA 0009 kesitinin deney verileri aralığı

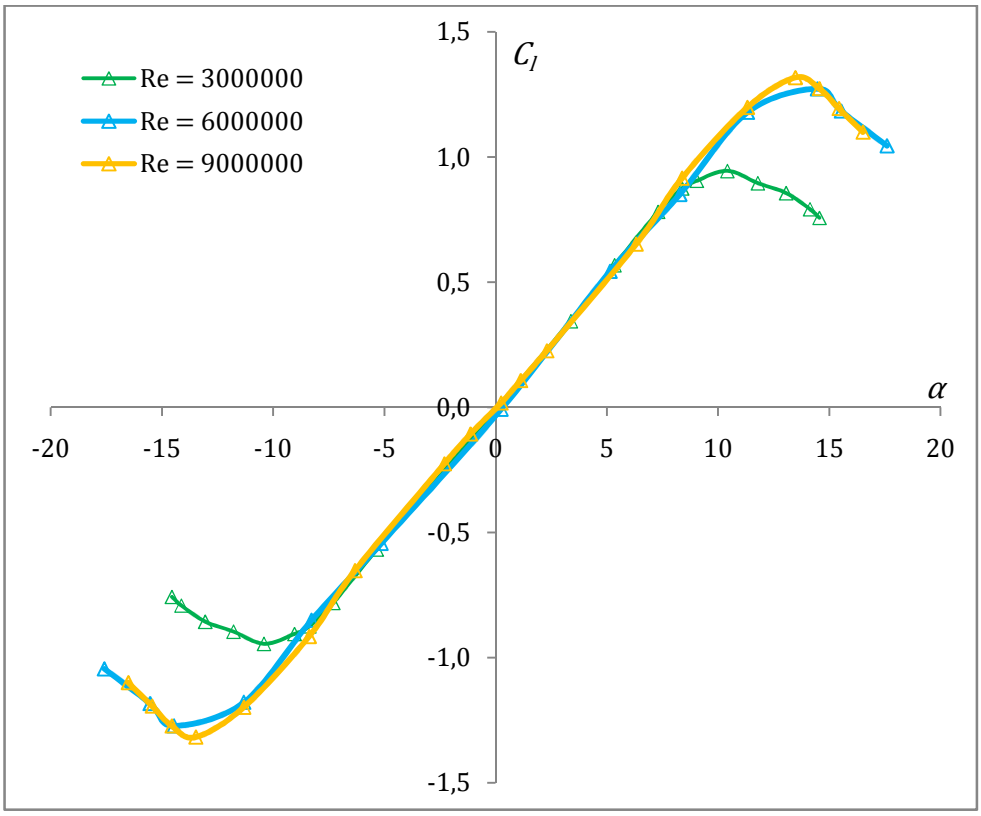
Reynolds Sayısı	α	Kaynak
$3.60e5$	$-30° : 180°$	Sheldahl (1981)
$5.00e5$	$-30° : 171°$	//
$6.90e5$	$-30° : 161°$	//
$3.00e6$	$-14° : 14°$	Abbott (1945)
$6.00e6$	$-17° : 17°$	//
$9.00e6$	$-16° : 16°$	//



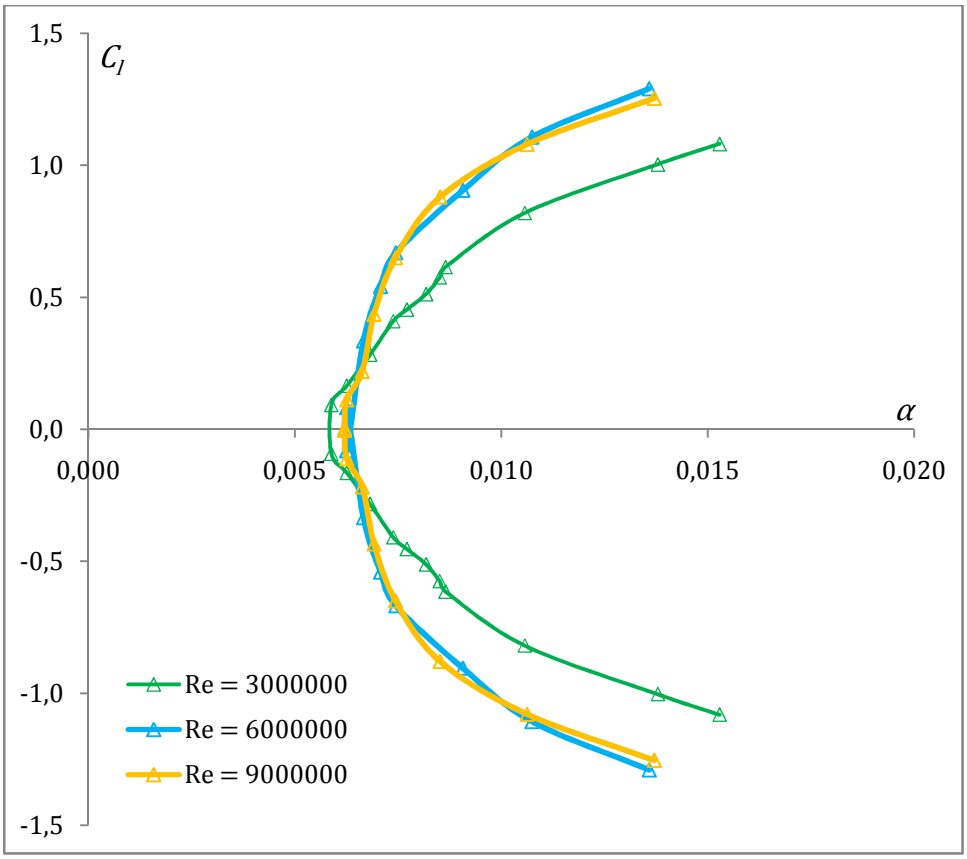
Şekil 4.6 : NACA 0009 kesitinin $\boldsymbol{\alpha - C_l}$ grafiği (Sheldahl, 1981)



Şekil 4.7 : NACA 0009 kesitinin $\boldsymbol{\alpha - C_d}$ grafiği (Sheldahl, 1981)



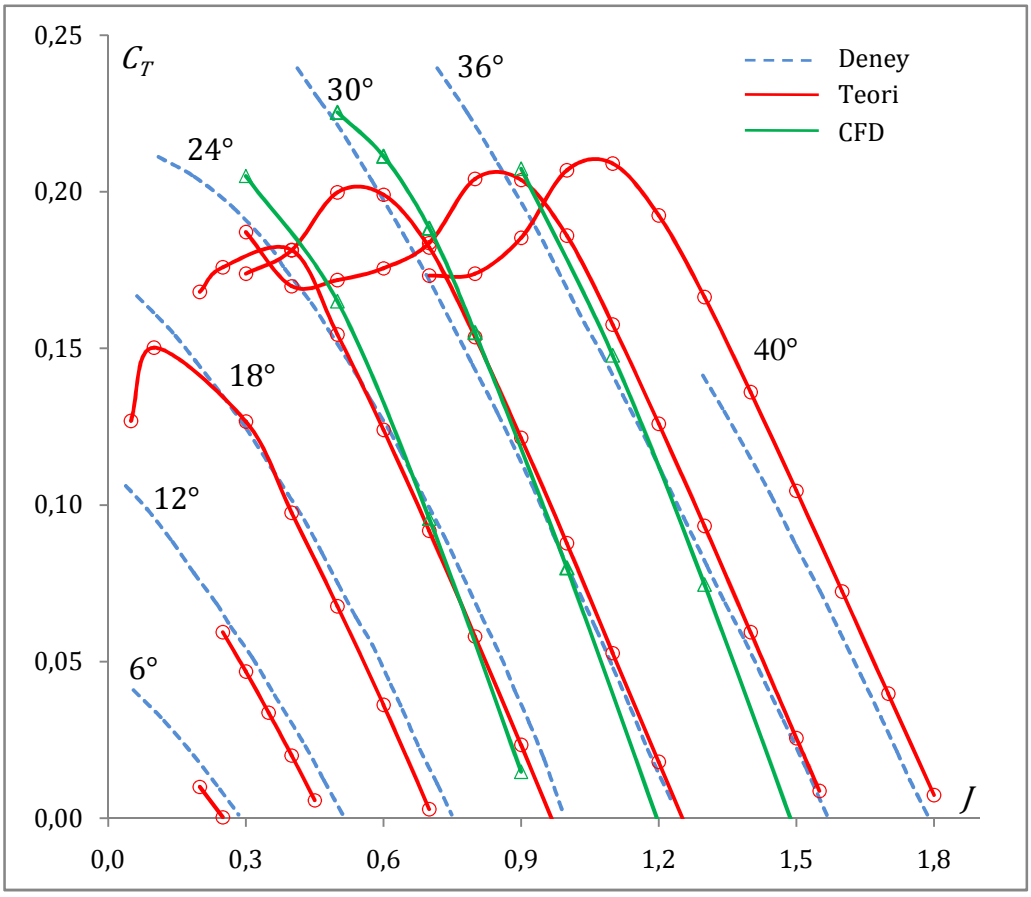
Şekil 4.8 : NACA 0009 kesitinin $\boldsymbol{\alpha - C_l}$ grafiği (Abbott, 1945)



Şekil 4.9 : NACA 0009 kesitinin $C_d - C_l$ grafiği (Abbott, 1945)

5. SONUÇLAR

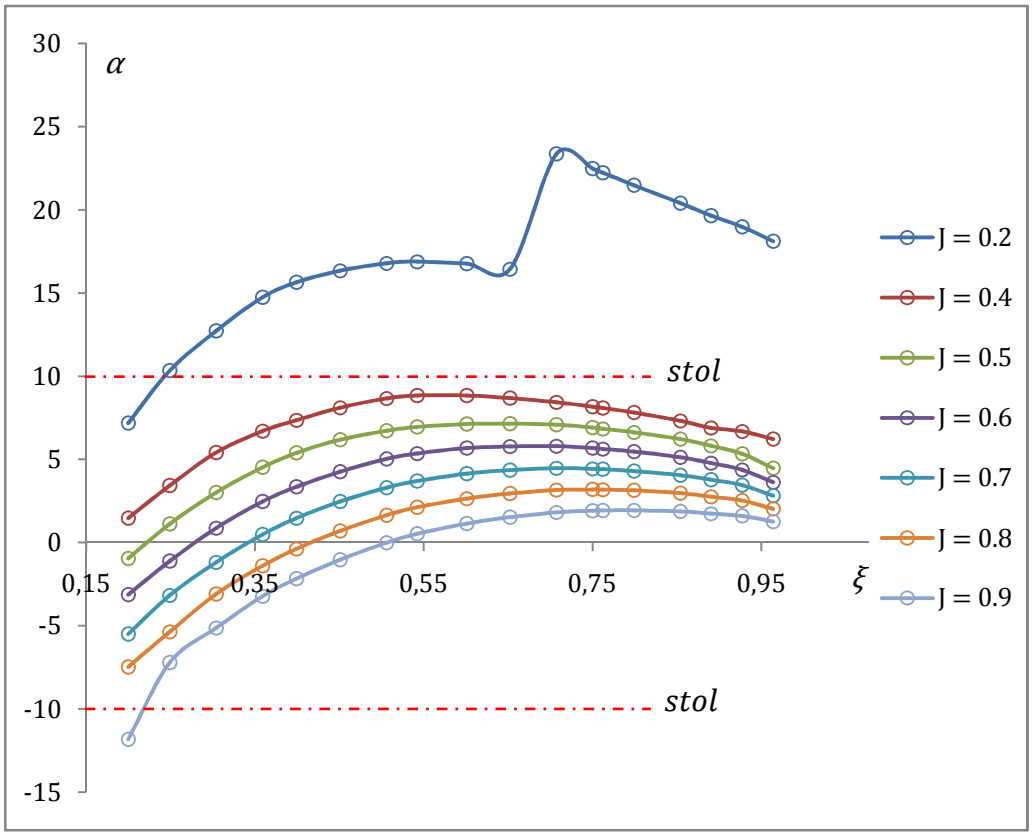
Şekil 5.1'de çeşitli oturma açıları için ilerleme oranı-itki katsayısı grafiği verilmektedir. Bu grafiğe dikkat edilirse tasarım oturma açısı, $\beta_{prop} = 26.6°$'ye yaklaştıkça hata oranının düştüğü gözlenir. Oturma açısının bu değeri civarında hem teori hem de CFD yöntemi ile elde edilen sonuçların deney ile uyumlu olduğu ifade edilebilir. Çok düşük ilerleme oranları için teori sonuçları tutunma kaybını çağrıştıran bir eğri çizerek deney verisinden uzaklaşırken CFD sonuçları deney verisine daha yakın seyir etmektedir.



Şekil 5.1 : Pervane-4 için $\boldsymbol{C_T - J}$ grafiği

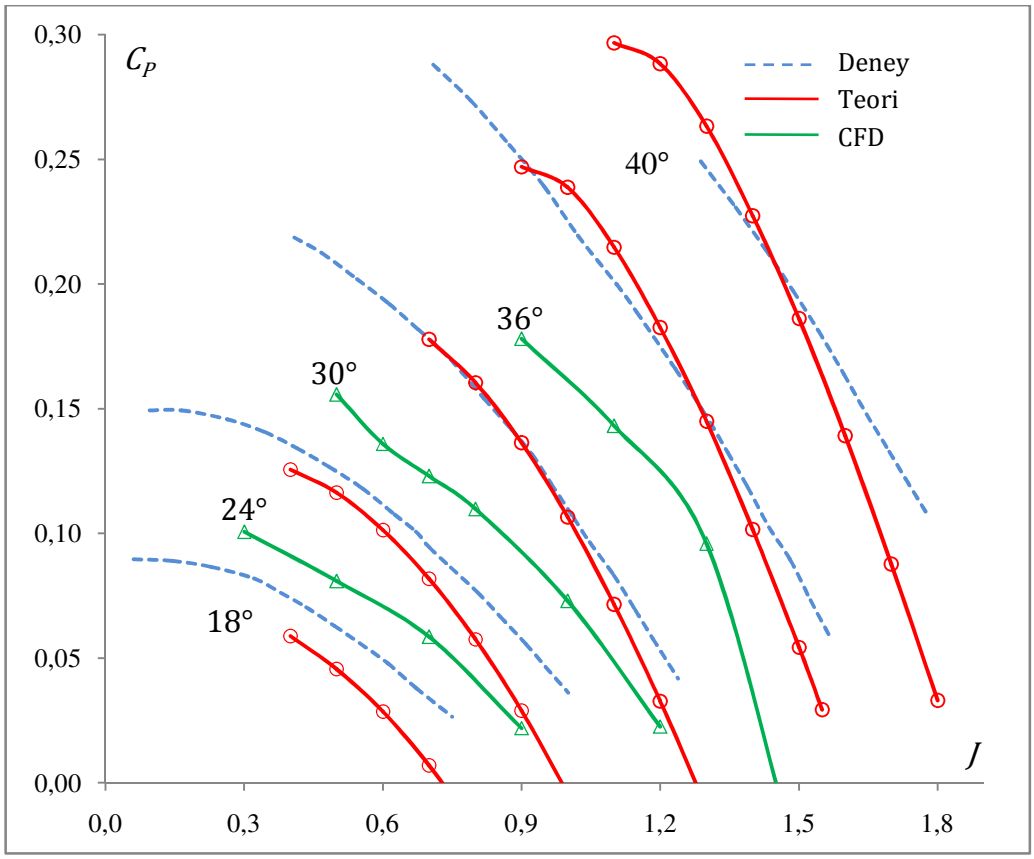
Tasarım noktasındaki hata oranının düşük olmasının nedeni pala boyunca hücum açısı dağılımının lineer taşıma bölgesinde olmasıdır. Şekil 5.2'deki grafikte $\beta_{prop} = 24°$ için çeşitli ilerleme oranlarında hücum açısı dağılımı verilmiştir.

Görüleceği üzere çok düşük ilerleme oranında palanın büyük bir kısmı tutunma kaybına maruz kalmaktadır. Tutunma kaybı bölgesinde ise kesit karakteristiklerinin deney verisinin güvenilirliği belirleyici olmaktadır.



Şekil 5.2 : Pervane-4'ün **24°** oturma açısında çeşitli ilerleme oranları için pala boyunca hücum açısı dağılımı

Güç katsayısı için sonuçlar Şekil 5.3'deki grafikte verilmiştir. Teori sonuçlarının tasarım noktası civarında tatmin edici olduğu gözlenmektedir. Tasarım noktası dışında ise beklendiği üzere hata oranı artmaktadır. CFD yöntemi ile elde edilen değerler ise en düşük çıkmıştır.



Şekil 5.3 : Pervane-4 için $C_P - J$ grafiği

Bu çalışmada klasik pala elemanı-momentum teorisi için Betz'in optimum pervane konseptini de içeren bir analiz programı yazılmıştır. Bu program ile yedi adet pervane tasarım noktalarında analiz edilmiş ve literatürdeki değerleri ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmanın sonucunda bilgisayar programının tutarlı ve tatmin edici sonuçlar verdiğine karar verilmiştir.

Bilgisayar programının tasarım noktası dışındaki başarısını görebilmek amacıyla litaratürden alınan bir pervane çeşitli oturma açıları ve ilerleme oranlarında analiz edilmiştir. İhtiyaç duyulan iki boyutlu kesit (NACA 0009) karakteristikleri düşük Reynolds sayılarında Sheldahl (1981)'den ve yüksek Reynolds sayılarında Abbott (1945)'den alınmıştır. Bilgisayar programı üzerinde inşa edildiği denklemlerden ötürü ok açısız veya düşük ok açılı pervanelerin hesabında kullanılabildiğinden çalışma boyunca ok açısı söz konusu olmamıştır.

Teorinin yanı sıra CFD yöntemi ile de çeşitli analiz uygulamaları yapılmıştır. Bu uygulamalar bahsi geçen NACA 0009 kesitinden imal edilmiş pervanenin çeşitli oturma açısında ve ilerleme oranlarında gerçekleştirilmiştir. Böylece teori ile CFD sonuçları karşılaştırılabilmiştir.

CFD sonuçları teoriye benzer şekilde tasarım noktası ve yakınında itki katsayısı için makul sonuçlar vermiştir. Güç katsayısında ise genel olarak hata oranı yüksek olmuştur. Teori ise belirli bir oturma açısının düşük ilerleme oranlarında itki katsayısı eğiliminde CFD yöntemine nazaran daha başarısız olmuştur.

CFD sonuçlarının iyileştirilebilmesi için simülasyonların optimize edilmesi gerektiği düşünülmektedir. Optimizasyon için yapılabilecek işlemler şu şekilde tespit edilmiştir:

- Çözüm ağının eleman sayısından bağımsızlık testi yapılmalıdır.
- Tutunma kaybı bölgesinde sürüklemenin daha iyi hesaplanabilmesi için alternatif türbülans modelleri olarak SST-kw ve Rea-ke denenmelidir.
- Pervaneyi içerisine alan ve açısal hareket tanımlanan hacimin ebatları değiştirilmeli ve sonuçlar incelenmelidir.
- Tek bir pala ve göbeğin üçte birini içine alan, düzenli ağ yapısına ve periyodik sınır şartlarına sahip bir çözüm ağı kullanılmalıdır.

Bu çalışma ayrıca literatürden daha fazla deney verisi bulunarak genişletilebilir. Bu bağlamda NACA tarafından yapılmış deneylerde kullanılan pervanelerin büyük bir kısmının NACA 16-serisi kesitleri ile imal edilmiş olduğundan bu kesitler için iki boyutlu kesit karakteristikleri elde edilebilir.

KAYNAKLAR

Adkins, C. N., Liebeck R. H., 1994. Design of optimum propellers, *Journal of Propulsion and Power Vol. 10, No. 5, Sept.-Oct.*

Abbott, I. H. V. D., Stivers A. E., 1945. Summary of airfoil data, *NACA Report 824.*

Bauer, A. B., 1997. A new look at optimum propeller performance – Going from the Prandtl F Factor to a Vortex-Induced downwash analysis, *AIAA-1997-5560.*

Betz, A., 1919. Schraubenpropeller mit geringstem energieverlust, *Gottingen Math Phys., pp. 913-217.*

Carlton, J., 2007. Marine propellers and propulsion, *Second Edition, Elsevier.*

Drela, M., Youngren, H., 2001. XFOIL 6.9 User Primer, *<http://web.mit.edu/drela/Public/web/xfoil/xfoil_doc.txt>,* alındığı tarih 19.04.2010.

Drzewiecki, S., 1904. *Bulletin de l'Association Technique Maritime, No.15, Session De 1904, Gauthier-Villars, Imprimeur-Libraire, Paris.*

Durand, W. F., 1935. Airplane propellers, *Aerodynamic theory, Third edition, Vol. IV, Division L.*

Dymarski, P., 2008. Computations of the propeller open water characistics using the SOLAGA computer program, *Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. **VIII**, No.1*

Evans A. J., Liner, G., 1951. A wind-tunnel investigation of the aerodynamic characteristics of a full-scale sweptback propeller and two related straight propellers, *NACA RM L50J05.*

Flaszynski, P., Szantyr1 J., Dymarski, P., Kraskowski, M., 2009. Numerical prediction of vortex generated by hydrofoil, *First International Symposium on Marine Propulsors, Trondheim, Norway*

Froude, R. E., 1889. On the part played in the operation of propulsion differences in fluid pressure, *Translated, RINA 30.*

Froude, W., 1878. On the elementary relation between pitch, slip and propulsive efficiency, *Translated, RINA 19.*

Glauert, H., 1948. The elements of aerofoil and airscrew theory, *Cambridge University Press, Second Edition.*

Goldstein, S., 1929. On the vortex theory of propellers, *Royal Society of London, Proceedings Vol. **1234** pp. 440-465.*

Gur, O., Rosen A., 2005. Propeller performance at low advance ratio, *Journal of Aircraft, Vol. **42**, No. 2, pp.435-441, March-April.*

Gur, O., Rosen A., 2008. Comparison of blade-element models of propellers, *The Aeronautical Journal, Vol. **1122**, No. 1138, December*

Helmbold, H. B., 1931. Goldstein's solution of the problem of the aircraft propeller with finite a number of blades, *NACA Technical Memorandum No. 652.*

Larrabee, E. E., 1979. Practical design of minimum induced loss propellers, *Business Aircraft Meeting and Exposition, Century II, Wichita, April 3-6.*

Larrabee, E. E., 1984. Five years experience with minimum induced loss propellers–Part I: Theory, *International Congress & Exposition, Detroit, Michigan, February 27-March 2.*

Ma, R., Liu, Peiqing, 2009. Numerical simulation of low reynolds number and highlift airfoil, S1223, *Proceedings of the World Congress on Engineering 2009, Vol. **II**, London*

Prandtl, L., 1919. *Vier Abhandlungen zur Hydrodynamik und. Aerodynamik, pp. 213-217.*

Prandtl, L., 1923. Application of modern hydrodynamics to aeronautics*, NACA Technical Note 116.*

Rankine, W. J. M, 1865. On the mechanical principles of the action of propellers, *Translated, RINA 6.*

Reid, E. G., 1949. The influence of blade-width distribution on propeller characteristics, *NACA TN 1834.*

Sheldahl, E. R., Klimas, P. C., 1981. Aerodynamic characteristics of seven symmetrical airfoil sections through 180-degree angle of attack for use in vertical axis wind turbines, *SANDIA Report 80-2114.*

Sholar, J., 1985. A human powered speed aircraft using electrical energy storage, *Massachusetts Institute of Technology, Department of Aeronautics and Astronautics.*

Tachmindji, A. I., Milam A. B., 1957. The calculation of the Circulation for propellers with finite hub having 3, 4, 5 and 6 blades, *DTMB Report No. 1141.*

Theodorsen, T., 1948. Theory of propellers, *First Edition, McGraw-Hill, pp. 213-217.*

Tibery C. L., Wrench, J. W., 1964. Tables of Goldstein factor, *Navy Department, David Taylor Model, Report 1534.*

Vries, O., 1979. Fluid dynamic aspects of wind energy conversion, *AGARD-AG-243.*

Wald, Q., 2006. The aerodynamics of propellers, *Progress in Aerospaces Sciences **42** 85-128.*

Wang, J., Wu, K., 2006. Numerical analysis of the tip vortex in an airconditioner's propeller fan, *School of Energy and Power Engineering, Huazhong University, Institude of Science and Technology, China*

Weick, F. E., 1930. Aircraft Propeller Design, *McGraw-Hill, London.*

Wrench, J. W., 1955. Calculation of Goldstein factors, *Navy Department, David Taylor Model, Report 1111, Reprint of Applied Mathematics Laboratory, Technical Report 14.*

Wrench, J. W., 1957. Calculation of propeller induction factors, *Navy Department, David Taylor Model, Report 1116, Reprint of Applied Mathematics Laboratory, Technical Report 13.*

Yaggy, P. F, Rogallo V. L., 1960. A wind-tunnel investigation of three propellers through an angle-of-attack range from 0° to 85°, *NASA TN D318.*

EKLER

EK A.1. Test pervanelerinin geometrileri

EK A.1

Çizelge A.1 : Error! Bookmark not defined. Pervane (1)'in geometrisi (Adkins, 1994)

ξ	$\bar{c}$	β	C_l
0.1739	0.1191	58.3125	0.7
0.3115	0.1602	41.8645	0.7
0.4493	0.1485	32.2669	0.7
0.5870	0.1242	22.2978	0.7
0.7246	0.0972	18.7971	0.7
0.8624	0.0665	15.9619	0.7
1.0000	0.0000	13.8552	0.7

Çizelge A.2 : Pervane (2)'nin geometrisi (Sholar, 1985)

ξ	$\bar{c}$	β	C_l	C_l/C_d
0.026	0.0181	99.45	0.7	35
0.078	0.0494	79.66	0.7	43.1
0.131	0.0724	69.95	0.7	47.1
0.182	0.0874	61.63	0.7	49.8
0.233	0.0958	54.69	0.7	51.6
0.284	0.0994	48.99	0.7	53.0
0.334	0.0997	44.32	0.7	54.0
0.383	0.0979	45.47	0.7	54.7
0.431	0.0947	37.28	0.7	55.3
0.477	0.0905	34.61	0.7	55.6
0.522	0.0859	32.37	0.7	55.8
0.566	0.0811	30.46	0.7	55.9
0.609	0.0761	28.84	0.7	55.8
0.649	0.0711	27.44	0.7	55.7
0.688	0.0661	25.21	0.7	55.4
0.725	0.0612	25.19	0.7	55.1
0.76	0.0564	24.29	0.7	54.6
0.793	0.0517	23.53	0.7	54.1
0.824	0.0505	22.81	0.7	53.5
0.853	0.0427	22.21	0.7	52.8
0.879	0.0383	21.7	0.7	51.9
0.903	0.0341	21.25	0.7	51.0
0.924	0.0299	20.87	0.7	49.9
0.943	0.0258	25.55	0.7	48.6
0.959	0.0217	25.28	0.7	47.1
0.972	0.0177	20.06	0.7	45.3
0.983	0.0137	19.89	0.7	43.2
0.991	0.0098	19.76	0.7	47.4
0.997	0.0059	19.68	0.7	35.5
1.000	0.0019	19.64	0.7	29.3

Çizelge A.3 : Pervane (3a)'nın geometrisi (Bauer, 1997)

ξ	$\bar{c}$	β	C_l	C_l/C_d
0.2000	0.1099	57.64	0.6	0.102
0.2796	0.1433	49.89	0.6	0.102
0.3591	0.1620	44.40	0.6	0.102
0.4387	0.1694	40.01	0.6	0.102
0.5183	0.1663	36.04	0.6	0.102
0.5979	0.1579	32.92	0.6	0.102
0.6774	0.1460	30.50	0.6	0.102
0.7570	0.1279	28.17	0.6	0.102
0.8366	0.1052	26.15	0.6	0.102
0.9161	0.0752	24.40	0.6	0.102
0.9957	0.0169	22.86	0.6	0.102

Çizelge A.4 : Pervane (3b)'nin geometrisi (Bauer, 1997)

ξ	$\bar{c}$	β	C_l	C_l/C_d
0.2000	0.0856	57.19	0.6	0.102
0.2796	0.1130	49.41	0.6	0.102
0.3591	0.1306	43.92	0.6	0.102
0.4387	0.1408	39.54	0.6	0.102
0.5183	0.1434	35.59	0.6	0.102
0.5979	0.1435	32.50	0.6	0.102
0.6774	0.1429	30.09	0.6	0.102
0.7570	0.1387	27.79	0.6	0.102
0.8366	0.1337	25.80	0.6	0.102
0.9161	0.1283	24.06	0.6	0.102
0.9957	0.1226	22.55	0.6	0.102

Çizelge A.5 : Pervane (3c)'nin geometrisi (Bauer, 1997)

ξ	$\bar{c}$	β	C_l	C_l/C_d
0.2000	0.0982	57.40	0.6	0.102
0.2796	0.1299	49.63	0.6	0.102
0.3591	0.1504	44.13	0.6	0.102
0.4387	0.1622	39.75	0.6	0.102
0.5183	0.1654	35.80	0.6	0.102
0.5979	0.1656	32.69	0.6	0.102
0.6774	0.1618	30.28	0.6	0.102
0.7570	0.1473	27.96	0.6	0.102
0.8366	0.1244	25.96	0.6	0.102
0.9161	0.0907	24.13	0.6	0.102
0.9957	0.0207	22.69	0.6	0.102

Çizelge A.6 : Pervane (3d)'nin geometrisi (Bauer, 1997)

ξ	$\bar{c}$	β	C_l	C_l/C_d
0.1000	0.0271	77.37	0.6	0.102
0.1890	0.0762	65.67	0.6	0.102
0.2780	0.1199	55.92	0.6	0.102
0.3670	0.1468	48.11	0.6	0.102
0.4560	0.1589	41.91	0.6	0.102
0.5450	0.1611	36.99	0.6	0.102
0.6340	0.1584	33.05	0.6	0.102
0.7230	0.1396	29.84	0.6	0.102
0.8120	0.1169	27.19	0.6	0.102
0.9010	0.0827	24.98	0.6	0.102
0.9900	0.0270	23.11	0.6	0.102

Çizelge A.7 : Pervane (3e)'nin geometrisi (Bauer, 1997)

ξ	$\bar{c}$	β	C_l	C_l/C_d
0.1000	0.0837	77.778	0.6	0.102
0.1890	0.1369	66.327	0.6	0.102
0.2780	0.1677	56.713	0.6	0.102
0.3670	0.1801	48.94	0.6	0.102
0.4560	0.1790	42.735	0.6	0.102
0.5450	0.1684	37.783	0.6	0.102
0.6340	0.1514	33.789	0.6	0.102
0.7230	0.1309	30.53	0.6	0.102
0.8120	0.1063	27.837	0.6	0.102
0.9010	0.0757	25.584	0.6	0.102
0.9900	0.0235	23.676	0.6	0.102

Çizelge A.8 : Pervane (4)'ün geometrisi, $\beta_{prop} = 26.6$, (Yaggy, 1960)

ξ	$\bar{c}$	β
0.1994	0.2105	38.84
0.2489	0.2105	37.67
0.3039	0.2105	36.49
0.3589	0.2105	35.32
0.3992	0.2105	34.42
0.4505	0.2105	33.24
0.5055	0.2105	32.07
0.5422	0.2105	31.26
0.6009	0.2105	29.90
0.6522	0.2105	28.73
0.7072	0.2105	27.56
0.7500	0.2105	26.57
0.7622	0.2105	26.29
0.7988	0.2105	25.48
0.8538	0.2105	24.31
0.8905	0.2105	23.49
0.9271	0.2105	22.77
0.9638	0.2105	21.87
1.0000	0.2105	21.07

Çizelge A.9 : Pervane (4)'ün geometrisi, $\beta_{prop} = 6$, (Yaggy, 1960)

ξ	$\bar{c}$	β
0.1994	0.2105	18.27
0.2489	0.2105	17.09
0.3039	0.2105	15.92
0.3589	0.2105	14.75
0.3992	0.2105	13.84
0.4505	0.2105	12.67
0.5055	0.2105	11.50
0.5422	0.2105	10.69
0.6009	0.2105	9.33
0.6522	0.2105	8.16
0.7072	0.2105	6.98
0.7500	0.2105	6.00
0.7622	0.2105	5.72
0.7988	0.2105	4.91
0.8538	0.2105	3.73
0.8905	0.2105	2.92
0.9271	0.2105	2.20
0.9638	0.2105	1.30

Çizelge A.10 : Pervane (4)'ün geometrisi, $\beta_{prop} = 12$, (Yaggy, 1960)

ξ	$\bar{c}$	β
0.1994	0.2105	24.27
0.2489	0.2105	23.09
0.3039	0.2105	21.92
0.3589	0.2105	20.75
0.3992	0.2105	19.84
0.4505	0.2105	18.67
0.5055	0.2105	17.50
0.5422	0.2105	16.69
0.6009	0.2105	15.33
0.6522	0.2105	14.16
0.7072	0.2105	12.98
0.7500	0.2105	12.00
0.7622	0.2105	11.72
0.7988	0.2105	10.91
0.8538	0.2105	9.73
0.8905	0.2105	8.92
0.9271	0.2105	8.20
0.9638	0.2105	7.30

Çizelge A.11 : Pervane (4)'ün geometrisi, $\beta_{prop} = 18$, (Yaggy, 1960)

ξ	$\bar{c}$	β
0.1994	0.2105	30.27
0.2489	0.2105	29.09
0.3039	0.2105	27.92
0.3589	0.2105	26.75
0.3992	0.2105	25.84
0.4505	0.2105	24.67
0.5055	0.2105	23.50
0.5422	0.2105	22.69
0.6009	0.2105	21.33
0.6522	0.2105	20.16
0.7072	0.2105	18.98
0.7500	0.2105	18.00
0.7622	0.2105	17.72
0.7988	0.2105	16.91
0.8538	0.2105	15.73
0.8905	0.2105	14.92
0.9271	0.2105	14.20
0.9638	0.2105	13.30

Çizelge A.12 : Pervane (4)'ün geometrisi, $\beta_{prop} = 24$, (Yaggy, 1960)

ξ	$\bar{c}$	β
0.1994	0.2105	36.27
0.2489	0.2105	35.09
0.3039	0.2105	33.92
0.3589	0.2105	32.75
0.3992	0.2105	31.84
0.4505	0.2105	30.67
0.5055	0.2105	29.50
0.5422	0.2105	28.69
0.6009	0.2105	27.33
0.6522	0.2105	26.16
0.7072	0.2105	24.98
0.7500	0.2105	24.00
0.7622	0.2105	23.72
0.7988	0.2105	22.91
0.8538	0.2105	21.73
0.8905	0.2105	20.92
0.9271	0.2105	20.20
0.9638	0.2105	19.30

Çizelge A.13 : Pervane (4)'ün geometrisi, $\beta_{prop} = 30$, (Yaggy, 1960)

ξ	$\bar{c}$	β
0.1994	0.2105	42.27
0.2489	0.2105	41.09
0.3039	0.2105	39.92
0.3589	0.2105	38.75
0.3992	0.2105	37.84
0.4505	0.2105	36.67
0.5055	0.2105	35.50
0.5422	0.2105	34.69
0.6009	0.2105	33.33
0.6522	0.2105	32.16
0.7072	0.2105	30.98
0.7500	0.2105	30.00
0.7622	0.2105	29.72
0.7988	0.2105	28.91
0.8538	0.2105	27.73
0.8905	0.2105	26.92
0.9271	0.2105	26.20
0.9638	0.2105	25.30

Çizelge A.14 : Pervane (4)'ün geometrisi, $\beta_{prop} = 36$, (Yaggy, 1960)

ξ	$\bar{c}$	β
0.1994	0.2105	48.27
0.2489	0.2105	47.09
0.3039	0.2105	45.92
0.3589	0.2105	44.75
0.3992	0.2105	43.84
0.4505	0.2105	42.67
0.5055	0.2105	41.50
0.5422	0.2105	40.69
0.6009	0.2105	39.33
0.6522	0.2105	38.16
0.7072	0.2105	36.98
0.7500	0.2105	36.00
0.7622	0.2105	35.72
0.7988	0.2105	34.91
0.8538	0.2105	33.73
0.8905	0.2105	32.92
0.9271	0.2105	32.20
0.9638	0.2105	31.30

Çizelge A.15 : Pervane (4)'ün geometrisi, $\beta_{prop} = 40$, (Yaggy, 1960)

ξ	$\bar{c}$	β
0.1994	0.2105	52.27
0.2489	0.2105	51.09
0.3039	0.2105	49.92
0.3589	0.2105	48.75
0.3992	0.2105	47.84
0.4505	0.2105	46.67
0.5055	0.2105	45.50
0.5422	0.2105	44.69
0.6009	0.2105	43.33
0.6522	0.2105	42.16
0.7072	0.2105	40.98
0.7500	0.2105	40.00
0.7622	0.2105	39.72
0.7988	0.2105	38.91
0.8538	0.2105	37.73
0.8905	0.2105	36.92
0.9271	0.2105	36.20
0.9638	0.2105	35.30

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Lütfi Öner

Doğum Yeri ve Tarihi: Konya 1982

Adres: İstanbul

Lisans Üniversite: İstanbul Teknik Üniversitesi

Yayın Listesi:

▪ **Öner L.,** Yükselen A., 2006: Darrieus rüzgar türbininde harekete başlama sorunu için yaklaşımlar, *UHUK*, Eylül 21-23, 2006, ODTÜ, Ankara