

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PERVANENİN GİRDAP KAFES YÖNTEMİYLE
AERODİNAMİK ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nihan ELMAS BAŞGÜNEY

Uçak ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı

Uçak ve Uzay Mühendisliği Programı

OCAK 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PERVANENİN GİRDAP KAFES YÖNTEMİYLE
AERODİNAMİK ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Nihan ELMAS BAŞGÜNEY
(521061107)**

Uçak ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı

Uçak ve Uzay Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. M.Adil YÜKSELEN

OCAK 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 521061107 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Nihan ELMAS BAŞGÜNEY**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**PERVANENİN GİRDAP KAFES YÖNTEMİYLE AERODİNAMİK ANALİZİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. M. Adil YÜKSELEN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Yrd. Doç.Dr. Hayri ACAR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Ergüven VATANDAŞ
Hava Harp Okulu

Teslim Tarihi : **15 Aralık 2014**
Savunma Tarihi : **23 Ocak 2015**

Eşime ve aileme

ÖNSÖZ

Aerodinamik teorisine olan ilgim lisans öğrenciliği döneminde başlamıştır. Fakat bu konunun alt başlıklarından biri olan Pervane Teorisi ile ilgili çalışma yapmam yüksek lisans yıllarımda mümkün olabilmıştır.

Aksiyal fan pervanelerine olan ilgim fan tasarımı, analizi, projelendirme ve satışı konusunda çalıştığım yıllarda gelişti. Bu süre boyunca otoparklar için jet fan projeleri hazırlanması, CFD programlarıyla fan analizi, fanlar için kalite (CE ve yangın) sertifika başvuru dökümanlarının hazırlanması, fan seçimi ve teklif hazırlanması alanlarında çalıştım.

Bu tecrübelerin haricinde pervane analizinde nümerik yöntemlerin uygulamasını yapmak amacıyla bir bilgisayar programı geliştirmek, hem pervane teorileri ve sayısal analiz yöntemleri üzerine sahip olduğum donanımı arttırmış hem de mühendislik yeteneklerimin gelişimine katkı sağlamıştır.

Çalışmam süresince deneyimleri ve bilgisi ile beni yönlendirdiği için danışmanım Sayın Adil Yükselen'e teşekkürü borç bilirim. Ayrıca bu zor süreçte beni yalnız bırakmadıkları ve beni cesaretlendirdikleri için eşim Hakkı Başgüney'e ve sevgili kardeşlerime, anneme ve yakın zamanda kaybettiğimiz babama ve arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Ocak 2015

Nihan Elmas Başgüney
(Uzay Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
KISALTMALAR.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY.....	xix
1.GİRİŞ.....	1
1.1 Motivasyon	1
1.2 Literatür Araştırması	3
1.3 Tezin Amacı	5
2.PERVANE TEORİSİ.....	7
2.1 Pervane Teorisinin Tarihsel Gelişimi	7
2.2 Momentum Teorisi	9
2.3 Pala Elemanı Teorisi	11
2.4 Pala Elemanı-Momentum Teorisi	14
2.4.1 Lineerleştirilmiş uç düzeltme teorisi	14
2.5 Taşıyıcı Çizgi Teorisi	15
3.PERVANE İÇİN GİRDAP KAFES YÖNTEMİ.....	19
3.1 Kanat Etrafındaki Akımın Fiziği	19
3.2 Pervane Palası İçin Girdap Kafes Modeli.	20
3.3 Pervane Etrafındaki Akımın Fiziği.....	21
3.4 Pervane İçin Girdap Kafes Modeli	23
3.5 Pervane Geometrisinin Tanımlanması	24
3.5.1 Test çalışması için pervane pala geometrisinin oluşturulması	24
3.5.1.1 Pala üst görünüm	25
3.5.1.2 Pala kesit açıları.....	26
3.5.1.3 Panel köşe noktalarının koordinatlarının hesaplanması	26
3.5.2 Verili pervane büyüklükleri ile pala geometrisinin oluşturulması	27
3.5.2.1 Kamburluk eğrisi koordinatlarının hesaplanması.....	25
3.5.2.2 İlk pala panel köşe noktalarının koordinatlarının hesaplanması.....	28
3.5.2.3 Diğer pala panel köşe nokta koordinatlarının hesaplanması	29
3.6 Panel Özelliklerinin Hesaplanması.....	30
3.7 Panel Normal Vektörünün Hesaplanması	31
3.8 İz Modeli	31
3.8.1 İz modelinin seçimi.....	31
3.8.2 İz modelinin oluşturulması	33
3.8.2.1 Helis hatve dağılımının hesaplanması	33
3.8.2.2 İz girdaplarının uç noktası koordinatlarının hesaplanması	34
3.9 İndüklenmiş Hızların Hesaplanması.....	36
3.9.1 Sabit şiddetli doğrusal girdap parçasının indüklemesi.....	36

3.10 Lineer Denklem Sisteminin Oluşturulması Ve Çözümü	37
3.11 Pervane Performans Parametrelerinin Hesaplanması	39
3.11.1 Pervane çekme katsayısının hesaplanması	39
3.11.2 Pervane moment katsayısının hesaplanması	40
3.11.3 Pervane güç katsayısı ve verimin hesaplanması	41
4. KANAT TEST ÇALIşMALARI	43
4.1 Pervane Palası İçin Test Çalışması	43
4.1.1 Düz levha taşıma katsayısı hesabı	44
4.1.2 Kamburluksuz profil taşıma katsayısı hesabı	44
4.1.3 Kamburluklu profil taşıma katsayısı hesabı	46
4.2 Gerçek Bir Kanat Profili İçin Taşıma Katsayısı Hesabı	46
4.2.1 NACA 4412	46
4.2.2 NACA 4415	47
5. PERVANE UYGULAMALARI.....	51
5.1 Pervane İçin Test Çalışması	51
5.1.1 MAYpropBEM programı	51
5.1.2 Pervane 1.....	52
5.1.2.1 Profil bilgileri.....	52
5.1.2.2 Pervane tasarım sonuçları	53
5.1.2.3 Pervane analiz sonuçları	54
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	59
KAYNAKLAR.....	63
ÖZGEÇMİş.....	67

KISALTMALAR

V_{∞}	: Serbest akım hızı
Ω	: Açısal hız
V_R	: Bileşke hız
α	: Hücüm açısı
c_D	: Sürüklenme katsayısı
c_L	: Taşıma katsayısı
ϕ	: İndüklenmiş akım hızı doğrultusu
γ	: Bileşke kuvvetin taşıma kuvveti doğrultusuyla yaptığı açı
σ	: Pervanenin katılığı
N_B	: Pervane pala sayısı
c	: Veter uzunluğu
θ	: Kesit konum açısı
Γ	: Girdap şiddeti
L	: Taşıma kuvveti
w	: İndüklenmiş hız
α_i	: İndüklenmiş hücüm açısı
D_i	: İndüklenmiş sürüklenme
R	: Bileşke kuvvet
V_e	: Efektif rüzgâr hızı
α_e	: Efektif hücüm açısı
α_g	: Geometrik hücüm açısı
n_i	: Panel normal vektörü
R_i	: Etkin akım hız vektörü
V_{ij}	: Etkin hız
ρ	: Akışkan yoğunluğu
N_J	: Pervanenin palası açıklığı boyunca panel sayısı
r_{Root}	: Pala kökünün pervane merkezine olan radyal uzaklığı
r_{Prop}	: Pervane yarıçapı
c_{Root}	: Pala kökünün veter uzunluğu
c_{Prop}	: Pala ucunun veter uzunluğu
b_{Blade}	: Pala uzunluğu
S_{Blade}	: Pala alanı
θ_0	: Burulma açısı
β	: Hatve
N_I	: Pervane veteri boyunca panel sayısı
δ	: Pervane palaları arasındaki açı
J_{Prop}	: Pervane ilerleme oranı
b	: Eksenel indüklenme faktörü
a	: Teğetsel indüklenme faktörü
V_{ei}	: Etkin akım hızı
c_T	: Çekme katsayısı
c_M	: Moment katsayısı
D_{Prop}	: Pervane çapı

c_p	: Pervane güç katsayısı
η	: Pervane verimi
a_∞	: Kanat kesit profilinin taşıma eğrisi eğimi
α_0	: Sıfır taşıma hücum açısı
AR	: Açıklık oranı
E_{max}	: Maksimum finesin büyüklüğü
α_{diz}	: Maksimum fines hücum açısı
cl_{diz}	: Maksimum fines hücum açısındaki taşıma katsayısı

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 5.1 : Pervane tasarım parametreleri	52
Çizelge 5.2 : Profil verileri	52
Çizelge 5.3 : Profil için taşıma katsayısı ve finesin hücum açısıyla değişimini formüle eden katsayılar	53
Çizelge 5.4 : Profil kamburluk fonksiyonu.....	54
Çizelge 5.5 : Pervane tasarım sonuçları.....	54
Çizelge 5.6 : Pervane tasarım parametreleri ile tasarım koşullarında pervane performansı	55
Çizelge 5.7 : Pervane 1'in pervane tasarım noktasında analiz sonuçları ($J_{Prop} = 0,467$)	55
Çizelge 5.8 : Pervane 1'in farklı ilerleme oranlarında analiz sonuçları (BEM).....	55
Çizelge 5.9 : Pervane 1'in farklı ilerleme oranlarında analiz sonuçları (VLM).....	56

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Gemi ve uçak pervanesi	1
Şekil 1.2 : Fan ve rüzgar türbini pervanesi	2
Şekil 1.3 : Pervane geometrisi	2
Şekil 2.1 : Taşıyıcı disk	10
Şekil 2.2 : Pala elemanının izi ve pala elemanına etkiyen kuvvetler.....	12
Şekil 2.3 : Pervane palaları arkasındaki girdap katmanlarının taşınma hızı.....	16
Şekil 2.4 : Kanat üzerindeki girdap sisteminin basit bir modeli.....	16
Şekil 2.5 : Kanat üzerindeki girdap sistemi için daha gerçekçi bir model	17
Şekil 2.6 : Γ şiddetinde girdap iplikçığının herhangi bir p noktasında indüklediği hız.....	17
Şekil 2.7 : Kanat profili üzerindeki açı ve kuvvetler	18
Şekil 3.1 : NACA 4412 profili etrafındaki akımın ve firar kenarındaki uç girdaplarının duman ile görüntülenmesi	19
Şekil 3.2 : Kanadın arkasında oluşan girdap sistemi	20
Şekil 3.3 : Pervane palası için girdap kafes modeli	21
Şekil 3.4 : Pervane etrafındaki girdap sistemi	22
Şekil 3.5 : Pervane kanadı arkasındaki girdap sistemi	22
Şekil 3.6 : Pervane için girdap kafes yöntemi modeli	23
Şekil 3.7 : Pala geometrisini tanımlayan parametreler	25
Şekil 3.8 : Pala kesit açıları.....	27
Şekil 3.9 : Kamburluk eğrisi koordinatları	28
Şekil 3.10 : Panel köşe noktası koordinatları.....	29
Şekil 3.11 : Pervane geometrisi	30
Şekil 3.12 : Girdap uç noktası ve panel kontrol noktalarının koordinatlarının hesaplanması	31
Şekil 3.13 : Panel normal vektörü.....	31
Şekil 3.14 : Pervane palası kesit profili için hız diyagramı	33
Şekil 3.15 : Pervane pala kesidi üzerindeki hız bileşenleri	34
Şekil 3.16 : Pervane iz geometrisi	35
Şekil 3.17 : Girdap iplikçiklerinin z koordinatının hesaplanması	35
Şekil 3.18 : İz girdap iplikçiklerinin uç noktalarının x ve y koordinatlarının hesaplanması	36
Şekil 3.19 : İndüklenmiş hızların hesaplanması	36
Şekil 3.20 : Üç boyutlu doğrusal girdap parçasının indüklediği hızın hesabında kullanılan terminoloji	37
Şekil 3.21 : Pervane için girdap kafes yöntemi modeli	38
Şekil 3.22 : Pervane palası üzerindeki panelin oluşturduğu kuvvet	40
Şekil 3.23 : Pervane palası üzerindeki panelin oluşturduğu moment.....	41
Şekil 4.1 : Düz levha ile gerçek kanat profilinin taşıma eğrisi eğiminin karşılaştırılması	43
Şekil 4.2 : Düz levha geometrisi.....	44

Şekil 4.3 : Düz levha ve hayali profil taşıma eğrisi eğiminin karşılaştırılması	45
Şekil 4.4 : Kamburluksuz profil hücum açısı-taşıma katsayısı değerleri	45
Şekil 4.5 : Kamburluklu profil hücum açısı-taşıma katsayısı değerleri.....	46
Şekil 4.6 : NACA 4412 profili hücum açısı-taşıma katsayısı değerleri.....	47
Şekil 4.7 : NACA 4415 taşıma katsayısı değişimi ($AR=6$)	48
Şekil 4.8 : NACA 4415 taşıma katsayısı değişimi ($AR=9$)	48
Şekil 4.9 : NACA 4415 taşıma katsayısı değişimi ($AR=12$)	49
Şekil 5.1 : Taşıma katsayısı-hücum açısı.....	53
Şekil 5.2 : Fines-hücum grafiği.....	53
Şekil 5.3 : İtke katsayısı-ilerleme oranı grafiği	56
Şekil 5.4 : Moment katsayısı-ilerleme oranı grafiği	56

PERVANENİN GİRDAP KAFES YÖNTEMİYLE AERODİNAMİK ANALİZİ

ÖZET

Bu çalışmada pervanelerin aerodinamik performanslarının nümerik yöntem ile belirlenmesi amacıyla girdap kafes yöntemini temel alan ve FORTRAN dilinde yazılmış bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Program girdi olarak verilen pervane geometri bilgisini, pervane ilerleme oranını ve pervane palalarının kesit profil bilgilerini kullanarak hesap yapmaktadır.

Literatürde girdap kafes yöntemi ile yapılmış çok sayıda çalışma mevcuttur. Bu yöntem özellikle tasarım aşamasında oldukça hızlı ve doğru sonuç verdiği için tercih edilmektedir. Ancak girdap kafes yöntemleri taşıyıcı elemanı kamburluk eğrisinden ibaretmiş gibi varsaydığından viskoz etkileri hesaba katamamaktadır.

Çeşitli kanat profilleri ve test pervanesi için programda kullanılan yöntemin güvenilirliğini ve doğruluğunu göstermek için birçok uygulama yapılmıştır. Çalışma sonuçlarını değerlendirmek amacıyla daha önce geliştirilmiş olan taşıyıcı çizgi teorisi ve pala elemanı-momentum teorisi programları kullanılmıştır.

Kanat üzerindeki doğrulama çalışmaları taşıyıcı çizgi yöntemi programı (MAYwingPLL) ile gerçekleştirilmiştir. İlk uygulamada düz levha şeklindeki kanat ve taşıma eğrisi eğimi düz levhadan daha küçük olan kamburluksuz hayali profile sahip kanat için analiz yapılmıştır.

Çeşitli hücum açılarında kamburluksuz profil sonuçlarına göre, taşıyıcı çizgi teorisi ve girdap kafes yöntemi elde edilen taşıma katsayısı değerleri birbirine çok yakındır. Bu değerlerin analitik olarak hesaplanan düz levha ve hayali profil verileri ile karşılaştırılması sonucunda analitik çözüm ile aynı hücum açılarında daha yüksek taşıma katsayısı değerleri hesaplandığı görülmektedir. Çünkü üç boyutlu kanat iki boyutlu kanattan farklı olarak taşımanın yanında indüklenmiş sürüklenme bileşenini de içerir ve üç boyutlu kanatta iki boyutlu kanat ile aynı hücum açısında taşıma daha azdır.

İkinci uygulama olarak, sayısal yöntemlerin kamburluğa ne tepki vereceğini göstermek için aynı hayali profile bir kamburluk verilmiştir. Taşıyıcı Çizgi Teorisi ile elde edilen taşıma katsayıları, profil kamburluğunu dikkate alacak biçimde bir değişime uğrayarak, Girdap Kafes Yöntemi ile elde edilen taşıma katsayılarından daha büyük değerler almaktadır.

Üçüncü uygulama olarak gerçek bir kanat profiline ait doğrusal olmayan bölgeyi de içeren veri kullanılmıştır. Kesit profili olarak NACA 4412 profili seçilmiştir. Her iki yöntemle (Taşıyıcı Çizgi Teorisi ve Girdap Kafes Yöntemi) elde edilen sonuçlarda doğrusal bölge içinde taşıma katsayıları literatürden alınan taşıma katsayısı değerlerine benzer şekilde lineer bir artış göstermektedir. Her iki yöntemde de viskoz etkiler hesaba katılmadığı için, kanat profilinin doğrusal olmayan bölgesinde taşıma eğrisi eğiminde azalma olmamıştır.

Pala test çalışmalarının en sonuncusunda deneysel çalışmalarla bir karşılaştırma yapılarak yöntemin genel başarısı hakkında bilgi edinilmesi amaçlanmıştır. Bu çerçevede dikdörtgensel üst görünümlü kanadın kesit profili olarak NACA 4415 profili seçilmiştir. Bu uygulamada dikdörtgensel üst görünümlü kanadın açıklık oranının 6, 9 ve 12 değerleri için hesaplamalar yapılmış olup, bu sonuçlar Ostowari ve Naik tarafından verilen üç-boyutlu deneysel sonuçlarla karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Açıklık oranı değeri küçük olduğunda ($AR=6$) Girdap Kafes Yöntemi sonuçları $0^\circ < \alpha < 10^\circ$ arasında deney sonuçlarına doğru yaklaşmaktadır. Fakat sonuçlar arasındaki uyum yeterli değildir. Bu durum uygulanan yöntemin kanat üzerinden geçen akımı yaklaşık iki boyutlu kabul etmesinden kaynaklanmaktadır. Bu açıklık oranı için üç boyutlu etkiler kuvvetli olup, kesit profili bilgisinin kullanılması hataya yol açmaktadır. Açıklık oranının daha büyük olduğu ($AR=9$ ve $AR=12$) iki halde VLM sonuçları ile deney sonuçları arasında iyi bir uyum olduğu görülmektedir. Bu da Girdap Kafes Yöntemi'nin açıklık oranı yeterince büyük olmak kaydıyla güvenilir bir yöntem olduğunu göstermektedir.

Pervane üzerindeki uygulama için ise geometrisi ve performans değerleri bilinen test pervanesi seçilmiştir. Test pervanesi kanat profili olarak Clark Y profili kullanılmıştır. Pervane için yazılan Girdap Kafes Yöntemi (VLM) programının sonuçlarının doğruluğunun kontrolü, pervanenin tasarım ve analizi için hazırlanmış ve klasik momentum ve pala elemanı teorilerine dayanan (MAYpropBEM) programı aracılığıyla yapılmıştır.

Öncelikle BEM programı aracılığıyla pervanenin tasarımı yapılmıştır. Ardından farklı ilerleme oranı değerlerinde pervane performansı hesaplanmıştır. Farklı ilerleme oranları için Girdap Kafes Yöntemi ve Pala Elemanı Yöntemi ile elde edilen çekme katsayısı değerlerinin karşılaştırılması sonucu, tasarım ilerleme oranı ($J_{prop}=0,467$) civarında iki yöntemin sonuçlarının oldukça uyumlu olduğu, farklı ilerleme oranlarında ise çekme katsayısının değişimlerinin birbiriyle uyumlu olduğu görülebilir.

Farklı ilerleme oranları için Girdap Kafes Yöntemi ve Pala Elemanı Yöntemi ile elde edilen moment katsayısı değerlerinin değişimlerinin birbiriyle uyumlu olduğu görülebilir.

AERODYNAMIC ANALYSIS OF A PROPELLER BY VORTEX LATTICE METHOD

SUMMARY

Propellers with different shaped blades are used in many applications like fans, ships, wind turbines, aircrafts and helicopters.

In this study, aerodynamic performance of a propeller is analysed numerically by using vortex lattice method. A FORTRAN based computer program is developed for this project. Propeller geometry information, propeller advance ratio and propeller blade section characteristics is used as program input for numerical calculation.

There are many studies in literature which used computational fluid dynamics (CFD) methods, experimental methods and vortex lattice method (VLM) in order to calculate propeller performance in fans, ships, wind turbines, aircrafts and helicopters.

There are numerical methods like momentum method, blade element method and Prandtl lifting line method in propeller theory. These methods are also used in literature for propeller calculations. According to studies in literature, thrust and tork values calculated by blade element method are generally %10 greater than values calculated by experimental methods. This difference is resulted from constraint of this method on considering effects of trailing vortices and blade vibration effects on propeller performance.

There are also studies in literature comparing blade element method and CFD method. Blade element method and CFD thrust, tork and efficiency results are very similiar to each other and distribution graphics behave in a similiar way. CFD method shows tip loss caused by tip vortices better than blade element method. Because of this, there is a significant reduction in CFD profile's tip region.

CFD methods can offer better opportunities for fan performance development rather than old design and analysis technics. CFD programs solve Navier-Stokes Equations for whole flow region. Programs written by VLM method can only calculate velocity and pressure on required location. In slender blades, successful results can be obtained by VLM method by using less computer force.

Vortex lattice method helps selecting appropriate blade geometry from different blade geometries and helps rapid pre-design. There are many studies in literature which used vortex lattice method (VLM), in order to calculate propeller performance in ship, aircraft and helicopter propellers. However, there are few studies in literature which are analysing fluid flow around axial fans.

Vortex lattice method is selected by researchers because it helps getting rapid and accurate results for propeller design. The weakness of the method is that lifting element is only considered as a camber curve and neglects thickness. Because of this assumption, VLM method can't consider viscose effects. In vortex lattice model which is build up for propeller, blades are divided into panels along span and chord.

Flow around propeller can be modelled by horse shoe vortices on every panel. Vortex strengths are problem's unknown parameters. In this method, horse shoe vortex strengths on blades opposite to each other are same. So, calculating vortex strengths on one of the blades is enough, it is not necessary to calculate for other blades.

Solution of equation system can be done by using surface boundary condition. Surface boundary condition assumes that flow's component vertical to boundary is equal to zero. Aerodynamic forces can be calculated from vortex strengths calculated by Joukowski lifting law.

Trailing vortices behind 3D blade's wake is propagating in blade's moving frame. In propellers, trailing vortices are propagating behind propeller by helical trajectories on wake at the effect of revolving and advancing movements of propeller.

Root vortex is extending along rotor axis linearly. Going far from propeller, wake vortex straitens and similarity in geometry breaks. In this case it is supposed to be damped in far regions from propeller.

Helix wake behind a propeller generated by vortex sheet which is built up by trailing vortices can be modelled by several wake methods. Wake methods can be divided into two basic methods, steady and transient methods. Prescribed wake model is a steady method which describes wake as a function. Free wake model is a transient method which includes rolling on blade tip and calculates wake vortex coordinates iteratively.

In this study, free wake model isn't preferred because it needs long computational time and there is a little role on accuracy of the results. Prescribed wake model is selected in order to obtain wake vortex coordinates.

Total thrust and moment on a propeller can be calculated if propeller blade geometry, blade section characteristics, propeller advance velocity, rotation velocity and density of air is given. By using these values propeller performance parameters (thrust coefficient, moment coefficient and efficiency) can be calculated.

Program results are validated by using different blade profiles. Propeller results are validated by using a test propeller with known geometry and performance. Prandtl lifting line and blade element-momentum based programs which are developed before are used for validation of VLM based study results.

Validation studies for propeller blades are performed by using lifting line method program (MAYwingPLL). In first application, uniform sheet shaped blade and blade which has a imaginary profile without camber with a smaller lifting curve slope is analysed.

According to results of a profile without camber, lifting coefficient values calculated in different angles of attack with lifting line method and vortex lattice method are similar to each other. Numerically calculated values are compared with analytically calculated values taken from literature. Lifting coefficient values calculated analytically for sheet shaped blade and a blade which has a imaginary profile, are greater than numerically calculated values because lift in 3D blade is smaller than lift in 2D blade in same angle of attack. Because 3D blade has an induced drag component added to lift which doesn't exist in 2D blade.

In second application, camber is added to imaginary profile in order to see effect of camber in numerical method results. Lifting coefficients that are calculated by lifting

line method has changed under the effect of profile camber. Lifting coefficients that are calculated by lifting line method are greater than lifting coefficients that are calculated by vortex lattice method.

In third application, real blade profile data which includes non-linear region data of an airfoil is used. NACA 4412 is chosen as a blade section profile. In results which are calculated by two methods (lifting line theory and vortex lattice method), lifting coefficients in linear region is increasing linearly similar to lifting coefficients in literature. There isn't any reduction in slope of lifting curves of two methods in blade profile's non-linear region because viscous effects are not included.

In last blade test study, numerical results are compared with experimental study results in order to examine success of the method. NACA 4415 profile is chosen as rectangular blade section profile. In this application, calculations are made for rectangular blade with aspect ratio values 6, 9 and 12. Results are given compared with 3D experimental results given by Ostowari and Naik.

When aspect ratio value is small ($AR=6$), vortex lattice method results are converging to experimental results between angle of attack interval $0^\circ < \alpha < 10^\circ$. However harmonization between results isn't enough because flow passing above blade is assumed to be 2D in vortex lattice method. In this aspect ratio, 3D effects are stronger and using section profile values causes mistakes.

When aspect ratio value is greater ($AR=9$ and $AR=12$), experimental and numerical results are consistent with each other. This study shows that when aspect ratio value is big enough, vortex lattice method is a reliable method.

Test propeller with known geometry and performance parameters is selected for propeller application. Clark Y profile is used for test propeller blade profile.

MAYpropBEM program is used for validation of results of vortex lattice method program for propeller. This program is used for propeller design and analysis. It is based on momentum and blade element methods.

First of all, propeller in required conditions is designed with BEM program. Using this propeller geometry in design conditions, propeller performance is calculated in different advance ratio values.

Thrust coefficients values which are calculated by vortex lattice method and blade element methods are compared. Results of two methods are consistent with each other around design advance ratio ($J_{prop} = 0,467$). In different advance ratios, variation of thrust coefficient values are also consistent with each other.

Moment coefficient values calculated for different advance ratios by vortex lattice and blade element methods are consistent with each other.

Efficiency values calculated by VLM method are greater than efficiency values calculated by BEM method in same advance ratios. Because VLM method doesn't consider viscous effects.

However, this study can be extended by finding new propeller geometries and experimental studies from literature .

Also VLM studies can be compared with other CFD studies or Numerical method studies solved with other methods in literature. New experimental studies can also be used for comparing with VLM studies.

1. GİRİŞ

1.1. Motivasyon

Bu çalışmada pervane girdap kafes yöntemiyle analiz edilecektir. Literatürde pervanelerin CFD, deneysel yöntemler ve Girdap Kafes Yöntemi (VLM) ile incelenmesine dayanan çok sayıda çalışma mevcuttur.

Pervane, döner bir milin üzerine yerleştirilmiş, uygun bir aerodinamik biçim verilmiş palalardan oluşan; itme veya çekme gücü sağlayan alettir (Wikipedia. 2014b). Şekil 1.1'de ve Şekil 1.2'de görüldüğü gibi pervanelerin uçaklar, helikopterler, gemiler, rüzgar türbinleri ve fanlar gibi birçok kullanım alanı mevcuttur. Rüzgâr türbinleri ve uçak motorları türbinler grubuna girerken, fan, pompa vb. kompresörler grubuna girer. (Ingram, 2009, Chapter 1, Section 1.3, para. 4).

Turbo makine, rotor ve akışkan arasında enerji transfer eden makinedir. Türbin enerjiyi akışkandan rotora transfer ederken, kompresör enerjiyi rotordan akışkana transfer eder (Wikipedia. 2014c).



Şekil 1.1: a) Gemi pervanesi. b) Uçak pervanesi.

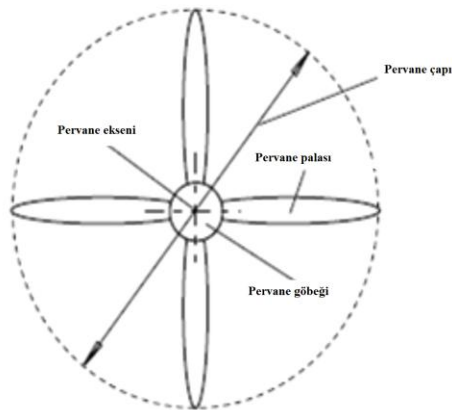
Uçak motorlarında pervane, içten yanmalı bir motorun veya türbinli bir motorun (türbo-prop) ürettiği mekanik enerjiyi önündeki hava kitlesini uçağın hareket yönüne zıt yönde hızlandırmak suretiyle ileri doğru bir çekme kuvvetine dönüştürür (Yükselen, 2014c, sy 1).

Fanlar hissedilen sıcaklığın istenilen konfor sıcaklığında tutulmasını sağlarken, direkt olarak sıcaklığı düşürmez. Elektrikli cihazlarda, motorlarda veya diğer makinelerde kullanılan fanlar sıcak havayı daha soğuk olan dışarıdaki ortama atarak, cihazı soğuturlar. Havayı hareket ettirmek için kullanılan fanların aksiyal, santrifüj (radyal) ve çapraz akışlı (teğetsel) olmak üzere üç ana çeşidi vardır. Fan kanatları kullanım amaçlarına göre değişik şekillerde dizayn edilebilir (Wikipedia. 2014a).



Şekil 1.2: a) Fan pervanesi. b) Rüzgar türbini pervanesi.

Bir pervane göbeği, etrafında eşit açısal aralıklarla konumlandırılmış ve pervane palası adı verilen kanatçıklardan meydana gelir. Pala sayısı genellikle 2, 3 veya 4 olur. Şekil 1,3'te görüldüğü gibi pervanenin de etrafında döndüğü göbek eksenine pervane eksenini, pala uçlarının izdüşümü olan daire çemberinin çapına ise pervane çapı adı verilir.



Şekil 1.3: Pervane geometrisi (Yükselen, 2014b, sy)

1.2. Literatür Araştırması

Hardin ve Burmeister (1999) havalandırma amacıyla kullanılan üç adet büyük metal kanada sahip aksiyal fanın performansının Girdap Kafes Yöntemi (VLM) ile belirlenmesi üzerine çalışmıştır. Dönen aksiyal fan palaları etrafındaki hava akışının analizi ve kanat tasarımı için uçak pervaneleri, helikopter rotorları, gemi pervaneleri ile ilgili literatürdeki çok sayıda VLM çalışmasından yararlanmıştır.

Hardin ve Burmeister (1999)'in çalışmasında üniform giriş akışı koşulları için deney ve Girdap Kafes Yöntemi (VLM) sonuçları karşılaştırıldığında, VLM yöntemi ile kanat yüklemesi, basınç, güç ve verimlilik değerleri için deneysel sonuçlara yakın sonuçlar elde edildiği görülmektedir.

Falahat (2011) yaptığı çalışmada daimi ve türbülanslı akış koşullarındaki sabit göbek uç oranına sahip düz palalı aksiyal fanda, maksimum akış katsayısını elde etmek için gereken hücum açısının ve dönme hızının sayısal ve deneysel yöntemlerle tespit edilmesini hedeflemiştir.

Bu çalışmanın sayısal ve deneysel sonuçları dönme hızlarının çoğu için maksimum akış katsayısının 45° - 55° aralığındaki pala hücum açısı ve dört palalı pervane için elde edildiğini göstermektedir. Dönme hızı arttıkça akış katsayısı artar, dönme hızı çok yüksek hızlara ulaştığında ise akış katsayısı sabit kalır. Sabit bir hücum açısına sahip bir pervanede pala sayısı arttırılınca, dört palaya kadar akış katsayısı artar. Dört ile altı pala arasında ise akış katsayısı artışı çok azdır.

Kim ve diğ. (2010) yaptıkları çalışmada otel lobilerinde, büyük spor salonlarında ve müzelerde tavanda ısı birikmesini önlemek amacıyla kullanılan aksiyal turbo fanlarda hatvenin, debi ve statik basınç üzerindeki etkilerini sayısal olarak analiz etmiştir. Aksiyal turbo fandan üflenen havanın varış mesafesini arttıracak verimli bir uygulama için yüksek hava debisine ve statik basınca sahip bir pervane gereklidir.

Değişik hatve değerleri (44° , 54° , 59° , 64°) ve 24° burulma açısına sahip sekiz palalı pervane için yapılan çözümler karşılaştırılmıştır. Sonuçlar 59° 'nin en yüksek debi ve statik basınç değerini sağlayan optimal hatve değeri olduğunu göstermektedir.

Patel ve Patel (2012) yaptıkları çalışmada pervane hatvesi, pala sayısı, pervane açıklığı, palanın maksimum kalınlığının yerleşimi, pala veter açısı vb. geometrik parametrelerinin aksiyal fan performansına etkilerini araştırmıştır.

Büyük ticari fanlarda pervanenin rüzgâra karşı (upwind) durduğu üç kanatlı rotorlar yaygın olarak kullanılır. Pervanesi rüzgâra karşı olan (upwind) rotor için pala sayısı seçimi pala katılığı, aerodinamik verimlilik ve gürültü arasında bir dengeye dayanır.

Üç kanatlı rotor konfigürasyonu en iyi dengeyi sağlar. Pala sayısını birden ikiye çıkarmak aerodinamik verimlilikte yüzde altılık bir artış, sayıyı ikiden üçe çıkarmak sadece ek yüzde üçlük bir artış meydana getirir.

Aksiyal kompresörde tasarım hızında sıfır açıklığa (kasa ve kanat ucu arasındaki boşluk) sahip rotor pervanesinin daha yüksek verimlilik ve basınç oranına sahip olacağı görülmüştür. Açıklığın artması hava kayıplarını arttırırken, verimlilik, basınç oranını ve debiyi azaltacaktır.

Pervane palasının şokla karşılaşan yüzeyinde (hücum kenarı) diğer kısımlarına göre daha fazla gerilme vardır ve bu yüzey diğer kısımlara göre daha kalın olmalıdır. Fırar kenarında ise kalınlık azalır.

Fan performans eğrisinin stall alanı dışında çalışmaya devam ederken, kanat veter açısını 20–60 ° aralığında arttırınca debi de artar.

Düz kanatlar yerine aerodinamik kanatlar kullanmak hava akışını düzgün hale getirecektir. Yüzeyin düzgün ve pürüzsüz olması türbülansı azaltacaktır.

Abbaszadeh ve diğ. (2010) çalışmalarında kanallı aksiyal fanlarda uç girdaplarının fan performansı üzerindeki zararlı etkilerini azaltmak için kullanılan değişik kanatçık(fanlet) konfigürasyonlarının etkisini araştırmıştır. İtki, havalandırma ve güç üretim sistemlerinde yaygınlıkla kullanılan kanallı aksiyal fanların performanslarının geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada iki, dört ve altı palalı pervane modelleri Pala Elemanı Metodu kullanılarak tasarlanmıştır. Yukarı yönlü kanatçıklı, aşağı yönlü kanatçıklı ve kanatçıksız olmak üzere üç ayrı fan konfigürasyonu kullanılarak dokuz ayrı model üzerinde çalışılmıştır.

Sonuçlar kanatçıklar kullanarak aksiyal fan performansının maksimum %3,6 arttırılabileceğini göstermektedir. Aşağı yönlü kanatçığın verimlilikte oluşturduğu artış yukarı yönlü kanatçıktakinden daha fazladır. Yukarı yönlü kanatçığın verimlilikte oluşturduğu artış %3,4 civarındayken, aşağı yönlü kanatçığın oluşturduğu artış %1,4 civarındadır.

1.3. Tezin Amacı

Pala elemanı yöntemi ile hesaplanan itki ve tork değerleri, genellikle deneysel sonuçlardan %10 fazladır. Bu fark, yöntemin uç girdabının pervane performansına etkilerini tam olarak hesaplamak ve kanat titreşim etkilerini hesaba katmadaki kısıtlarından kaynaklanmaktadır.

Pala elemanı yöntemi ve CFD çözümleri ile elde edilen itki, tork ve verimlilik değerleri birbirine yakındır ve dağılım profilleri aynı davranışı göstermektedir. CFD profilinin uç bölgesinde, CFD metodunun uç girdaplarından kaynaklanan uç kayıplarını daha iyi göstermesinden kaynaklı olarak önemli bir düşüş vardır.

CFD teknikleri fan performansının geliştirilmesinde eski tasarım ve analiz yöntemlerine göre daha iyi olanaklar sunmaktadır. CFD programları Navier-Stokes denklemlerinin tüm akış alanı için çözümünü yaparken, VLM metodu sadece kanat ve katı yüzeyler üzerinde istenilen konumda hız ve basınç hesabına olanak sağlar. İnce kanatlı fanlarda VLM metodu ile daha az bilgisayar gücü harcanarak başarılı sonuçlar elde edilebilir (Hardin ve Burmeister, 1999).

VLM metodu aynı zamanda pervane tasarımı yapılırken, farklı pala geometrileri arasından en uygun geometrinin belirlenmesi için hızlı bir ön tasarım yapma imkânı sağlar. Literatürde uçak pervaneleri, helikopter rotorları, gemi pervaneleri ile ilgili çok sayıda VLM çalışması olmasına rağmen, dönen aksiyal fan kanatları etrafındaki hava akışını analiz eden VLM çalışması çok azdır.

Bu çalışmada girdap kafes yöntemi kullanarak pervane etrafındaki hava akışının analiz edilmesi amaçlanmıştır.

2. PERVANE TEORİSİ

Pervane teorisi momentum ve pala elemanı olmak üzere başlıca iki yaklaşımla ele alınmaktadır.

Rankine, Froude ve Carlton'un çalışmalarında belirtildiği gibi Momentum Teorisi sürtünmesiz akışkan hareketini ve sonsuz pala sayısını incelediğinden, ideal sınırı temsil etmektedir. Theodorsen'in çalışmasında vurgulandığı gibi momentum teorisi bir pervanenin verimiyle ilgili yararlı bilgiler vermekle birlikte pervane palalarının tasarımı için gerekli bilgiyi üretemez. Sadece çok palalı pervanelerde palalara etkiyen akım hızları ortalama akım hızından çok farklı olmadığı için akım hızları ile ilgili bilgi verebilir.

Froude, Drzewiecki ve Carlton'un çalışmalarında belirtildiği gibi Pala elemanı teorisi ise geometrik büyüklükleri ve kesit karakteristiklerini hesaplar içerisine kattığından tasarım problemlerinde öne çıkmaktadır. Gur'un çalışmasında belirtildiği gibi Pala elemanı yaklaşımında etkin akım hızının tayini için gerekli olan indüklemeye faktörleri girdi olarak kullanılır (Öner, 2010'da atıfta bulunulduğu gibi).

İndüklemeye faktörlerinin 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 (Öner, 2010).

2.1 Pervane Teorisinin Tarihsel Gelişimi

Pervane teorisinin gelişimi 19. yüzyılda Rankin ve Froude'un gemiler üzerine yaptığı çalışmalarla başlar. İki araştırmacı akışkan ortamda (su veya hava) itki yaratan cihaz için temel momentum denklemlerini geliştirmişlerdir.

19. yüzyıl sonunda Drzewiecki pala elemanlarının ortamda helisel yörüngeyle ilerleyen bağımsız taşıyıcı yüzeyler olarak ele aldığı pervane hareket teorisini ortaya

koymuştur. Fakat yaptığı çalışmada pervanenin kendisi tarafından indüklenen hızın her bir pala elemanına etkisini dikkate almamıştır.

1919 yılında Betz, hafif pervaneler için minimum enerji kaybına (indüklenmiş sürüklenme) sahip optimum yük dağılımını ortaya koymuş ve bu dağılımın düzenli helisel tabakaların deforme olmadan (rijit) pervane arkasında uzanmasıyla elde edildiğini göstermiştir (Wald, 2006’da atıfta bulunulduğu gibi).

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 (Öner, 2010’da atıfta bulunulduğu gibi).

Prandtl helisel girdap tabakalarının etrafındaki akış için yaklaşık bir çözüm sunmuştur. İlerleme oranı küçükken bu yaklaşım iyidir ve kanat sayısı arttıkça sonuç daha da iyileşir. Basit matematik forma sahip bu yaklaşım hala kullanılmaktadır.

Prandtl’in bağlı ve serbest girdap kavramlarını içeren Taşıyıcı izgi Teorisi’ni geliştirmesiyle birlikte pervane hareketinin rasyonel teorisine giden yol açılmıştır. Modern pervane teorisi kanat teorisiyle benzerdir. Bağlı girdap ile ilişkilendirilen bir sirkülasyonun olduğu ve firar kenarından sürekli bir girdap tabakasının uzandığı pervane kanadı taşıyıcı yüzey olarak düşünölmüştür. Minimum enerji kaybını sağlayan kanat boyu yük dağılımı için girdap üniform (downwash) aşağı akım dağılıma sahip düz bir tabaka olarak alınır (Wald, 2006, sy 88).

Goldstein çalışmasında hafif yüklü ve küçük ilerleme oranlarına sahip pervaneler için potansiyel akım problemini analitik olarak çözmüş ve sirkülasyon dağılımını elde etmiştir. Ayrıca iki ve dört kanatlı pervaneler için sirkülasyon dağılım tablolarını oluşturmuştur (Wald, 2006’da atıfta bulunulduğu gibi).

Theodorsen deforme olmayan helisel girdap tabakası modelinin ve açısal momentum kayıp faktörlerinin sadece hafif yüklü pervaneler ile sınırlı olmayacağını ve ağır yükleme altındaki pervaneler için de kullanılabileceği göstermiştir (Öner, 2010’da atıfta bulunulduğu gibi).

Theodorsen, bu önemli bulguya dayanarak ideal yükleme dağılımına sahip pervanelerin teorisinin gelişmesine önemli bir katkıda bulunmuştur (Wald, 2006, sy 88; Öner, 2010, sy 2). Theodorsen’in belirttiği gibi 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 (Öner, 2010'da atıfta bulunulduğu gibi).

Girdap Kafes Yöntemi, ilk kez 1946 yılında V.M. Falkner'ın yazdığı bir makalede kullanılmıştır (Wikipedia.2014e'de atıfta bulunulduğu gibi). Ardından W.P.Jones, H. Schlichting, G.N. Ward gibi çok sayıda araştırmacı bu yöntemi geliştirmiştir. Yöntem Prandtl Taşıyıcı Çizgi Teorisi'nden türetilmiştir. Taşıyıcı Çizgi Teorisi'nde olduğu gibi her bir kanat için bir at nalı girdabı kullanmak yerine, Girdap Kafes Yöntemi'nde kanat çok sayıda at nalı girdabı kullanarak modellenir (Wikipedia.2014e).

2.2 Momentum Teorisi

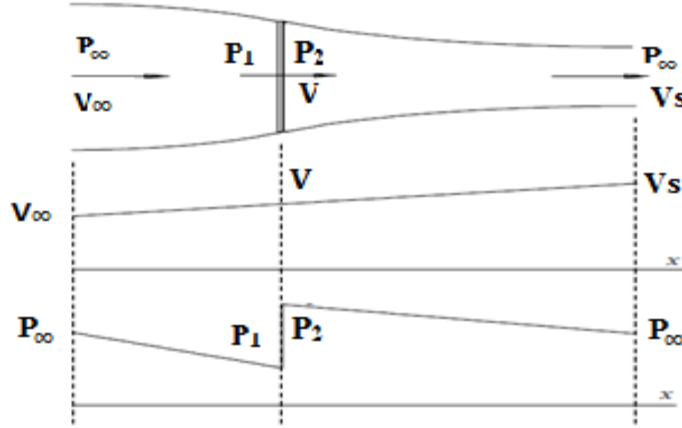
Froude tarafından geliştirilen ideal disk teorisinde pervane yerine aynı çapta sonsuz ince bir disk alınarak bu diskten geçen havanın kazandığı momentum incelenir. Bu inceleme sırasında şu kabuller yapılır:

- a. Diski geçen akışkan statik basınç artımı şeklinde bir enerji kazanır. Kazanılan enerji diskin her tarafında aynıdır.
- b. Diskin her bir tarafından geçen hava zerrecelerinin hızı aynıdır. Akım daimi ve girdapsızdır. Pervane çıkışındaki girdaplar ihmal edilir (Yükselen, 2014b, sy 2).

Bu kabuller altında diskten geçen akışkan kütlesinin Şekil 2.1'deki gibi bir akım borusu oluşturduğu düşünülebilir. Carlton'un belirttiği gibi eksenel momentum teorisinde pervane problemi, içerisinde yalnızca eksenel momentum transferi yapılan bir akım alanının incelenmesi şekline indirgenmiş, yani Carlton'un ve Duran'ın belirttiği gibi diskin içerisinde hareket ettiği akışkanı döndürmeden itki sağladığı kabul edilmiştir. (Öner, 2010'da atıfta bulunulduğu gibi) Bu nedenle ideal disk teorisi aynı zamanda eksenel momentum teorisi olarak da adlandırılır.

Pervanenin önünde ve yeterince uzağında hava, V_∞ hızıyla pervaneye doğru gelmekte ve pervaneye yaklaştıkça hızlanarak disk üzerinde V hızına erişmektedir. Diskten sonra hızlanmasına devam ederek yeterince geride V_s hızına erişmektedir. Bu hız artışına paralel olarak havanın statik basıncı da pervaneye yaklaştıkça azalarak diskin önünde p_1 değerine inmekte, diskten kazandığı enerji ile diskin önünde p_1 değerine

inmekte, diskten kazandığı enerji ile diskin gerisinde p_2 değerine artmakta ve diskin gerisinde giderek düşmek suretiyle yeniden sonsuzdaki p_∞ statik basıncına inmektedir.



Şekil 2.1 Taşıyıcı disk.

Disk alanı S olmak üzere, diskin ön ve arkasındaki basınç farkının disk üzerinde yarattığı ileri çekme kuvveti T , Denklem 2.1'de hesaplanır.

$$T = \frac{1}{2} \rho (V_s^2 - V_\infty^2) S \quad (2.1)$$

Birim zamanda diskten geçen havanın kütleli debisi ρSV olup, diskin hava hızında yarattığı artma da $V_s - V_\infty$ olduğuna göre momentum teoremi yardımıyla, akışkanın momentumundaki artış çekme kuvvetine eşitlenerek, Denklem 2.2 yazılabilir.

$$T = \rho SV (V_s - V_\infty) \quad (2.2)$$

Bu sonuca dayanarak T çekme kuvvetini sağlayan pervanenin veriminin yüksek olması için mümkün olan en büyük disk çapı tercih edilmelidir. İki bağıntı birbirine eşitlenerek, Denklem 2.3 ile disk üzerindeki hız hesaplanır.

$$V = \frac{(V_s + V_\infty)}{2} \quad (2.3)$$

Disk ideal verimi (η_i), Denklem 2.4'te pervanenin önünde ve yeterince uzağındaki hava hızının disk üzerinde hıza bölünmesiyle elde edilir.

$$\eta_i = \frac{V_\infty}{V} \quad (2.4)$$

Disk için harcanan güç (P), diskten alınan faydalı güç ve ideal verimin birbirine bölünmesiyle Denklem 2.5 ile hesaplanır (Yükselen, 2014b, sy 4).

$$P = \frac{TV_\infty}{\eta_i} = \frac{TV_\infty}{V_\infty / V} = TV \quad (2.5)$$

Aktuator disk teorisi pervanelerin anlaşılmasına yardımcı olmakla birlikte kanat yüklemesini pervane geometrisi ve faaliyet koşulları ile ilişkilendirmekte yetersiz kalmıştır (Veldhuis, 2005, sy 328).

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 açısız hareketine harcanan kinetik enerji, akım özelliklerinin palalar ve disk üzerinde uniform dağılım göstermemesinden dolayı, diğer bir deyişle radyal akış sebebiyle oluşan kayıplara harcanan enerjide hesaba katılmalıdır.

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 (Öner, 2010, sy 16).

İlerleyen yıllarda pervane teorisi hesaplar içerisine katılmak istenen bu hususlar doğrultusunda geliştirilmiştir. Palaların sürtünmesinden ötürü kaybedilen enerji pala elemanı teorisi, akım alanının açısız 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 (Öner, 2010, sy 19).

2.3 Pala Elemanı Teorisi

Froude Momentum Teorisi her ne kadar bir pervanenin performansı ile ilgili genel bilgi veriyor olsa da akım alanının daha detaylı araştırılması için yeterli değildir. Palanın şekli, kesit profili gibi detayların performans üzerindeki etkisinin araştırılması için Pala Elemanı Teorisi kullanılabilir (Yükselen, 2014b, sy 16).

Drzewiecki çalışmasında pala elemanı teorisini pratik bir formda ve kullanıma uygun bir biçimde sunmuştur. Kesitler başına düşen kuvvetlerin pala boyunca toplanarak tüm pervane için itki ve tork hesabının yapılması ve bunun için kesit karakteristiklerinin kullanılması fikri ilk kez Drzewiecki tarafından önerilmiştir (Öner, 2010'da atıfta bulunulduğu gibi).

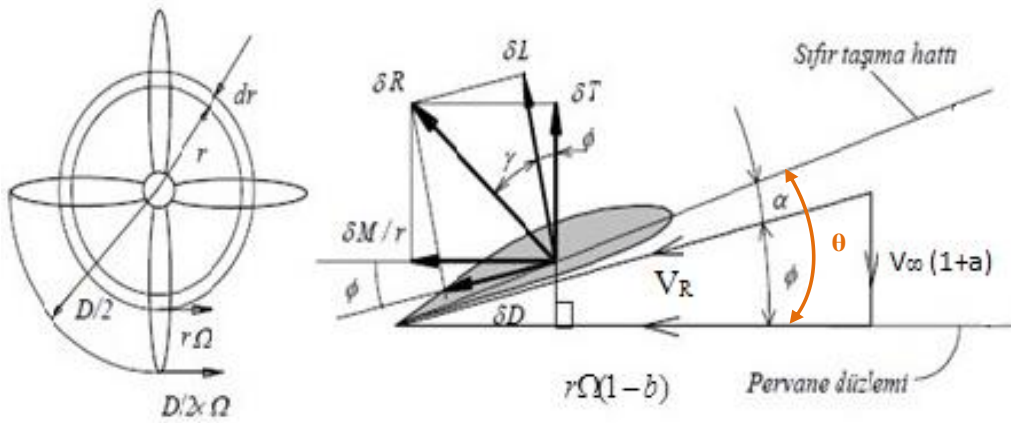
Pala elemanı teorisine göre rotor gerisinde silindirik bir iz vardır. Bu teori palan her bir elemanının diğer elemanların davranışından bağımsız olduğu kabulüne dayanır. Başlangıçta teori sonsuz sayıda palaya sahip bir rotor için çözülmekte iken daha

sonra sonlu pala etkisini hesaba katabilmek için lineerleştirilmiş uç düzeltme teorisi geliştirilmiştir (Beşerik, 2009, sy 64). Bir pervane palasının pervane ekseninden r uzaklıktaki δr genişliğinde elemanlarından birini göz önüne alırsak, pervanenin açısal hızı Ω iken, bu elemanın hızı $r\Omega$ 'dır. Pervane düzlemini geçen akımın kendisi de girdap sisteminin etkisiyle pervanenin dönme yönünde $r\Omega b$ hızıyla dönmektedir. Pala elemanına pervane düzlemi içinde etkiyen bileşke hız, Denklem 2.6 ile hesaplanan büyüklüktedir.

$$r\Omega(1-b) \quad (2.6)$$

Şekil 2.2'de görüldüğü gibi pervanenin dönme düzlemini geçen akımın hızı ise serbest akım hızı V_∞ , girdap sisteminin indüklediği hız $a.V_\infty$ olmak üzere, Denklem 2.7'deki gibi belirtilebilir.

$$V_\infty(1+a) \quad (2.7)$$



Şekil 2.2 Pala elemanının izi ve pala elemanına etkiyen kuvvetler.

Pala elemanına etkiyen toplam hız ise bu iki hızın bileşkesi olan V_R 'dir. Formüllerde (Denklem 2.6 ve 2.7) yer alan a teğetsel indüklenme faktörünü, b ise eksenel indüklenme faktörünü göstermektedir. Pala elemanı bileşke V_R hızı doğrultusunda bir taşıma kuvvetine maruz kalacaktır. V_R hızının doğrultusu, üç boyutlu bütün etkiler katıldıktan sonra belirlendiği için taşıma ve sürüklenme kuvvetleri, seçilen pala elemanı kesitinin seçilen pala elemanı kesitinin α hücum açısındaki iki-boyutlu C_D ve C_L katsayıları ile orantılıdır.

Taşıma ve sürüklenme kuvvetlerinin bileşkesi, ilerleme yönünde çekme kuvveti δT ve buna dik doğrultuda moment kuvveti $\delta M/r$ olmak üzere iki bileşene ayrılabilir (Şekil 2.2). Formüllerde yer alan γ (Denklem 2.8) bileşke kuvvetin taşıma kuvveti

doğrultusuyla yaptığı açığı, ϕ (Denklem 2.9) ise V_R hızının dönme düzlemiyle yaptığı açığı göstermektedir. Bu açılar aşağıdaki formüller yardımıyla hesaplanır.

$$\tan \gamma = \frac{\delta D}{\delta L} = \frac{C_D}{C_L} \quad (2.8)$$

$$\tan \phi = \frac{V_\infty (1 + a)}{r\Omega(1 - b)} \quad (2.9)$$

Pervane dönme düzleminde pala elemanlarının kapladığı planform alanının disk alanına oranı pervanenin katılığı veya sıkılığı olarak adlandırılır ve Denklem 2.10 ile hesaplanır.

$$\sigma = \frac{N_B c \delta r}{2\pi\Omega \delta r} = \frac{N_B c}{2\pi r} \quad (2.10)$$

Denklem 2.10'da yer alan N_B pervanenin pala sayısını, δr pala elemanının genişliğini, c ise veter uzunluğunu göstermektedir.

Taşıma ve sürüklenme kuvvetlerinin bileşkesi, ilerleme yönünde çekme kuvveti δT ve buna dik doğrultuda moment kuvveti $\delta M/r$ olmak üzere iki bileşene ayrılabilir. Çekme kuvveti Denklem 2.11 ile, Denklem 2.12 ile moment kuvvetinin pala boyunca değişimi hesaplanır.

$$\frac{\delta T}{\delta r} = \pi \sigma \rho V_R^2 C_L \cos(\phi + \gamma) \quad (2.11)$$

$$\frac{\delta M}{\delta R} = \pi^2 \sigma \rho V_R^2 C_L \sin(\phi + \gamma) \quad (2.12)$$

Diğer taraftan pala elemanlarına etkiyen toplam δT çekme kuvveti pervane dönme düzleminin δr genişliğindeki şeridinden geçen havanın momentumundaki artışa eşittir (Denklem 2.13). Toplam δM momenti (Denklem 2.14) ise δr genişliğindeki şeridinden geçen havanın açısal momentumundaki artışa eşittir (Yükselen, 2014b, sy 21-24).

$$\frac{\delta T}{\delta r} = 4\pi \rho V_\infty^2 a(1 + a) \quad (2.13)$$

$$\frac{\delta M}{\delta r} = 4\pi^3 \rho V_\infty b(1 + a)\Omega \quad (2.14)$$

Pala elemanı teorisinde prensip her bir palanın kesitlere bölünerek kesit başına oluşan taşıma ve sürüklenme kuvvetlerinin hesaplanması ve bunların pala boyunca integre edilmesidir. Fakat bu kuvvetlerin hesaplanması için etkin akım doğrultusunun tespit edilmesi, bunun için ise indüklenme faktörlerinin bilinmesi gerekmektedir (Öner, 2010, sy 22).

2.4 Pala Elemanı-Momentum Teorisi

Momentum teorisindeki diferansiyel ifadeler (Denklem 2.11 ve Denklem 2.12) ile pala elemanı teorisindeki ifadeler (Denklem 2.13 ve Denklem 2.14) eşleştirilirse Pala Elemanı-Momentum Teorisi elde edilir. Böylece her iki teorisinin de eksikleri giderilmeye çalışılır (Denklem 2.15 ve Denklem 2.16).

$$4\pi\rho V_\infty^2 a(1+a) = \pi\sigma\rho V_R^2 c_L \cos(\phi + \gamma) \quad (2.15)$$

$$4\pi^3 \rho V_\infty b(1+a)\Omega = \pi^2 \sigma\rho V_R^2 c_L \sin(\phi + \gamma) \quad (2.16)$$

V_R yerine yazılarak Denklem 2.17,

$$V_R = \frac{V_\infty(1+a)}{\sin\phi} = \frac{r\Omega(1-b)}{\cos\phi} \quad (2.17)$$

Denklem 2.18 ve Denklem 2.19 elde edilir.

$$\frac{b}{1-b} = \frac{\sigma}{2} C_L \frac{\sin(\phi + \gamma)}{\sin 2\phi} \quad (2.18)$$

$$\frac{a}{1+a} = \frac{\sigma}{4} C_L \frac{\cos(\phi + \gamma)}{\sin^2 \phi} \quad (2.19)$$

Bir pervanenin pala geometrisi, kesit karakteristikleri, ilerleme ve dönme hızları ile havanın yoğunluğu verildiği takdirde, yukarıda çıkarılan bağıntılar yardımıyla pervanenin çekme ve moment gradyanlarının pala boyunca değişimini ve bunlar yardımıyla pervaneye etkiyen toplam çekme ve momenti hesaplamak mümkündür.

Bu hesaplar pervane dizaynının ilk adımlarını teşkil eder. Hesaplanan çekme ve moment gradyanları kullanılarak pervanenin yük altındaki burulma ve eğilmesi hesaplanır. Buradan pala boyunca yeni θ açıları elde edilir. Ve bu hesaplar yakınsama elde edilinceye kadar iteratif olarak devam ettirilir (Yükselen, 2014b, sy 24).

2.4.1 Lineerleştirilmiş uç düzeltme teorisi

Bir önceki bölümde belirtildiği gibi pala elemanı teorisinde sonsuz sayıda palaya sahip bir rotor için çözüm yapılmaktadır. Sonsuz sayıdaki pala için yapılan çözümde radyal hız bileşenleri ihmal edilip, olayın fiziği ve matematiği basitleştirilmiştir. Sonlu pala etkisini hesaba katabilmek için lineerleştirilmiş uç düzeltme teorisi geliştirilmiştir (Beşerik, 2009, sy 72).

Lineerleştirilmiş uç düzeltme teorisine göre, helisel girdap tabakasının parçası olarak temel helisel girdap iplikçliğini düşünürsek, girdap iplikçigi kendisine dik olan ve

yerel pervane hızıyla aynı olan w_s hızıyla her yöne hareket etmektedir. Lokal helis açısı ϕ_s ve lokal helis yarıçapı r_s iken, eksenel hız $w_s \cos \phi_s$ ve çevresel hız $w_s \sin(\phi_s)/r_s$ olmaktadır (Veldhuis, 2005, sy 329).

Prandtl tarafından geliştirilen metoda göre, belirli bir radyal konumda sonlu pala sayısı ile sonsuz pala sayısı halinde sirkülasyon değerleri bir F uç düzeltme faktörü ile birbirine bağlanır. Bu faktör Denklem 2.20, Denklem 2.21 ve Denklem 2.22 ile hesaplanır (Veldhuis, 2005, sy 330).

$$F = \frac{B(1-\xi)}{2\sin(\phi_t)} \quad (2.20)$$

$$F = \frac{2}{\pi} \arccos(e^{-f}) \quad (2.21)$$

$$\xi = r / R \quad (2.22)$$

2.5 Taşıyıcı Çizgi Teorisi

Disk teorisi pervaneleri anlamamıza yardım etmiştir fakat kanat yüklemesini pervane geometrisi ve çalışma koşulları ile ilişkilendirmekte yetersiz kalmıştır

Alman matematikçi ve fizikçi Hermann von Helmholtz sürtünmesiz ve sıkıştırılmaz akışta girdap iplikçığı konseptini ilk kullanan kişidir. Helmholtz girdap teoremine göre, girdap davranışının prensipleri şöyledir:

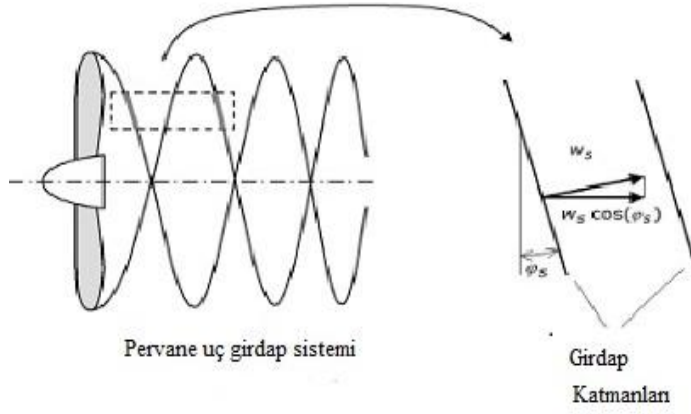
a.Girdap iplikçığının büyüklüğü uzunluğu boyunca sabittir.

b.Girdap iplikçığı akışkan içinde sonlandırılmaz. Akışkanın sınırlarında ($\pm \infty$ olabilir) veya kapalı bir yol oluşturmalıdır.

Sonlu kanadın aerodinamik özelliklerini belirlemek için ilk pratik teori Ludwig Prandtl tarafından geliştirilmiştir (Anderson, 2001, Bölüm 5.2). Şekil 2.3'te görüldüğü gibi Prandtl üç boyutlu akışta sonlu kanatlardaki taşımayı uç girdap tabakası aracılığıyla tarif etmiştir.

Prandtl'ın geliştirdiği Taşıyıcı Çizgi Teorisi'ne göre, girdap tabakasının temel etkisi kanat üzerinde (veya kanat üzerindeki bağlı girdapta) hız indüklemesidir. İndüklenmiş hızlar Biot-Savart Kanunu aracılığıyla hesaplanır.

Küçük hücum açısına sahip üç boyutlu kanat, “bağlı girdap” adı verilen girdap iplikçikleri ile modellenebilir. Küçük hücum açılarında akım viskoz değildir ve doğrusal Laplace denklemi ile tanımlanabilir (Hanson, 2008, sy 19).

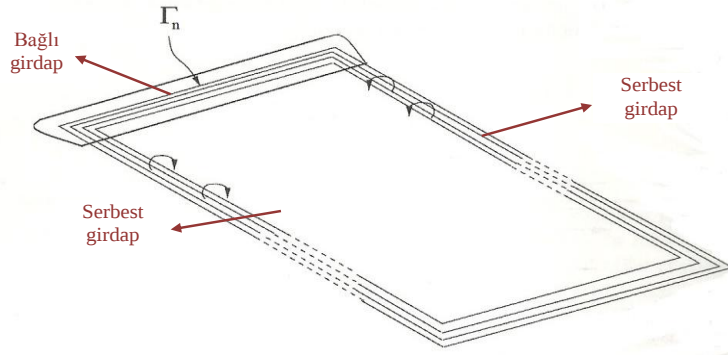


Şekil 2.3 Pervane palaları arkasındaki girdap katmanlarının taşınma hızı.

Γ şiddetinde ve kanat üzerinde sabitlenmiş girdap iplikçığı (bağlı girdap) Kutta-Joukowski denklemi (Denklem 2.23) ile tanımlanan L taşıma kuvvetini oluşturacaktır (Anderson, 2001, Bölüm 5.2).

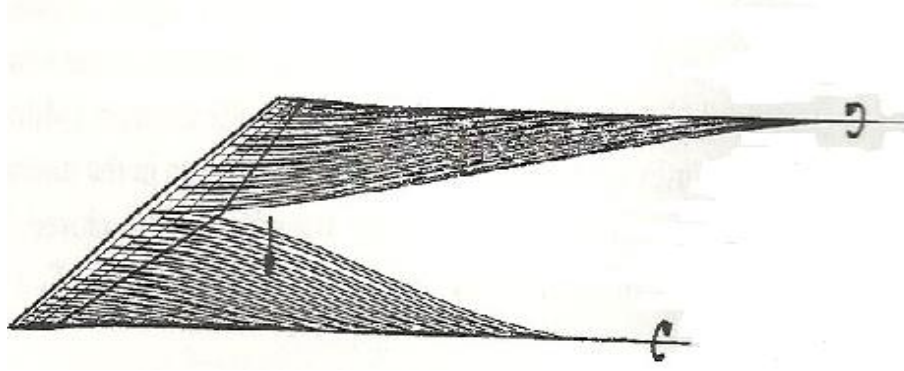
$$L = \rho V_{\infty} \times \Gamma \quad (2.23)$$

Bütün bir kanat Şekil 2.4'te görüldüğü gibi Γ_n ($n = 1, 2, 3, 4, \dots$) girdap iplikçik serisiyle modellenebilir (Hanson, 2008, sy 19).



Şekil 2.4 : Kanat üzerindeki girdap sisteminin basit bir modeli.

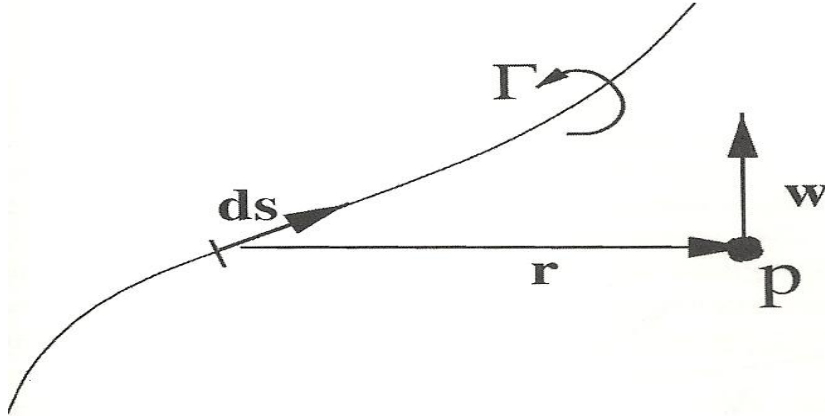
Gerçekte ise serbest girdaplar güçlü uç girdapları etrafında yukarı kıvrılacaktır ve girdap sistemi Şekil 2.5'teki gibi görünecektir. Kanat üzerindeki girdaplar (bağlı girdaplar) taşımayı modellerken, kanat uçlarından sonsuza uzanan iki adet firar girdabı (serbest girdaplar) ise kanadın üç boyutluluğundan kaynaklanan girdap tabakasını modeller. Girdabın bu şekline at nalı girdabı denir. Serbest girdaplar Biot-Savart Yasasına dayanarak kanat açıklığı boyunca aşağı yönde hız indükler (Hanson, 2008, sy 20).



Şekil 2.5: Kanat üzerindeki girdap sistemi için daha gerçekçi bir model.

Biot-Savart Yasası, potansiyel teorisinin genel bir sonucudur. Potansiyel teori, sürtünmesiz, sıkıştırılamaz akışları ve elektromanyetik alanları tanımlar (Anderson, 2001, Bölüm 5.2). Bu yasa ile Γ girdap şiddetindeki ds girdap iplikçığının herhangi bir p noktasında indüklediği hız, w Şekil 2.6'da görüldüğü gibi hesaplanır (Denklem 2.24) (Hanson, 2008, sy 20).

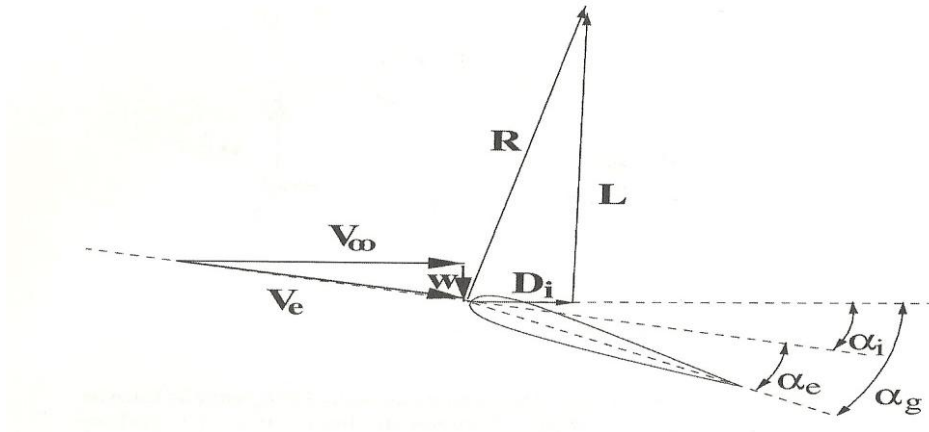
$$w = \frac{\Gamma}{4\pi} \oint \frac{r \times ds}{r^3} \quad (2.24)$$



Şekil 2.6: Γ şiddetinde bir girdap iplikçığının herhangi bir p noktasında indüklediği hız.

Denklem 2.24'te yer alan r , ds girdap parçası ile p noktası arasındaki uzaklığı göstermektedir. Kanat profili üzerindeki bütün girdapların indüklediği toplam hız (downwash) aşağı doğru bir sapma yaratır. Bu nedenle bu kısımdaki yerel hücum açısında α_i indüklenmiş hücum açısı kadar azalma olur.

Şekil 2.7'de yer alan D_i indüklenmiş sürüklenmeyi, L taşımayı, R ise bileşke kuvveti göstermektedir. Efektif rüzgâr hızı (V_e) ise serbest akım hızı (V_∞) ile indüklenmiş hızın (w) vektörel toplamıdır (Hanson, 2008, sy 21).



Şekil 2.7: Kanat profili üzerindeki açı ve kuvvetler (Hanson, 2008, sy 22).

Denklem 2.25'te yer alan (α_g) geometrik hücum açısını (veter çizgisi ile serbest akım hızı arasındaki açı) göstermektedir (Anderson, 2001, Bölüm 5.1).

$$\alpha_e = \alpha_g - \alpha_i \quad (2.25)$$

Üç boyutlu kanat iki boyutlu kanattan farklı olarak taşımanın yanında indüklenmiş sürüklenme bileşenini de içerir ve üç boyutlu kanatta iki boyutlu kanat ile aynı hücum açısında taşıma daha azdır. Kanat uçlarında indüklenmiş hız sıfır taşıma sağlar (Hanson, 2008, sy 21).

Akış sıkıştırılmaz ve sürtünmesiz kabul edildiği için yüzey sürtünmesinden kaynaklı sürüklenme (D_f) veya akım ayrışmasından kaynaklı basınç sürüklemesi (D_p) yani profil sürüklemesi oluşmaz. Bu nedenle kanat üzerinde sadece sürüklemenin bileşenlerinden biri olan indüklenmiş sürüklenme oluşur. (Anderson, 2001, Bölüm 5.1).

3. PERVANE İÇİN GİRDAP KAFES YÖNTEMİ

Bu bölümde pervane için girdap kafes yöntemi programı geliştirilecektir. Öncelikle kanat etrafındaki akımın fiziğini inceleyelim.

3.1 Kanat Etrafındaki Akımın Fiziği

Üç boyutlu kanadın alt ve üst yüzeyleri arasında oluşan basınç farkı nedeniyle (yukarıda düşük basınç, aşağıda yüksek basınç) kanat üzerinde taşıma oluşur. Kanat etrafındaki akımın fiziğini daha yakından inceleyelim. Şekil 3.1'de kanat etrafındaki akım görüntülenmiştir.

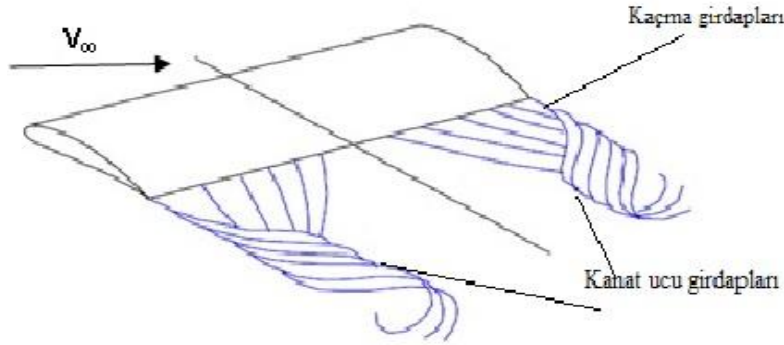
Basınç farkından dolayı kanadın her iki ucunda alt yüzeyden üst yüzeye doğru oluşan akım kaçması, kanadın alt yüzeyinde simetri düzleminden kanat uçlarına doğru, üst yüzeyinde ise kanat uçlarından simetri düzlemine doğru ikincil akımların oluşmasına neden olur. Yanal doğrultuda oluşan ikincil akımlar, kanadın alt ve üst yüzeyinden geçen akımların kendi doğrultularında bükülmesine yol açar.



Şekil 3.1: NACA 4412 profili etrafındaki akımın ve firar kenarındaki uç girdaplarının duman ile görüntülenmesi (Smart Blade, 2014).

Kanadın alt ve üst yüzeyinde yer alan birbirine zıt yöndeki yanal hız bileşenleri, firar kenarında eksenleri serbest akım doğrultusunda olan girdaplar oluşturur. Bu girdaplara "kaçma girdabı" adı verilir. Açıklık boyunca oluşan kaçma girdapları, Şekil 3.2'de görüldüğü gibi kanadın gerisinde belli bir uzaklıktan sonra birleşerek,

kanat uçları hizasında geriye doğru burularak uzanan iki büyük girdap oluşturur. Bu girdaplara da "kanat ucu girdabı" adı verilir.



Şekil 3.2: Kanadın arkasında oluşan girdap sistemi.

Kanat uçlarındaki taşımada alt ve üst yüzeyler arasındaki akım kaçması nedeniyle önemli kayıplar oluşur. Kayıplar genellikle kanadın simetri düzlemi yakınılarında en alt seviyededir.

Sonuç olarak üç boyutlu bir kanadın açıklığı boyunca değişen bir yük (taşıma) dağılımı söz konusudur. Yükleme kanadın orta kesitinde en büyük değerini almakta iken kanat uçlarına doğru giderek azalmakta ve tam kanat uçlarında sıfır olmaktadır (Yükselen, 2014c, sy 2).

3.2 Pervane Palası İçin Girdap Kafes Modeli

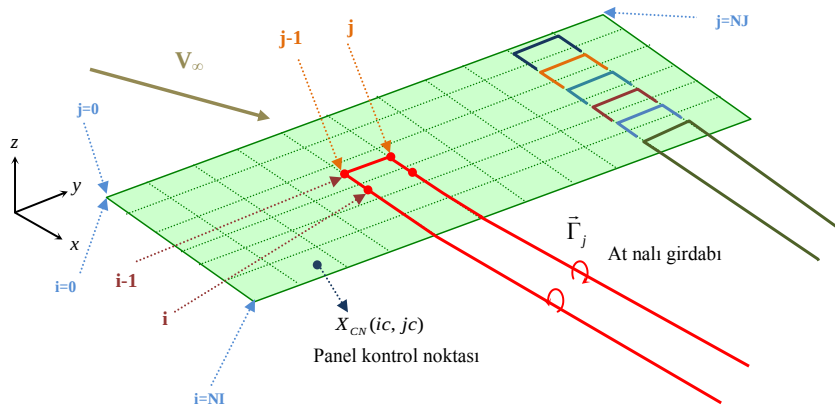
Girdap kafes yönteminde pervane palası, açıklık doğrultusunda ve veter doğrultusunda panellere ayrılarak her bir panel üzerinde yer alan at nalı girdaplarıyla modellenir. Bir at nalı girdabı, Şekil 3.3'te görüldüğü gibi panel çeyrek veter çizgisi üzerinde ($c/4$) yer alan bir bağlı girdap kısmından ve bu bağlı girdabın ucundan çıkıp veter boyunca firar kenarına, firar kenarından sonra da serbest akım doğrultusunda sonsuza uzanan iki kaçma girdabı kolundan oluşur.

Bu yöntemle analiz yaparken, pala üzerindeki at nalı girdap şiddetleri problemin bilinmeyenleridir. Bunları bulmak için panelin $3c/4$ 'ünde yer alan her bir panel kontrol noktasında, akımın yüzeye dik bileşeninin olmadığı şeklindeki ve Denklem 3.1 ile ifade edilen yüzey sınır koşulundan yararlanılır:

$$\vec{V} \cdot \vec{n}_i = 0 \quad (3.1)$$

Burada $\vec{V}$ panel kontrol noktası üzerine etkiyen bileşke hızı, $\vec{n}_i$ de panelin normal

vektörünü belirtmektedir. Böylece panel sayısınca denklemden oluşan bir lineer denklem takımı elde edilir (Denklem 3.2).



Şekil 3.3: Pervane palası için girdap kafes modeli.

$$\sum A_{ij} \vec{\Gamma}_j = \vec{R}_i \quad (3.2)$$

A_{ij} katsayısı herhangi bir j paneline bağlı at nalı girdabının, birim girdap şiddeti başına, herhangi bir i panelinin kontrol noktasında normal doğrultuda indüklediği hız bileşenini belirtmektedir. $\vec{R}_i$ panele doğru gelen serbest akım hız vektörünün yüzeye dik hız bileşenini, $\vec{\Gamma}_j$ ise girdap şiddetini belirtmektedir.

Bu denklem takımının (Denklem 3.2) çözümüyle elde edilen girdap şiddetleri, Joukowski Taşıma Kanunu'nda kullanılarak kanada etkiyen aerodinamik kuvvetler elde edilir (Denklem 3.3).

$$\vec{F} = \sum (\rho \vec{V}_{ij} \times \vec{\Gamma}_j) \quad (3.3)$$

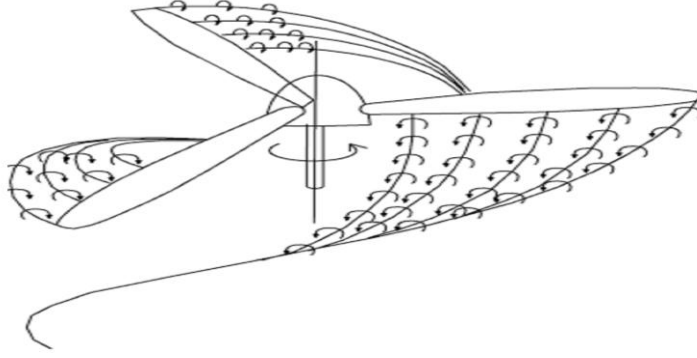
Denklem 3.3'te yer alan ρ havanın yoğunluğunu, $\vec{V}_{ij}$ kanat üzerindeki etkin hızı belirtmektedir.

3.3 Pervane Etrafındaki Akımın Fiziği

Pervanenin her bir palasını üç boyutlu bir kanat gibi düşünmek mümkündür. Pervane palası kök kısmı etrafında dönme hareketi yaparken, sırt kısmı önünde de ilerleme hareketi yapmaktadır. Pervane yaptığı dönme hareketi ile çevresindeki akışkanı döndürerek geriye doğru iter ve kinetik enerjisini havaya aktararak dönme düzleminin önü ile arkası arasında bir basınç farkı oluşturur.

Bu hareketlerin etkisi altındaki pervane palası üzerinde genellikle pervanenin ilerleme yönünde bir taşıma kuvveti oluşmakta, ancak uç etkisi nedeniyle, üç boyutlu

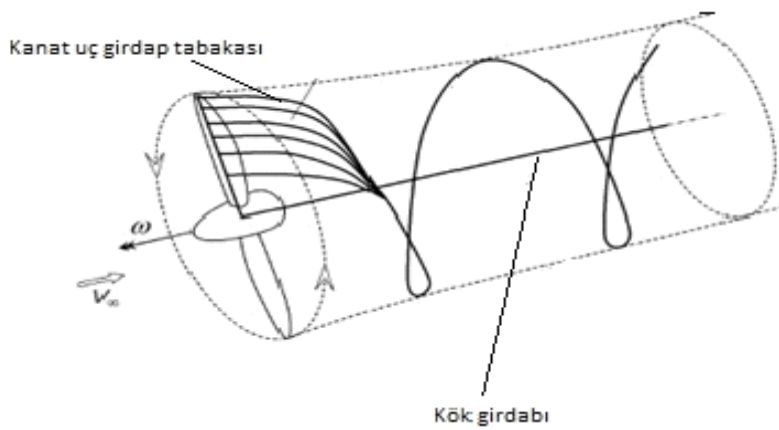
kanatta olduğu gibi pala ucunda sıfır olan taşıma pala boyunca değişim göstermektedir. Bunun sonucu palanın firar kenarında kaçma girdapları oluşmakta ve bu girdaplar Şekil 3.4'de görüldüğü gibi palanın izinde birbiri üzerinde yuvarlanarak bir uç girdabı oluşturmaktadır.



Şekil 3.4: Pervane etrafındaki girdap sistemi.

Üç boyutlu bir kanadın izinde aynı tarzda oluşan kaçma girdapları kanadın gerisinde, kanadın hareket düzlemi içerisinde kalacak şekilde yayılıyorken, pervanenin izinde pervanenin dönme ve ilerleme hareketlerinin ortak etkisi nedeniyle Şekil 3.5'te görüldüğü gibi helisel yörüngeler boyunca yayılmaktadır. Kök girdabı ise rotor eksenini boyunca lineer bir şekilde uzanmaktadır (Yükselen, 2014b, sy 19).

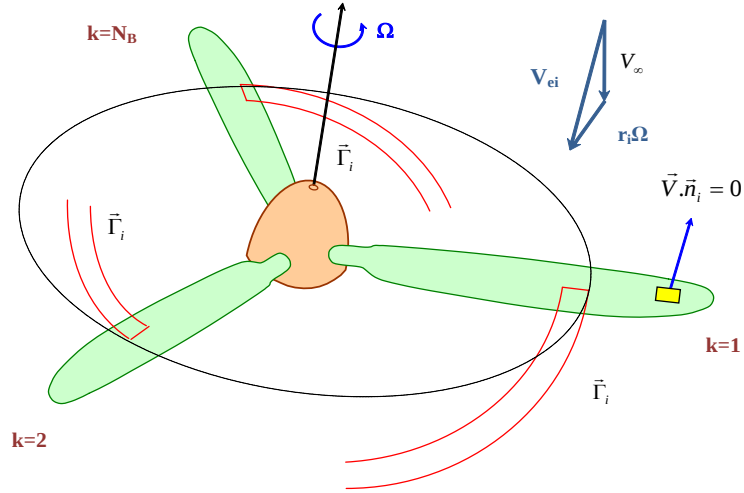
Pervaneden uzaklaştıkça sürtünme nedeniyle iz girdabı daralır ve geometrideki benzerlik bozulur. Bu durumda pervaneden yeterince uzak bölgelerde girdapların sönümlenmiş olması beklenir (Öner, sy 7) .



Şekil 3.5: Pervane kanadı arkasındaki girdap sistemi (Veldhuis, sy 17).

3.4 Pervane İçin Girdap Kafes Modeli

Pervane için oluşturulan girdap kafes modelinde, palalar açıklık doğrultusunda ve veter doğrultusunda panellere ayrılır. Her bir panel üzerinde yer alan at nalı girdapları yardımıyla pervane etrafındaki akım modellenir. Bu yöntemle analiz yaparken, Şekil 3.6'da gösterilen palalar üzerinde birbirinin karşılığı olan at nalı girdap şiddetleri, aynı olup problemin bilinmeyenleridir.¹



Şekil 3.6: Pervane için girdap kafes yöntemi modeli.

Denklem sisteminin çözümü için akımın yüzeye dik bileşeninin olmadığı şeklindeki yüzey sınır koşulundan yararlanılır (Denklem 3.4).

$$\vec{V} \cdot \vec{n}_i = 0 \quad (3.4)$$

Formülde yer alan $\vec{V}$ pervanenin bütün palalarının panellerinin üzerindeki at nalı girdaplarının birinci pala üzerindeki panellerin kontrol noktaları üzerinde indüklediği toplam hızı, $\vec{n}_i$ ise birinci pala üzerindeki panellerin normal vektörlerini belirtmektedir. Yukarıdaki denklemin uygulanmasıyla, bir lineer denklem takımı elde edilir (Denklem 3.5).

$$\sum A_{ij} \vec{\Gamma}_i = \vec{R}_j \quad (3.5)$$

Buradaki A_{ij} katsayısı herhangi bir j paneline (tüm palalar üzerindeki) bağlı at nalı girdabının, birim girdap şiddeti başına, herhangi bir i panelinin kontrol noktasında

¹ Girdap şiddetleri bütün palalar için aynı olduğundan, tek bir pala üzerindeki girdap şiddetini hesaplamak yeterli olup, diğer palalar için girdap şiddetlerini hesaplamaya gerek yoktur.

normal doğrultuda indüklediği hız bileşenini belirtmektedir. Denklem sisteminde (Denklem 3.5) Γ_i büyüklüğü i paneli üzerindeki at nalı girdabının şiddetini ifade etmektedir. Denklem sistemindeki (Denklem 3.5) $\mathbf{R}_i$ vektörü, serbest akım hızı ile pervanenin dönmesinden kaynaklanan çizgisel hızın bileşkesinden oluşmaktadır (Denklem 3.6).

$$\vec{R}_i = \vec{V}_{ei} = \vec{V}_\infty + (\vec{r}_i \cdot \Omega) \quad (3.6)$$

Denklem sistemindeki (Denklem 3.6) $\mathbf{r}_i$ panel kontrol noktasının yer vektörünü, Ω ise pervanenin açısal hızını belirtmektedir. Denklem sistemindeki (Denklem 3.5) A_{ij} katsayısı her bir pala üzerinde birbirine karşılık gelen at nalı girdaplarının indüklemelerinin toplanmasıyla elde edilir (Denklem 3.7).

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^{N_B} a_{ij}^k \quad (3.7)$$

Denklem sistemindeki (Denklem 3.7) N_B pervanenin pala sayısını belirtmektedir. Denklem takımının (Denklem 3.5) çözümüyle elde edilen girdap şiddetleri, Joukowski Taşıma Kanunu'nda kullanılarak, panellere etkileyen aerodinamik kuvvetler elde edilir (Denklem 3.8).

$$\Delta \vec{F}_{ij} = \rho \Delta \vec{V}_{ij} \times \vec{\Gamma}_i \quad (3.8)$$

Denklem sisteminde (Denklem 3.8) yer alan ρ havanın yoğunluğunu, $\Delta \vec{V}_{ij}$ ise panel üzerinde indüklenmiş bileşke hızı belirtmektedir. Panellere etkileyen kuvvetlerin toplanmasıyla, pervaneye etkileyen toplam kuvvet bulunur (Denklem 3.9).

$$\vec{F}_{ij} = \sum \Delta \vec{F}_{ij} \quad (3.9)$$

3.5 Pervane Geometrisinin Tanımlanması

Pervanenin VLM ile analizinde bir palanın açıklık ve veter doğrultularında panellere ayrılacağı yukarıda belirtildi. Bu bölümde biraz bu işlemin nasıl yapılabileceğine ilişkin bilgi verilecektir. Pervane geometrisi dahilinde, bu durumdan kastedilen panellerin köşe noktalarının koordinatları olmaktadır.

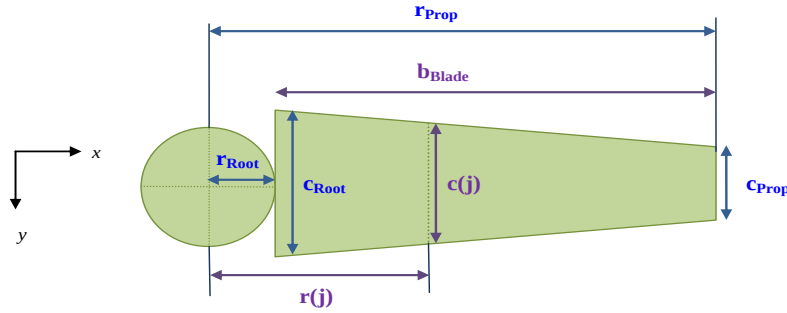
3.5.1 Test çalışması için pervane pala geometrisinin oluşturulması

Öncelikle test çalışmasında kullanılacak olan pervane pala geometrisi oluşturulur.

3.5.1.1 Pala üst görünüm

Pervane palasını açıklığı boyunca NJ adet panele ayırırız. Pala geometrisini tanımlayan parametreler (r_{Root} , r_{Prop} , c_{Root} , c_{Prop}) ve panel sayıları input dosyası aracılığıyla programa girilir.

Ardından Şekil 3.7'de görüldüğü gibi pala geometrisini tanımlayan diğer bir parametre olan pala uzunluğu (b_{Blade}), pervane yarıçapına (r_{Prop}) ve pala kökünün pervane merkezine olan radyal uzaklığına (r_{Root}) bağlı olarak hesaplanır.



Şekil 3.7: Pala geometrisini tanımlayan parametreler.

Ardından pala geometrisini tanımlayan diğer bir parametre olan pala uzunluğu (b_{Blade}), pervane yarıçapına ve pala kökünün pervane merkezine olan radyal uzaklığına bağlı olarak hesaplanır (Denklem 3.10).

$$b_{Blade} = r_{Prop} - r_{Root} \quad (3.10)$$

NJ adet panel kullandığımız için panellerin birim genişliği ise (Denklem 3.11) :

$$dr = \frac{b_{Blade}}{NJ} \quad (3.11)$$

olarak bulunur. Palanın alanı (S_{Blade}) ise şöyle hesaplanır (Denklem 3.12) :

$$S_{Blade} = b_{Blade} \left(\frac{c_{Root} + c_{Prop}}{2} \right) \quad (3.12)$$

Daha sonra panel uç noktalarının koordinatlarının hesabı için öncelikle pala boyunca değişen veter uzunluğu (Şekil 3.7) hesaplanır (Denklem 3.13 ve Denklem 3.14).

$$c(j) = c_{Root} - dcdr * (r(j) - r_{Root}) \quad (3.13)$$

$$dcdr = \frac{(c_{Root} - c_{Prop})}{b_{blade}} \quad (3.14)$$

Ardından pala açıklığı boyunca istasyonların yarıçapsal konumu hesaplanır (Denklem 3.15).

$$r(j) = r_{Root} + jdr \quad (3.15)$$

3.5.1.2 Pala kesit açıları

Pala için kesit konum açısı (θ) burulma açısı (θ_0) ile hatvenin (β) toplanmasıyla hesaplanır (Denklem 3.16) :

$$\theta = \theta_0 + \beta \quad (3.16)$$

Pala açıklığı boyunca burulma açısının doğrusal olarak değiştiği farz edilirse, burulma açısı Denklem 3.17 ve Denklem 3.18 ile hesaplanır.

$$\theta_0(j) = \theta_{Root} - dTdr * (r(j) - r_{Root}) \quad (3.17)$$

$$dTdr = \frac{(\theta_{Root} - \theta_{Prop})}{b_{blade}} \quad (3.18)$$

Hatve (β), pala kök burulma açısı (θ_{Root}) ve pala uç burulma açısı (θ_{Prop}) değerleri de input dosyası aracılığıyla programa girilir.

3.5.1.3 Panel köşe noktalarının koordinatlarının hesaplanması

Öncelikle pala üzerinde açıklık boyunca yerleşmiş tek sıra panellerden oluşan xy ekseninde yer alan pala için panel köşe noktalarının koordinatlarını hesaplarız (Denklem 3.19-Denklem 3.24).

$$x(0, j) = -0.25c(j) \quad (3.19)$$

$$y(0, j) = r(j) \quad (3.20)$$

$$z(0, j) = 0 \quad (3.21)$$

$$x(1, j) = 0.75c(j) \quad (3.22)$$

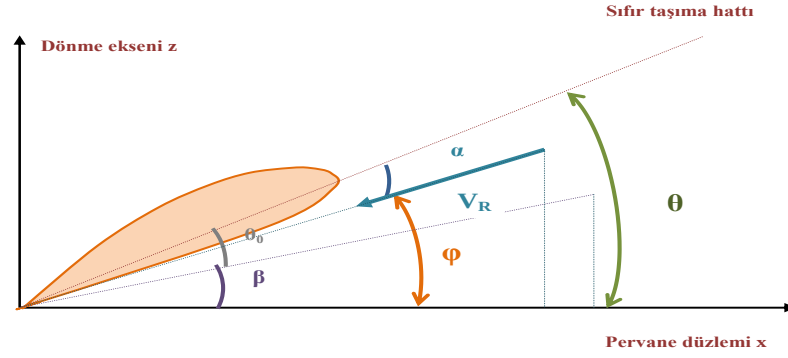
$$y(1, j) = r(j) \quad (3.23)$$

$$z(1, j) = 0 \quad (3.24)$$

Kesit konum açısı sıfır olduğu durum için pervane palası üzerindeki panel köşe noktası koordinatları yukarıda hesaplanmıştı. Şekil 3.8’de görüldüğü gibi pervane palası θ kesit konum açısı kadar döndürülerek palaya burulma verilebilir.

Dikdörtgen palanın θ açısı kadar kesit konum açısı verilmiş hali için palanın panel uç noktası koordinatları şöyle hesaplanır (Denklem 3.25- Denklem 3.28) :

$$x(0, j) = x(0, j). \cos \theta \quad (3.25)$$



Şekil 3.8 : Pala kesit açıları.

$$z(0, j) = -x(0, j) \cdot \sin \theta \quad (3.26)$$

$$z(1, j) = -x(1, j) \cdot \sin \theta \quad (3.27)$$

$$x(1, j) = x(1, j) \cdot \cos \theta \quad (3.28)$$

3.5.2 Verili pervane büyüklükleri ile pala geometrinin oluşturulması

Pervane palası koordinatları en basit halde bir data dosyası içerisinde yer alıp, bu dosyadan okutulabilir. Ancak birçok uygulamada bu koordinatların pervane pala geometrisinin genel büyüklüklerinden elde edilmesi gerekebilir. Bu çerçevede bir pervane palası genel olarak açıklığı boyunca birçok istasyondaki veter uzunlukları, kesit konum açıları ve kesit profilleri ile tanımlanmıştır.

Şimdi bir pervane palası için açıklık boyunca kesitlerin r_j yarıçapsal konumları, c_j veter uzunlukları ve θ_j kesit konum açıları verilmiş olmak üzere panel köşe noktalarının nasıl hesaplanacağını görelim.

Pervane palasını açıklığı boyunca NJ adet, veter boyunca NI adet panele ayırırız. Pervane palası için açıklığı boyunca bir çok istasyonda verilmiş olan veter uzunlukları, kesit konum açıları ve kesit profil değerleri kullanılarak pala kök kısmının pervane merkezine olan radyal uzaklığı, pervane yarıçapı, kök ve pervane veter uzunlukları hesaplanabilir (Denklem 3.29- Denklem 3.32).

$$r_{Root} = r(0) \quad (3.29)$$

$$c_{Root} = c(0) \quad (3.30)$$

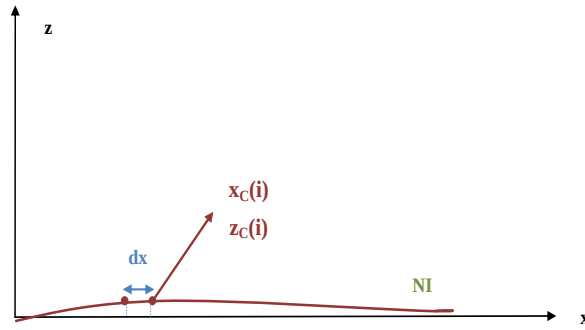
$$r_{Prop} = r(NJ) \quad (3.31)$$

$$c_{Prop} = c(NJ) \quad (3.32)$$

3.5.2.1 Kamburluk eğrisi koordinatlarının hesaplanması

Şekil 3.9'de görülen kamburluk eğrisi koordinatları, çeşitli kanat profilleri için literatürde verilmiş olan şeklindeki kamburluk eğri fonksiyonları kullanılarak hesaplanabilir (Denklem 3.33).

$$z_{Camber} = f(x_c) \quad (3.33)$$



Şekil 3.9 : Kamburluk eğrisi koordinatları.

Kamburluk eğrisinin x koordinatının hesabı için öncelikle kanat veteri boyunca uzanan dx panel genişliği hesaplanır (Denklem 3.34).

$$dx = \frac{c_{Root}}{NI} \quad (3.34)$$

Formüldeki c_{Root} kök veter uzunluğunu, NI ise veter boyunca uzanan panel sayısını göstermektedir. Kamburluk eğrisinin x koordinatı panel genişliğine bağlı olarak hesaplanır (Denklem 3.35).

$$x_C(i) = i \cdot dx \quad (3.35)$$

Kamburluk eğrisi formülasyonu (z_{Camber}) yardımıyla eğrinin z koordinatı hesaplanır (Denklem 3.36).

$$z_C(i) = z_{Camber}(x_C(i)) \quad (3.36)$$

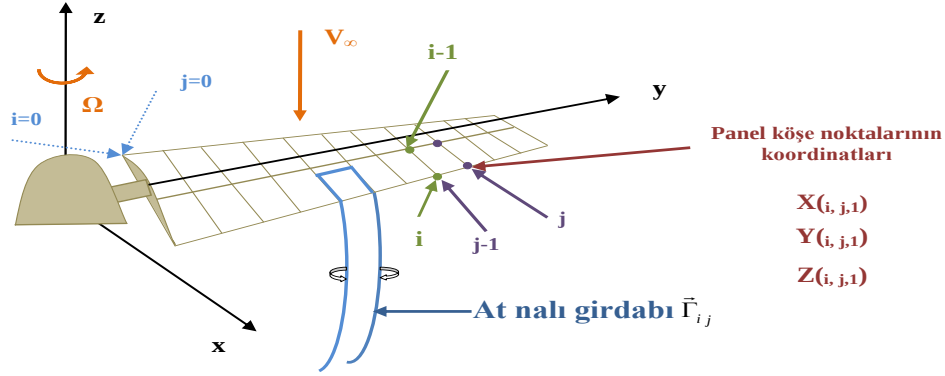
Bunun dışında kamburluk eğrisi koordinatları verilmişse, yukarıda belirtilen hesaplama adımına gerek kalmadan programda bu koordinatlar direkt girdi olarak kullanılabilir.

3.5.2.2 İlk pala panel köşe noktalarının koordinatlarının hesaplanması

Öncelikle tek bir pala üzerindeki ve Şekil 3.10'da görülen panel köşe noktalarının

koordinatları hesaplanır. Panel köşe noktalarının koordinatları açıklık doğrultusundaki istasyonların pervane merkezine olan radyal uzaklığına ve veter doğrultusunda kamburluğa bağlı olarak hesaplanır. Kamburluk nokta dağılımı kullanılarak birim uzunluk için hesaplanan formüller veter uzunluğu ile çarpılır (Denklem 3.37-Denklem 3.39).

$$x(i, j, 1) = (x_c(i) - 0.25).c(j) \quad (3.37)$$



Şekil 3.10 Panel köşe noktası koordinatları.

$$y(i, j, 1) = r(j) \quad (3.38)$$

$$z(i, j, 1) = z_c(i).c(j) \quad (3.39)$$

Kesit konum açısının sıfır olduğu durum için pervane palası üzerindeki panel köşe noktası koordinatları $P_0 (x_0, y_0, z_0)$ yukarıda hesaplanmıştı. (Denklem 3.37- Denklem 3.39) Pervane palası θ kesit konum açısı kadar döndürülerek palaya burulma verilebilir. Bu durumda yeni panel köşe noktası koordinatları hesaplanır (Denklem 3.40- Denklem 3.42).

$$x(i, j, 1) = x_0 \cdot \cos \theta + z_0 \sin \theta \quad (3.40)$$

$$y(i, j, 1) = r(j) \quad (3.41)$$

$$z(i, j, 1) = z_0 \cdot \cos \theta - x_0 \sin \theta \quad (3.42)$$

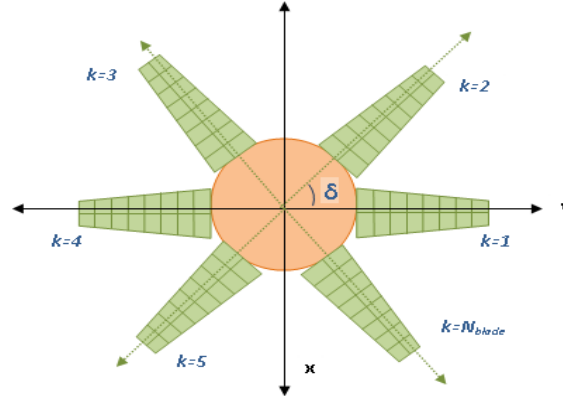
3.5.2.3 Diğer pala panel köşe noktalarının koordinatlarının hesaplanması

N_B adet palaya sahip bir pervane için panel köşe noktası koordinatları tek bir pervane palası üzerinde hesaplandıktan sonra, pala Şekil 3.11'de görülen δ açısı kadar döndürülerek diğer palaların panel köşe noktası koordinatları elde edilir. δ açısı Denklem 3.43 ile hesaplanır:

$$\delta = \frac{2\pi}{N_B} \quad (3.43)$$

3.6 Panel Özelliklerinin Hesaplanması

Girdaplar en ön sıradaki bağlı girdap uç noktasından başlayıp firar kenarına gelir ve daha sonra helisel bir yol izler. Pervane palaları üzerindeki panellerin çeyrek veterinde yer alan at nalı girdaplarının uç noktası koordinatları, yukarıda kanatlar



Şekil 3.11 : Pervane geometrisi.

için hesaplanan ve panel köşe noktası koordinatlarına bağlı olarak hesaplanır (Denklem 3.44, Denklem 3.45, Denklem 3.46).

$$x_v(iv, jv, k) = x(iv, jv, k) + (0.25) \cdot (x(iv+1, jv, k) - x(iv, jv, k)) \quad (3.44)$$

$$y_v(iv, jv, k) = y(iv, jv, k) \quad (3.45)$$

$$z_v(iv, jv, k) = z(iv, jv, k) + (0.25) \cdot (z(iv+1, jv, k) - z(iv, jv, k)) \quad (3.46)$$

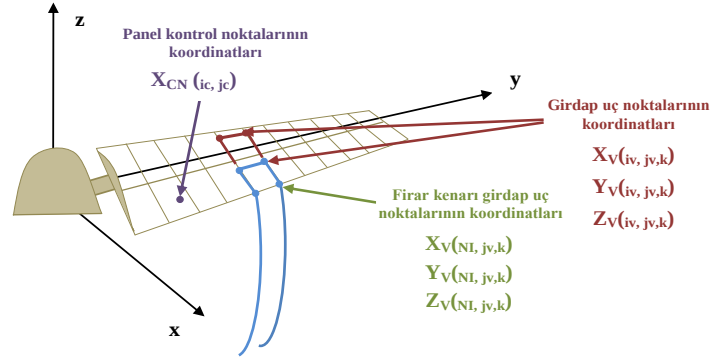
Firar kenarındaki girdap uç noktası koordinatları ise Şekil 3.12’de görüldüğü gibi firar kenarındaki panel uç noktası koordinatlarına eşittir (Denklem 3.47, Denklem 3.48, Denklem 3.49).

$$x_v(NI, jv, k) = x(NI, jv, k) \quad (3.47)$$

$$y_v(NI, jv, k) = y(NI, jv, k) \quad (3.48)$$

$$z_v(NI, jv, k) = z(NI, jv, k) \quad (3.49)$$

Formüllerde yer alan k kanat numarasını göstermektedir. Birinci kanat üzerindeki her bir panelin kontrol noktası koordinatları panel veterinin $3c/4$ 'ünde ve orta noktada yer alır.

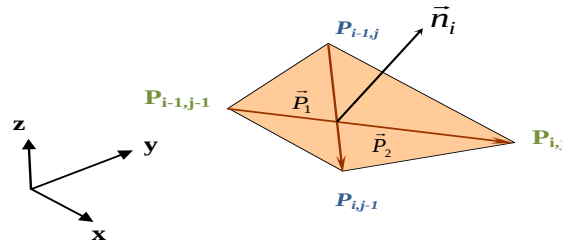


Şekil 3.12: Girdap uç noktası ve panel kontrol noktalarının koordinatlarının hesaplanması.

3.7 Panel Normal Vektörünün Hesaplanması

Panel normal vektörü $\vec{n}_i$, panel düzlemindeki iki vektörün vektörel çarpımına bağlı olarak Şekil 3.13'te görüldüğü gibi Denklem 3.50 ile hesaplanır (Yükselen, 2014d, sy 5).

$$\vec{n}_i = \frac{\vec{P}_1 \times \vec{P}_2}{|\vec{P}_1 \times \vec{P}_2|} \quad (3.50)$$



Şekil 3.13 : Panel normal vektörü

3.8 İz Modeli

3.8.1 İz modelinin seçimi

Pervanenin gerisindeki akımda indüklenmiş hızlar pervanenin yeterince önündeki serbest akım hızına oranla küçük değilse türbinin izi giderek genişleyen bir yapıya sahip olacaktır. Bu tür problemler non-lineer tipte olup, çözümünü hayli karışıktır (Beşerik, sy 36). Serbest girdap tabakasının pervanenin arkasında oluşturduğu girdap tabakasının pervanenin arkasında oluşturduğu helisel izin modellenmesi için çeşitli iz modelleri kullanılmaktadır. İz modelleri zamana bağlı ve daimi olmak üzere iki temel gruba ayrılabilir. İzi bir fonksiyona bağlı olarak tanımlayan **önceden belirlenmiş (prescribed) iz modeli** ve kanat ucunda oluşan yuvarlanmayı

hesaba katacak şekilde iz yapısını ayarlayan **serbest (free) iz modeli** başlıca iki modeldir.

Kanat ucundaki yuvarlanmanın hesaba katılması için serbest girdap modeli seçilmesi gerekir. Serbest girdap modellerinin çoğu iz geometrisini tam olarak belirlemek için iteratif bir yöntem kullanır.

Pervaneye yakın bölgelerde akım alanının uç girdapları tarafından ne kadar indüklendiği önemlidir. Bu durum Betz (1919), Prandtl (1929), Goldstein (1929) ve Theodorsen (1948) tarafından geliştirilen iz modelleriyle açıklanmaya çalışılmıştır (Öner, sy7).

Betz tarafından geliştirilen girdap teorisi, sabit hatveli iz kabulü yapar ve minimum indüklenmiş kayba sahip pervaneyi tasarlamak için kullanılabilir. Pervane kanadı boyunca optimum sirkülasyon dağılımı, pervane kanat kesitlerindeki profil sürüklenmesine bağlı viskoz kayıplarını dikkate almaz (Veldhuis, sy 329).

Goldstein'in helisel iz modelinde, iz geometrisi hafif yüklü pervaneleri esas alır ve girdap sisteminin etkileşim akımı kanat hızlarıyla karşılaştırıldığında küçüktür. İzi oluşturan helisin hatvesi küçüktür ve pervane akımı etkileşimi (slipstream contraction) yoktur.

Wing'e göre, aerodinamik pervane performansı sabit hatveli iz varsayımıyla doğru olarak modellenenebilir. Pervane izi, kanat boyunca son panelden aşağıya doğru dönerek uzanan at nalı girdaplar kullanılarak modellenmiştir. İz gradyanı, firar kenarı panelinin eğimini Kutta şartına çok yaklaşılarak takip eder (Burger, sy 13- 14).

Theodorsen'e göre, 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. Ağır yüklü pervaneler için sirkülasyonun radyal dağılımı Goldstein'in hafif yükleme hali için elde ettiği sonuçların aynısıdır (Öner, sy30).

Serbest girdap modeli uzun hesaplama zamanı ve çözümün doğruluğuna olan katkısının az olması nedeniyle bu çalışmada kullanılması tercih edilmemiştir. İz girdabının koordinatlarını belirlemek için daimi bir model olan Önceden belirlenmiş (prescribed) iz modeli kullanılmıştır.

.

3.8.2 İz modelinin oluşturulması

3.8.2.1 Helis hatve dağılımının hesaplanması

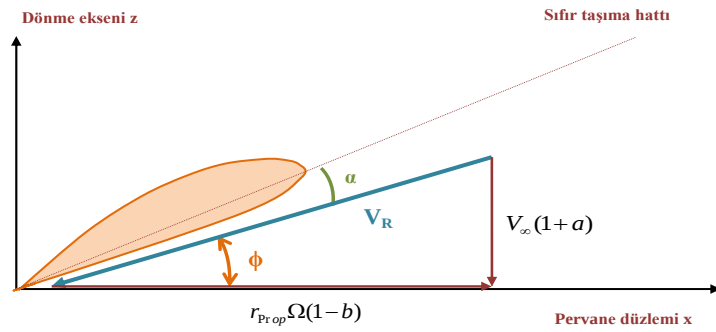
İlerleme oranı (J_{Prop}), pervanenin ilerleme hızının pala ucunun çevresel hızıyla ilgili olan büyüklüğe bölünmesiyle elde edilir (Denklem 3.51). İlerleme oranı boyutsuz bir büyüklük olup, pervane ucunun her devirde ne kadar ilerlediğini gösterir (Yükselen, 2014b, sy 9).

$$J_{Prop} = \frac{V_{\infty}}{r_{Prop} \cdot \Omega} \quad (3.51)$$

Denklem 3.51'de V_{∞} pervanenin ilerleme hızını, r_{Prop} pervane yarıçapını, Ω ise pervanenin açısal hızını ifade etmektedir. Eksenel indüklenme faktörü b olmak üzere, pala elemanına pervane düzlemi içinde etkiyen bileşke hız (Denklem 3.52) Şekil 3.14'te görüldüğü gibi,

$$r_{Prop} \Omega (1 - b) \quad (3.52)$$

büyüklüğündedir.



Şekil 3.14: Pervane palası kesit profili için hız diyagramı

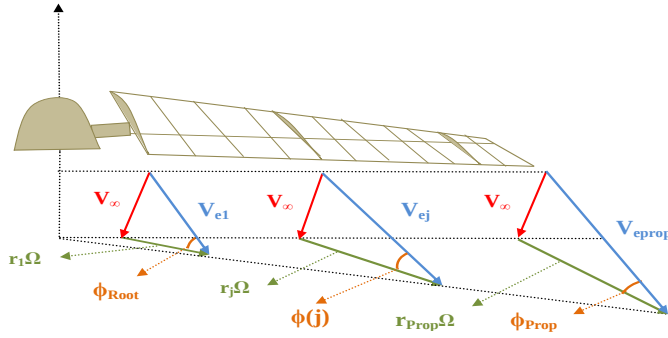
Pervanenin dönme düzlemini geçen serbest akım hızı V_{∞} ise, a teğetsel indüklenme faktörü, girdap sisteminin indüklediği hız $a \cdot V_{\infty}$ olmak üzere, Denklem 3.53'teki gibi

$$V_{\infty} (1 + a) \quad (3.53)$$

belirtilebilir. Pala elemanına etkiyen toplam hız ise bu iki hızın bileşkesi olan V_R 'dir (Yükselen, 2014b, sy 11). Bileşke hızın dönme düzlemiyle yaptığı açı (helis hatvesi) (ϕ) (Denklem 3.54) şöyle hesaplanır:

$$\tan \phi = \frac{V_{\infty} (1 + a)}{r_{Prop} \Omega (1 - b)} \quad (3.54)$$

Pervane palasının çeşitli pala dilimlerinin Şekil 3.15'teki gibi açıklık boyunca bir araya getirilmesinden oluştuğu varsayılabilir.



Şekil 3.15 : Pervane pala kesidi üzerindeki hız bileşenleri.

İndükleme faktörleri ihmal edildiği durumda pala açıklığı boyunca kesitlerin eksenel ve çizgisel hızları lineer olarak değişeceği için helisin hatve dağılımı için (Denklem 3.55) şeklinde bir eşitlik önerilebilir.

$$\tan \phi(j) = \frac{V_{\infty}}{r(j)\Omega} \quad (3.55)$$

3.8.2.2 İz girdaplarının uç noktası koordinatlarının hesaplanması

İzi oluşturan helis geometrisi çok sayıda sabit uzunlukta doğrusal girdap iplikçğine bölünerek modellenenir. İz pala açıklığı boyunca her bir j konumunda $a_{TE}(j)$ yarıçapına sahip birer helis çizer. Öncelikle birinci pervane palası üzerindeki iz girdap iplikçiklerinin uç noktalarının koordinatları hesaplanır. Çeşitli istasyonlardaki helis yarıçapları (Denklem 3.56) birinci palanın firar kenarındaki girdap uç noktası koordinatlarına bağlı olarak hesaplanır.

$$a_{TE}(j) = \sqrt{x_v(NI, j, 1)^2 + y_v(NI, j, 1)^2} \quad (3.56)$$

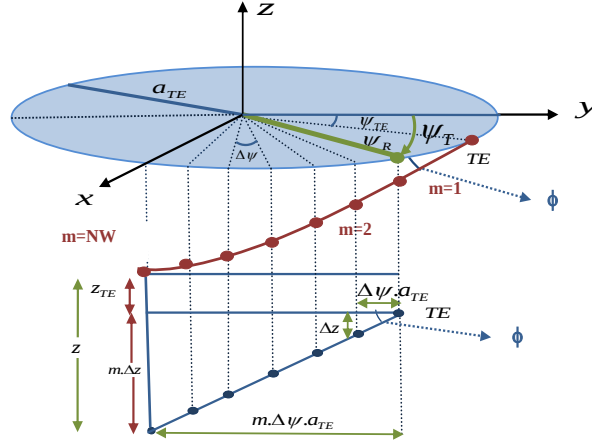
Çeşitli istasyonlarda helis hatvesinin (Φ) tanjantı kullanılarak helisin z yönündeki birim değişimi Δz (Denklem 3.57) hesaplanır (Şekil 3.17).

$$\Delta z(j) = \Delta \psi_R \cdot a_{TE}(j) \tan \phi(j) \quad (3.57)$$

Bu formülden yola çıkarak iz üzerindeki herhangi bir nokta için, z koordinatı şöyle bulunur (Denklem 3.58):

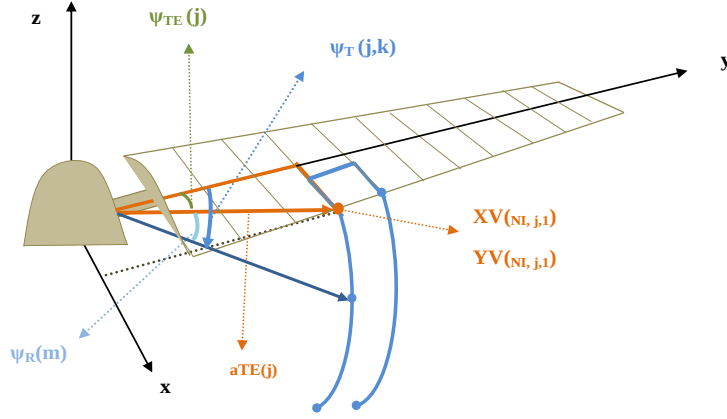
$$z = z_{TE} - m \Delta z \quad (3.58)$$

Formüldeki z_{TE} Şekil 3.16'da görüldüğü gibi firar kenarının z koordinatını, m ise iz üzerindeki girdap parçacıklarının indisini ifade etmektedir.



Şekil 3.16: Girdap iplikçiklerinin z koordinatının hesaplanması.

Çeşitli istasyonlarda firar kenarındaki girdap uç noktası koordinatlarının y eksenine göre yaptığı ve Şekil 3.17'de görülen çıkış açısı (Denklem 3.59) hesaplanır.



Şekil 3.17 : Pervane iz geometrisi

$$\psi_{TE}(j) = \arcsin(x_V(NI, j, 1) / a_{TE}(j)) \quad (3.59)$$

Helisin azimut açısı $\psi_R(m)$ $\Delta\psi_R$ açı aralığına bağlı olarak elde edilir. (Denklem 3.60)

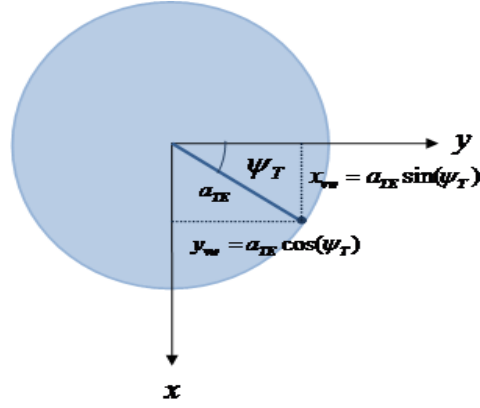
$$\psi_R(m) = m \cdot \Delta\psi_R \quad (3.60)$$

İz girdap iplikçiklerinin uç noktalarının y eksenine göre yaptığı açı hesaplanır (Denklem 3.61).

$$\psi_T(m, j) = \psi_{TE}(j) + \psi_R(m) \quad (3.61)$$

Birinci kanat üzerindeki iz girdabını oluşturan girdap iplikçiklerinin uç noktalarının x ve y koordinatları Şekil 3.18'deki gibi formüle edilir.

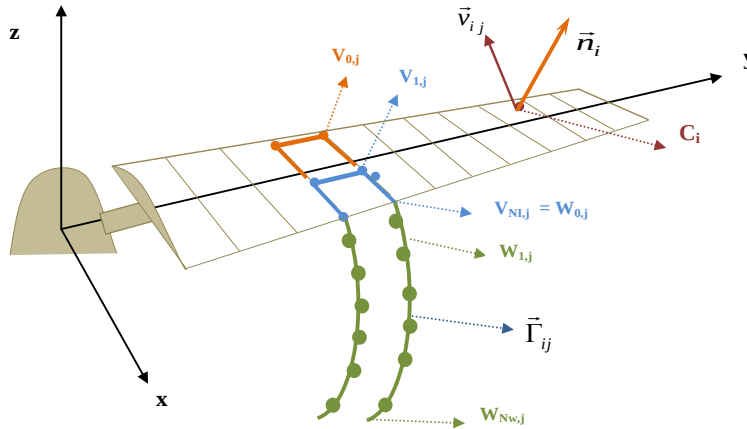
İz girdap iplikçiklerinin uç noktası koordinatları birinci pervane palası üzerinde hesaplandıktan sonra, pala δ açısı kadar döndürülerek diğer palaların köşe noktası koordinatları elde edilir. δ açısı Denklem 3.43'te hesaplanmıştır.



Şekil 3.18 : İz girdap iplikçiklerinin uç noktalarının x ve y koordinatlarının hesaplanması.

3.9 İndüklenmiş Hızların Hesaplanması

Birim girdap şiddetine ($\Gamma_{ij}=1$) sahip olduğu farz edilen ve Şekil 3.19'da görülen at nalı girdaplarının birinci kanat kontrol noktalarında (C_i) indüklediği toplam hız $\vec{v}_{ij}$, her bir pala üzerinde (i,j) konumuna denk gelen girdapların indüklemelerinin toplanmasıyla elde edilir.



Şekil 3.19: İndüklenmiş hızların hesaplanması.

3.9.1 Sabit şiddetli doğrusal girdap parçasının indüklemesi

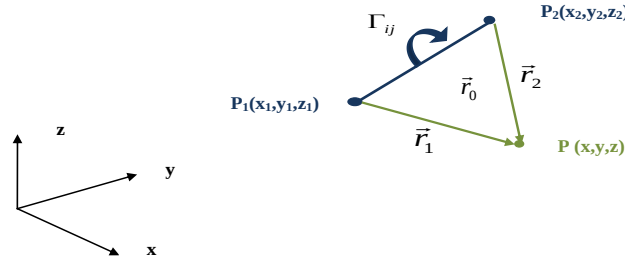
Bir önceki bölümde indüklenmiş hızların hesaplanması için at nalı girdapları doğrusal girdap parçalarına bölünmüştü. Bu bölümde ise sabit-şiddetli doğrusal bir girdap parçasının uzayda seçilen herhangi bir noktada indüklediği hız bileşenleri hesaplanacaktır

Herhangi bir doğrusal girdap parçasının uzayda seçilen herhangi bir noktada indüklediği hız bileşenleri Biot-Savart Kanunu'ndan elde edilen bağıntı (Denklem 3.62) ile hesaplanır (Katz and Plotkin, 1991, sy 48).

$$\vec{V} = \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{\vec{r}_1 \times \vec{r}_2}{|\vec{r}_1 \times \vec{r}_2|} \cdot \vec{r}_0 \left(\frac{\vec{r}_1}{|\vec{r}_1|} - \frac{\vec{r}_2}{|\vec{r}_2|} \right) \quad (3.62)$$

Bu formüle dayanarak, $P_1(x_1, y_1, z_1)$ ve $P_2(x_2, y_2, z_2)$ noktaları arasında yer alan ve Şekil 3.20'de görülen doğrusal girdap parçasının $P(x, y, z)$ noktasında indüklediği hız bileşenleri hesaplanır.

P noktası girdap çizgisinin üzerinde ise tekillik söz konusu olup, bu durumun kontrol edilmesi ve girdap çizgisinin çok yakınında özel bir uygulama yapılması gerekmektedir.



Şekil 3.20: Üç boyutlu doğrusal girdap parçasının indüklediği hızın hesabında kullanılan terminoloji

Sayısal hesaplamada bu yakınlık çok küçük ϵ yarıçaplı bir bölge ile tayin edilir. Yani; Denklem 3.63) olması durumuna bakılır.

$$|\vec{r}_1 \times \vec{r}_2| = \Delta_v = \Delta_v \langle \epsilon \quad \vec{r}_2 \langle \epsilon \quad \vec{r}_1 \langle \epsilon, \quad (3.63)$$

(Bu durum gerçekleşiyorsa, üç hız bileşeni de sıfır olur (Denklem 3.64).

$$u = v = w = 0 \quad (3.64)$$

3.10 Lineer Denklem Sisteminin Oluşturulması ve Çözümü

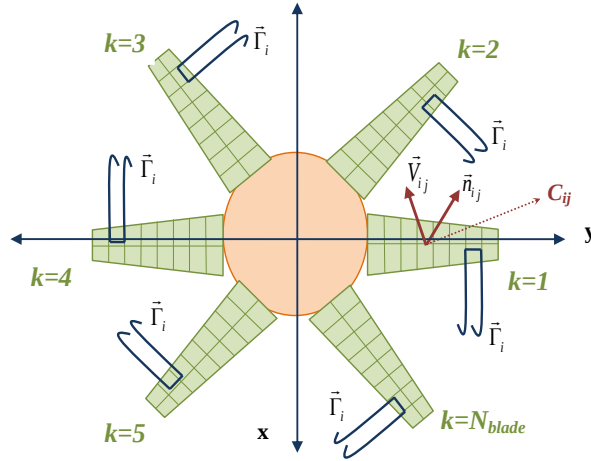
Pervanenin girdap kafes yöntemi ile analizinde, indüklenmiş hızların hesaplanmasının ardından, indüklenmiş hızlar kullanılarak lineer denklem sistemi oluşturulur (Denklem 3.65).

$$\sum A_{ij} \vec{\Gamma}_i = \vec{R}_i \quad (3.65)$$

Şekil 3.21'de görülen Γ_i her bir pala üzerinde i konumuna denk gelen at nalı girdaplarının toplam girdap şiddetini, $\mathbf{R}_i$ panele doğru gelen etkin akım hız vektörünü göstermektedir. A_{ij} katsayılar matrisi (Denklem 3.66),

$$A_{ij} = \vec{V}_{ij} \cdot \vec{n}_{ij} \quad (3.66)$$

pervane üzerindeki herhangi bir i paneline bağlı at nalı girdabının, birim girdap şiddeti başına, birinci pervane kanadı üzerindeki herhangi bir (ij) panelinin kontrol noktasında normal doğrultuda indüklediği hız bileşenini belirtmektedir.



Şekil 3.21: Pervane için girdap kafes yöntemi modeli.

Pervanenin birinci pervane kanadı üzerindeki (ij) panelinin kontrol noktasında normal doğrultuda indüklenen toplam hız, pervanenin her bir palasının indüklediği hızların toplanmasıyla elde edilir (Denklem 3.67).

$$\vec{R}_i = \vec{V}_{ei} = \vec{V}_{\infty} + r_i \vec{\Omega} \quad (3.67)$$

Denklem sisteminin (Denklem 3.67) sağ tarafı $\mathbf{R}_i$, Ω dönme hızına sahip pervane ilerleme hızı $\mathbf{V}_{\infty}$ ve dönmeden kaynaklı hız bileşeninin $(r_i \cdot \Omega)$ toplanmasıyla hesaplanır. Denklemde yer alan $\mathbf{V}_{ei}$ etkin akım hızı, r_i ise (i,j) panel kontrol noktasının pervane merkezine olan uzaklığıdır.

$\mathbf{R}_i$ vektörü A_{ij} katsayılar matrisinin sağ tarafına bir kolon $(A_{i,j+1})$ olarak eklenir. Ortaya çıkan denklem sistemi Gauss Eliminasyon yöntemiyle çözülerek paneller üzerindeki Γ_i girdap şiddetleri bulunur.

3.11 Pervane Performans Parametrelerinin Hesaplanması

Bir pervanenin pala geometrisi ve pala kesit karakteristikleriyle ilerleme, dönme hızları ve havanın yoğunluğu verildiği takdirde, bağıntılar yardımıyla pervaneye etkiyen toplam çekme ve momenti hesaplamak mümkündür (Yükselen, 2014b, sy 24).

Bu bölümde pervane için hesaplanan toplam çekme ve moment kullanılarak, pervane performansını belirten başlıca parametreler olan çekme katsayısı (c_T) ve moment katsayısı (c_M) hesaplanacaktır.

3.11.1 Pervane çekme katsayısının hesaplanması

Pervane çekme katsayısının hesabı için öncelikle panellerin yeni kontrol noktalarının koordinatları hesaplanır. İndüklenmiş hızların hesabında kullanılacak olan yeni kontrol noktaları daha önce uç nokta koordinatları hesaplanan birinci pala üzerindeki panellerdeki bağlı girdapların orta noktasıdır.

Ardından her bir yeni kontrol noktası üzerindeki indüklemeler hesaplanır. Panel kontrol noktaları üzerindeki bileşke hız, serbest akımın hız bileşenleri ile indüklenmiş hız bileşenlerinin daha önce hesaplanan Γ_{ij} girdap şiddetleriyle çarpılmış hallerinin toplamı olarak hesaplanır (Denklem 3.68).

$$\vec{V}_{ij} = (\vec{V}_\infty + r_{ij} \cdot \vec{\Omega}) + \vec{v}_{ij} \cdot \vec{\Gamma}_{ij} \quad (3.68)$$

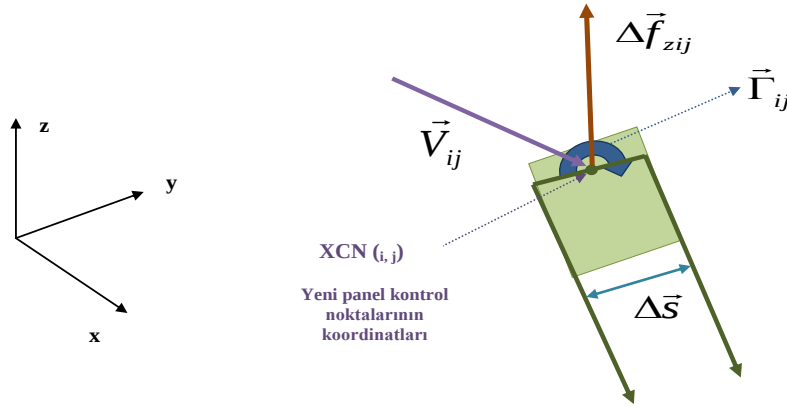
Denklemdeki (Denklem 3.68) $\vec{v}_{ij}$, tüm at nalı girdaplarının (i,j) panel kontrol noktalarında indüklediği hızı göstermektedir. Palalar üzerindeki (ij) konumundaki panellere etkiyen ve Şekil 3.22'de görülen aerodinamik kuvvet, denklem takımının (Denklem 3.65) çözümüyle elde edilen girdap şiddetleri kullanılarak Denklem 3.69 ile hesaplanır.

$$\Delta \vec{f}_{zij} = \rho \vec{V}_{ij} \times \vec{\Gamma}_{ij} \quad (3.69)$$

Formüldeki ρ havanın öz kütlesi, $\vec{V}_{ij}$ panel üzerindeki bileşke hız, $\vec{\Gamma}_{ij}$ ise panel üzerindeki sirkülasyon vektörüdür. Panel üzerindeki sirkülasyon vektörü, panel üzerindeki sirkülasyonunun panel açıklık vektörü $\Delta \vec{s}$ ile çarpılmasıyla elde edilir (Denklem 3.70).

$$\vec{\Gamma}_{ij} = \Gamma_{ij} \cdot \Delta \vec{s} \quad (3.70)$$

Pervane palası üzerindeki toplam kuvvet panellere etkiyen kuvvetlerin toplanmasıyla elde edilir (Denklem 3.71):



Şekil 3.22: Pervane palası üzerindeki panelin oluşturduğu kuvvet.

$$\vec{F}_z = \sum_{i=1}^{NI} \sum_{j=1}^{NJ} \Delta \vec{f}_{zij} \quad (3.71)$$

Pervane çekme kuvveti tek bir pala için hesaplanan kuvvetin pervane pala sayısı (N_B) ile çarpılmasıyla hesaplanır (Denklem 3.72) :

$$T = F_z \cdot N_B \quad (3.72)$$

Pervane çekme katsayısı, pervane çekme kuvvetinin havanın öz kütlesi (ρ) ile saniyedeki dönme hızının karesinin (n_{RPS}) ve pervane çapının (D_{prop}) dördüncü kuvveti ile çarpımına bölünmesiyle hesaplanır (Denklem 3.73):

$$c_T = \frac{T}{\rho \cdot n_{RPS}^2 \cdot D_{prop}^4} \quad (3.73)$$

3.11.2 Pervane moment katsayısının hesaplanması

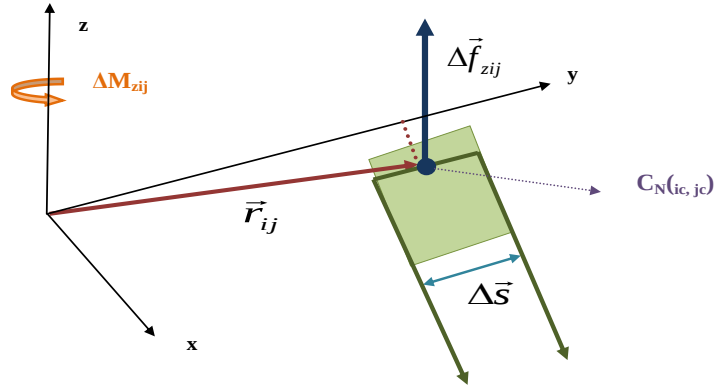
Pervane palası üzerindeki herhangi bir panelin pervane merkezinde oluşturduğu ve Şekil 3.23'te görülen moment, bir önceki bölümde hesaplanan panel üzerindeki $\Delta \vec{f}_{zij}$ kuvvetinin panel kontrol noktasının pervane merkezine olan uzaklık vektörü $\vec{r}_{ij}$ ile çarpılmasıyla hesaplanır (Denklem 3.74) :

$$\Delta M_{zij} = (\vec{r}_{ij} \times \Delta \vec{f}_{zij}) \cdot \vec{k} \quad (3.74)$$

Pervane palasının pervane merkezinde oluşturduğu toplam moment, paneller için hesaplanan momentlerin toplanmasıyla elde edilir (Denklem 3.75):

$$M_z = \sum_{i=1}^{NI} \sum_{j=1}^{NJ} \Delta M_{zij} \quad (3.75)$$

Pervane momentini tek bir pala için hesaplanan momentin pervane pala sayısı (N_B) ile çarpılmasıyla hesaplanır (Denklem 3.76):



Şekil 3.23 : Pervane palası üzerindeki panelin oluşturduğu moment.

$$M = M_z . N_B \quad (3.76)$$

Pervane moment katsayısı, pervane momentinin havanın öz kütlesi (ρ) ile saniyedeki dönme hızının karesinin (n_{RPS}) ve pervane çapının beşinci kuvveti ile çarpımına bölünmesiyle hesaplanır (Denklem 3.77):

$$c_M = \frac{M}{\rho . n_{RPS}^2 D_{prop}^5} \quad (3.77)$$

3.11.3 Pervane güç katsayısı ve veriminin hesaplanması

Pervane güç katsayısı pervane moment katsayısına bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanır. (Denklem 3.78):

$$c_p = 2\pi c_M \quad (3.78)$$

Pervane verimi (Denklem 3.79) ise pervane ilerleme oranı (J_{prop}), pervane çekme katsayısı (c_T) ve pervane güç katsayısına (c_p) bağlı olarak hesaplanabilir (Yükselen, 2014b, sy 10).

$$\eta = J_{prop} \left(\frac{c_T}{c_p} \right) \quad (3.79)$$

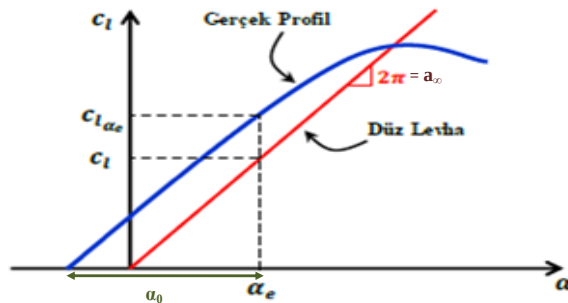
4. KANAT TEST ÇALIŞMALARI

Önceki bölümde anlatılan girdap kafes yöntemi pervane modeli için FORTRAN dilinde program geliştirilmiştir. Bu bölümde bir önceki bölümde pervane için geliştirilen girdap kafes yöntemi programı kullanılarak çeşitli kanat profilleri ve pervaneler için uygulamalar yapılacaktır.

4.1. Pervane palası için test çalışması

Analiz yönteminin geliştirilmesi sırasında kullanılabilecek çok basit bir geometri üretme yolu da pervane palasını kanat gibi düşünerek kanat geometrisine yönelik bütün parametreleri pervane palasına uygulamaktır. Bu uygulama sırasında pervanenin dönmesi dikkate alınmazsa, uygulama tamamen kanada yönelik olacaktır (Şahin, 2013, sy 31).

Girdap kafes yöntemi uygulaması sırasında veter doğrultusunda panel sayısı birden fazla alınarak kamburluk etkileri hesaba katılabilir. Veter doğrultusunda tek bir panel alındığında ise, kesit profilinin düz levha olduğu varsayılarak kamburluk etkileri dikkate alınmaz. Şekil 4.1'de görüldüğü gibi Gerçekte kanat kesit profilinin taşıma eğrisi eğimi (a_{∞}) ve sıfır taşıma hücum açısı (α_0) düz levha halinden farklıdır (Şahin, 2013, sy 23).



Şekil 4.1 : Düz levha ile gerçek kanat profilinin taşıma eğrisi eğiminin karşılaştırılması.

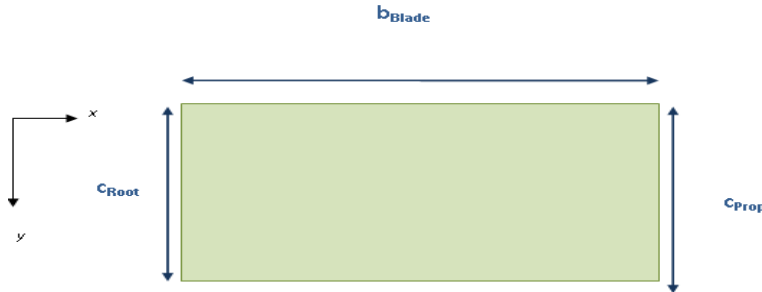
Girdap kafes yöntemleri kanat, pervane ve benzeri taşıyıcı elemanları, ihmal edip kamburluk yüzeyinden ibaret olarak göz önüne alırken, viskoz etkileri

genellikle hiç dikkate almamaktadır. Taşıyıcı Çizgi Modelleri ise kaçma girdaplarının etkisiyle oluşan lokal sapmaları dikkate alarak kesit profillerinin viskoz koşullardaki özelliklerini hesaba katabilmektedir. Fakat taşıyıcı çizgi modeli kesit profili taşımasının hücum açısıyla lineer olarak değiştiğini varsaymaktadır. Gerçek bir profilin taşıma katsayısı belli bir hücum açısından sonra sınır tabaka kalınlaşmasının ve akım ayrılmalarının sonucu olarak doğrusal olmayan bir değişim göstermeye başlar (Şekil 4.1) (Şahin, 2014, sy 24).

Pervane palası için yazılan Girdap Kafes Yöntemi (VLM) programının sonuçlarının doğruluğunun kontrolü, düşük hızlardaki üç boyutlu kanat için hazırlanmış Prandtl Taşıyıcı Çizgi Teorisi (**MAYwingPLL**) programı aracılığıyla yapılabilir (A. Yükselen, kişisel görüşme, 15 Ağustos 2014).

4.1.1 Düz levha taşıma katsayısı hesabı

İlk test çalışması için düz levha kesit profili kullanılmıştır. Bu profilin taşıma eğrisi eğimi (a_∞) 2π 'dir (Şekil 4.1). Uygulama sırasında dikdörtgensel üst görünümlü bir kanat ele alınmıştır. Şekil 4.2'de görülen kanadın açıklık oranı (**AR**) 10, kanat alanı (S_{blade}) ise 10 m^2 'dir.

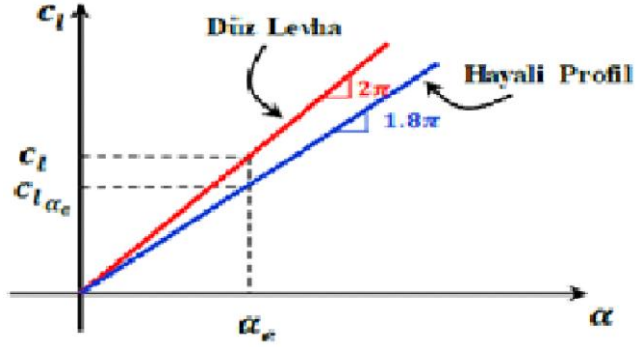


Şekil 4.2 : Düz levha geometrisi.

Kanat açıklığı boyunca 10 adet panele ayrılmış ve hücum açısı 10° olan düz levha için girdap kafes yöntemi (VLM) programı kullanılarak taşıma katsayısı 0,88 olarak hesaplanır. Prandtl Taşıyıcı Çizgi Teorisi (PLL) programında ise düz levha için taşıma katsayısı bu değere çok yakın olan 0,85 olarak hesaplanır.

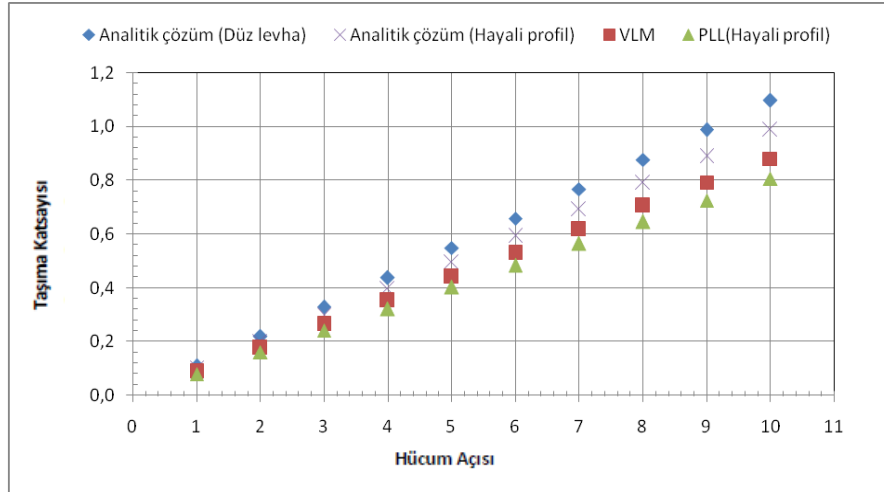
4.1.2 Kamburluksuz profil taşıma katsayısı hesabı

İkinci uygulama olarak, düz levhadan biraz daha küçük bir taşıma eğrisi eğimine sahip hayali, simetrik bir kesit profili kullanılmıştır. Bu profilin taşıma eğrisi eğim Şekil 4.3'te görüldüğü gibi (a_∞) düz levhadan farklı olarak 2π yerine 1.8π alınmıştır.



Şekil 4.3: Düz levha ve hayali profil taşıma eğrisi eğiminin karşılaştırılması (Şahin, 2014, sy 39).

Bu uygulamada Prandtl Taşıyıcı Çizgi Teorisi (PLL) ve Girdap Kafes Yöntemi (VLM) kullanılarak Şekil 4.4'te görüldüğü gibi çeşitli hücum açılarındaki kamburluksuz profil için taşıma katsayıları elde edilmiştir.



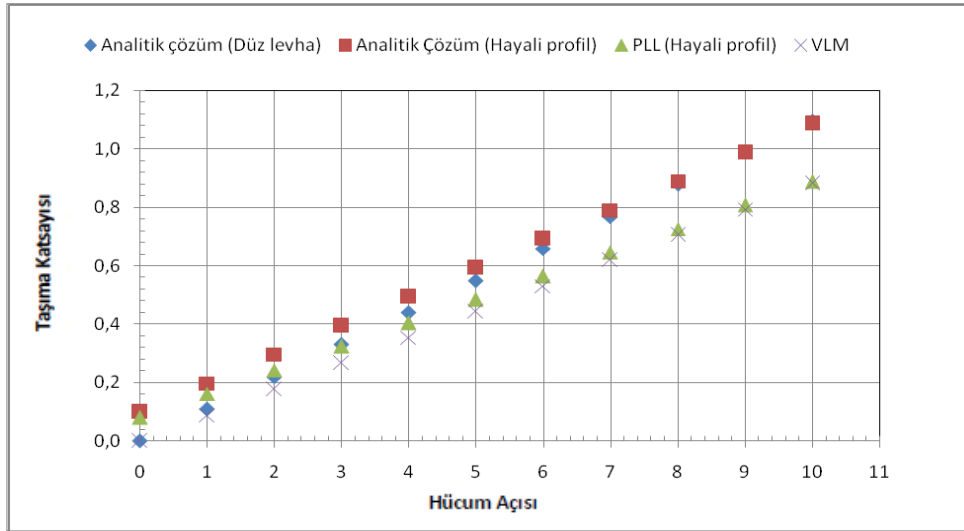
Şekil 4.4 : Kamburluksuz profil hücum açısı-taşıma katsayısı değerleri.

Her iki yöntemle elde edilen sonuçlara göre, elde edilen taşıma katsayısı değerleri birbirine çok yakındır. Bu eğriler analitik olarak hesaplanan düz levha ve hayali profil verileri ile karşılaştırılması sonucunda analitik çözüm ile aynı hücum açılarında daha yüksek taşıma katsayısı değerleri hesaplandığı görülmektedir. Çünküsürükleme bileşenini de içerir ve üç boyutlu kanatta iki boyutlu kanat ile aynı hücum açısında taşıma daha azdır (Hanson, 2008, sy 21).

Analitik çözüm ve Girdap Kafes Yöntemi iki boyutlu kanat için hesap yaparken, PLL yöntemi üç boyutlu hesap yapmaktadır.

4.1.3 Kamburluklu profil taşıma katsayısı hesabı

Üçüncü uygulama olarak, bir önceki bölümde kullanılan sayısal yöntemlerin kamburluğa ne tepki vereceğini göstermek için aynı hayali profile sıfır taşıma hücum açısı $\alpha_0=-1$ olacak şekilde bir kamburluk verilmiş ve yukarıdaki hesaplar tekrarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.5'te sunulmuştur.



Şekil 4.5 : Kamburluklu profil hücum açısı-taşıma katsayısı değerleri.

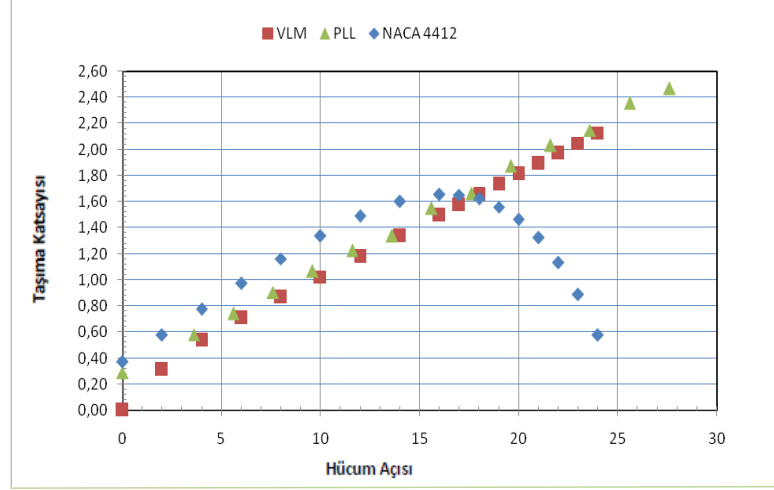
Şekilde (Şekil 4.5) görüldüğü gibi, Taşıyıcı Çizgi Teorisi ile elde edilen taşıma katsayıları, profil kamburluğunu dikkate alacak biçimde bir değişime uğrayarak, Girdap Kafes Yöntemi ile elde edilen taşıma katsayılarından daha büyük değerler almaktadır.

4.2. Gerçek Bir Kanat Profili için Taşıma Katsayısı Hesabı

4.2.1 NACA 4412

Bu bölümde gerçek bir kanat profiline ait doğrusal olmayan bölgeyi de içeren veri kullanılmıştır. Kesit profili olarak NACA 4412 profili seçilmiştir (Şahin, 2013, sy43) ve profile ait verilere polinomik eğri uydurulmuştur. Önceki örneklerde kullanılan dikdörtgensel üst görünümlü kanat için farklı hücum açısı değerlerinde Şekil 4.6'da görülen taşıma katsayıları elde edilmiştir.

Doğrusal bölgede her iki yöntemle elde edilen sonuçlarda taşıma katsayıları literatürde yer alan taşıma katsayısı değerlerine benzer şekilde lineer bir artış göstermektedir (Şekil 4.6).



Şekil 4.6 : NACA 4412 profili hücum açısı-taşıma katsayısı değerleri.

Her iki yöntemde (Taşıyıcı Çizgi Teorisi ve Girdap Kafes Yöntemi) de viskoz etkiler hesaba katılmadığı için, kanat profilinin doğrusal olmayan bölgesinde taşıma eğrisi eğiminde azalma olmamıştır.

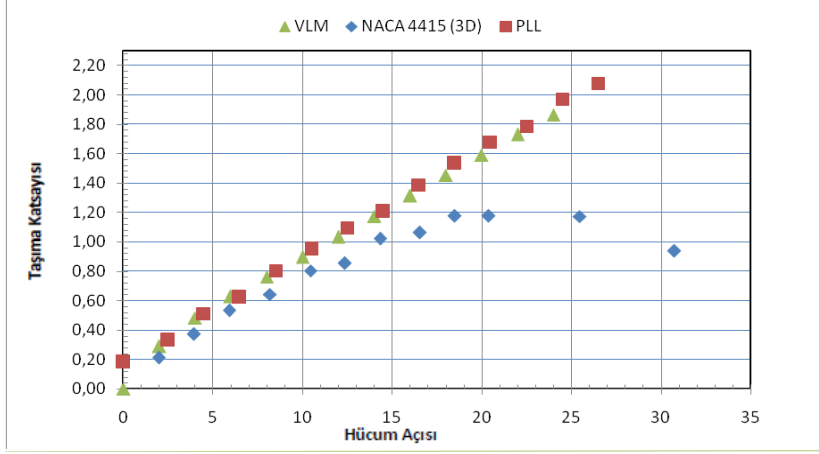
4.2.2 NACA 4415

Pala test çalışmalarının en sonuncusunda deneysel çalışmalarla bir karşılaştırma yapılarak yöntemin genel başarısı hakkında bilgi edinilmesi amaçlanmıştır. Bu çerçevede dikdörtgensel üst görünümlü kanadın kesit profili olarak NACA 4415 profili seçilmiştir. Bu profile ait veriler Ostowari ve Naik'in çalışmasından alınmış ve bu veriye bir polinomik eğri uydurulmuştur.

Bu uygulamada dikdörtgensel üst görünümlü kanadın açıklık oranının (AR) 6, 9 ve 12 değerleri için hesaplamalar yapılmış olup, sonuçlar Şekil 4.7'de, Ostowari ve Naik tarafından verilen üç-boyutlu deneysel sonuçlarla karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. (Şahin, 2014, sy 45-47)

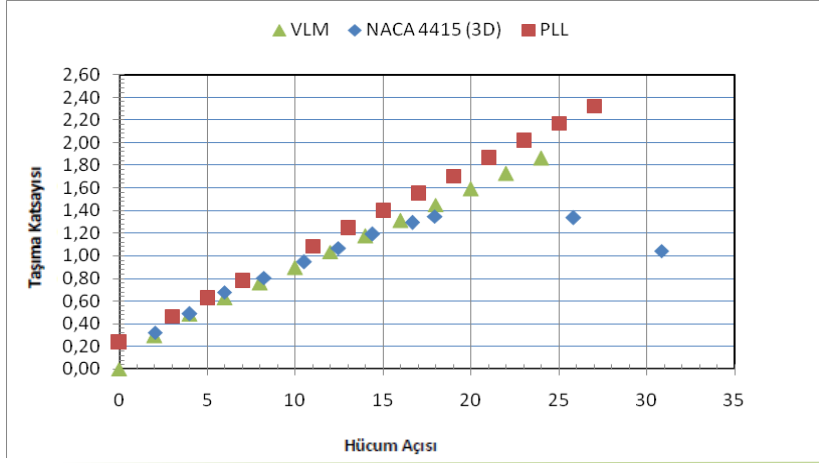
Açıklık oranı değeri küçük olduğunda (AR=6) Girdap Kafes Yöntemi sonuçları Şekil 4.7'de görüldüğü gibi $0^\circ < \alpha < 10^\circ$ arasında deney sonuçlarına doğru yaklaşmaktadır. Fakat sonuçlar arasındaki uyum yeterli değildir. Bu durum uygulanan yöntemin kanat üzerinden geçen akımı yaklaşık iki boyutlu kabul etmesinden kaynaklanmaktadır. Bu açıklık oranı için üç boyutlu etkiler kuvvetli olup, kesit profili bilgisinin kullanılması hataya yol açmaktadır.

Açıklık oranının daha büyük olduğu (AR=9) durumda Şekil 4.8'de görüldüğü gibi Girdap Kafes Yöntemi sonuçları ile özellikle kanat profilinin $0^\circ < \alpha < 16^\circ$ arasında



Şekil 4.7 : NACA 4415 taşıma katsayısı değişimi (AR=6).

deney sonuçları arasında iyi bir uyum görülmektedir.

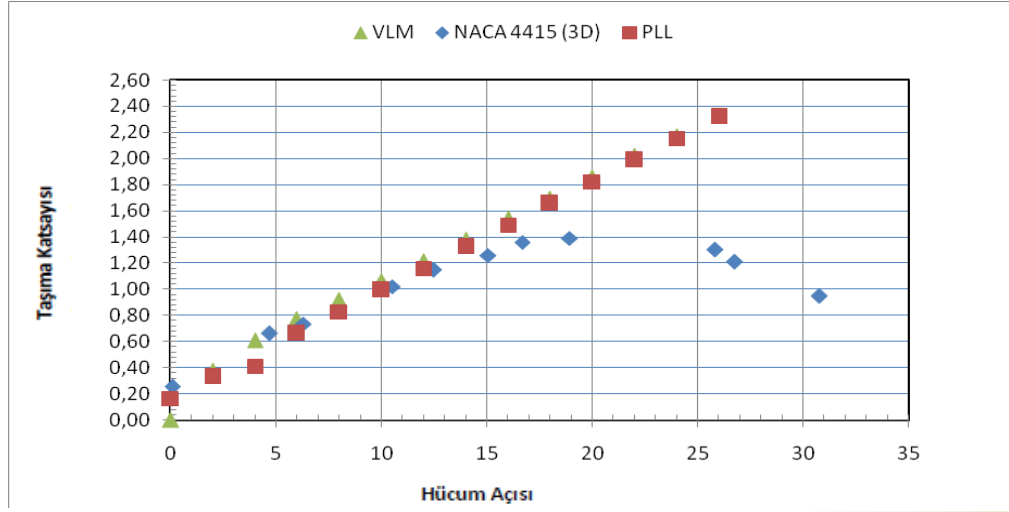


Şekil 4.8: NACA 4415 taşıma katsayısı değişimi (AR=9).

Açıklık oranının daha da büyük olduğu (AR=12) durumda ise Şekil 4.9'da görüldüğü gibi Girdap Kafes Yöntemi sonuçları ile özellikle kanat profilinin $0^\circ < \alpha < 12,5^\circ$ arasında deney sonuçları arasında iyi bir uyum görülmektedir.

Açıklık oranının daha büyük olduğu (AR=9 ve AR=12) iki halde VLM sonuçları ile deney sonuçları arasında iyi bir uyum olduğu görülmektedir. Bu da Girdap Kafes Yöntemi'nin açıklık oranı yeterince büyük olmak kaydıyla güvenilir bir yöntem olduğunu göstermektedir.

Her iki yöntemde (Taşıyıcı Çizgi Teorisi ve Girdap Kafes Yöntemi) de viskoz etkilerhesaba katılmadığı için, kanat profilinin doğrusal olmayan bölgesinde taşıma eğrisi eğiminde azalma olmamıştır.



Şekil 4.9: NACA 4415 taşıma katsayısı değişimi (AR=12)

5. PERVANE UYGULAMALARI

5.1 Pervane İçin Test Çalışması

5.1.1 MAYpropBEM programı

Pervane için yazılan Girdap Kafes Yöntemi (VLM) programının sonuçlarının doğruluğunun kontrolü amacıyla ve pervanenin tasarım ve analizi için hazırlanmış, klasik momentum ve pala elemanı teorilerine dayanan (**MAYpropBEM**) programı aracılığıyla yapılabilir (A. Yükselen, kişisel görüşme, 15 Ağustos 2014).

Tasarım problemi, istenilen çekme kuvvetini olabildiğince küçük bir şaft momentiyile sağlayacak bir pervanenin çap ve devir sayısı ile pala boyunca kesit konum açıları ve veter boylarının hesaplanmasından ibarettir.

Öncelikle **MAYpropBEM** programında seçilen pervane için uçuş hızı (U_∞), çekme kuvveti (T), pala sayısı (n_{Blade}) ve ideal verim (η_i) programa girilir.

Palanın herhangi bir kesitinin aerodinamik bakımdan optimum çalışma şartlarında olması için akımın bu kesite optimum hücum açısıyla gelmesi gerekir. Bu açı finesin maksimum olduğu hücum açısıdır. Bu bakımdan, seçilen kesit profiline ait aşağıdaki verilerin de bilinmesi gereklidir:

- a. $E_{\max}$ Maksimum finesin büyüklüğü
- b. α_{diz} Maksimum fines hücum açısı
- c. cl_{diz} Maksimum fines hücum açısındaki taşıma katsayısı

İlk aşamada ideal disk teorisi yardımıyla pervane çapı (D_{prop}), devir sayısı (n_{RPM}) ve Pervane ilerleme oranı (J_{prop}) özel birtakım kısıtlar yoksa verilen çekme kuvveti ile seçilen ideal verimden (η_i) elde edilebilir (A. Yükselen, kişisel görüşme, 15 Ağustos 2014).

İkinci aşama ise pala boyunca kesit konum açılarının (θ) ve veter uzunluklarının (c) değerlerinin belirlenmesidir. Üçüncü aşamada ise lokal çekme katsayısı, şaft moment katsayısı ve verimin açıklık doğrultusunda değişimleri sırasıyla hesaplanır. Bu,

aşamada son olarak tasarım ilerleme oranı için pervane performans parametreleri (verim (η), çekme katsayısı (k_T), moment katsayısı (k_M)) hesaplanır.

Analiz problemi ise, çapı, pala boyunca kesit konum açıları ve veter dağılımı bilinen bir pervanenin değişik ilerleme oranlarındaki performansının hesaplanması olarak ifade edilebilir (A. Yükselen, kişisel görüşme, 15 Ağustos 2014).

5.1.2 Pervane 1- (Clark Y Profili)

Pervane ile ilgili bazı tasarım verileri belirlendiğinde disk teorisi ile pervane geometrisi ile ilgili değerleri elde etmek mümkündür (Çizelge 5.1).

Çizelge 5.1: Pervane Tasarım Parametreleri

Pervanenin ilerleme hızı	U_∞	30 m/s
Pervanenin çekme kuvveti	T	200 N
Pervane kanat sayısı	n_{Blade}	2
İdeal verim	η_i	0,97

5.1.2.1 Profil bilgileri

İlk pervane uygulaması için test pervanesi kanat profili olarak tasarım ve tasarım dışı şartlarda performansı bilinen Clark Y profili seçilmiştir. Clark Y kanat profilinin performans değerleri Çizelge 5.2, Çizelge 5.3, Çizelge 5.4, Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de verilmiştir.

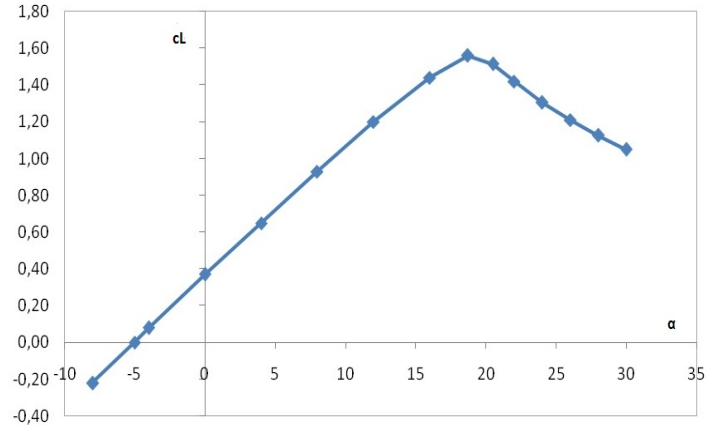
Çizelge 5.2: Profil Bilgileri

Maksimum fines hücum açısı	α_{diz}	0
Maksimum fines hücum açısındaki taşıma katsayısı	$C_{L\text{diz}}$	0,37
Maksimum finesin büyüklüğü	E_{max}	22,2

Literatürden elde edilen profil karakteristiklerini gösteren grafikler kullanılarak programda kullanılmak üzere en-küçük kareler yöntemiyle denklemler hesaplanır. Bu denklemlerin katsayıları Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Clark Y kanat profilinin taşıma katsayısı-hücum açısı grafiği performans değerleri Şekil 5.1'de verilmiştir.

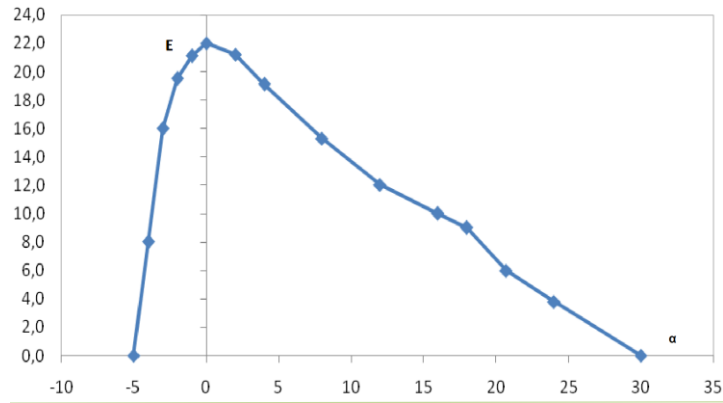
Clark Y kanat profilinin fines-hücum açısı grafiği performans değerleri Şekil 5.2'de verilmiştir.



Şekil 5.1: Taşıma katsayısı-hücum açısı grafiği.

5.1.2.2 Pervane tasarım sonuçları

Yukarıda belirtilen pervane dizayn parametreleri ve profil verileri kullanılarak, istenen performans değerlerini sağlayacak pervane geometrisi tasarlanır. Tasarım sonuçları Çizelge 5.5 'te verilmiştir.



Şekil 5.2: Fines-hücum açısı grafiği.

Çizelge 5.3: Profil için taşıma katsayısı ve finesin hücum açısıyla değişimini formüle eden katsayılar

$cL(\alpha)$		$E(\alpha)$	
$\alpha < \alpha_{max}$	$\alpha > \alpha_{max}$	$\alpha < \alpha_{diz}$	$\alpha > \alpha_{diz}$
0.3664360000	-23,790600000	22,0516000000	21,928900000
0.0733593000	4,2502300000	0,1387830000	-0,7486200000
-0.0000210448	0,0069218400	0,0821223000	0,0000000000
0.0000000000	-0,0000681615	0,0000000000	0,0000000000
-0.0000957060	-0,2603840000	-0,4565450000	0,0000000000

Clark Y kanat profilinin kamburluk fonksiyonu Çizelge 5.4, verilmiştir.

Çizelge 5.4: Profil kamburluk fonksiyonu

i	x	z
1	0.00000	0.00000
2	0.02447	0.00380
3	0.09549	0.01620
4	0.20611	0.02755
5	0.34549	0.03346
6	0.50000	0.03346
7	0.65451	0.02755
8	0.79389	0.01844
9	0.90451	0.00922
10	0.97553	0.00247
11	100.000	0.00000

5.1.2.3 Pervane analiz sonuçları

Son aşamada MAYpropBEM ve VLM programı aracılığıyla pervanenin analizi yapılır. Analiz sonuçları Çizelge 5.7, Çizelge 5.8 ve Çizelge 5.9'da verilmiştir.

Çizelge 5.5: Pervane tasarım sonuçları

D_{Prop}	1,903 m		İdeal Disk Teorisi
n_{RPM}	2024 d/dak	34 d/sn	
J_{Prop}	0,467		
r/R	c/R	θ	Pala Elemanı Teorisi
0,20	0,1018	38,04	
0,25	0,0859	31,86	
0,30	0,0740	27,29	
0,35	0,0648	23,80	
0,40	0,0575	21,08	
0,45	0,0516	18,89	
0,50	0,0468	17,11	
0,55	0,0427	15,62	
0,60	0,0393	14,37	
0,65	0,0364	13,30	
0,70	0,0339	12,38	
0,75	0,0317	11,58	
0,80	0,0298	10,87	
0,85	0,0280	10,24	
0,90	0,0265	9,68	
0,95	0,0251	9,18	
1,00	0,0239	8,73	

Tasarım koşulları için pervane performans değerleri ise Çizelge 5.6'da verilmiştir. Şekil 5.3'te farklı ilerleme oranları için Girdap Kafes Yöntemi ve Blade Element Yöntemi ile elde edilen çekme katsayısı (c_T) değerleri verilmiştir. Grafikten tasarım ilerleme oranı ($J_{prop} = 0,467$) civarında iki yöntemin sonuçlarının oldukça uyumlu olduğu, farklı ilerleme oranlarında ise çekme katsayısının değişimlerinin birbiriyle

uyumlu olduğu görülebilir.

Çizelge 5.6: Pervane tasarım parametreleri ile tasarım koşullarında pervane performansı

	Başlangıçta belirlenen pervane tasarım parametreleri	Tasarım koşullarında hesaplanan pervane performansı
J_{Prop}	—	0,467
k_T	—	0,0105
T	200 N	192 N
k_M	—	0,001
M	—	35,7 Nm
η	0,97	0,7621

Pervane 1'in pervane tasarım noktasındaki analiz sonuçları ($J_{Prop}= 0,467$) Çizelge 5.7'de verilmiştir.

Çizelge 5.7: Pervane 1'in pervane tasarım noktasında analiz sonuçları ($J_{Prop}= 0,467$)

	BEM	VLM
k_T	0,0105	0,0101
k_M	0,0010	0,0008

Pervane 1'in farklı ilerleme oranlarındaki BEM analiz sonuçları Çizelge 5.8'de verilmiştir.

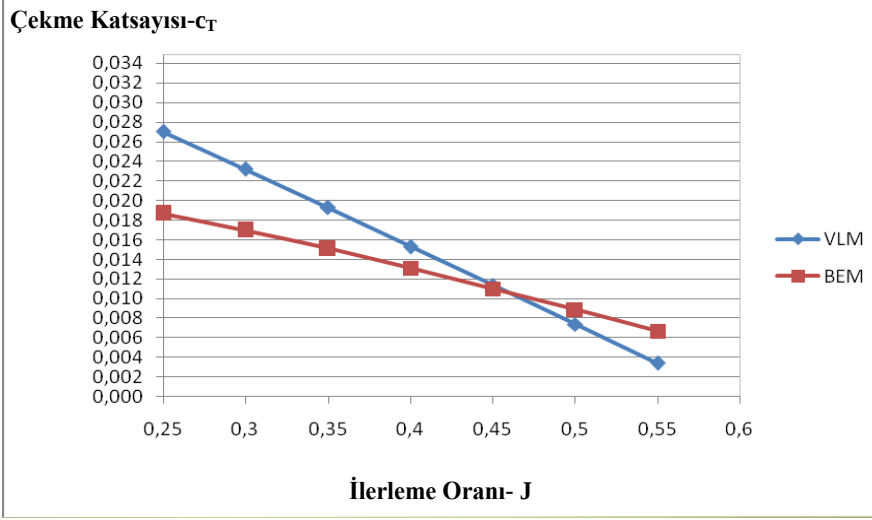
Çizelge 5.8: Pervane 1'in farklı ilerleme oranlarında analiz sonuçları (BEM)

BEM					
J	T(N)	M(Nm)	k_T	k_M	η
0,25	1204,37	159,92	0,0188	0,0013	0,57
0,30	757,69	109,08	0,0171	0,0013	0,63
0,35	495,04	77,14	0,0152	0,0012	0,68
0,40	329,47	55,46	0,0132	0,0012	0,72
0,45	219,71	39,86	0,0111	0,0011	0,75
0,50	144,05	28,29	0,0090	0,0009	0,77
0,55	90,27	19,46	0,0068	0,0008	0,77

Pervane 1'in farklı ilerleme oranlarındaki VLM analiz sonuçları Çizelge 5.9'de verilmiştir.

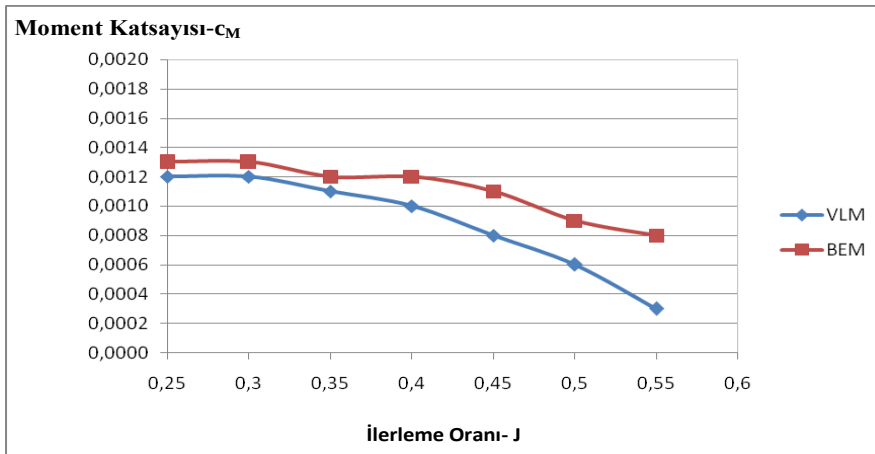
Çizelge 5.9: Pervane 1'in farklı ilerleme oranlarında analiz sonuçları (VLM)

VLM					
J	T(N)	M(Nm)	k_T	k_M	η
0,25	1805,57	154,07	0,0271	0,0012	0,89
0,30	1074,52	106,37	0,0233	0,0012	0,92
0,35	656,75	74,04	0,0194	0,0011	0,94
0,40	400,71	50,69	0,0154	0,0010	0,96
0,45	235,58	33,05	0,0115	0,0008	0,97
0,50	124,94	19,26	0,0075	0,0006	0,98
0,55	48,62	8,17	0,0035	0,0003	0,99



Şekil 5.3 : İtme katsayısı-ilerleme oranı grafiği.

Şekil 5.4'te farklı ilerleme oranları için Girdap Kafes Yöntemi ve Blade Element Yöntemi ile elde edilen moment katsayısı değerleri verilmiştir. Grafikten farklı ilerleme oranlarında iki yöntemin sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu görülebilir.



Şekil 5.4: Moment katsayısı - ilerleme oranı grafiği

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada pervanelerin aerodinamik performanslarının nümerik bir yöntem ile tahmini için pervane kesit profili verilerini kullanarak hesap yapabilecek girdap kafes yöntemi esaslı bir yöntem geliştirilmiştir.

Yöntem için FORTRAN dilinde bir bilgisayar programı hazırlanıp yöntemin güvenilirliğini ve doğruluğunu göstermek için birçok uygulama yapılmıştır.

Kanat üzerindeki doğrulama çalışmaları taşıyıcı çizgi yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Öncelikle düz levha şeklindeki kanat ve taşıma eğrisi eğimi düz levhadan daha küçük olan kamburluksuz hayali profile sahip kanat için analiz yapılmıştır.

İlk uygulamada Prandtl Taşıyıcı Çizgi Teorisi (PLL) ve Girdap Kafes Yöntemi (VLM) kullanılarak çeşitli hücum açılarındaki kamburluksuz profil elde edilen sonuçlara göre, elde edilen taşıma katsayısı değerleri birbirine çok yakındır. Bu eğriler analitik olarak hesaplanan düz levha ve hayali profil verileri ile karşılaştırılması sonucunda analitik çözüm ile aynı hücum açılarında daha yüksek taşıma katsayısı değerleri hesaplandığı görülmektedir. Çünkü üç boyutlu kanat iki boyutlu kanattan farklı olarak taşımanın yanında indüklenmiş sürüklenme bileşenini de içerir ve üç boyutlu kanatta iki boyutlu kanat ile aynı hücum açısında taşıma daha azdır. Diğer bir uygulama olarak, bir önceki bölümde kullanılan sayısal yöntemlerin kamburluğa ne tepki vereceğini göstermek için aynı hayali profile bir kamburluk verilmiştir. Taşıyıcı Çizgi Teorisi ile elde edilen taşıma katsayıları, profil kamburluğunu dikkate alacak biçimde bir değişime uğrayarak, Girdap Kafes Yöntemi ile elde edilen taşıma katsayılarından daha büyük değerler almaktadır.

Diğer bir uygulama olarak gerçek bir kanat profiline ait doğrusal olmayan bölgeyi de içeren veri kullanılmıştır. Kesit profili olarak NACA 4412 profili seçilmiştir. Doğrusal bölgede her iki yöntemle elde edilen sonuçlarda taşıma katsayıları literatürde yer alan taşıma katsayısı değerlerine benzer şekilde lineer bir artış göstermektedir. Her iki yöntemde (Taşıyıcı Çizgi Teorisi ve Girdap Kafes Yöntemi) de viskoz etkiler hesaba katılmadığı için, kanat profilinin doğrusal olmayan

bölgesinde taşıma eğrisi eğiminde azalma olmamıştır.

Pala test çalışmalarının en sonuncusunda deneysel çalışmalarla bir karşılaştırma yapılarak yöntemin genel başarısı hakkında bilgi edinilmesi amaçlanmıştır. Bu çerçevede dikdörtgensel üst görünümlü kanadın kesit profili olarak NACA 4415 profili seçilmiştir. Bu uygulamada dikdörtgensel üst görünümlü kanadın açıklık oranının 6, 9 ve 12 değerleri için hesaplamalar yapılmış olup, Ostowari ve Naik tarafından verilen üç-boyutlu deneysel sonuçlarla karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Açıklık oranı değeri küçük olduğunda ($AR=6$) (Şekil 4.7) Girdap Kafes Yöntemi sonuçları $0^\circ < \alpha < 10^\circ$ arasında deney sonuçlarına doğru yaklaşmaktadır. Fakat sonuçlar arasındaki uyum yeterli değildir. Bu durum uygulanan yöntemin kanat üzerinden geçen akımı yaklaşık iki boyutlu kabul etmesinden kaynaklanmaktadır. Bu açıklık oranı için üç boyutlu etkiler kuvvetli olup, kesit profili bilgisinin kullanılması hataya yol açmaktadır.

Açıklık oranının daha büyük olduğu ($AR=9$ ve $AR=12$) iki halde VLM sonuçları ile deney sonuçları arasında iyi bir uyum olduğu görülmektedir. Bu da Girdap Kafes Yöntemi'nin açıklık oranı yeterince büyük olmak kaydıyla güvenilir bir yöntem olduğunu göstermektedir.

Pervane için yazılan Girdap Kafes Yöntemi (VLM) programının sonuçlarının doğruluğunun kontrolü, pervanenin tasarım ve analizi için hazırlanmış ve klasik momentum ve pala elemanı teorilerine dayanan (MAYpropBEM) programı aracılığıyla yapılmıştır.

Pervane üzerinde VLM yönteminin uygulaması için Clark Y profili kullanılmıştır. Öncelikle BEM programı aracılığıyla pervanenin tasarımı yapılmıştır. Ardından farklı ilerleme oranı değerlerinde pervane performansı hesaplanmıştır.

Farklı ilerleme oranları için Girdap Kafes Yöntemi ve Pala Elemanı Yöntemi ile elde edilen çekme katsayısı değerlerinin karşılaştırılması sonucu, tasarım ilerleme oranı ($J_{prop}= 0,467$) civarında iki yöntemin sonuçlarının oldukça uyumlu olduğu, farklı ilerleme oranlarında ise çekme katsayısının değişimlerinin birbiriyle uyumlu olduğu görülebilir.

Farklı ilerleme oranları için Girdap Kafes Yöntemi ve Pala Elemanı Yöntemi ile elde edilen moment katsayısı değerlerinin farklı ilerleme oranlarında değişimlerinin birbiriyle uyumlu olduğu görülebilir.

Yapılan çalışmaya ek olarak literatürden daha fazla pervane geometrisi ve deney verisi bulunarak çalışma genişletilebilir.

KAYNAKLAR

- Abbaszadeh, M., Shahrooz, M., Shadi, A. ve Ejlali, H.** (2012). Mitigation of Destructive Effects of Tip Vortex in Ducted Axial Non-Twisted Fans by Utilization of Different Arrangement of Fanlets. *International Journal of Science and Engineering Investigations*. Cilt 1, sayı. 1, Sf. 100-105.
- Anderson, J. D.** (2001). *Fundamentals of Aerodynamics*. Third Edition. McGraw-Hill, Singapore.
- Beşerik, G.** (2009). *Yatay Eksenli Rüzgar Türbinlerinin Aerodinamik Dizaynı*, (yüksek lisans tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Falahat, A.** (2011). Numerical and Experimental Optimization of Flow Coefficient in Tubeaxial Fan. *International Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering*. Cilt 2, sayı. 5, Sf. 75-85.
- Hanson, M.O.L.** (2008). *Aerodynamics of Wind Turbines*. Second Edition. Earthscan, London.
- Hardin, R.A. ve Burmeister, L.C.** (1999). Survey, Prediction by a Vortex-Lattice Method, and Measurement for Axial-Flow Ventilation Fans with Sheet-Metal Blades. *Scientia Iranica*. Cilt 2, sayı 5, Sf. 24-29.
- Katz, J. ve Plotkin A.** (1991). *Low-Speed Aerodynamics: From Wing Theory to Panel Methods*. McGraw-Hill, Singapore.
- Kim, Y., Lee, T., Hur, J., Moon, S. ve Lee, J.** (2010). Flow Characteristics Impeller Change of an Axial Turbo Fan. *International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering*. Cilt 4, sayı 1, Sf. 12-15.
- Öner, L.** (2010). *Pervane Analizi*. (yüksek lisans tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Patel J.S. ve Patel, S.M.** (2012). Parameter Affecting the Performance of Axial Fan Performance. *International Journal of Engineering Research & Technology*. Cilt 1, sayı 3, Sf. 1-3.
- Şahin, L.** (2013). *Pervane İçin Girdap Kafes Uygulamaları*, (yüksek lisans tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Wald, Q.R.** (2006). The aerodynamics of propellers, *Progress in Aerospace Sciences*. sayı 42, Sf. 85-128.
- Yükselen, M.A.** (2014). Kişisel görüşme.
- Yükselen, M.A.** (2014). Pervane Teorisi, Aerodinamik Ders Notları, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul. **Yükselen, M.A.** (2014). Sonlu Kanatlar için Lanchester-Prandtl Taşıyıcı Çizgi Teorisi, Aerodinamik Ders Notları, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

- Yükselen, M.A.** (2014). *Üç Boyutlu Panel Yöntemleri*, Aerodinamik Ders Notları, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Axial flow fan.** (t.y.). *The Free Dictionary*. Alındığı tarih: 06.06.2014, adres: <http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/axial-flow+fan>
- Benson, G., Breining, F., Gustafson, B., Gustafson, T., Saxon, P.** ve diğ. (1989). *Improving Fan System Performance, a sourcebook for industry*. Manitoba: Northern Blower Inc . Alındığı tarih: 05.07.2014, adres: http://www1.eere.energy.gov/manufacturing/tech_assistance/pdfs/fans_sourcebook.pdf
- Burger, C.** (2007). *Propeller Performance Analysis and Multidisciplinary Optimization Using a Genetic Algorithm* (doktora tezi). Adres: http://etd.auburn.edu/bitstream/handle/10415/210/Burger_Christoph_57.pdf?sequence=1
- Havaladırma ekipmanları.** (t.y.). *Ulpatek*. Alındığı tarih: 06.06.2014, adres: <http://www.ulpatek.com/details.aspx?pId=1113&productName=havaladirmak-ekipmanlari>
- Ingram, G.** (2009). *Basic concepts in turbomachinery*. Colorado: Grant Ingram and Ventus Publishing. Alındığı tarih: 05.07.2014, adres: http://www.leka.lt/sites/default/files/dokumentai/key-concepts-in-turbo-machinery_1.pdf
- Lindsey, W.F., Stevenson, D. B., Daley B. N.** (1948). *Aerodynamic Characteristics of 24 NACA 16-Series Airfoils At Mach Numbers Between 0.3 and 0.8. Technical Note No. 1546*. Washington: Naca Library. Alındığı tarih: 19.06.2014, adres: <http://naca.central.cranfield.ac.uk/reports/1948/naca-tn-1546.pdf>
- Mechanical fan.** (t.y.). *Wikipedia*. Alındığı tarih: 05.06.2014, adres: http://en.wikipedia.org/wiki/Mechanical_fan
- Pervane.** (t.y.). *Wikipedia*. Alındığı tarih: 05.06.2010, adres: http://en.wikipedia.org/wiki/Mechanical_fan
- Visualization Wind Tunnel.** (t.y.). *Smart Blade GmbH*. Alındığı tarih: 06.06.2014, adres: <http://smart-blade.com/products-services/visualization-wind-tunnel.html>
- Stack, J.** (1939). *Test of Airfoils Designed to Delay The Compressibility Burble. Report No. 763*. Virginia: Naca. Alındığı tarih: 19.06.2014, adres: [Accessed 19 June 2014]. Available from: <http://www.pdas.com/refs/rep763.pdf>
- Turbomachinery.** (t.y.). *Wikipedia*. Alındığı tarih: 05.06.2014, adres: <http://en.wikipedia.org/wiki/Turbomachinery>
- Uçak motoru nedir nasıl çalışır.** (t.y.). *Bilgiustam*. Alındığı tarih: 06.06.2014, adres: <http://www.bilgiustam.com/ucak-motoru-nedir-nasil-calisir>
- Veldhuis L.L.M.** (2005). *Propeller Wing Aerodynamic Interference*. Delft University of Technology. (doktora tezi), adres: http://www.lr.tudelft.nl/fileadmin/Faculteit/LR/Organisatie/Afdelingen_en_Leerstoelen/Afdeling_AEWE/Aerodynamics/Contributor_Area/Secretary/Publications/publications/doc/2005_4_02.pdf

Vortex lattice method. (t.y.). *Wikipedia*. Alındığı tarih: 09.06.2014, adres: http://en.wikipedia.org/wiki/Vortex_lattice_method

Weir, R.J. (1987). *Ducted Propeller Design and Analysis*. Virginia: Sandia. Alındığı tarih: 19.06.2014, adres: <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/1987/872118.pdf>

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad : Nihan ELMAS BAŞGÜNEY

Doğum Yeri ve Tarihi : 15.01.1981, İstanbul

E-Posta : elmasni@itu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2006, İTÜ, Uçak ve Uzay Bilimleri, Uzay Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

İTÜ, Araştırma Görevlisi.

Ventek Mühendislik Ltd. Şti., Satış Mühendisi.

Aironn Havalandırma ve Klima Sistemleri San. ve Dış Tic. Ltd., Proje ve Ar-ge Mühendisi

