T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DÜŞÜK HIZLI UÇAKLARDA AERODİNAMİK PERVANE TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

Tezi Hazırlayan
Haluk DEMİRTAŞ

Tezi Yöneten
Prof. Dr. M. Kemal APALAK

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Temmuz 2006
KAYSERİ

Prof. Dr. M. Kemal APALAK danışmanlığında **Haluk DEMİRTAŞ** tarafından hazırlanan **"Düşük Hızlı Uçaklarda Aerodinamik Pervane Tasarımı ve Optimizasyonu"** adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

28.07.2006

JÜRİ:

Başkan: Prof. Dr. Hüseyin YAPICI

Üye :Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ

Üye : Prof. Dr. M. Kemal APALAK

ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulunun 05/09/2006 tarih ve 2006/25-08 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

05/09/2006

N. Ayyıldız

Prof. Dr. Nusret AYYILDIZ

Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının her aşamasında yardımları, öneri ve görüşlerini ile destek sağlayan başta değerli hocam Prof. Dr. M. Kemal APALAK'a akım modellemesi ve diğer konularda desteğini esirgemeyen Sayın Müdürümüz Prof.Dr. Hüseyin YAPICI'ya tezin değişik aşamalarında yardımlarını esirgemeyen Ögr.Gör. Mustafa SOYLAK, Dr Mehmet ERLER, Ögr. Gör. İlker YILMAZ, Uzman Veysel ERTURUN ve Arş. Gör. Ziya DOĞAN'a teşekür ederim.

Ayrıca, şimdi aramızda olmayan okulumuzun bu günlere gelmesinde ve bizlerin yetişmesinde büyük emekleri olan ve kendisini şükranla andığımız değerli hocam Prof. Dr. Veysel ATLI'ya teşekkür ederim.

Haluk DEMİRTAŞ

DÜŞÜK HIZLI UÇAKLARDA AERODİNAMİK PERVANE TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

Haluk DEMİRTAŞ
Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Temmuz 2006
Tez Danışmanı: Prof. Dr. M. Kemal APALAK

ÖZET

Hava araçlarında için pervaneler, geçmişte olduğu gibi, günümüzde de hala önemlidir. Pervanelerin aerodinamik, yapısal ve performans konularındaki çalışmalar devam etmektedir.

Bu çalışmada, pervane palasının aerodinamik tasarımı yapılmıştır. Pervane palalarının tasarımı öncelikle palalara etkiyen aerodinamik kuvvetlerin bilinmesini gerektirir. Pervane palaları akışkanlar dinamiği yönünden ve pala elemanın aerodinamiği ile ilgili temel teorilerle tasarlanmıştır.

Pervane palalarının tasarımıda, pervane palalarının tasarımında en sık rastlanan yöntem olan pala elemanı teorisi kullanılmıştır.

İlk olarak pervane palasının tasarımı için metot geliştirilmiştir. Daha sonra pala geometrisi pala performansına dayandırılarak düzeltilmiştir. Geometrisi düzeltilen palanın performansı incelenmiştir. Çekme kuvveti ve şaft momentinde artış, verimde ise azalmanın olduğu görülmüştür.

JavaFoil programı kullanılarak elde edilen profil kodları, SolidWorks 2004 kullanılarak pala geometrisi çizilmiştir. Pala profillerinin aerodinamik karakteristiklerinde FLUENT 6.0 kullanılmıştır.

Anahtar kelimeler. Pervane Tasarımı, Aerodinamik, Pala Profili

AERODYNAMICS DESIGN AND OPTIMIZATION OF A PROPELLER FOR A LOW SPEED AIRCRAFT

Haluk DEMİRTAŞ
Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
M. Sc. thesis, July 2006
Thesis Supervisor: Prof. Dr. M. Kemal APALAK

ABSTRACT

Propellers are stil important for aircraft as in the past. The studies on the aerodynamics, structure and performance of the propellers have continued.

In this study, the aerodynamics design of a propeller blade was made. First the design of propeller blade requires to know how aerodynamic forces affect the blades. The propeller blades were designed by with considering fluid dynamics and the fundamental theories related with the aerodynamic of propeller component.

İn the design of propeller blades the propeller component theory was mostly used as a design method of propeller.

Firstly, a method for the design of a propeller blade was developed, and then the blade geometry was corrected based on the blade performance. The performance of the corrected geometry of blade was also investigated. It was found that draw force and shaft moment increase, where as the efficiency decreases.

The profile sections were drawn using JavaFoil programme, the blade geometry was a using SolidWork 2004. Fluent 6.0 was used the aerodynamic characteristic of the blade profiles.

Key Words: Propeller design, aerodynamic, airfoil.

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	i
TEŞEKKÜR	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER	vi
KISALTMALAR VE SİMGELER	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	xii
1. BÖLÜM	1
1.1. Giriş	1
1.2. Tezin Bölümleri	6
2. BÖLÜM	8
PERVANE TEORİSİ	8
2.1. Giriş	8
2.2. Profil Geometrisi	8
2.3. Taşıma ve Sürükleme Katsayılarının Elde Edilmesi	12
2.4. Pervane ve Pervane Geometrisi	14
2.5. Pervane Etrafındaki Akım Alanı	16
2.6. Pervane Hatvesi	19
2.6.1. Geometrik Hatve	20
2.6.2. Deneysel Ortalama Hatve	21
2.6.3. Geometrik Hatvenin Pervane Performansı Üzerine Etkisi	22

2.7. Pervane Katsayıları	24
2.7.1. Çekme Katsayısının Boyut Analizi ile Bulunması	24
2.7.2. Moment Katsayısı	27
2.8. Pervane Verimi Güç Katsayısı ve Tesirlilik Faktörü	27
2.8.1. Pervane Verimi	27
2.8.2. Güç Katsayısı	28
2.8.3. Tesirlilik Faktörü.....	29
3. BÖLÜM	31
3.1. Froude Momentum Teorisi	31
3.2. İdeal Diskin Çekme Kuveti, Pervaneyi Geçen Akım Hızı, İzdeki Hız	31
3.3. Diskin İdea Verimi	33
4. BÖLÜM	36
PALA ELEMANI TEORİSİ.....	36
4.1. Giriş.....	36
4.2. Pala Elemanının Performansı.....	36
4.3. Boyutsuz Paremetreler	42
5. BÖLÜM	42
PERVANE TASARIMI.....	44
5.1. Giriş.....	44
5.2. Problem Tanımı.....	45
5.3. Akım Ortamının Modellenmesi	47
5.3.1. Akım Ortamının Geometrik Modellenmesi	47

5.3.2. Matematik Model	47
5.4. Pervane Verilerinin Elde Edilmesi	51
5.4.1. Pervane Uç Hızının Belirlenmesi	51
5.4.2. Pervaneye Ait Temel Performans Değerlerinin Elde Edilmesi	52
5.5. Pala Geometrisinin Elde Edilmesi	55
5.6. Pervane Performans Değerlerinin Elde Edilmesi	66
5.7. Pervane Analizi	69
6. BÖLÜM	97
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	97
6.1. Sonuçlar	97
6.2. Öneriler	99
KAYNAKLAR	100
ÖZGEÇMİŞ	104

KISALTMALAR VE SİMGELER

SEMBO		TANIM
T		: Pervane çekme kuvveti
Q		: Pervane şaft momenti
V_∞		: Serbest akım hızı
V_S		: Pervane İzindeki akım hızı
V_o		: Pervane düzlemini geçen akımın hızı
V_R		: Pala elemanına etkiyen bileşke hız
V_{max}		: Pervane ucuna etkiyen maksimum bileşke hız
Ω		: Pervanenin açısal hızı
E		: Profile ait fines
S		: Pervane palasının süpürdüğü alan
R		: Pervane yarıçapı
D		: Pervane çapı
r		: Lokal yarıçap
n_B		: Pervane pala sayısı
η_i		: Pervane verimi
L		: Taşıma kuvveti
C_L		: Profile ait taşıma katsayısı

D		: Sürükleme Kuvveti
C_D		: Profile ait sürükleme katsayısı
α		: Hucum açısı
Φ		: Profilin kesit konum açısı
Θ		: Burulma açısı
γ		: Taşıma kuvveti ile bileşke kuvvet arasındaki açı
Re		: Reynold sayısı
M		: Mach sayısı
c		: Profile ait veter uzunluğu
J		: Pervane ilerleme oranı
t_f		: Tesirlilik faktörü
σ		: Pervane katılığı-sıklığı
P		: Pervaneden elde edilen güç
P_f		: Faydalı güç
$\dot{m}$		: Kütlesel debi
ds		: Profile ait yay elemanı
F_a		: Yay elemanına etkiyen bileşke kuvvet
F_x		: Yay elemanına etkiyen kuvvetin x bileşeni
F_y		: Yay elemanına etkiyen kuvvetin y bileşeni
β		: Lokal ilerleme oranı

a		: Pervane düzlemindeki yönde hızlanma paremetresi
b		: Pervane düzlemindeki radyal yönde hızlanma paremetresi paremetresiı
k_T		: Çekme katsayısı
k_Q		: Moment katsayısı
k_P		: Güç katsayısı
ρ		: Akışkan yoğunluğu
G_v		: Türbülans viskozite üretimi
Y_v		: Duvarlarda türbülans viskozite etkisinin giderilmesi
υ		: Kinematik Viskozite
$\bar{\nu}$		: Türbülans kinematik viskozite
μ		: Dinamik viskozite
μ_t		: Türbülans viskozitesi
σ		: Çekme gerilmesi
f_{v1}		: Viskoz sönümleme fonksiyonu
f_{v2}		: Viskoz sönümleme fonksiyonu
S		: Gerilme tensörünün ortalama değer katsayısı
$\bar{S}$		: Deformasyon tensörü
Ω		: Dönme tensörü

ŞEKİLLER TABLOSU

Şekil 1.1. Leonardo da Vinci nin Tasarladığı Helikopter Rotoru	2
Şekil 1.2. David Bushnell'ın Tasarladığı Denizaltı	2
Şekil 1.3. A.J.P. Paucton'ın Tasarladığı Yatay Eksenli Rotor	3
Şekil 1.4. Sir George Cayley'in Tasarladığı 4 Rotorlu ve 2 Pervaneli Convertiplan	4
Şekil 1.5. Rolls-Royce Trafından Geliştirilen Turboprop Motor	5
Şekil 1.6. NASA'nın Geliştirdiği Yüksek Hızlı Pervane	5
Şekil 1.7. Özel Amaçlar İçin Geliştirilmiş Pervane	6
Şekil 2.1. Kanat Üzerinde Profilin Gösterilmesi.....	9
Şekil 2.2. Profil ve Profili Tanımlayan Terimler	9
Şekil 2.3. a Simetrik Profilin C_l–α Değişimi.....	10
Şekil 2.3. b Pozitif Kanburluklu Profilin Cl–α Değişimi	10
Şekil 2.3. c Negatif Kanburluklu Profilin Cl–α Değişimi	10
Şekil 2.4. Sabit hızda, C_l ile α Değişimi.	11
Şekil 2.5. Sürükleme Katsayısının Mach Sayısı ile Değişimi	12
Şekil 2.6. Profil Üzerinde Alınmış ds Yay Elemanı	12
Şekil 2.7. Profil Etrafında Oluşan Kuvvetlerin Gösterilmesi.....	13
Şekil 2.8. Uçaklarda Kullanılan Güç Sistemleri	15
Şekil 2.9. Pervane Geometrisi ve Kesit Profili	16
Şekil 2.10. Pala Boyunca Yük Dağılımı	16
Şekil 2.11. Pervane Etrafındaki Girdap Sistemi.....	17

Şekil 2.12. Girdap Çizgileri ve Bileşenleri	18
Şekil 2.13. Akımın Pervane Ekseni Doğrultusunda İndüklenmesi	19
Şekil 2.14. Pervane Palası Boyunca Oturma Açıları İle İlerleme Hızı Arasıdaki İlişki.	20
Şekil 2.15. Geometrik Hatve ile Pala Hız Dağılımının Gösterilmesi	20
Şekil 2.16. Geometrik Hatvenin Pervane Üzerindeki Etkisi.....	22
Şekil 2.17. Büyük ve Küçük Hatve Durumu İçin İlerleme ile Verim İlişkisi	24
Şekil 2.18. Pala Elemanı Kesit Profiline Kuvvetler.....	29
Şekil 3.1. İdeal Dikte Basınç ve Hız Dağılımı.....	32
Şekil 4.1. Pervane Ekseninden r Uzaklıktaki Kesit Elemanı	36
Şekil 4.2. Pala Elemanına Etkiyen Kuvvetler	37
Şekil 5.1. Pala Elemanında Kullanılan Profile Etki Eden Kuvvetler.....	46
Şekil 5.2. Pala Elamanının Boyunca Profillerin Kökten Uca Doğru Dağılımı.....	46
Şekil 5.3. Akım Alanının Veter Uzunluğuna Bağlı Boyutlandırılması	47
Şekil 5.4. Akım Alanının Grid Yapısı.....	48
Şekil 5.5. Pala Elemanı Uç Profili Etrafındaki Hız Dağılımı.	52
Şekil 5.6. Pala Elemanı Uç Profili Etrafındaki Basınç Katsayısı Dağılımı.	52
Şekil 5.7. Taşıma Katsayısının Pala Boyunca Değişimi.....	58
Şekil 5.8. Sürükleme Katsayısının Pala Boyunca Değişimi...	58
Şekil 5.9. Eksenel Yönde Hiz İndükleme Parametresinin Pala Boyunca Değişimi.....	62
Şekil 5.10. Radyal Yönde Hiz İndükleme Parametresinin Pala Boyunca Değişimi.....	62
Şekil 5.11. Kesit Konum Açısının Pala Boyunca Değişimi.....	63

Şekil 5.12. Lokal Katılığın Pala Boyunca Değişimi..	63
Şekil 5.13. Veterin Uzunluğunun Pala Boyunca Değişimi.	64
Şekil 5.14. Bileşke Akım Hızının Pala Boyunca Değişimi.....	65
Şekil 5 15. Elde Edilen Verilerle Oluşturulan Pala Elemanı.	65
Şekil 5.17. Taşıma Kuvvetinin Pala Boyunca Dağılımı.	67
Şekil 5.18. Sürükleme Kuvvetinin Pala Boyunca Dağılımı.	68
Şekil 5.19. Çekme Kuvvetinin Pala Boyunca Dağılımı.	68
Şekil 5.20. Şaft Momentinin Pala Boyunca Dağılımı.	69
Şekil 5.21. Optimizasyon Sonrası Eksenel Yöndeki Hız İndükleme Parametresinin Pala Boyunca Değişimi.	71
Şekil 5.22. Optimizasyon Sonrası Radyal Yöndeki Hız İndükleme Parametresinin Pala Boyunca Değişimi..	71
Şekil 5.23. Optimizasyon Sonrası Profil Kesit Konum Açısının Pala Boyunca Değişimi..	72
Şekil 5.24. Optimizasyon Sonrası Lokal Katılığın Pala Boyunca Değişimi.....	72
Şekil 5.25. Optimizasyon Sonrası Veter Uzunluğunun Pala Boyunca Değişimi.....	73
Şekil 5.26. Optimizasyon Sonucu Elde Edilen Pervane Palası.	73
Şekil 5.27. Optimizasyon Sonrası Bileşke Hızın Pala Boyunca Değişimi..	74
Şekil 5.28. Optimizasyon Sonrası Taşıma Kuvvetinin Pala Boyunca Değişimi.	74
Şekil 5.29. Optimizasyon Sonrası Sürükleme Kuvvetinin Pala Boyunca Değişimi.	76
Şekil 5.30. Optimizasyon Sonrası Çekme Kuvvetinin Pala Boyunca Değişimi.	77
Şekil 5.31. Optimizasyon Sonrası Şaft Momentinin Pala Boyunca Değişimi.	77
Şekil 5.32. Optimizasyon Öncesi ve Optimizasyon Sonrası Eksenel Yöndeki Hız İndükleme Parametresinin Pala Boyunca Değişimi.	79

Şekil 5.33. Optimizasyon Öncesi ve Optimizasyon Sonrası Radyal Yöndeki Hız İndükleme Parametresinin Pala Boyunca Değişimi.	79
Şekil 5.34. Optimizasyon Öncesi ve Optimizasyon Sonrası Profil Kesit Konum Açısının Pala Boyunca Değişimi..	80
Şekil 5.35. Optimizasyon Öncesi ve Optimizasyon Sonrası Lokal Katılığın Pala Boyunca Değişimi.	80
Şekil 5.36. Optimizasyon Öncesi ve Optimizasyon Sonrası Veter uzunluğunun Pala Boyunca Değişimi.	81
Şekil 5.37. Optimizasyon Öncesi ve Optimizasyon Sonrası Bileşke Akım Hızının Pala Boyunca Değişimi.	81
Şekil 5.38. Optimizasyon Öncesi ve Optimizasyon Sonrası Taşıma Kuvvetinin Pala Boyunca Değişimi.	82
Şekil 5.39. Optimizasyon Öncesi ve Optimizasyon Sonrası Sürükleme Kuvvetinin Pala Boyunca Değişimi.	82
Şekil 5.40. Optimizasyon Öncesi ve Optimizasyon Sonrası Çekme Kuvvetinin Pala Boyunca Değişimi.	83
Şekil 5.41. Optimizasyon Öncesi ve Optimizasyon Sonrası Şaft Momentinin Pala Boyunca Değişimi.	83
Şekil 5.42. Optimizasyon Öncesi Profillerin Kökten Uca Doğru Pala Boyunca Dağılımı.	84
Şekil 5.43. Optimizasyon Sonrası Profillerin Kökten Uca Doğru Pala Boyunca Dağılımı.	84
Şekil 5.44. Bir Numaralı İstasyonda Profil Etrafındaki $-C_P$ Dağılımı.	86
Şekil 5.45. Bir Numaralı İstasyonda Profil Etrafındaki $-C_P$ Dağılımı.	86
Şekil 5.46. İki Numaralı İstasyonda Profil Etrafındaki Hız Dağılımı.	87
Şekil 5.47. İki Numaralı İstasyonda Profil Etrafındaki $-C_P$ Dağılımı.	87
Şekil 5.48. Üç Numaralı İstasyonda Profil Etrafındaki Hız Dağılımı.	88
Şekil 5.49. Üç Numaralı İstasyonda Profil Etrafındaki $-C_P$ Dağılımı.	88
Şekil 5.50. Dört Numaralı İstasyonda Profil Etrafındaki Hız Dağılımı.	89

Şekil 5.51. Dört Numaralı İstasyonda Profil Etrafındaki $-C_P$ Dağılımı.	89
Şekil 5.52. Beş Numaralı İstasyonda Profil Etrafındaki Hız Dağılımı.	90
Şekil 5.53. Beş Numaralı İstasyonda Profil Etrafındaki $-C_P$ Dağılımı.	90
Şekil 5.54. Altı Numaralı İstasyonda Profil Etrafındaki Hız Dağılımı.	91
Şekil 5.55. Altı Numaralı İstasyonda Profil Etrafındaki $-C_P$ Dağılımı.	91
Şekil 5.56. Yedi Numaralı İstasyonda Profil Etrafındaki Hız Dağılımı.	92
Şekil 5.57. Yedi Numaralı İstasyonda Profil Etrafındaki $-C_P$ Dağılımı.	92
Şekil 5.58. Sekiz Numaralı İstasyonda Profil Etrafındaki Hız Dağılımı.	93
Şekil 5.59. Sekiz Numaralı İstasyonda Profil Etrafındaki $-C_P$ Dağılımı.	93
Şekil 5.60. Dokuz Numaralı İstasyonda Profil Etrafındaki Hız Dağılımı.....	94
Şekil 5.61. Dokuz Numaralı İstasyonda Profil Etrafındaki $-C_P$ Dağılımı.	94
Şekil 5.62. On Numaralı İstasyonda Profil Etrafındaki Hız Dağılımı.	95
Şekil 5.63. On Numaralı İstasyonda Profil Etrafındaki $-C_P$ Dağılımı.	95
Şekil 5.64. 1 ve 10 Numaralı İstasyonlarda Profilin Üst ve Alt Yüzeylerindeki Basınç Katsayısı Dağılımı.....	96
Şekil 5.65. 1, 5 ve 10 Numaralı İstasyonlarda Profilin Üst ve Alt Yüzeylerindeki Basınç Katsayısı Dağılımı.....	96

1. BÖLÜM

1.1. Giriş

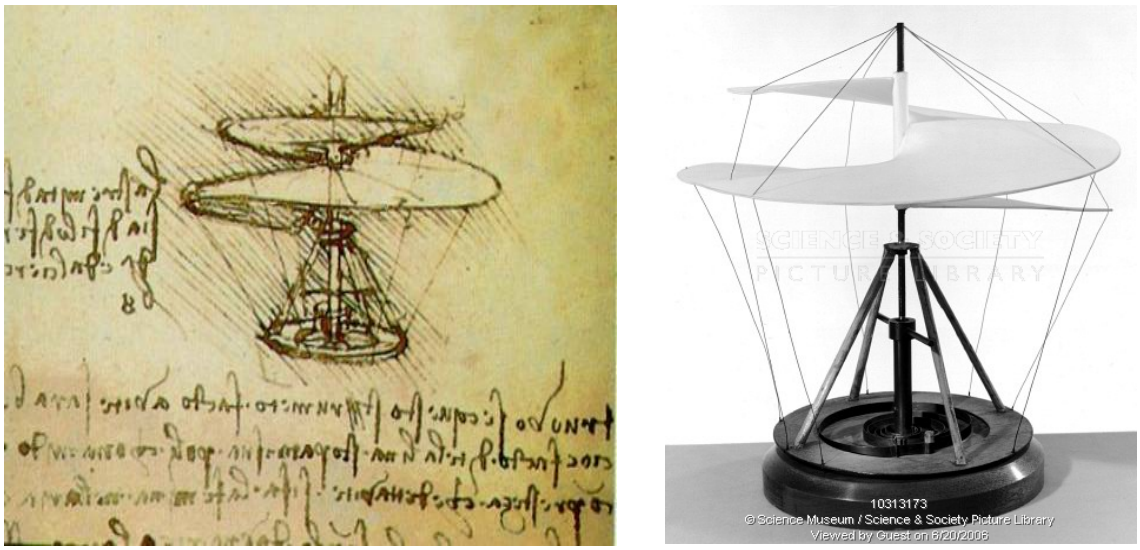
Havacılığın gelişmesi, başlangıçta hava araçlarının tasarımı kadar pervanelerdeki gelişmelere de bağlı olmuştur. Pervaneler ilk olarak kişisel gayretlerle geliştirilmeye çalışılmıştır. Havacılıkta dönüm noktası olarak kabul edilen Wright kardeşlerin ilk uçuşundan sonra pervanelerin gelişmesi için yoğun bir çalışma sergilenmiştir. Günümüzde birbirinden farklı kullanım alanları ve bu alanlara bağlı olarak farklı koşullar için tasarlanmış pervaneler ve bu pervanelerde kullanılan profiller geliştirilmiştir. Bu konuyla ilgili literatürde çok sayıda çalışma mevcuttur [1-6].

Hava araçlarında kullanılan pervaneler, kullanıcı için basit bir mekanizma gibi görünsede, tasarımcılar açısından aerodinamik, performans ve yapısal olarak bir bütünlük içeren kompleks bir yapı ifade etmektedir. Bu sebeple kullanımı çok eski olmasına rağmen pervanelerin gelişimi ilk zamanlarda kullanımıyla kıyaslandığında yavaş gerçekleştiği söylenebilir. Fakat günümüzde gelişen yeni teknolojik gelişmelere paralel olarak pervaneler için yeni kullanım sahalarının ortaya çıkmasıyla birlikte hızlı gelişmenin olduğu görülmektedir. Pervanelerin tarihsel gelişimine kısa bir göz attığımızda, her yeni buluş ve teknolojik ilerlemeye paralel olarak pervanelerin gelişimindeki süreklik daha iyi anlaşılır.

Leonardo da Vincinin, pervanelerden esinlenerek tasarladığı araç, pervane ve helikopter rotorlarının atası olduğu kabul edimektedir. Şekil 1a'da Leonardo da Vinci'nin çizimi [7], şekil 1b'de ise Leonardo da Vinci'nin çiziminden esinlenerek yapılmış araç görülmektedir [8].

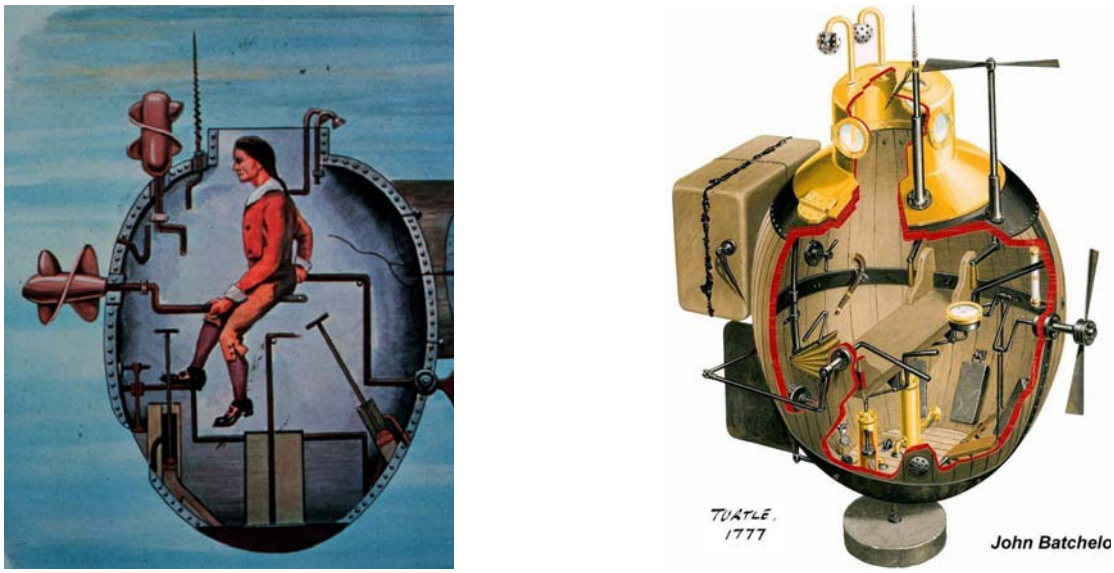
1680 yılında Robert Hooke, yel değirmeni kanadı yardımıyla suyu bir noktadan başka bir noktaya hareket ettirebileceğini fark etti. Bernoulli 1752'de gemilerin hareketinde rüzgara bağımlılığı azaltmak ve pervane yardımı ile gemileri hareket ettirmek için,

pervane kanatlarını, omurga ve güç iletim elamanı arası yerleşimini, 60'ar derece olacak şekilde ayarlayarak gemileri hareket ettirmeye çalışmıştır. Şekil 1.2 de görüldüğü gibi David Bushnell 1776'de suyun altıda gidebilmek için yapmış olduğu denizatlıda tek palden oluşan pervane kullanmıştır [9-10].



a b

Şekil 1.1. Leonarda da Vincinin Tasarladığı Helikopter Rotoru [7,8].

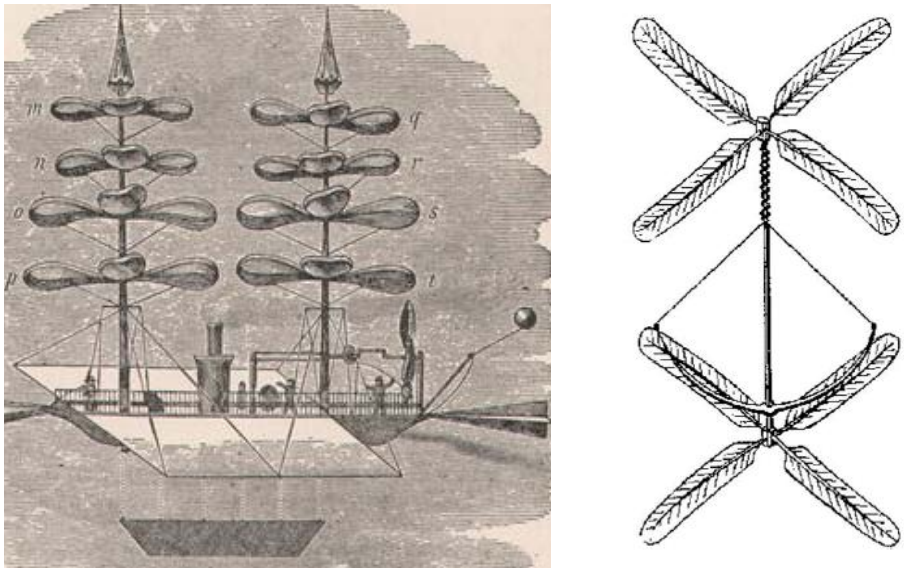


(a) (b)

Şekil 1.2. a-b David Bushnell'ın Tasarladığı Denizaltı [9,10].

Bernoulli ve David Bushnell yaptığı çalışmalardan sonra, itki için pervaneleri kullanma düşüncesi 18. yüzyılda yaygın ve kabul gören bir düşünce olmuştur.

Nitekim A.J.P. Paucton, 1786 yılında yayınladığı teori ile, itki için yatay eksenli bir rotorun kullanılabileceğini önermiştir [11]. Şekil 1.3 de görüldüğü gibi A.J.P. Paucton nun tasarladığı yatay eksenli rotor görülmektedir.



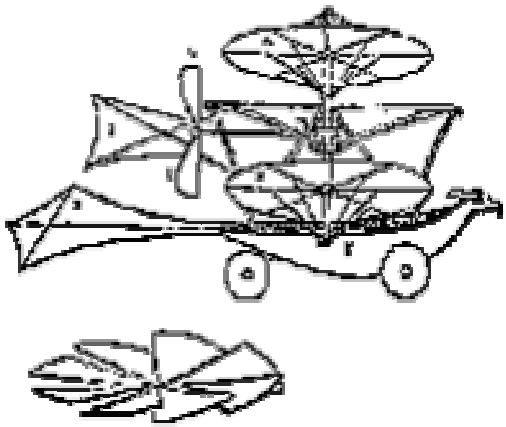
Şekil 1.3. A.J.P. Paucton'ın Tasarladığı Yatay Eksenli Rotor [11].

19. yüzyılın başında yapılan deneylerde, daha fazla itki elde etmek için, pervane çapının büyütülmesi ve bu çaptaki pervaneyi döndürmek için gücü artırmak yerine, pervane pala geometrisinin değiştirilmesi ile daha çok itki gücü elde edilmiştir. Yapılan bu deneysel çalışmalar pervane palalarının gelişiminde büyük aşama olarak kabul edilmektedir. Bu aşamadan sonra pervanelerde kullanılan profillerde hızlı bir gelişme sağlanmıştır.

İngiliz teorisyen Sir George Cayley, aerodinamiğin temelini oluşturan kuralları yayınlamıştır. Cayley'in yaptığı çalışma ile 4 rotorlu ve 2 pervaneli "convertiplan" tasarlamıştır [12]. Cayley'in aerodinamik kuralları, hava araçlarının geliştirilmesi için çalışan araştırmacılara ve mühendislere esin kaynağı olmuştur.

1878 William Froude pala elemanı teorisini (blade element theory) geliştirmesinden sonra, pala elamanları ile ilgili deneyler hız kazanmıştır. Pala elemanı teorisinden yararlanılarak yapılan bu deneysel çalışmaların sonucunda, Wright kardeşler, 1903

yılında kendi geliştirdikleri hava araçlarında kullanılmak üzere kendi pervanelerini geliştirdiler [13]. Wright kardeşlerin geliştirdiği pervane, o tarihe kadar yapılmış olan pervanelerden %60 daha fazla verim elde edilmiştir. Bu pervaneyi kullanarak, havacılıkta dönüm noktası olarak kabul edilen uçakla ilk uçuşu gerçekleştirmişlerdir.



Şekil 1.4. Sir George Cayley'in Tasarladığı 4Rotorlu ve 2 Pervaneli Converti Planı [12].

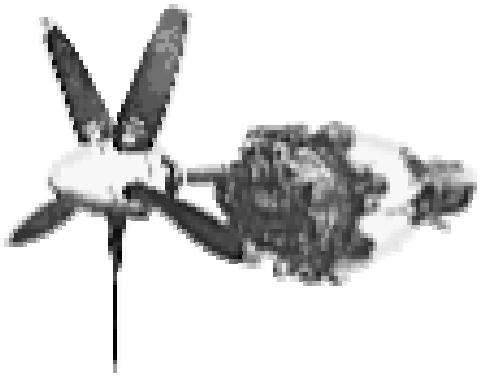
Ludwig Prandtl ve Albert Betz 1919 yılında verimi artırmak için minimum kayıplara sahip pervane tasarımı çalışmaları yapmışlardır. Başlangıçta kişisel gayretler ve sınırlı desteklerle yapılan araştırma ve geliştirmeler, savaşların etkisi ve kullanım alanlarının çeşitlenmesiyle birlikte pervane tasarımı çalışmaları çok yönlü olarak devam etmiştir.

Uçakların uçuşlarındaki ilerleme düzensizliğin ortadan kaldırılması için 1919 yılında sabit hatveli pervaneler geliştirilerek kullanılmaya başlanmıştır. Uçakların hem boyut hem de hız olarak büyümesiyle birlikte, farklı uçuş şartları için verimli olabilecek, kısa pistlere kalkış ve inişi gerçekleştirebilmeleri olanağı sağlayan değişken hatveli pervaneler üzerinde yapılan çalışmalar 1932 yılında tamamlanarak kullanıma başlanmıştır.

Pervane palası boyunca değişken hızlardan kaynaklanan titreşim ve aerodinamik yüklerin düzensizliği sonucu oluşan yapısal problemleri en aza indirgeyen sabit hızlı pervaneler Dr. H. S. Hele-Shaw ve T. E. Beacham tarafından geliştirilerek 1935 yılında uçaklarda kullanılmaya başlanmıştır.

Yüksek hız aerodinamiğindeki ilerlemelere paralel olarak, yüksek hızda verimli olan profillerin geliştirilmesiyle, jet motorlarının türbin pallerinde yüksek hız profilleri ilk

olarak 1945 de Rolls-Royce firması tarafından turboprop motorlarda test edilip kullanılmaya başlanılmıştır (Şekil 1.5) [14].



Şekil 1.5. Rolls-Royce Trafından Geliştirilen Turboprop Motor [14].

Ses hızının üzerinde hareket etme düşüncesi, kuralları Hamilton Standard tarafından belirlenen un- ducted fanlarının gelişmesi ile sağlanmıştır. Un-ducted fanlarının hava girişinin jet motorla birleştirilmesi sonucu oluşturulan güç sistemi sayesinde ses hızı aşılmıştır. Ses hızına ulaşan uçakta, akış hızının artırılması, motorda kullanılan ince fan blade açılarının hızla değişilmesiyle sağlanmıştır.

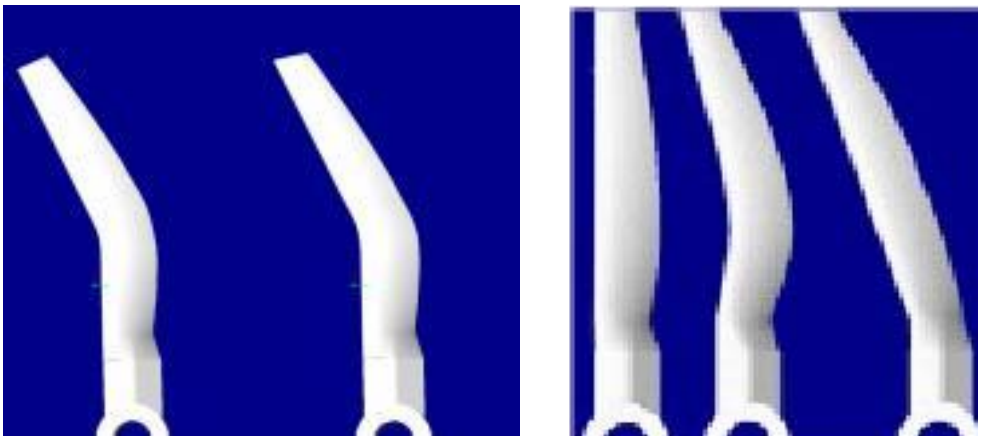
1980'li yıllarda NASA, endüstriyel hava aracı taşımacılığı için, yüksek hızlı pervanelerin testlerini gerçekleştirerek kullanıma sunmuştur (Şekil 1.6).



Şekil 1.6. Nasa'nın Geliştirdiği Yüksek Hızlı Pervane.

2000'li yıllara gelindiğinde, malzeme teknolojisindeki gelişmeye paralel olarak özellikle helikopter ve helikopter çalışma sistemine benzer sistemler için, hafif fakat

dayanıklı malzemelerden yapılmış pervaneleri geliştirme çalışmalarına hız verilmiştir. Ayrıca farklı kullanım alanları için geliştirilen pervanelere ait uygulama örneği şekil 1.7'de görülmektedir [15].



(a) (b)

Şekil 1.7. a-b Özel Kullanım Alanlar İçin Geliştirilmiş Pervaneler [15].

1.2. Tezin Bölümleri

Bu çalışmada, Pala elemanı NACA 4412 profili kullanılarak pervane tasarımı altı bölümde tamamlanmıştır.

Birinci bölümde, pervanelerin kullanımı, tarihsel gelişimi, pervanelerin gelişmesiyle birlikte diğer alanlara katkısı ve günümüzde farklı alanlarda kullanımı bilgileri verilmiştir.

İkinci bölümde, profil ve profil geometrisini tanımlayan bilgiler, pervanenin tanımı, çalışma prensibi, geometrik ve etkin hatvenin pala boyunca değişiminin incelenmesi, pervane etrafındaki akım alanının incelenmesi, pervane çekme kuvvetinin, geometrik tasarım ve performans hesaplamalarında kullanılacak boyutsuz sayıların elde edilmesi bilgileri verilmiştir.

Üçüncü bölümde, ideal şartlar yaklaşımıyla pervane düzlemi önünde ve gerisindeki, hız ve basıncın ilişkilendirilmesi, pervane veriminin elde edilmesi anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde, pala elemanı teorisi ile pala elemanına ait ayrıntılı geometrik veriler elde edilmiştir.

Beşinci bölümde, ikinci, üçüncü ve dördüncü bölümlerdeki bilgilerden faydalanarak örnek bir tasarım çalışması ve bu çalışmaya ait performans ve geometrik sonuçlar irdelenmiştir.

Son bölümde ise yapılan çalışma ile ilgili sonuçlar ve öneriler verilmiştir.

2. BÖLÜM

PERVANE TEORİSİ

2.1. Giriş

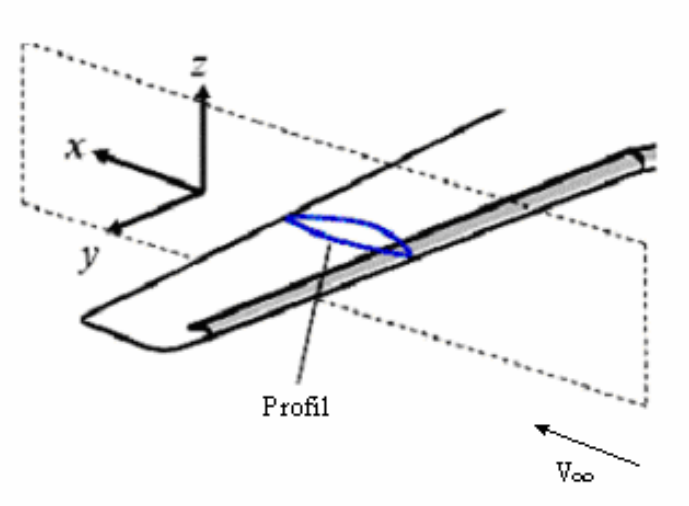
Birinci bölümde pervane tasarımının, aerodinamik, performans ve yapısallık açısından kompleks bir yapı olduğundan bahsedilmişti. Bu kompleksliğin daha iyi anlaşılması için pervanelerin çalışma prensipleri, pervane palalarında kullanılan profil geometrisi, profil türleri incelenecektir. Profil etrafındaki akım alanı incelenerek, taşıma, sürükleme kuvvetinin elde edilmesi ve profil türlerine göre taşıma katsayısı ile sürükleme katsayısının hücum açısıyla değişimi gösterilecektir. Pervane etrafındaki akım alanının incelenmesi, pervane hatvesi, hatveden kaynaklanan ilerleme durumu, pervane tasarımı ve performans hesaplamalarında kullanılan boyutsuz parametreler incelenmiştir.

2.2. Profil Geometrisi

Şekil-2.1de görüldüğü gibi, bir kanadın serbest akıma paralel kesitinin x-z düzlemindeki izdüşümüne profil denir. Profil, uçaklarda, helikopter pallerinde, türbin fanlarında, rüzgar türbinlerinde, rüzgar tünellerinde, otomobillerde ve kontrollü taşıma istenen yerlerde kullanılmaktadır. Kullanım alanlarına bağlı olarak profilleri, subsonik, transonik, süpersonik profiller olmak üzere üç guruba ayırmak mümkündür. Günümüzde çeşitli kuruluşlar tarafından geliştirilen değişik profiller yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar içinde en yaygın olarak kullanılan profiller NACA tarafından geliştirilen profillerdir.

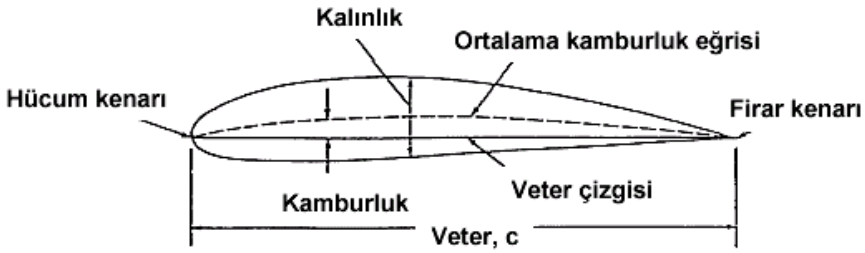
Bir profile ait karektrestik bilgileri kavrayabilmek için, profil geometris ve bu geometriyi tanımlayan terimlerin anlamları aşağıda açıklanmıştır (Şekil-2.2).

- Ortalama kanburluk eğrisi, airfoilin alt ve üst yüzeylerini birleştiren doğru parçalarını dik olarak ortalayan eğridir.



Şekil 2.1. Kanat Üzerinde Profilin Gösterilmesi [16].

- Hücum kenarı, kanburluk eğrisinin profile gelen akım tarafındaki uç noktasıdır.
- Firar kenarı, kanburluk eğrisinin profili terk eden akım tarafındaki uç noktasıdır.
- Vete*r*, profilin hücum kenarı ile firar kenarını birleştiren düz doğru hattıdır.
- Kanburluk, profilin veter hattına dik olarak ölçülen kanburluk hattı ile veter hattı arasındaki mesafedir.
- Kalınlık, profilin alt ve üst yüzeyleri arasında veter hattına dik olarak ölçülen mesafeye denir.
- Maksimum kalınlık, profilin alt ve üst yüzeyleri arasında veter hattına dik olarak ölçülen maksimum mesafe olarak adlandırılır.

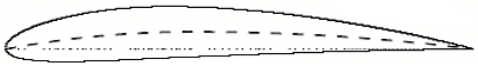


Şekil 2.2. Profil ve Profili Tanımlayan Terimler [16,17].

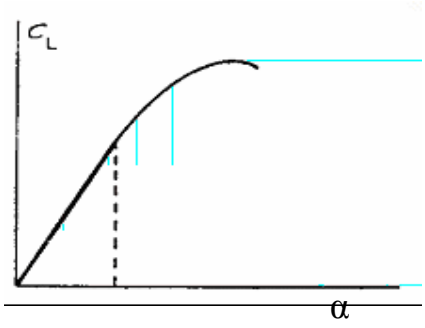
Şekil 2.2'de de görüldüğü gibi, ortalama kanburluk eğrisi olarak bilinen eğrilik hattının, veterle çakıştığı profillere simetrik profiler, eğrilik hattının veterle çakışmadığı profillere kamburluklu profiller olarak adlandırılır.



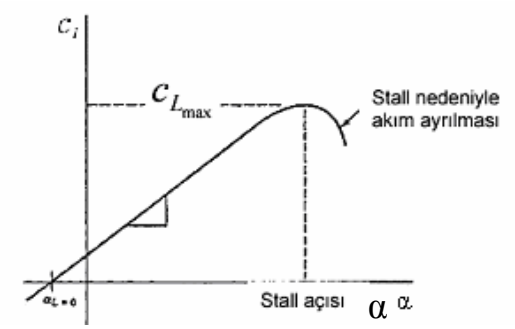
NACA 0012



NACA 4412



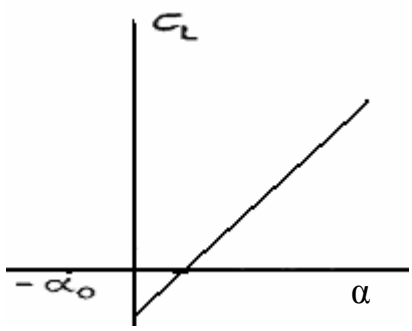
Şekil 2.3. a Simetrik Profilin C_l–α Değişimi [17].



Şekil 2.3. b Pozitif Kanburluklu Profilin C_l – α Değişimi [17].

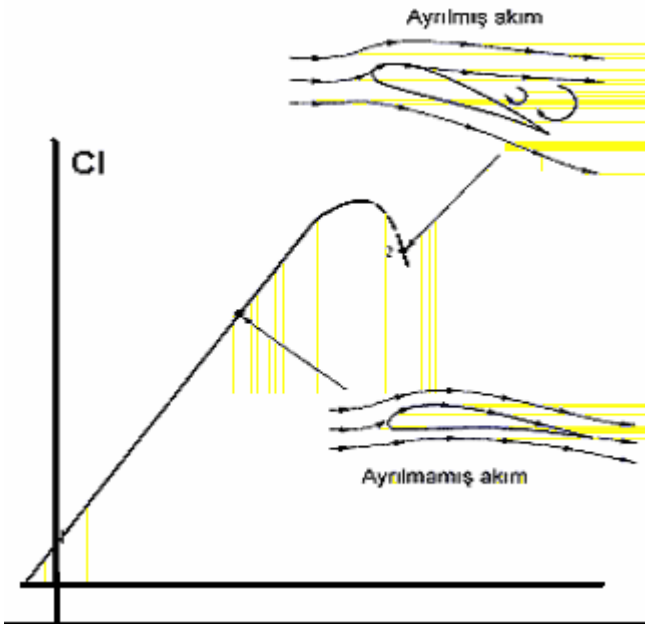


NACA 6412



Şekil 2.3. c Negatif Kanburluklu Profilin C_l – α Değişimi.

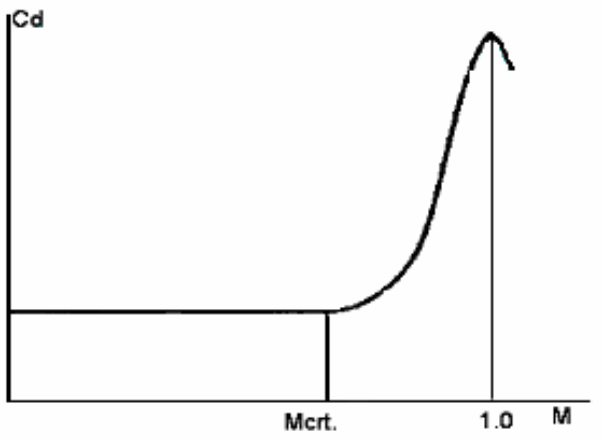
Kamburluklu profillerde eğrilik hattı veter hattının üzerinde ise bu tip profillere pozitif kamburluklu profiler altında ise negatif kamburluklu profiller olarak adlandırılır. Şekil 2.3a, b ve c'de sırasıyla simetrik, prozitif kanburluklu ve negatif kanburluklu profillere ait hücum açısı (α) ile taşıma katsayısı (C_l) nin değişimi görülmektedir.



Şekil 2.4. Sabit Hızda, Taşıma Katsayısı (C_l) ile Hücum Açısının (α) Değişimi [16].

Bir profilde hızı sabitleyerek profilin hücum açısı adım adım artırılırsa, C_L değeri de hücum açısıyla parelel olarak artar. Hücum açısının belirli bir değerinde ise C_L'nin maksimum değerine ulaştığı ve bu değerden sonra C_L nin hızla düştüğü, yani profilin stall olduğu görülür (Şekil 2.4).

Akım içerisine yerleştirilmiş profilinde, profil üzerindeki akım hızını M=1'e ulaştığı andaki serbest akım mach sayısına kritik mach ($M_{crt.}$) sayısı denir [18,19]. Profil üzerindeki akımın hızı ses hızına ulaşmasıyla çok sayıdaki mach dalgası üst üste gelerek şok dalgasını oluştururlar. Bunun sonucu olarak da profil sürükleme kaysayısında hızlı bir artışın olduğu görülmektedir (Şekil 2.5). Bu sebepten dolayı pala elemanına etkiyen bileşke hızın ses hızını geçmesi genellikle istenmez.



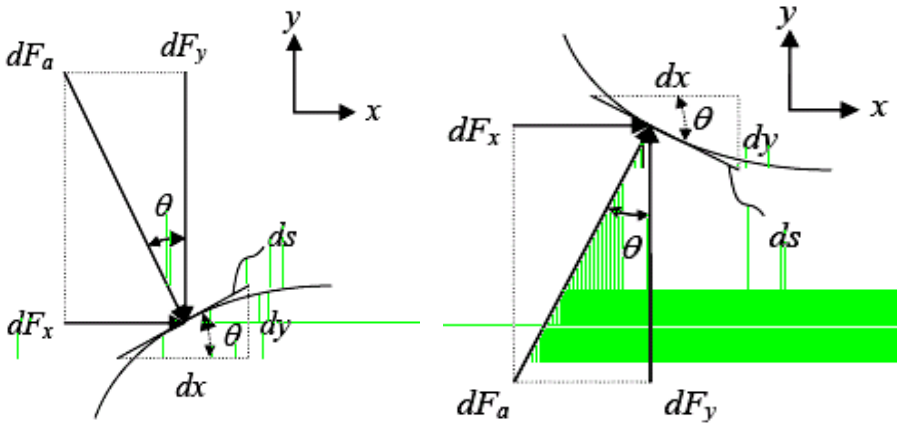
Şekil 2.5. Sürükleme Katsayısının Mach Sayısı ile Değişimi [16,18].

2.3 Taşıma ve Sürükleme Katsayılarının Elde Edilmesi

Şekil 2.6a, b de görüldüğü gibi bir profile ait ds yay elemanı alalım. Bu yay elemanına etkiyen dF_a kuvvetini, p yay elemanına etkiyen basınç olmak üzere

$$dF_a = pds \tag{2.1}$$

yazılır.



(a) (b)

Şekil 2.6. Profil Üzerinde Alınmış ds Yay Elemanı [20].

Diğer taraftan dF_a kuvvetinin x yönündeki bileşeni dFx, y yönündeki bileşeni dF_y ve dF_a ile dF_y arasındaki açı θ olmak üzere,

$$\begin{aligned} dF_X &= dF_a Sin(\theta) \\ &= pSin(\theta)ds \\ &= pdy \end{aligned} \tag{2.2}$$

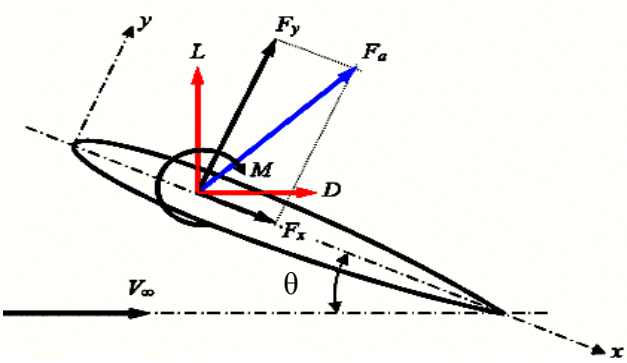
$$\begin{aligned} dF_y &= -dF_a Cos(\theta)ds \\ &= -pCos(\theta)ds \\ &= -pdx \end{aligned} \tag{2.3}$$

şeklinde yazılır. Aynı zamanda dFx ve dF_y kuvvetleri, alt yüzeye etkiyen basınç (P_l), üst yüzeye etkiyen basınç (P_u) olmak üzere

$$F_y = \int_0^C (p_l - p_u)dx \tag{2.4}$$

$$F_x = \int (P_u \frac{dy_u}{dx} + p_l \frac{dy_l}{dx})dx \tag{2.5}$$

olarak ifade edilir. Diğer taraftan şekil 2.7 de görüldüğü gibi L taşıma kuvveti, D sürükleme kuvveti sırasıyla



Şekil 2.7. Profil Etrafında Oluşan Kuvvetlerin Gösterilmesi [20].

$$L = F_y Cos(\theta) - F_x Sin(\theta) \tag{2.6}$$

$$D = F_y Sin(\theta) - F_x Cos(\theta) \tag{2.7}$$

şeklinde yazılır [20]. Ayrıca

$$L = \frac{1}{2}\rho V_\infty^2 C_l c \tag{2.8}$$

$$D \quad \frac{1}{2} \; V_{\infty}^{2} C_{d} c \tag{2.9}$$

ifade edilir [20, 21]. Yukarıdaki (2.1) ve (2.2) numaralı denklemden Cl ve Cd katsayıları çekilirse,

$$C_{d} = \frac{2D}{\rho V_{\infty}^{2} c} \qquad C_{d} = C_{d}(\theta, R_{e}, M) \tag{2.10}$$

$$C_{l} = \frac{2L}{\rho V_{\infty}^{2} c} \qquad C_{l} = C_{l}(\theta, R_{e}, M) \tag{2.11}$$

elde edilir. (2.3) ve (2.4) numaralı denklemlerde geçen M, R_e ve θ ifadeleri, υ (akışkana ait kinematik viskozite) olmak üzere, Re (Reynold sayısı)

$$R_{e} = \frac{V_{\infty} \; c}{\upsilon} \tag{2.12}$$

ve a (ses hızı) olmak üzere M (Mach sayısı)

$$M = \frac{V_{\infty}}{a} \tag{2.13}$$

olarak ifade edilir [17, 21-26].

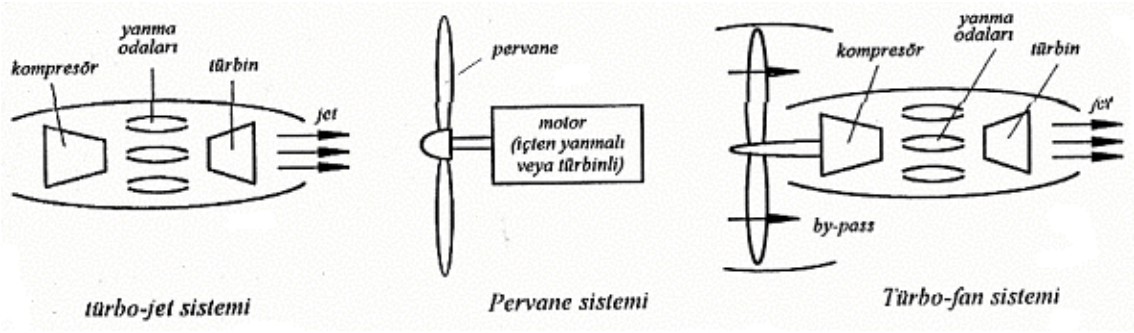
2.4 Pervane ve Pervane Geometrisi

Pervane, içten yanmalı bir motorun veya türbinli bir motorun (türbo-prop) ürettiği mekanik enerjiyi, önündeki hava kitlesini uçağın hareket yönüne zıt yönde hızlandırmasıyla ileri doğru bir çekme kuvvetine dönüştürür.

Bir uçağı ileri doğru çeken kuvvet, akışkan kütlesinin geriye doğru, momentumun arttırılarak sevk edilmesi suretiyle elde edilir. Sözü edilen momentumun artışı şekil 2.8 de görüldüğü gibi genellikle,

- Bir türbojet motorunda havanın önce sıkıştırılıp, sonra ısıtılarak genişletilmesiyle,
- Bir pervane ile havanın geriye doğru hızlandırılmasıyla,
- Modern, yüksek by-pas'lı türbojet motorlarında kısmen türbinde genişlemeyle ve kısmen de pervane ile hızlandırmak

suretiyle elde edilir [27].

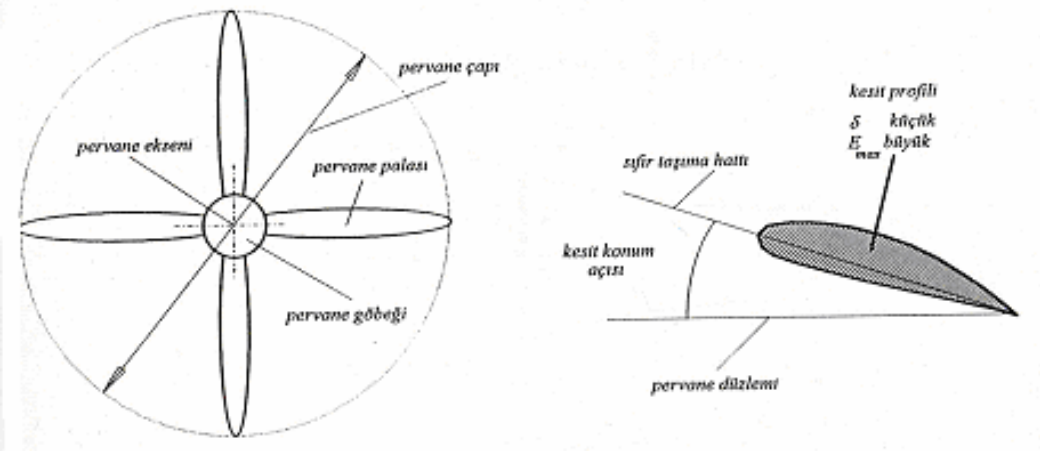


Şekil 2.8. Uçaklarda Kullanılan Güç Sistemleri [27].

Bir pervane göbeği etrafında eşit açısal aralıklarla konumlandırılmış ve pervane palası adı verilen kanatçıklardan meydana gelir. Pala sayısı genellikle 2, 3 veya 4 olur. Özel kullanıma yönelik olarak bazı durumlarda pal sayısı 8'ya kadar çıkmaktadır. İkili veya üçlü sıralı olarak yerleştirilmiş pervanelerde sistemlerde pal sayısı 16'ya kadar çıkabilmektedir.

Pervane palalarında kullanılan profillerin kesit profillerinin kalınlık oranı (x/c) genellikle küçük ancak finesleri (E) büyüktür. Pervanenin de etrafında döndüğü göbek eksenine pervane ekseni, pala uçlarının izdüşümü olan daire çemberinin çapına ise pervane çapı adı verilir (Şekil 2. 9). Pervane palasının açıklığına dik bir düzlemle kesilmesi suretiyle elde edilen kesit profiline ait veterin, pervanenin içinde döndüğü düzlemle yaptığı açıya kesit konum açısı (θ) denir. İleride de ayrıntısı ile bahsedileceği gibi, kesit konum açısı pala açıklığı boyunca kökten uca doğru sürekli değişir. Kesit konum açısının sürekli değişmesinden dolayı, pervane palaları burulmuş kanatlara benzetilebilir.

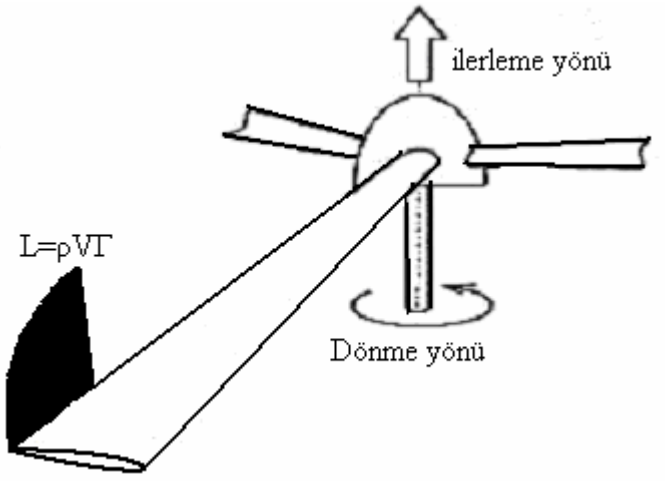
Pervane palasının herhangi bir kesitindeki kesit konum açısı sabit olan pervaneye sabit hatveli pervane, kesit konum açısı değişen pervaneye ise değişken hatveli pervane olarak adlandırılır.



Şekil 2.9. Pervane Geometrisi ve Kesit Profili [27].

2.5. Pervane Etrafındaki Akım Alanı

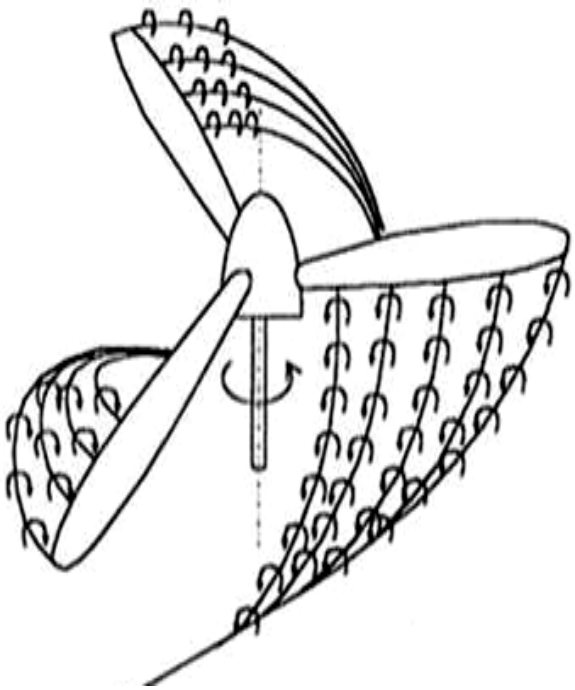
Bir pervanenin her bir palasını üç boyutlu bir kanat gibi düşünmek mümkündür. Yalnız bu kanat kök kısmı etrafında bir dönme hareketi yaparken sırt kısmı yönünde de bir ilerleme hareketi yapmaktadır. Bu hareketler etkisi altında, pervane palası üzerinde genellikle pervanenin ilerleme yönünde bir taşıma kuvveti oluşmakta ancak uç etkisi nedeniyle üç boyutlu kanatta olduğu gibi pala ucunda sıfır olan taşıma, pala boyunca bir değişim göstermektedir (Şekil 2.10). Pala ucunda sıfır olan taşımanın sonucu, palanın firar kenarında kaçma girdapları oluşmakta ve bu girdaplar palanın izinde birbiri üzerine yuvarlanarak bir uç girdabı oluşturmaktadır.



Şekil 2.10. Pala Boyunca Yük Dağılımı [27].

Üç boyutlu bir kanadın izinde aynı tarzda oluşan kaçma girdapları kanadın gerisinde kandın hareket düzlemi içerisinde kalacak şekilde yayılıyorken bir pervanenin izinde pervanenin dönme ve ilerleme hareketlerinin ortak etkisi nedeniyle helisel yörüngeler boyunca yayılmaktadır (Şekil 2.11). Buna göre bir pervane etrafındaki akım alanını pervane palaları yerine üç boyutlu kanatta olduğu gibi bağlı girdaplar alarak ve buna yukarıda izah edilen kaçma girdapları sistemini ilave ederek modellemek mümkündür.

Bir planın yakın izi incelenirse kaçma girdaplarının pala gerisinde palanın dönme düzlemi içinde kalacak şekilde değil de yukarıda belirtildiği gibi pervane gerisine doğru helisel yörüngeler boyunca yayıldığı görülür. Bu girdap çizgilerinin palanın civarındaki akım alanı üzerindeki etkisini daha iyi görebilmek için dönme düzlemi içindeki ve ilerleme doğrultusundaki iki bileşene ayrılmaktadır (Şekil 2.11).

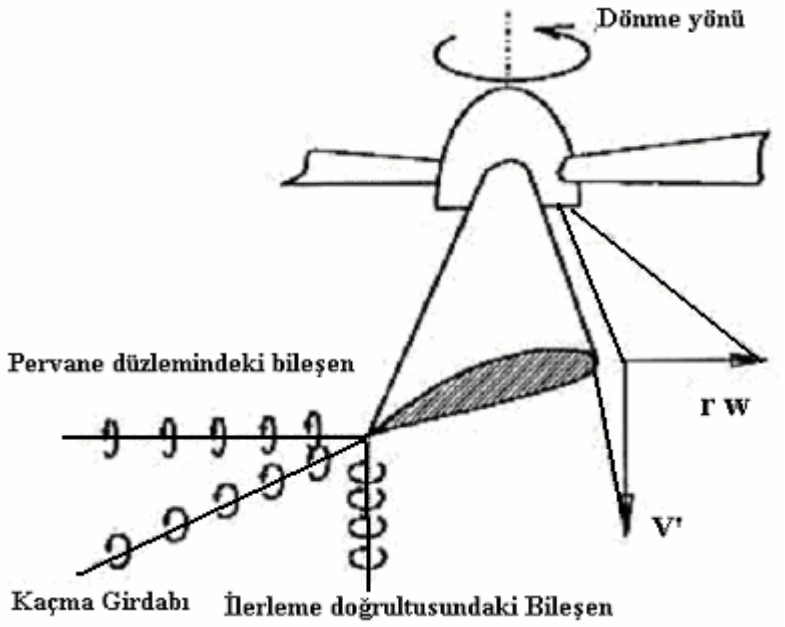


Şekil 2.11. Pervane Etrafındaki Girdap Sistemi

Dönme düzlemi içerisinde kalan bileşen girdap çizgileri üç boyutlu kanattakine benzer tarzda pala civarında karnı doğrultusunda yani diğer bir deyişle pervanenin ilerleme yönüne zıt yönde hızlar indüklerler. İşte bu indüklenen hızlar Froude momentum teoremindeki bahsedilen disk düzleminde akım hızındaki görülen artımdır.

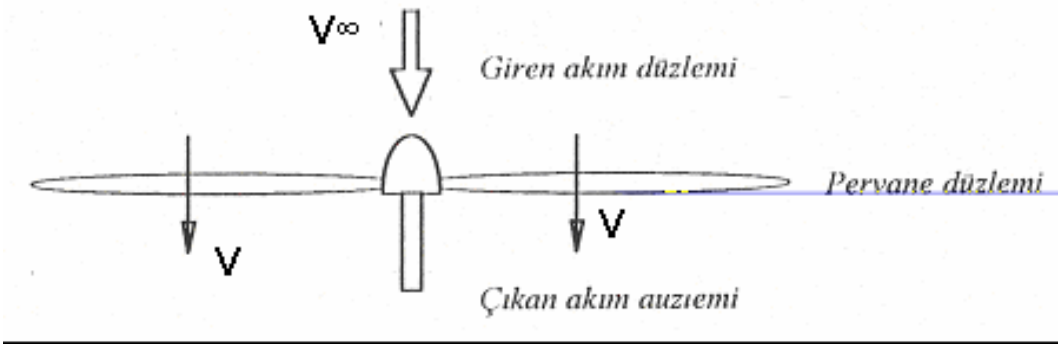
Üç boyutlu kanatta kanat açıklığı arttıkça indüklenmiş hızın azaldığı, kanat açıklığının sonsuz olma durumunda indüklenmiş hızın sıfır olduğu bilinmektedir. Diğer taraftan ideal disk teorisine (Froude Momentum teorisi) göre, diski geçen akım ne kadar çok hızlanırsa ideal verim o kadar azalacaktır. Froude disk teorisinin bir sonucu olarak ideal verimin pervane alanı ve izdeki hıza olan bağımlılıkları belirtilmektedir. İzdeki hızı arttırmak yerine pervane çapını arttırmanın ideal verimi olumlu yönden etkileyeceği ifade edilmiştir.

Şekil 2.12 de görüldüğü gibi pervanenin ilerleme doğrultusundaki girdap çizgisi bileşenleri ise palaların dönme yönünde hızlar indüklerler. Yani hava akımı pervanenin dönmesi yönünde komple bir dönme hareketi kazanır.



Şekil 2.12. Girdap Çizgileri ve Bileşenleri [21, 27].

Bunun dışında, pervane palalarını temsilen alınan bağlı girdaplar palanın sırt tarafında dönme yönüne zıt yönde karın kısmında ise dönme yönünde hızlar indüklerler. Şimdi bir pervanenin dönme düzlemiyle buna hemen önündeki "giren akım düzlemini" ve hemen gerisindeki "çıkan akım düzlemini" göz önüne alalım. (Şekil 2.13)



Şekil 2.13. Akımın Pervane Ekseni Doğrultusunda İndüklenmesi

Giren akım düzleminde pala önündeki bağlı girdapların indükledikleri hızla ilerleme doğrultusundaki kaçma girdabı çizgisi bileşenlerinin indükledikleri hızlar birbirini yok edici yöndedir. Dolayısıyla giren akım düzleminde bir dönme olmadığını kabul edebiliriz.

Çıkan akım düzleminde gerek bağlı girdapların ve gerek ilerleme doğrultusundaki kaçma girdabı bileşenlerinin indükledikleri hızlar aynı yönde ve aynı mertebelerdedir. Çıkan akım düzlemindeki indüklenmiş hız için $2b\Omega$ yazılabilir. Pervane düzleminde ise bağlı girdaplar hız indüklemediklerinden, akımdaki dönme sadece ilerleme doğrultusundaki kaçma girdaplarından kaynaklanır. Pervanenin dönme düzleminde indüklenen bu açısal hız ω, pervanenin açısal dönme hızı Ω nın bir kesiri olarak

$$\omega = b\Omega \tag{2.14}$$

şeklinde ifade edilir [21-23, 27-29]. Pervane düzlemindeki kaçma girdabı bileşenleri, daha önce de belirtildiği gibi pervanenin ilerleme yönüne zıt yönde hız indüklerler. Bu hız pervanenin ilerleme hızı V_∞ un bir kesri olarak

$$u' = aV_\infty \tag{2.15}$$

şeklinde ifade edilir [21,27].

2.6. Pervane Hatvesi

Vida ile benzetme yapılarak bir pervanenin bir devirdeki ilerlemesine “pervane hatvesi” adı verilir. Ancak pervanede, vidadan farklı olarak bazı özel durumlar söz konusudur. Örneğin uçak, konum olarak sabit kalıp fakat pervanenin döndüğü kabul edilirse

pervanede devir başına ilerleme olmadığından,. dolayısıyla hatvede sıfır olur. Aksine pervane durmuş vaziyette yani uçarken motorları susturup süzülüş hareketi yaparken bu defa devir başına ilerleme miktarı ve dolayısı ile hatve sonsuzdur. Buna göre vidadan hareketle yapılan hatve tanımı, pervanenin çeşitli şartlardaki özel durumlarını tam olarak ifade edebilen bir tanım olmaktan uzaktır. Bu zorluğu gidermek için iki farklı pervane hatvesi tanımı yapılmıştır.

2.6.1. Geometrik Hatve

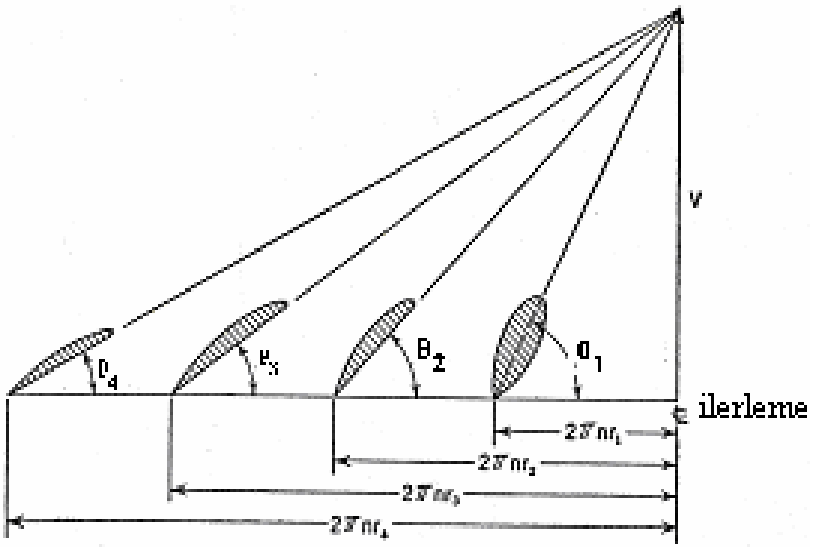
Pervanenin ekseninden r uzaklıktaki bir kesitin, sıfır taşıma hattı ile pervane dönme düzlemi arasındaki açıya θ dersek

$$h = 2\pi r Tg\theta \tag{2.16}$$

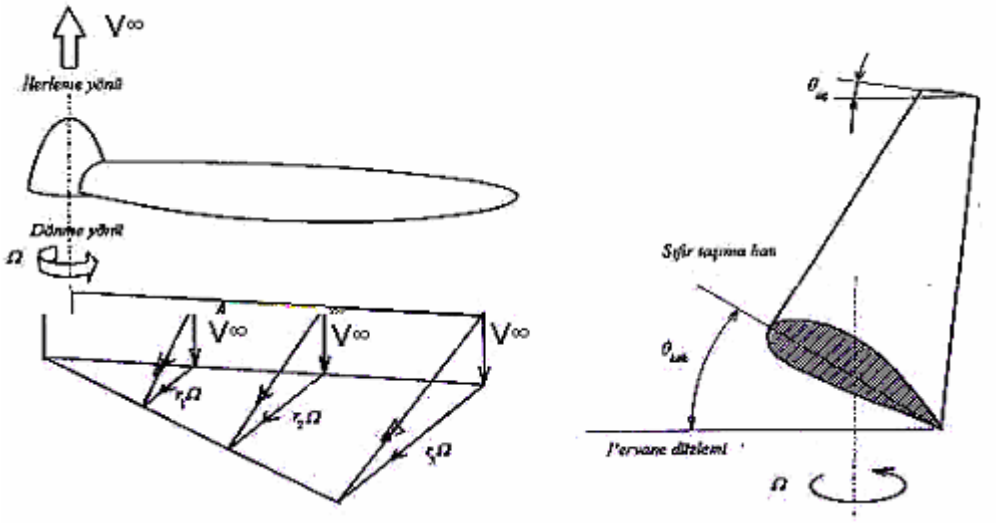
büyüklüğü bu kesitin geometrik hatvesi olarak tanımlanır [21, 27, 29]. (2.16) Bağıntıdan da görüldüğü gibi geometrik hatve, pervane palasındaki lokal yarıçapa bağlı olarak değişir. Bu nedenle pervane ekseninden yarıçapın %70'i kadar uzaklıktaki kesitin geometrik hatvesi pervanenin ortalama "geometrik hatvesi" olarak isimlendirilir. Geometrik hatve sadece palaların geometrisine bağlı bir büyüklük olup uçuş şartlarından bağımsızdır.

Pervanenin ilerleme oranının sabit olmasına karşın kök kısmındaki bir noktanın çizgisel hızı uç kısmındaki bir noktanın çizgisel hızından küçük olması nedeniyle, pervaneye etkiyen bileşke akım hızı pala boyunca değişir.

İlerleme oranının pala açıklığı boyunca sabit kalması için pala boyunca hücum açısının sürekli değişmesi gerekmektedir. Pala açıklığı boyunca, hücum açısının değişmesi, tasarımda büyük zorluklar meydana getirir. Pervane tasarımında hücum açısının pala boyunca değişmesini önlemek için pervane palaları kökten uca doğru burulur (Şekil 2.14). Geometrik hatve pervane palası boyunca kök kesintinde büyükken, uca doğru gittikçe geometrik hatve azalır (Şekil-2.15).



Şekil 2.14. Pala Boyunca Oturma Açıları İle İlerleme Hızı Arasıdaki İlişki [22].



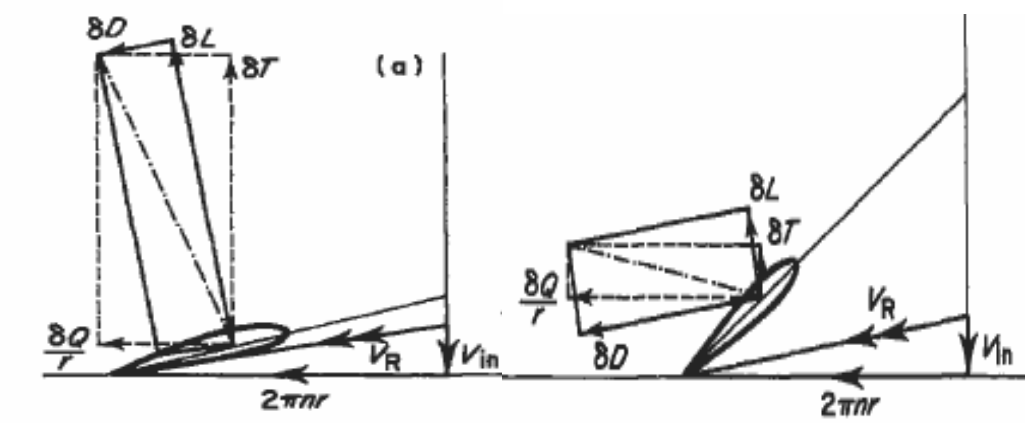
Şekil 2.15. Geometrik Hatve.

2.6.2. Deneysel Ortalama Hatve

Pervanenin net çekme kuvvetinin (T) sıfır olması halinde devir başına ilerleme miktarına pervanenin "deneysel ortalama hatvesi" denir [21, 27, 29]. Bu parametre imal edilmiş bir pervanenin karakteristiklerinin deneysel ölçmeleri için oldukça uygun bir parametredir.

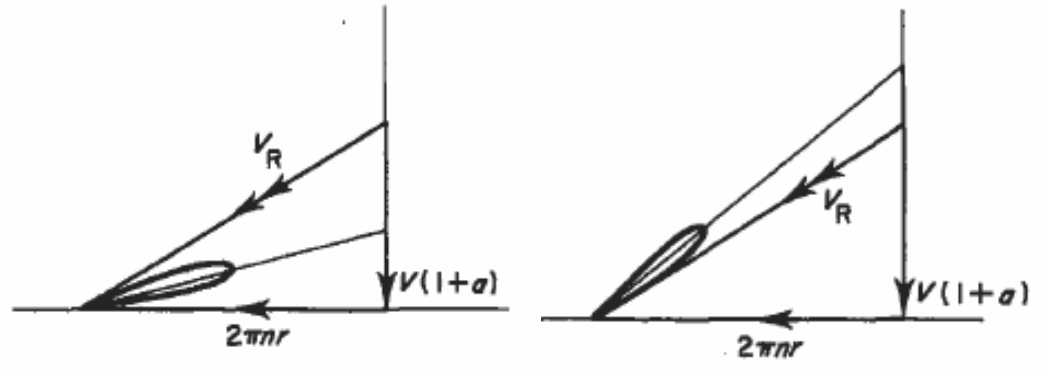
2.6.3. Geometrik Hatvenin Pervane Performansı Üzerine Etkisi

Şekil-2.16'da görüldüğü gibi, Pala sayıları ve genel yapıları birbirine benzeyen ve birinin geometrik hatvesi küçük diğerininki büyük olmak üzere iki pervaneyi göz önüne alalım. Her iki pervane de aynı n devir sayısıyla dönmekte olsun. Önce geometrik hatvesi küçük yani ilerleme hızı küçük olan pervaneyi ele alalım. Uçağın ilerleme hızının sıfır olduğu hali göz önüne aldığımızda. Bu halde pervane ekseninden r uzaklıktaki bir pala elemanına etkiyen bileşke akım hızı pervanenin dönmesiyle ilgili çizgisel hız ($V=2\Omega nr$) ile pervanenin harekete geçirdiği havanın pervane düzlemine dik doğrultudaki hızının bileşkesinden ibarettir. Bu durumda hatvesi küçük olan pervane makul sınırlar içindeki bir hücüm açısından çalışmakta iken büyük hatveli pervane muhtemelen" pert dö vites(stall)" şartlarında çalışmaktadır.



(a) (b)

İlerleme hızı sıfır olduğu durumdaki pervaneler



(a) (b)

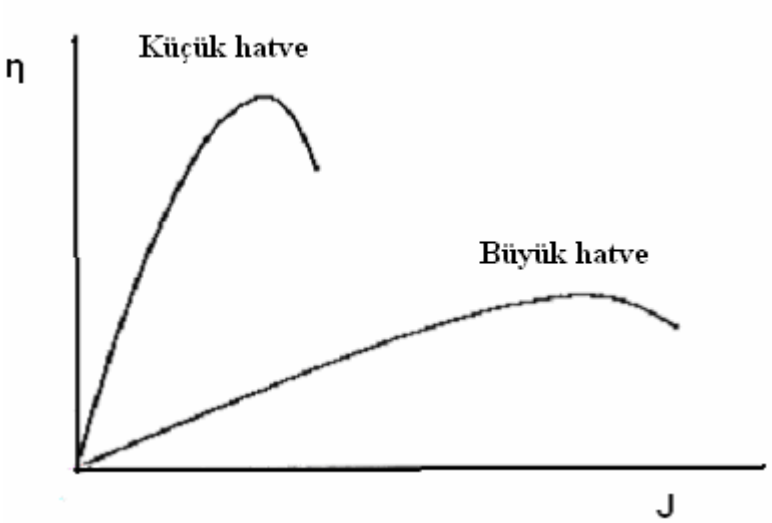
İlerleme hızı büyük olduğu durumdaki pervaneler

Şekil 2.16. Geometrik Hatvenin Pervane Üzerindeki Etkisi [21].

Bunun sonucu olarak küçük hatveli pervanenin taşıma kuvveti büyük, sürükleme kuvveti küçük veya diğer bir bakış açısıyla çekme kuvveti büyük fakat pervaneyi çevirmek için gerekli moment küçüktür Şekil 2.16 ilerleme hızının sıfır olduğu durum). Buna karşılık hatvesi büyük olan pervanenin çekme kuvveti küçük momenti ise büyüktür.

Pervanenin ilerleme hızının yani diğer bir deyişle uçağın uçuş hızının büyük olması halinde tamamıyla aksi bir durum söz konusu olur. Bu defa büyük hatveli pervane makul sınırlar içerisindeki bir hücum açısından etkin olarak çalışmakta iken küçük hatveli pervane muhtemelen ileri doğru çekme yerine geriye doğru bir çekme kuvveti oluşturmaktadır.

Bu nedenle düşük uçuş hızlarında elverişli olan bir pervanenin yüksek hızdaki uçuşlarda uygun olmayacağını söyleyebiliriz. Bu durum havacılığın ilk gelişme yıllarında uçaklarda performansı kısıtlayıcı önemli bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır.
Yüksek hız için yapılmış bir uçağı sıfırdan istenen hıza çıkarmak için yukarıda anlattığımız nedenlerden dolayı çok uzun bir pist ihtiyacı doğurmakta. Pist uzunluğunu makul seviyelerde tutturmak için çift hatveli pervaneler geliştirilmiştir. Bu tür pervanelerde pervane göbeğinde özel bir sistem aracılığıyla palalar döndürülerek(hücum açıları değiştirilerek) iki ayrı konumda pervaneler çalıştırılmıştır. Böylece küçük ilerleme hızlarında küçük hatvede tutulan pervane uçuş hızının büyük olduğu hallerde büyük hatve konumuna getirilebilmektedir. Şekil(2.17) de küçük ve büyük iki hatve halinde pervane veriminin(η), ilerleme oranı(J) ile değişimini belirten tipik bir örnek görülmektedir.



Şekil 2.17. Büyük ve Küçük Hatve Durumu İçin İlerleme ile Verim İlişkisi [21, 27].

Havacılıkta önemli bir ilerleme de sabit hızlı diye adlandırılan pervanelerin geliştirilmesiyle sağlanmıştır. Bu pervanelerde palalar yine göbek içerisindeki bir mekanizma aracılığıyla döndürülerek pala hatvesi sürekli olarak değiştirilebilmektedir. Sözü edilen mekanizma ile aynı zamanda motor hızı da en verimli değerlerde sabit kalacak bir ayarlama yapılabilmektedir.

2.7. Pervane Katsayıları

Bir pervanenin performansı benzeri bir modeli üzerinde gerçekleştirilen deneysel ölçmelerle tespit edilebilir. Bu durumda modellerle yapılan bütün deneylerde olduğu gibi deney sonuçlarını tam boyuttaki gerçek hale aktaracak uygun bir geçiş sistemine ihtiyaç vardır. Bu amaçla boyut analizi kullanılır. Pervane için yapılacak bir boyut analizi herhangi bir cismin aerodinamik incelemesinde ortaya çıkan taşıma ve sürükleme katsayılarına benzer şekilde pervanenin performansı ile ilgili olan, çekme katsayısı ve moment katsayılarını verir.

2.7.1. Çekme Katsayısının Boyut Analizi ile Bulunması

Önceki bölümlerde görüldüğü gibi bir pervanenin verdiği çekme kuvveti, pervanenin geometrisi ve serbest akım karakteristikleriyle pervane izindeki hıza bağlıdır. Serbest akım karakteristik olarak aşağıdaki parametrelerle tanımlanabilir. Bu parametreler,

Alışkanlığın Yoğunluğu	ρ	kg/m3
Kinematik Viskozitesi	υ	m2/s
Bulk Elastisite Modülü	E	kg/m*s-2
Serbest Akım Hızı	V∞	m/s

olarak yazılır.

Pervane geometrisi pervanenin çapı D[L] ile karakterize edildiği gibi izdeki hızın pervanenin devir sayısı n[T^{-1}]ile ilgili olduğu belirtilebilir. Buna göre pervanenin T[MLT^{-2}] çekme kuvveti için

$$T = f(D, n, \rho, v, E, V_\infty)$$

veya C boyutsuz bir sabit olmak üzere

$$T = CD^a n^b \rho^c v^d E^e V_\infty^f \tag{2.17}$$

şeklinde tanımlanır. Buradan her bir büyüklüğün değeri kullanılarak

$$[MLT^2]=[L]^a[T^{-1}]^b[ML^{-3}]^c[L^2T^{-1}]^d[ML^{-1}T^{-2}]^e[LT^{-1}]^f$$

eşitliği yazıldıktan sonra, aşağıdaki şekle dönüşür.

$$[MLT^2]=[M]^{c+e}[L]^{a-3c+2d-e+f}[T]^{-b-d-2e-f}$$

ve aynı boyuttaki terimlerin üstleri eşitlenerek

$$\begin{aligned}
&[M] \rightarrow 1 = c + e \\
&[L] \rightarrow 1 = a - 3c + 2d - e + f \\
&[T] \rightarrow 2 = b + d + 2e + f
\end{aligned}$$

elde edilir. Altı bilinmeyen içeren bu üç denklemden a, b ve c parametreleri diğer parametreler cinsinden

c=1-e
a=4-2e-2d-f
b=2-d-2e-f

çekildiği takdirde pervane çekmesi için yazılan (15.13) bağlantısı

$$T = CD^{4-2e-2d-f} n^{2-d-2e-f} \rho^{1-e} \upsilon^d E^e V_\infty^f$$

veya düzenlenerek

$$T = C\rho \cdot n^2 D^4 \left(\frac{\upsilon}{D \cdot n^2} \right)^d \left(\frac{E}{\rho \cdot n^2 D^2} \right)^f \left(\frac{V_\infty}{nD} \right)^f \tag{2.18}$$

şekline getirilebilir. Bu son ifadede parantezler içinde geçen terimleri ayrı ayrı incelendiğinde,

$$\frac{v}{nD}$$

n pervanenin açısal hızıyla ilgili bir büyüklük ve D de pervane çapı olup nD büyüklüğü pala ucunun hızıyla orantılı büyüklüktür. Buna göre bu ifade

$$\left(\frac{v}{(nD)D} \right) = \frac{1}{\mathrm{Re}} \tag{2.19}$$

şeklinde pala ucu için yazılmış Reynolds sayısından ibarettir [21, 29, 30]. Ayrıca

$$\left(\frac{E}{\rho\, n^2 D^2} \right) : \left(\frac{E}{\rho} \right) = a^2 \tag{2.20}$$

akışkan içindeki ses hızı ve yine D.n pala ucunun hızıyla orantılı bir büyüklük olmak üzere bu ifade

$$\left(\frac{a}{Dn} \right)^2 = \frac{1}{M^2} \tag{2.21}$$

şeklinde pala ucundaki Mach sayısını belirmektedir.

$$\left(\frac{V_\infty}{nD} \right) = J \tag{2.22}$$

V_∞ uçağın ve dolayısıyla pervanenin ilerleme hızı V_∞ çevresel hızı ile ilgili bir büyüklük olmak üzere bu son ifade pervane ucunun her devirde ne kadar ilerlediğinin gösteren boyutsuz bir faktör olup "ilerleme faktörü" olarak adlandırılır[28-30]. Buna göre pervanenin çekme kuvveti

$$T = C\rho n^2 D^4 f(\mathrm{Re}, M, J) \tag{2.23}$$

şeklinde pala ucu için yazılmış Reynolds ve Mach sayılırıyla ilerleme oranı cinsinden yazılabilir. Bu bağıntı boyutsuz C katsayısı $f(\mathrm{Re}, M, J)$ fonksiyonu birleştirilerek

$$k_T = Cf(\mathrm{Re}, M, J)$$

şeklinde yeni bir "pervane çekme katsayısı" tanımlanmak suretiyle

$$T = k_T \rho\, n^2 D \tag{2.24}$$

şeklinde de ifade edilebilir. k_T katsayısı görüldüğü gibi Re,M ve J sayılarıyla pervanenin geometrisine bağlı sabit olup deneysel veya teorik yöntemlerle tespit edilir [21-30].

2.7.2. Moment Katsayısı

Pervanenin momentinin de çekme kuvvetinde olduğu gibi pervane geometrisi dönme hızı ve akışkan özelliklerine bağlı olduğu göz önüne alınarak yukarıdakine benzer bir analiz yapıldığı taktirde moment için de

$$Q = k_Q \rho n^2 D^5 \tag{2.25}$$

şeklinde bir ifade elde edilir. Buradaki k_Q katsayısı da yine Re, M ve J sayılarıyla pervane geometrisine bağlı bir sabittir [21, 27, 31].

2.8. Pervane Verimi Güç Katsayısı ve Tesirlilik Faktörü

Pervanenin aerodinamik benzerlik şartlarını ortaya koyan yukarıdaki boyut analizlerinin sonunda elde edilen boyutsuz pervane katsayıları yanında pervane verimi güç katsayısı ve tesirlik faktörü gibi diğer bazı boyutsuz katsayılar da pervane analiz ve dizaynında önemli kavramlardır.

2.8.1. Pervane Verimi

pervane şaftına uygulanan moment Q olmak üzere pervane için harcanan güç

$$P_h = 2\pi n Q \tag{2.26}$$

şeklinde yazılabilir. Buna karşılık pervaneden birim zamanda alınan iş, yani pervanenin faydalı gücü

$$P_f = TV_\infty \tag{2.27}$$

olup buna göre pervanenin verimi

$$\eta = \frac{P_f}{P_h} = \frac{TV_\infty}{2\pi nQ} \tag{2.28}$$

veya T ve Q için boyut analizi ile bulunan bağıntılar kullanılarak

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{k_T \rho n^2 D^4 V_\infty}{2\pi n k_Q \rho n^2 D^5} \\ &= \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{k_T}{k_Q} \cdot \frac{V_\infty}{nD} \\ &= \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{k_T}{k_Q} \cdot J \end{aligned} \tag{2.29}$$

şeklinde elde edilir.

2.8.2. Güç Katsayısı

Pervaneyi döndürmek için gereken güç

$$\begin{aligned} P &= 2\pi nQ \\ &= 2\pi n(k_Q \rho\ n^2 D^5) \\ &= 2\pi k_Q \rho\ n^3 D^5 \end{aligned} \tag{2.30}$$

olmak üzere güç katsayısı

$$P = k_P \rho n^3 D^5 \tag{2.31}$$

şeklinde ifade edilir. (2.19) numaralı bağıntıdan güç katsayısı çekilirse

$$\begin{aligned} k_P &= \frac{P}{\rho n^3 D^5} \\ &= \frac{2\pi k_Q \rho n^3 D^5}{\rho n^3 D^5} \\ &= 2\pi k_Q \end{aligned} \tag{2.32}$$

Şeklinde tanımlanır. Bu durumda pervane verimi için de

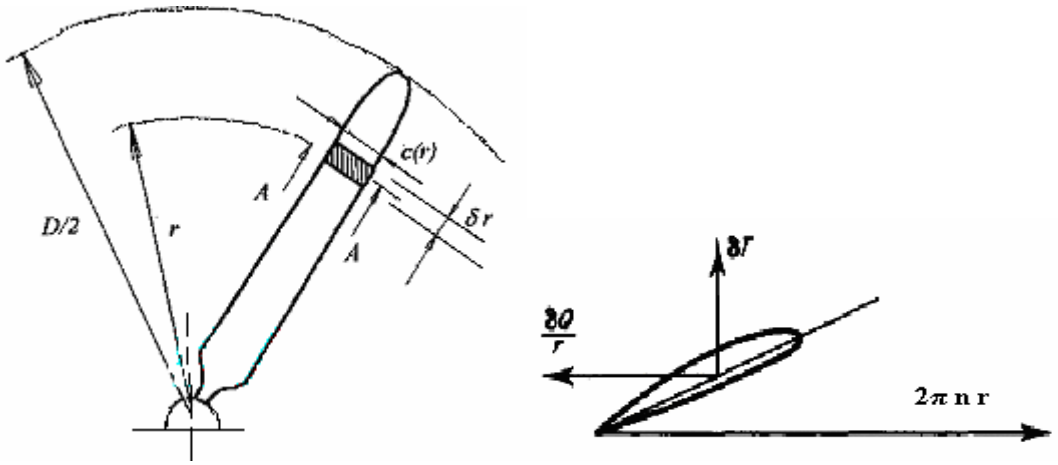
$$\eta = J \cdot \left(\frac{k_T}{k_Q} \right) \tag{2.33}$$

bağıntısı elde edilir [21, 27].

2.8.3. Tesirlilik Faktörü

Bilindiği gibi mukavemet gereksinimleri nedeni ile bir pervane palası göbekten uca doğru farklı kesitlere sahiptir. Göbek yakınında dairesel olan kesit önce ovalleşir, daha sonra profil şeklini alır. Profilin veter uzunluğu pala ucuna doğru giderek küçülür. Pervane kesitlerinin bu şekilde değişmesinin etkisini incelemek için tesirlilik faktörü adı verilen bir katsayı tanımlanır. Dönme hızı n devir/sn olan D çaplı bir pervanenin göbek ekseninden r uzaklıkta δr genişliğindeki bir pala elamanını ele alınsın (Şekil 2.18).

Pervaneyi çevirmek için pervane şaftına uygulanan moment δQ olsun ve bu momentin δr genişliğindeki pala elemanına gelen kısmı da δQ olsun. Moment kolu r olduğuna göre pala elemanına dönme yönünde uygulanan kuvvet δQ /r büyüklüğünde olacaktır. Ve bu kuvvet pala elemanına etkileyen sürükleme kuvvetine eşit olacaktır.



Şekil 2.18. Pala Elemanı Kesit Profiline kuvvetler [21, 27].

Yapılan incelemede havanın pervane düzlemine dik doğrultudaki ilerleme hızını ihmal edilmesi mümkündür. Bu taktirde pala elemanına etkiyen akım hızı

$$V = 2\pi nr \tag{2.34}$$

ve sürükleme kuvveti de 2πnr

$$\frac{\delta Q}{r} = \frac{1}{2} C_D \rho (2\pi n r)^2 c(r) \delta r \tag{2.35}$$

olur. Buradan pala elemanına etkiyen elemanter moment

$$\delta Q = 2 C_D \rho \pi^2 n^2 c(r) r^3 \delta r \tag{2.36}$$

olarak yazılabilir. C_D sürükleme katsayısı genel olarak pala boyunca değişen bir büyüklük olmakla birlikte bu incelemede bir an için sabit olduğu kabul edilerek son ifade pala kökünden ucuna kadar integre edilirse, pervanenin pala n olmak üzere pervane şaftına uygulanan toplam moment

$$Q = 2\pi^2 n^2 n_B \rho C_D \int_{kök}^{uç} c(r) r^3 dr \tag{2.37}$$

olarak ifade edilir. Ancak önceden de belirtildiği gibi pervanenin göbeğe yakın kısımları mukavemet gereksinimleri nedeniyle profil kesitli olmayıp, bu kısımların pervane performansına bir katkısı olduğu söylenemez. Bu nedenle sonuncu ifadedeki integrali genellikle pervane ekseninden pervane çapının %10'u kadar dışarıdan başlatılması uygun olur. Diğer yandan pervaneyi çevirmek için gerekli güç,

$$P_g = 2\pi n Q \tag{2.38}$$

olup Q için yazılan (2.25) numaralı bağıntıyı (2.26) numaralı bağıntıda yerine yazarak

$$P_g = 4\pi^3 n^3 n_B \rho C_D \int_{0.1D}^{0.5D} c(r) r^3 dr \tag{2.39}$$

olarak yazılır [24-26]. Bu ifadede geçen integral ifadesi

$$t_f = \frac{10^5}{D^5} \int_{0.1D}^{0.5D} c(r) r^3 dr \tag{2.40}$$

"tesirlilik faktörü" olarak adlandırılır [21]. Bu durumda (2.39) bağıntısı,

$$P_g = 4\pi^3 n^3 n_B \rho C_D \left(\frac{D}{10}\right)^5 t_f \tag{2.41}$$

şeklinde yazılır.

3. BÖLÜM

3.1. Froude Momentum Teorisi

Pervaneye ait temel parametrelerin bulunması Froude tarafından geliştirilen momentum teorisi kullanılacaktır. İdeal disk teorisi olarak da kullanılan momentum teorisinden hareketle, pervane yerine pervaneyle aynı çapa sahip ideal bir disk ve diskten geçen havanın kazandığı momentum incelenir. Ancak bu incelemede şu kabuller yapılır.

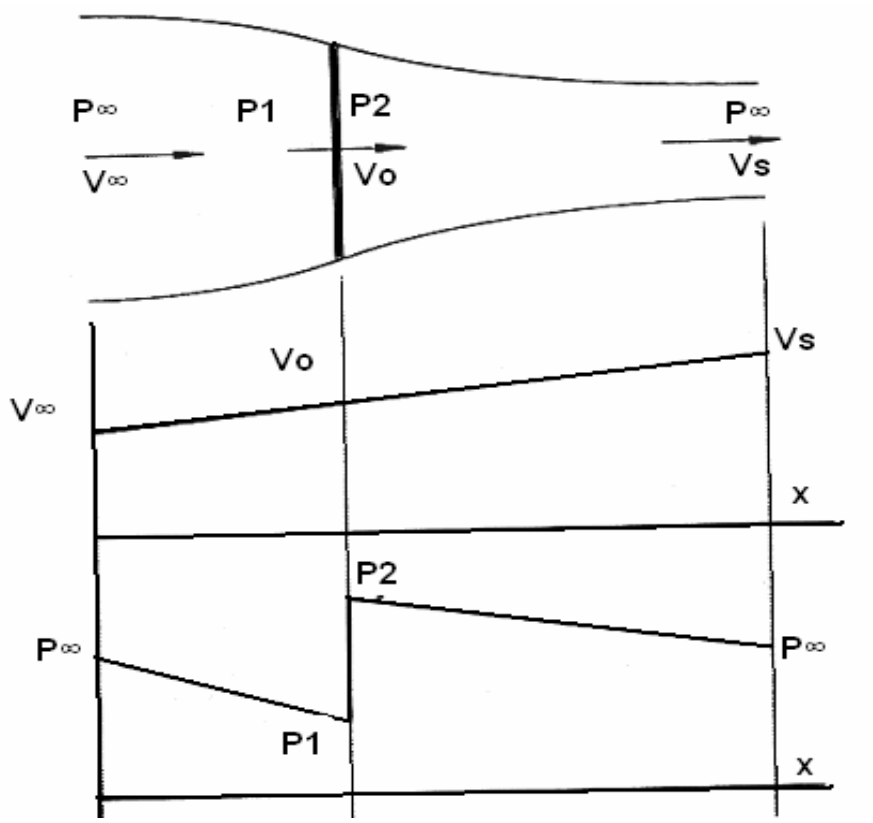
- Diski geçen akışkanın kazandığı enerji akışkanın statik basıncındaki artışı şeklindedir. Akışkanın kazandığı bu enerji diskin her tarafında aynıdır.
- Diski geçen geçen hava partiküllerinin hızları disk yüzeyinin her tarafında aynıdır.
- Diskten geçen hava akımı sürekli ve girdapsızdır. Disk çıkışında oluşan girdaplar ihmal edilir.

3.2. İdeal Diskin Çekme Kuvveti, Pervaneyi Geçen Akım Hızı, İzdeki Hız.

Froude momentum teorisinde yapılan kabuller altında, diski geçen akışkan kütlesinin Şekil-3.1 'deki gibi bir akım borusu oluşturduğu düşünülebilir. Disk(Pervane) önünde ve yeterince uzağında havanın hızı, uçağın hızına eşit bir V_∞ hızıyla diske doğru gelmekte ve diske yaklaştıkça akım hızlanarak disk üzerinde V_0 hızına erişmektedir. Diskten aldığı enerji ile diskten sonra hızlanmasına devam ederek, akışkan basıncının serbest akım basıncına eşit olduğu bölgeye kadar hızlanmasını sürdürerek V_s hızına erişmektedir. Bu hız artışını şu şekilde tanımlayabiliriz. Diskin yeteri kadar önünde akışkanın statik basıncı serbest akım statik basıncı olan P_∞ değerinde iken diske yaklaştıkça statik basınç azalarak diskin önünde P_1 değerine ulaşmaktadır. Havanın diskten aldığı enerji ile diskin arkasında statik basınç P_2 değerini artmakta ve diskin gerisinde giderek düşmek suretiyle serbest akım statik basıncı P_∞ değerine inmektedir.

Diğer taraftan birim zamanda diskten geçen havanın kütlesel debisi

$$\dot{m} = \rho S V_{\infty} \tag{3.1}$$



Şekil 3.1 İdeal Dikte Basınç ve Hız Dağılımı [17-18, 21].

ve diskin hava hızında yarattığı artma ise $(V_s - V_{\infty})$ olduğuna göre momentumun teoremi yardımıyla, T çekme kuvveti, S disk alanı, ρ akışkan yoğunluğu olmak üzere akışkanın momentumundaki artışı

$$T = \rho S V_0 \left(V_s - V_{\infty}\right) \tag{3.2}$$

şeklinde yazabiliriz.

Diskin ön ve arkasındaki basınçların farkının, disk üzerinde yarattığı ileri doğru çekme kuvveti T için

$$T = S\left(P_2 - P_1\right) \tag{3.3}$$

olarak yazılır.

Akım girdapsız kabul edildiğine göre şekil 3.1 deki diskin önünde ve gerisindeki bölgelerde ayrı ayrı olmak üzere Bernoulli denklemi birer defa

$$P_\infty + \frac{1}{2}\rho V_\infty^2 = P_1 + \frac{1}{2}\rho V_0^{\,2} \tag{3.4}$$

$$P_\infty + \frac{1}{2}\rho V_s^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho V_0^{\,2} \tag{3.5}$$

Şeklinde iki bağıntı elde edilir. (3.5) bağıntısından (3.4) bağıntısı çıkarılırsa

$$P_2 - P_1 = \frac{1}{2}\rho\left(V_s^2 - V_\infty^2\right) \tag{3.6}$$

elde edilir. (3.3) bağıntısına (3.6) bağıntısını yerleştirilirse

$$T = \frac{1}{2}S\rho\left(V_s^2 - V_\infty^2\right) \tag{3.7}$$

elde edilir. (3.2) bağıntısı ile (3.7) bağıntısı birbirine eşitlenir ve gerekli sadeleştirmeler yapılırsa

$$V_0 = \frac{\left(V_s + V_\infty\right)}{2} \tag{3.8}$$

elde edilir. (3.8) bağıntısına göre disk üzerinden geçen havanın hızı, serbest akım hızı V_∞ ile diskin gelişmiş izindeki V_s hava hızının aritmetik ortalamasına eşit olmaktadır.

3.3. Diskin İdeal Verimi

Diskin yeterince önünde ve yeterince gerisinde havanın statik basıncı aynı ve P_∞ değerine sahip, buna karşılık birim akışkan kütlesinin kinetik enerjisi, diskin önünde ve statik basıncın serbest akım statik basıncı P_∞ eşit olduğu yerdeki enerji

$$\frac{1}{2}V_\infty^2 \tag{3.9}$$

iken diskin yeterince gerisinde ve uzağındaki enerji

$$\frac{1}{2}V_s^2 \tag{3.10}$$

şeklinde olmaktadır. Buna göre diski geçen akışkanın enerjisindeki artış

$$\frac{1}{2}\left(V_s^2 - V_\infty^2\right) \tag{3.11}$$

olup, diski birim zamanda geçen akışkanın enerjisindeki değişme (artım)

$$\frac{dE}{dt} = \frac{1}{2}\rho S V_0\left(V_s^2 - V_\infty^2\right) \tag{3.12}$$

elde edilir. Bu sonuncu ifade diskin, yani pervanenin havayı hızlandırırken harcadığı enerjiyi göstermektedir. Buna karşılık diski çeken kuvvet T olduğu ve diskin hareket hızı da V_∞ olduğuna göre diskin birim zamanda yaptığı faydalı iş (faydalı güç)

$$W_f\left(P_f\right) = TV_\infty \tag{3.13}$$

olarak ifade edilir. Buna göre diskin ideal verimi

$$\eta_i = \frac{2\ TV_\infty}{\rho S V_0\left(V_s^2 - V_\infty^2\right)} \tag{3.14}$$

şeklinde tanımlamak mümkündür. T için daha önceden bulunan (3.2) bağıntısı kullanılarak

$$\eta_i = \frac{2\rho S V_0\left(V_s - V_\infty\right)V_\infty}{\rho S V_0\left(V_s - V_\infty\right)\left(V_s + V_\infty\right)}$$
$$= \frac{2V_\infty}{V_s + V_\infty}$$

veya

$$\eta_i = \frac{2}{1 + \left(V_s / \ V_\infty\right)} \tag{3.15}$$

şeklinde yazılabilir.(3.8) bağıntısının yardımıyla

$$\eta_i = \frac{V_\infty}{V_0} \tag{3.16}$$

elde edilir.

Diskten alınan faydalı güç TV_∞ ve ideal verim da $\left(V_\infty / \ V_0\right)$ olduğuna göre diskte harcanan güç

$$\begin{aligned} P &= \frac{TV_\infty}{\eta_i} \\ &= \frac{TV_\infty}{\left(\frac{V_\infty}{V_0}\right)} \\ &= TV_0 \end{aligned} \tag{3.17}$$

olarak elde edilir[21, 27-28]. (3.15) tanımlanan verim ifadesinde görüldüğü gibi verilen bir uçuş hızında, pervanenin izindeki V_s hızı arttıkça pervane veriminin azaldığı görülmektedir. Oysa pervaneden elde edilen çekme kuvveti hava kütlesinin hızlandırılmasıyla elde edilmektedir. Son iki cümlede açıklananlar birbirleriyle çelişki oluşturmaktadır. Bu çelişkiyi iki özel durumu inceleyerek açıklanır.

İlk olarak (3.2) bağıntısından yararlanarak, pervane çapının çok büyük olduğu durumu ele alalım. Verimin yüksek olması uçuş hızının ve izdeki hızlara oranı $\left(V_\infty / \ V_0\right)$ 1'e yaklaşacak şekilde yani hızlar arasındaki fark küçük tutup, pervane alanı S'yi yeterince büyük tutarak T çekme kuvveti yeterince büyük yapılabilir.

İkinci halde ise küçük çaplı bir pervane ele alalım. Aynı T çekme kuvveti için (3.15) bağıntısından faydalanarak izdeki hızın arttırılması gerekir. Bu durumda ise verim düşer.

Sonuç olarak üstte açıklanan iki duruma göre, verilen bir T çekme kuvvetini sağlayan pervanenin veriminin yüksek olması için mümkün olabilen en büyük disk çapı tercih edilmelidir.

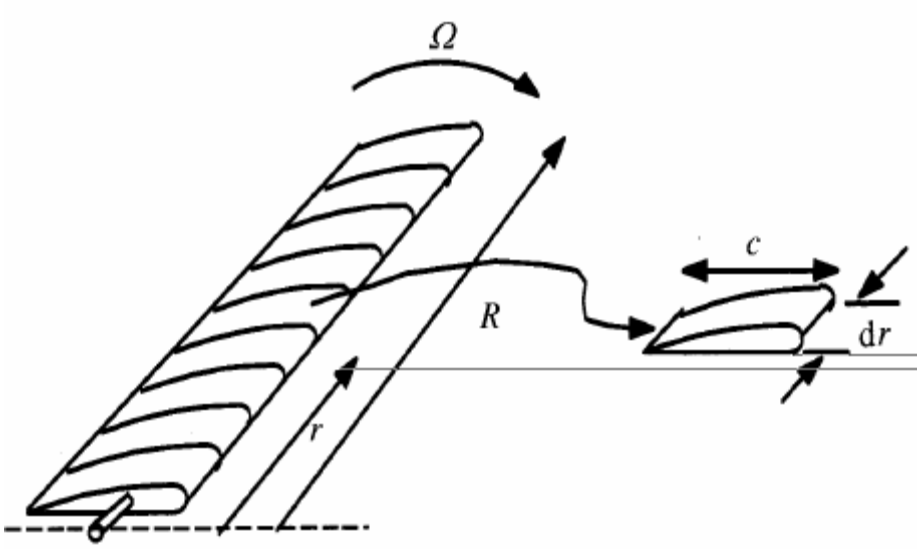
Froude momentum teorisi yardımıyla elde edilen (3.2), (3.7), (3.8) ve (3.16) numaralı bağıntılar, pervane tasarımda temel performans değerlerinin bulmasında kullanılmaktadır.

4. BÖLÜM

PALA ELEMANI TEORİSİ

4.1. Giriş

Froude momentum teorisi her ne kadar bir pervanenin performansı ile ilgili genel bilgi veriyor olsa da akım alanının sık sık daha detaylı incelenmesi palanın şekli ve kesit profili gibi bazı detayların performans üzerindeki etkisinin araştırılması gerekmektedir. Bu araştırmaları pala elemanı teorsi yardımıyla yapmak mümkündür. Ancak teoriye girmeden önce pervanenin detayları ile ilgili yeni bazı parametrelerin ve akımın fiziksel yapısının tanıtılması yararlı olacaktır.



Şekil 4.1 Pervane Eksenden R Uzaklıktaki Kesit Elemanı [32] .

4.2. Pala Elemanının Performansı

Bir pervanenin palalarının pervane ekseninden r uzaklıkta δr genişliğindeki kesit elemanını göz önüne alalım (Şekil 4.1). Pervanenin açısal hızı Ω olmak üzere r uzaklıktaki kesit elemanın hızı $\Omega r\left[m/sn\right]$ dır. İkinci bölümde de bahsedildiği gibi

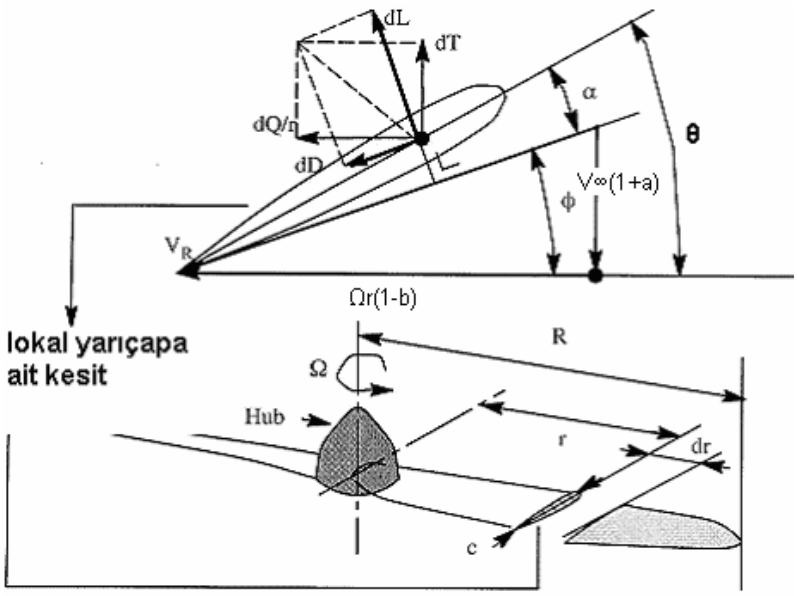
pervane düzlemini geçen akımın kendisi de girdap sisteminin etkisiyle pervanenin dönme yönünde $br\Omega$ hızıyla dönmektedir. Buna göre alınan pala elemanına pervane düzlemi içinde etkiyen radyal yöndeki hız

$$r\Omega(1-b) \tag{4.1}$$

olarak belirtilir. Pala elemanını etkiyen hız ise eksenel hız ile radyal hızın bileşkesi olan V_R hızıdır. Pervanenin ilerleme hızı V_∞ girdap sisteminin indüklediği hızı da aV_∞ olmak üzere pervanenin dönme düzlemini geçen akımın hızı

$$V_0 = V_\infty(1+a) \tag{4.2}$$

şeklinde ifade edilir.



Şekil 4.2. Pala Elemanına Etkiyen Kuvvetler [29].

Şekil 4.2 de görüldüğü gibi pala elemanı V_R hızının etkisiyle bir taşıma kuvveti oluşturur. V_R hızının doğrultusu, üç boyutlu bütün etkiler katıldıktan sonra belirlendiği için taşıma ve sürükleme kuvvetleri seçilen pala elemanı kesitinin α hücum açısındaki iki boyutlu C_D ve C_L katsayıları ile orantılı olarak değişir.

Taşıma kuvveti (δL) ve sürükleme kuvveti (δD)'nin bileşkesi olan ∂R kuvvetini ilerleme yönünde çekme kuvveti (δT) ve buna dik doğrultuda moment kuvveti ($\delta Q/\ r$) olmak üzere iki bileşene ayrılabilir.

Bu durumda V_R hızının dönme düzlemiyle yaptığı açı ϕ ve bileşke kuvvetin taşıma kuvveti doğrultusuyla yaptığı açı γ olmak üzere şekil 3.2 yardımıyla şu bağıntılar

$$Tg\gamma = \frac{\delta D}{\delta L} = \frac{C_D}{C_L} \tag{4.3}$$

$$V_R = \frac{V_\infty (1+a)}{Sin\phi} \tag{4.4}$$

$$V_R = \frac{r\Omega(1-b)}{Cos\phi} \tag{4.5}$$

olarak belirtilir. Diğer taraftan (4.4) ve (4.5) eşitliğinden

$$\frac{V_\infty}{\Omega r} = \frac{1-b}{1+a} Tg\phi \tag{4.6}$$

yazılabilir. Diğer taraftan çekme kuvveti (δT) ve moment kuvveti ($\delta Q/r$) sırasıyla,

$$\delta T = \delta R Cos(\gamma + \phi) \tag{4.7}$$

$$\frac{\delta Q}{r} = \delta R Sin(\gamma + \phi) \tag{4.8}$$

yazılır. Pala elemanından kazanılan faydalı güç δP_f

$$\delta P_f = V_\infty \delta T \tag{4.9}$$

pala elemanını döndürmek için harcanan güç δP_g

$$\delta P_g = \Omega \delta Q \tag{4.10}$$

olarak ifade edilir. Bu durumda pala elemanı verimi için,

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\partial P_f}{\partial P_g} \\ &= \frac{V_\infty \delta T}{\Omega \delta Q} \\ &= \frac{V_\infty \delta R Cos(\gamma + \phi)}{\Omega r \delta R Sin(\gamma + \phi)} \end{aligned} \tag{4.11}$$

veya (4.6) dan faydalanarak

$$\eta = \frac{(1-b)Tg\phi}{(1-a)Tg(\gamma + \phi)} \tag{4.12}$$

verim bağıntısı ifade edilir.

Pervanenin pala sayısı n_B ise, δr genişliğindeki pala elemanlarına etkiyen toplam taşıma ve sürükleme kuvvetleri C_L ve C_D iki boyutlu kesit karakteristikleri ve profiline ait veter uzunluğu c olmak üzere

$$\delta L = n_B c \ \delta r \frac{1}{2} \rho V_R^2 C_L \tag{4.13}$$

$$\delta D = n_B c \ \delta r \frac{1}{2} \rho V_R^2 C_D \tag{4.14}$$

şeklinde ifade edilir. Şekil 3.2 den çekme kuvvetini taşıma ve sürükleme kuvvetine bağlı olarak

$$\delta T = \delta L Cos\phi \ - \delta D Sin\phi \tag{4.15}$$

yazılır. (4.3), (4.13) ve (4.14) bağıntılarını (4.16) de yerine yazarak düzenlenirse

$$\delta T = n_B c \ \delta r \frac{1}{2} \rho V_R^2 (C_L Cos\phi \ - C_D Sin\phi)$$

$$\frac{\delta T}{\delta r} = n_B c \frac{1}{2} \rho V_R^2 \; C_L \left(Co\phi \; - \frac{C_D}{C_L} Sin\phi \right)$$

$$\frac{\delta T}{\delta r} = \frac{n_B c}{2} V_R^2 C_L (Cos\phi - Tg\gamma Sin\phi)$$

$$\frac{\delta T}{\delta r} = n_B c \frac{1}{2} V_R^2 C_L \left(\frac{Cos\phi Cos\gamma - Sin\phi \sin\gamma}{Cos\gamma} \right)$$

$$\frac{\delta T}{\delta r} = \frac{n_B c}{2} V_R^2 C_L \frac{Cos(\phi + \gamma)}{Cos\gamma} \tag{4.16}$$

bağıntısı elde edilir. Aynı şekilde moment kuvvetini, taşıma ve sürükleme kuvvetine bağlı olarak

$$\frac{\delta Q}{\delta r} = \delta L Sin\phi + \delta D Cos\phi \tag{4.17}$$

yazılır. (4.3), (4.13) ve (4.14) bağıntılarını (4.18) de yerine yazarak düzenlenirse

$$\begin{aligned} \frac{\delta Q}{\delta r} &= \frac{1}{2} n_B c \delta r V_R^2 (C_L Sin\phi - C_D Cos\phi) \\ &= \frac{n_B c r}{2} \rho V_R^2 C_L \frac{Sin(\phi + \gamma)}{Cos\gamma} \end{aligned} \tag{4.18}$$

bağıntısı elde edilir. Ayrıca pervane dönme düzleminde pala elemanlarının kapladığı planform alanının disk alanına oranı

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{n_B c \delta r}{2\pi r \delta r} \\ &= \frac{n_B c}{2\pi r} \end{aligned} \tag{4.19}$$

şeklindeki ifadeye pervanenin katılığı-sıklığı olarak adlandırılır.

Diğer taraftan pala elemanlarına etkiyen toplam çekme kuvveti δT kütlesel debi $\dot{m}$ olmak üzere, pervane dönme düzleminin δr genişliğindeki şeridinden geçen havanın momentumundaki artışa eşittir.

$$\delta T = \dot{m}\,\Delta V \tag{4.20}$$

Burada δT ifadesi,

$$V = \frac{V_s + V_\infty}{2} \qquad \rightarrow V_s = V_\infty(1+2a)$$
$$= V_\infty(1+a)$$

$$\Delta V = V_s - V_\infty$$
$$= 2aV_\infty$$

$$\dot{m} = \rho V(2\pi r\ \delta r)$$
$$= \rho V_\infty(1+a)(2\pi r\ \delta r) \tag{4.21}$$

bağıntılarını kullanarak çekme kuvvetinin pala boyunca değişimi

$$\delta T = 4\pi r\rho V_\infty^2 \delta r a(1+a) \tag{4.16a}$$

$$\frac{\delta T}{\delta r} = 4\pi r\rho V_\infty^2 a(1+a) \tag{4.16b}$$

serbest akım hızı V_∞ bağlı olarak ifade edilir. Benzeri şekilde pala elemanlarına etkiyen toplam δQ momenti aynı δr genişlikteki şeritten geçen havanın açısal momentumundaki artışa eşittir.

$$\delta Q = \dot{m}\,\Delta(\omega r^2) \tag{4.17}$$

Bu ifadeden yola çıkarak

$$\omega = 2b\Omega \tag{4.18a}$$

$$\dot{m} = \rho V_\infty(1+a)(2\pi r\delta r) \tag{4.18b}$$

(4.18a) ve (4.18b) bağıntıları (4.17) bağıntısına yerleştirildiğinde, şaft momentinin pala boyunca değişimi

$$\delta Q = 4\pi r^3 \delta r\rho V_\infty b(1+a)\Omega \tag{4.19a}$$

$$\frac{\delta Q}{\delta r} = 4\pi r^3 \rho V_\infty b(1+a)\Omega \tag{4.19b}$$

olarak elde edilir. $(\delta Q/\delta r)$ ve $(\delta T/\delta r)$ için bulunan bu son ifadeler daha önce bulunan ifadelerle karşılaştırılarak.

$$\begin{aligned} 4\pi r\rho V_\infty^2 a(1+a) &= \pi r\sigma\rho V_R^2 C_L Cos(\phi+\gamma) \\ 4\pi r^3 \rho V_\infty b(1+a)\Omega &= \pi r^2 \sigma\rho V_R^2 C_L Sin(\phi+\gamma) \end{aligned}$$

ve ayrıca V_R yerine

$$\begin{aligned} V_R &= \frac{V_\infty(1+a)}{Sin\phi} \\ &= \frac{r\Omega(1-b)}{Cos\phi} \end{aligned}$$

eşiti yazılıp düzenlenirse

$$\frac{a}{1+a} = \frac{\sigma}{4} C_L \frac{Cos(\phi+\gamma)}{Sin^2\phi} \tag{4.20}$$

$$\frac{b}{1-b} = \frac{\sigma}{4} C_L \frac{Cos(\phi+\gamma)}{Sin2\phi} \tag{4.21}$$

ifadeleri elde edilir [21-27].

4.3. Boyutsuz Parametreler

Pervane tasarımı ve analizinde kullanılmak üzere bu bölümde pala elemanı teorisi yardımı ile çıkartılan denklemleri boyutsuz bir şekle sokarak kullanmak mümkün.
Bunun için pervanenin T çekme kuvveti ve şaft momentinin

$$T = k_T \rho\ n^2 D^4 \tag{4.22}$$

$$Q = k_Q \rho\ n^2 D^5 \tag{4.23}$$

şeklinde bir k_T çekme katsayısı ve k_M şaft momenti katsayısı cinsinden ifade edilebileceği hatırlanırsa, çekme kuvveti yerine bu bağıntı kullanılarak ve ayrıca

$$\bar{r} = \frac{r}{R} \tag{4.24}$$

$$D = 2R$$

$$J = \frac{V_\infty}{nD}$$

olmak üzere, çekme kuvveti ve şaft momenti için yazılan (4.16),(4.19),(4.23) ve (4.26) bağıntıları sırasıyla,

$$\frac{\delta k_T}{\delta r} = \pi \bar{r} J^2 a(1+a) \tag{4.26a}$$

$$\frac{\partial k_Q}{\partial \bar{r}} = 4\pi^2 r^3 Jb(1+a) \tag{4.26b}$$

şekline getirilir.

5. BÖLÜM

PERVANE TASARIMI

5.1. Giriş

Önceki bölümlerde bir pervane etrafında meydana gelen hava akımının fiziksel yapısı incelenmiş, bu fiziksel yapıya uygun iki teoriden bahsedilmişti. Bu teorilerden birincisi olan taşıyıcı disk teorisi ve ikinci teori olarak da pala elemanı teorisi açıklanmıştı.. Bu teorilerden, taşıyıcı disk teorisi, bir pervanenin tasarımı ile ilgili çalışmalarda, pervaneye ait temel performans değerlerini vermekteydi. Yani, çekme kuvvetiyle akım hızları (serbest akım hızı, pervane düzlemindeki hız, izdeki hız gibi) ve pervane alanı arasında ilişki kurulmasını sağlamakta ve pervanenin ideal verimi hakkında bilgi vermektedir. İdeal disk teorisi, pala elemanının ayrıntılı geometrik şekli hakkında bilgi veremediğinden, pervane geometrisi ve bu geometriye bağlı pervane performansı ile ilgili ayrıntılı tasarım için, pala elemanı teorisi önemli bir olanak sağlamaktadır.

Bu bölümde, NACA 4412 profiline ait kritik mach sayısı tespit edilerek pervane uç hızı V_{max} belirlenecektir. Daha sonra pala boyunca istasyonlarda kullanılan profillere ait verilerinden taşıma katsayısı, sürükleme katsayısı, mach sayısı, basınç katsayısı gibi tasarımda kullanılacak boyutsuz sayılar ve V_{max} değeri FLUENT yazılımı kullanılarak elde edilecektir. Elde edilen bu veriler de kullanarak Froude momentum teorisi yardımıyla pervanenin temel performans değerleri, pala elemanı teorisi yardımıyla pervanenin geometrik şekli ve performans değerleri elde edilecektir. Hesaplamalar yapılırken, literatürde genel olarak görüldüğü gibi önceki bölümde elde edilen denklemler boyutsuzlaştırılarak kullanılacaktır. Bu bakımdan başlangıç kısımları tasarım işlemlerinde kullanılacak olan denklemlerin boyutsuzlaşmasına ayrılmıştır. Bundan sonra genel tasarım yaklaşımı ve tasarımın ayrıntıları açıklanmıştır. Son olarak,

tasarım sonucu elde edilen pervane geometrisinin tasarım şartlarındaki performansını görmek amacıyla analiz çalışmalarına yer verilmiştir.

5.2. Problem Tanımı

Kısa pistlere iniş kalkış yapabilen küçük uçaklarda kullanılabilecek çekme kuvveti (T) 1500 N, verimi (η) 0.97 olan ve uçağı 60 m/sn hızla ilerleten NACA 4412 profili kullanılarak üç palli bir pervane tasarımının yapılmasıdır. Hesaplama kolaylığı açısından pala elemanı 10 eşit istasyona bölünmüştür.

Şekil 5.1 ve şekil 5.2 de görüldüğü gibi V_{max} R, Φ, L, D, T, Q, α, a ve b verilerinin elde edilmesidir.

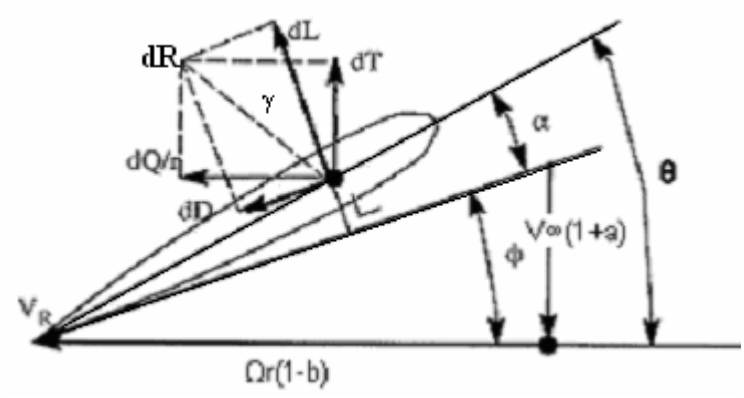
Yapılacak olan pervane tasarımı dört aşamada gerçekleştirilecektir. Bunlar,

- Pervaneye ait temel büyüklüklerin elde edilmesi için başlangıç verilerinden pala uç hızı (V_{max}) değerinin FLUENT yazılımı kullanılarak tespit edilmesi,

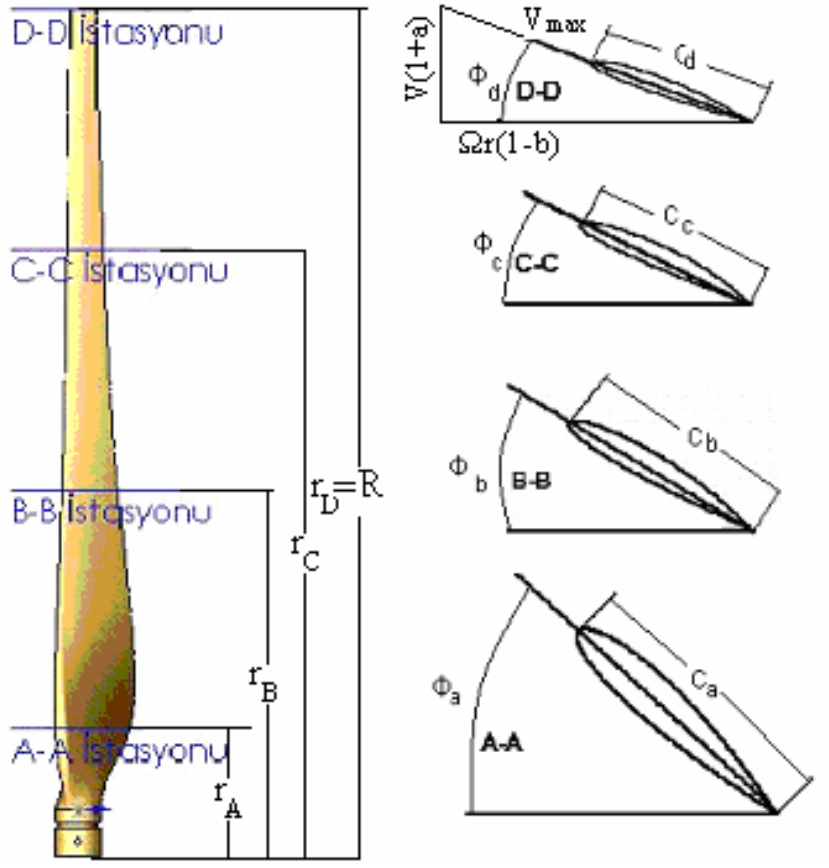
- Pervaneye ait temel performans değerlerinin (S, R, D, J, V_0, V_s gibi) froude momentum teorisi yardımıyla elde edilmesi,

- Pala elemanı teorisinde kullanılmak üzere, NACA 4412 profiline ait katsayıların FLUENT yazılımıyla elde edilmesi, froude momentum ve pala elemanı yardımıyla pala geometrisinin oluşturulması ve pala elemanına etkiyen kuvvetlerin hesaplanması yapılacaktır.

- Başlangıçta belirli kabullerle yapılan tasarımın optimize edilerek pala geometrisine ait yeni performans değerlerinin elde edilerek optimizasyon öncesi performans değerleriyle karşılaştırılması,



Şekil 5.1. Pala Elemanında Kullanılan Profile Etki Eden Kuvvetler.

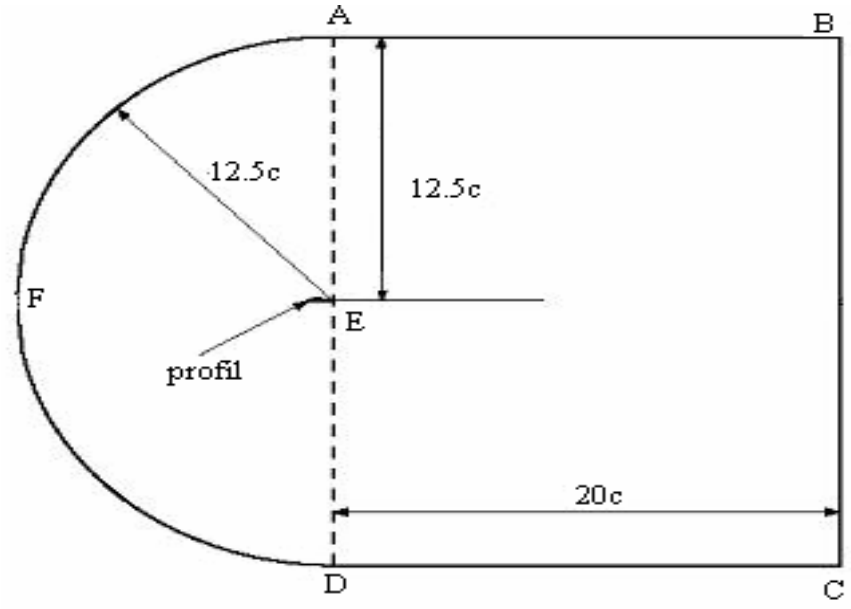


Şekil 5.2. Pala Elamanının Boyunca Profillerin Kökten Uca Doğru Dağılımı.

5.3 Akım Ortamının Modellenmesi

5.3.1 Akım Ortamının Geometrik Modellenmesi

Kanat veya pervane profilleri için veter uzunluğu c olmak üzere şekil 5.3 de görülen geometrik model önerilmektedir[33]. Çözüm için geometrimizde, şekil 5.4 de görüldüğü gibi mesh yapısı olarak Quadrilaterals, mesh tipi olarak Map kullanılmıştır.



Şekil 5.3. Akım Alanının Veter Uzunluğuna Bağlı Boyutlandırılması.

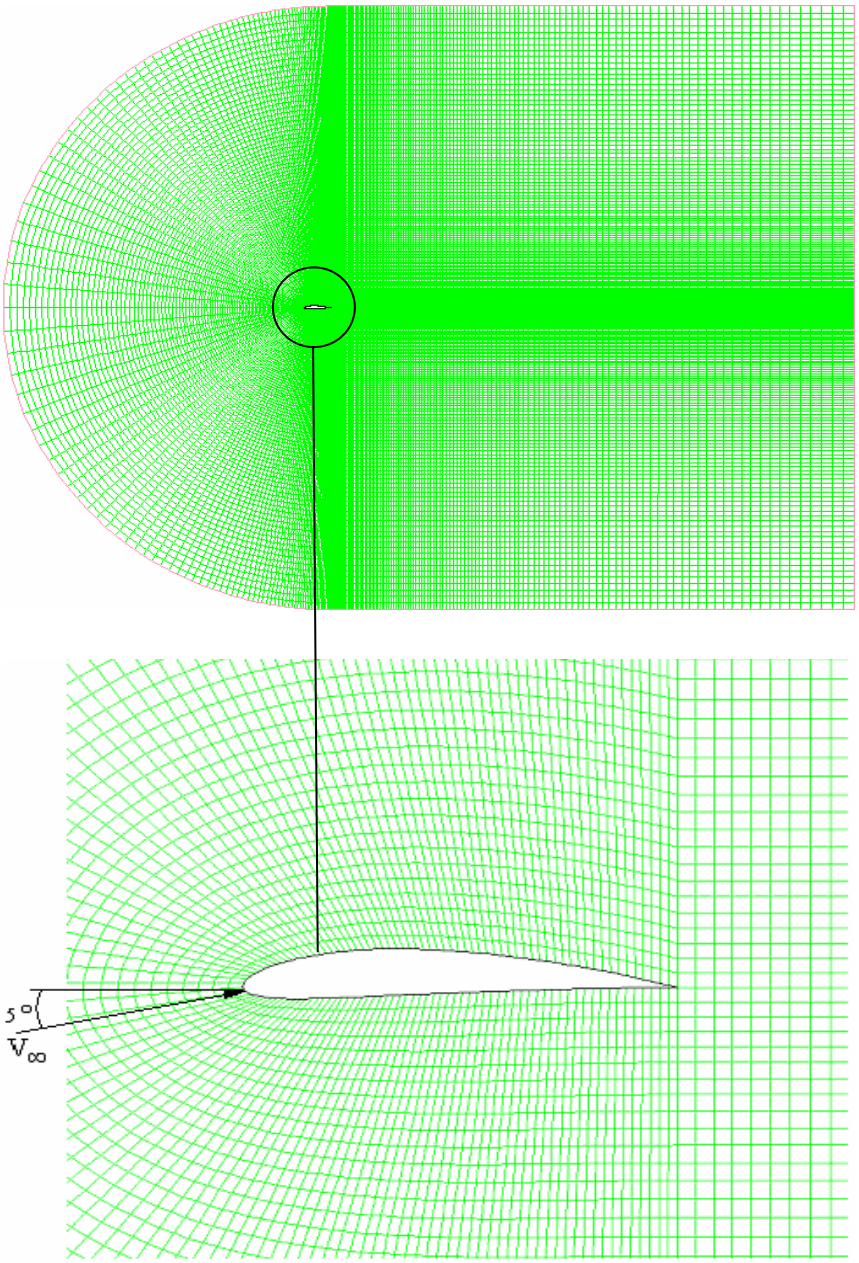
5.3.2 Matematik Model

Hesaplamalar için aşağıda verilen model kullanılmaktadır:
Türbülansın genellikle akıştaki dönme yada girdaptan etkilenmesinden dolayı FLUENT kodunun dönme yada girdabın etkilerinin de hesaba katılmasıyla daha doğru türbülans viskozitesinin hesaplanmasını sağlayan "Spalart-Allmaras" türbülans modeli seçildi.

Çalışmada aşağıdaki kabuller dikkate alınmaktadır:

- Akış iki boyutlu eksenel ve türbülanslıdır,
- Akışkanın viskozitesi (moleküler viskozite, μ) sıcaklıkla ekponansiyel olarak azalmaktadır,
- Akışkanın özgül ısısı ve ısıl iletkenlik katsayısının sıcaklıkla değişimi ihmal edilmektedir,

- Yer çekiminin etkisi ihmal edilmektedir,
- Profil etrafında ve akım alanı olarak belirlenen sınırlarda ısı transferinin olmadığı kabul edilmektedir,
- Akım ortamı ile dış akış arasında ısı transferi olmadığı kabul edilmektedir.
- Türbülans modeli için Spalart-Allmaras Modeli kullanılmıştır.



Şekil 5.4. Akım Alanının Grid Yapısı.

Spalart-Allmaras Modeli için Transport denklemi

Türbülans kinematik viskozitesi $\bar{v}$, türbülans viskozite üretimi $G_{v,}$ akışkan yoğunluğu ρ, duvarlarda türbülans viskozite etkisinin giderilmesi Y_v, moleküler kinematik viskozite υ, $\sigma_{\bar{vv}}$ ve C_{b2} sabitler olmak üzere Spart-Allmaras modeli için transport denklemi,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\bar{v})+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\bar{v}u_i)=G_v+\frac{1}{\sigma_{\bar{vv}}}\left[\frac{\partial}{\partial x_j}\left\{\left(\mu+\rho\bar{v}\right)\frac{\partial\bar{v}}{\partial x_j}\right\}+C_{b2}\rho\left(\frac{\partial\bar{v}}{\partial x_j}\right)^2\right]-Y_v+S_{\bar{v}} \quad \textbf{(5.1)}$$

şeklinde ifade edilir [34].

Türbülans viskozite modeli

viskoz sönümleme fonksiyonu f_{v1} olmak üzere türbülans viskozitesi μ_t,

$$\mu_t=\rho\bar{v}f_{v1} \quad (5.2)$$

$$f_{v1}=\frac{x^3}{x^3+C_{v1}^3} \quad (5.3)$$

$$x\equiv\frac{\bar{v}}{v} \quad (5.4)$$

olarak tanımlanır [39].

Türbülans üretim modeli

Türbülans üretimi $G_{v,}$

$$G_v=C_{b1}\rho\bar{S}\bar{v} \quad (5.5)$$

olarak tanımlanır. (5.5) bağıntısında geçen $\bar{S}$ ifadesi,

$$\bar{S} = S + \frac{\bar{v}}{\kappa^2 d^2} f_{v2} \tag{5.6}$$

duvardan mesafe d, κ sabit, dönme tensörü Ω_{ij}, deformasyon tensörü S ve viskoz sönümleme fonksiyonu f_{v2},

$$f_{v2} = 1 - \frac{x}{1 + x f_{v1}} \tag{5.7}$$

$$S \equiv \sqrt{2\Omega_{ij}\Omega_{ij}} \tag{5.8}$$

şeklindedir. Deformasyon tensörü ifadesinde geçen Ω_{ij} ifadesi,

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \tag{5.9}$$

şeklinde tanımlanır. Türbülansın duvarlarda yok edilmesi terimi Y_v,

$$Y_v = C_{w1}\rho f_w \left(\frac{\bar{v}}{d}\right)^2 \tag{5.10}$$

(5.10) ifadesinde geçen f_w,

$$f_w = g\left(\frac{1 + C_{w3}^6}{g^6 + C_{w3}^6}\right)^{\frac{1}{6}} \tag{5.11}$$

$$\mathrm{g} = \mathrm{r} + \mathrm{C}_{\mathrm{w2}}(\mathrm{r}^6 - \mathrm{r}) \tag{5.12}$$

$$r = \frac{\bar{v}}{\bar{S}\kappa^2 d^2} \tag{5.13}$$

yazılır. Spalart-Allmaras modelinde kullanılan C_{b1}, C_{b2}, $\sigma_{\bar{v}}$, C_{v1}, C_{w1}, C_{w2}, C_{w3} ve κ sabitleri,

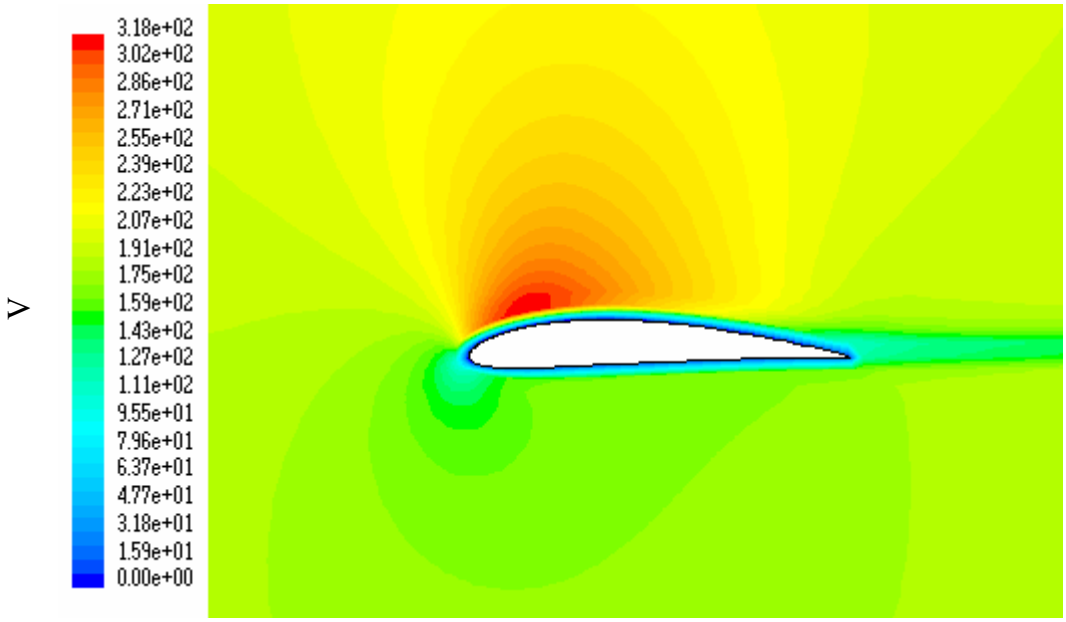
$C_{b1} = 0.1355$, $C_{b2} = 0.622$, $\sigma_{\tilde{v}} = \frac{2}{3}$, $C_{v1} = 7.1$, $C_{w2}=0.3$, $C_{w3}=2$, $\kappa=0.4187$ ve $C_{w1} = \frac{C_{b1}}{\kappa^2} + \frac{(1+C_{b2})}{\sigma_{\tilde{v}}}$ olarak verilmiştir [34].

5.4 Pervane Verilerinin Elde Edilmesi

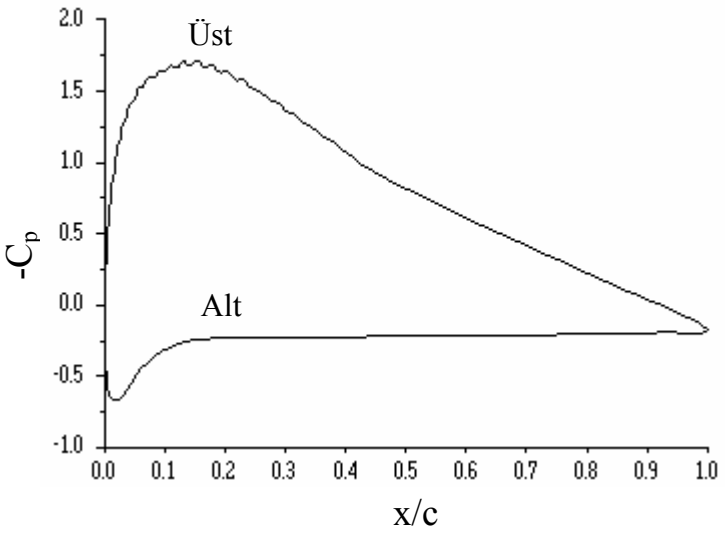
5.4.1 Pervane Uç Hızının Belirlenmesi

İkinci bölümde anlatıldığı gibi, tasarlanan pervane kök kısmı etrafında dönme yaparken pal boyunca Ωr hızıyla da ilerleme yapmaktadır. Pala elemanını serbest akım hızı ile dönmeden kaynaklanan çizgisel hızın bileşkesi olan V_R hızına maruz kalmaktadır. Pala ucunda V_R bileşke hızının belirli bir değerinde profil üzerindeki akım hızı ses hızına ulaşır. Profil üzerindeki akım hızı ses hızına ulaştığında şok dalgası oluşumu ve şoka bağlı olarak şekil 2.5 de görüldüğü gibi sürükleme kuvvetinde hızlı artış meydana gelmektedir. Şok dalgası oluşumu ve şoka bağlı sürükleme kuvvetindeki artışını önlemek için pala uç profiline etki eden bileşke akım hızı, profil üzerindeki akım hızının ses hızını aşmayacak şekilde tespit edilir ve V_{max} ile gösterilir.

Pala ucunda profile etki eden bileşke akım hızı V_{max} değerini tespit etmek için NACA 4412 profilini α =5 derecelik hücum açısı ve M=0.57 mach lık serbest akım hızında, profil üzerindeki akım hızı M=0.991964 olarak elde edilmiştir. Profil üzerinde tespit edilen hız değeri ses hızına çok yakın ve ses hızını aşmadığından, M=0.57 mach sayısı değeri, maksimum uç hız olan V_{max} olarak alınmıştır. Ses hızının 340 m/sn değeri için V_{max} =193.8 m/sn olarak elde edilir. Şekil 5.5 ve şekil 5.6 da pala elemanı uç profili etrafındaki hız dağılımı ve basınç katsayısının değişimi görülmektedir.



Şekil 5.5. Pala Elemanı Uç Profili Etrafındaki Hız Dağılımı.



Şekil 5.6. Pala Elemanı Uç Profili Etrafındaki Basınç Katsayısı Dağılımı.

5.4.2 Pervaneye Ait Temel Performans Değerlerinin Elde Edilmesi

Şekil 3.1 de görüldüğü gibi pervane düzlemindeki hız V_0 ve pervane izindeki hız V_S değerleri ile şekil 5.1 deki pervane çapı D, yarıçapı R, palasının süpürdüğü alan S, açısal hızı Ω, pervane ilerleme oranı J ile pervane devir sayısı n verileri elde edilecektir.

Pervanenin tasarımında veri olarak

Serbest Akım Hızı	$V_\infty \ (m/sn)$
Pervanenin Çekme Kuvveti	$T \ (N)$
Pal Sayısı	n_B
Pervanenin ideal verimi	η
Maksimum etkin hız	$V_{\max} \ (m/sn)$

değerleri alınmıştır. Ayrıca tasarım deniz seviyesindeki şartlarda gerçekleştirildiği ve pala boyunca bütün kesitlerde aynı tip profil kullanılmıştır.

Bu şartlar altında Frode momentum teorisinden faydalanarak elde edilen (3.16) bağıntısı kullanılarak pervane düzlemindeki hız V_0,

$$\eta_i = \frac{V_\infty}{V_0} \rightarrow V_0 = \frac{V_\infty}{\eta_i} \tag{5.14}$$

yine aynı teorinin bir sonucu olarak diskin iz bölgesindeki akım hızı (V_s)'yi değeri için (3.8) bağıntısından yararlanarak

$$V_0 = \frac{V_\infty + V_S}{2} \ \rightarrow V_S = 2V_0 - V_\infty \tag{5.15}$$

yazılabilir. Ayrıca pervane iz bölgesi alanı için (3.5) bağıntısı kullanılarak,

$$T = \rho S V_0 \left(V_S - V_0\right) \ \rightarrow S = \frac{T}{\rho V_0 \left(V_S - V_0\right)} \tag{5.16}$$

elde edilir.Pervane yarıçapı ve çapı sırasıyla

$$S = \pi R^2 \rightarrow \ R = \sqrt{\frac{S}{\pi}} \tag{5.17}$$

$$D = 2R \tag{5.18}$$

değerleri elde edilmiştir..

Pervanenin devir sayısının pala boyunca çizgisel hızları etkileyeceği açıktır. En büyük çizgisel hız pervane palasının en uç noktasında elde edilir. Uç kesitindeki etkin hız ise pervane ilerleme hızıyla çizgisel hızın bileşkesi olan V_R dir. V_R nin pala ucundaki değeri olan V_{max}'ı önceki paragrafta belirlemişti. Buna göre, pervaneyi geçen akımdaki eksenel ve radyal yönde indüklenmiş hızları ihmal ederek, pervanenin uç kesitindeki maksimum etkin hız için,

$$V_{\max}^2 = V_\infty^2 + (R\Omega)^2 \tag{5.19}$$

bağıntısını yazmak mümkündür. (5.19) bağıntısından hareketle açısal hız için

$$\Omega = \frac{\sqrt{V_{\max}^2 - V_\infty^2}}{R} \tag{5.20}$$

elde edilir. Pervanenin devir sayısı için de

$$\Omega = 2\pi n \rightarrow n = \frac{\Omega}{2\pi} \tag{5.21}$$

şeklinde yazılır. Pervanenin ilerleme oranı J değeri için (2.2) numaralı bağıntısı kullanılarak

$$J = \left(\frac{V_\infty}{nD}\right)$$

hesaplanır. Bu verilenlerden hareketle aşağıdaki verilen elde edilmiştir.

Pervane düzlemindeki akım hızı	V_0=61.855 m/sn
Pervane izindeki akım hızı	V_S=63.711 m/sn
Pervanenin alanı	S=5.333 m^2
Pervanenin yarıçapı	R=1.303 m
Pervanenin çapı	D=2.606 m
Pervanenin açısal hızı	Ω=141.425 rad/sn
Pervanenin devir sayısı	n=22.508 1/sn
İlerleme oranı	J=1.022

5.5 Pala Geometrisinin Elde Edilmesi

Görüldüğü gibi mevcut verilerle ve yapılan kabullerle, taşıyıcı disk teorisi çerçevesinde pervanenin çapı ve devir sayısı için ilk değerler elde edilmekte, ancak taşıyıcı disk teorisi pervane palasının geometrik ayrıntıları olan veter boylarının ve oturma açılarının pala boyunca dağılımını vermemektedir.

Pala geometrisinin ayrıntılarının hesaplanmasında pala elemanı teorisinden yararlanılacaktır. Bu aşamadan itibaren pervanenin dizayn problemini, pervane ilerleme hızı (V_∞), pervane pala sayısı (n_B), pervane çekme kuvveti (T), pervane çapı (D) ve pervane devir sayısı (n) ve şekil 5.2 görüldüğü gibi kesit profili seçilmiş olan pervanenin bir palası boyunca veter uzunlukları c_i ve kesit konum açılarını Φ_i değerlerinin elde edilmesi şeklindedir.

Kesit konum açılarının ve veter uzunluklarının elde edilmesinde aşağıda gösterilen işlem sırası takip edilecektir.

- İstasyonlara ait lokal yarıçapların elde edilmesi,
- İstasyonlardaki kesit profillerine etki eden bileşke akım hızlarının elde edilmesi,
- İstasyonlardaki profillere ait C_l ve C_d değerlerinin elde edilmesi,
- İstasyonlardaki profillere ait γ açısının elde edilmesi
- Son olarak da veter boyları ve profil oturma açılarının bulunması şeklinde sıralanabilir.

Pervane palası burulmuş kanat gibi olduğundan pala elemanına etki eden aerodinamik kuvvetlerin gerçeğe yakın olarak hesaplanabilmesi için genellikle pala elemanı belirli sayıda istasyona bölünerek hesaplamalar yapılır. Bu çalışmada pervane palası eşit aralıklarda 10 istasyona bölünmüştür. R pervane yarıçapı olmak üzere lokal yarıçap r değerleri

$$r_i = \frac{R}{10} i \rightarrow (i = 1,2...10) \tag{5.22}$$

bağıntısıyla elde edilir.

Pervane ilerleme hızı V_∞ ve dönmeden kaynaklanan hız Ωr olmak üzere Pala boyunca profillere etki eden bileşke akım hızları,

$$V_{Ri}^2 = V_\infty^2 + \left(r_i \Omega\right)^2 \rightarrow i = (1,2...10) \tag{5.23}$$

bağıntısıyla hesaplanır. Hesaplanan bileşke akım hızları lokal yarıçap değerleriyle birlikte tablo 5.1 de verilmiştir.

Pala elemanında kullanılan profil aynı olmasına rağmen pala boyunca kesit profillerine etki eden bileşke akım hızı kökten uca doğru değiştiği için pala boyunca Cl ve Cd değerleri değişecektir. FLUENT yazılımıyla elde edilen Cl ve Cd bileşke akım hızı V_R bileşke hızları için elde edilen veriler kullanılacaktır.

Tablo 5.1 Pala boyunca profile etki eden bileşke akım hızındaki değişimi

R_i (m)	V_R (m/sn)	M
0.13	63	0.18
0.26	70	0.21
0.39	82	0.24
0.52	95	0.28
0.65	110	0.32
0.78	126	0.37
0.91	142	0.42
1.04	159	0.47
1.17	176	0.52
1.30	194	0.57

Taşıma kuvveti ile ve bileşke kuvvet arasındaki açı γ değeri (4.3) bağıntısı yardımıyla,

$$\gamma_i = \tan^{-1}\left(\frac{C_{di}}{C_{li}}\right) \rightarrow i = (1,2...10) \tag{5.24}$$

hesaplanır.

Pervane palası boyunca istasyon sayısı m olmak üzere istenildiği gibi seçilebilmektedir. Ayrıca dizayn işlemlerinde boyutsuz denklemler kullanıldığı gibi, pala boyuda 1 birim olarak alınmaktadır. Böylece pala elemanının genişliği

$$\nabla \bar{r} = \frac{1}{m} \tag{5.25}$$

ve i' inci istasyonun yarıçapsal konumu

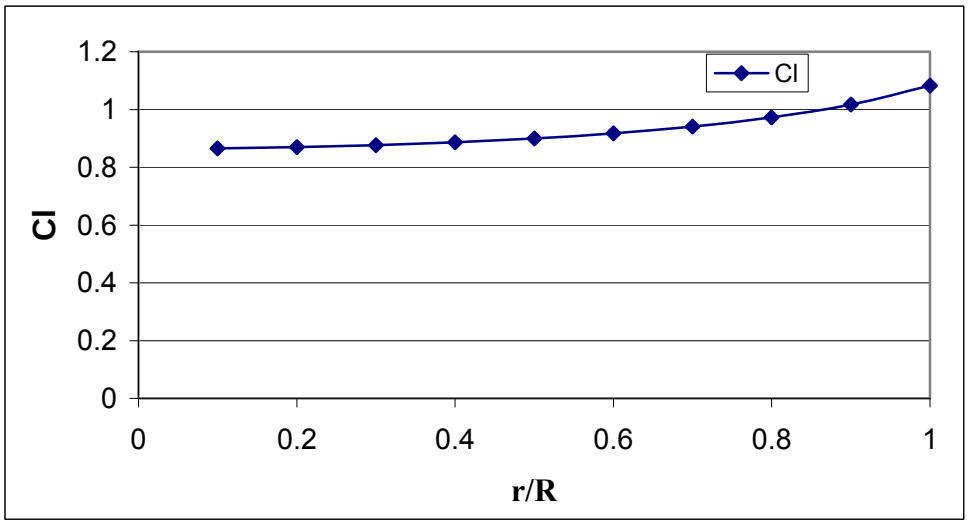
$$\bar{r}_i = \nabla \bar{r} \cdot i \tag{5.26}$$

şeklinde bulunur. Tablo 5.2 de γ, C_l, C_d ve r/R değerleriyle birlikte verilmiştir. Ayrıca C_l ve C_d 'nin r/R ile değişimi şekil 5.7 ve şekil 5.8'de verilmiştir.

Tablo 5.2 Pala boyunca istasyonlardaki C_l, C_d ve γ değerleri.

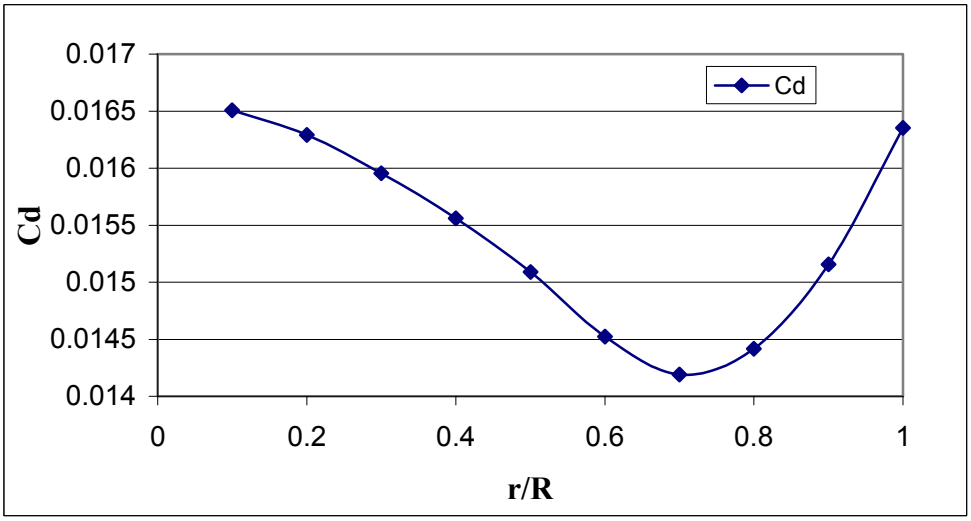
r/R	C_l	C_d	γ (^{0})
0.1	0.866	0.0165	1.092
0.2	0.870	0.0163	1.073
0.3	0.876	0.0159	1.043
0.4	0.886	0.0156	1.006
0.5	0.899	0.0151	0.961
0.6	0.917	0.0145	0.907
0.7	0.941	0.0142	0.864
0.8	0.973	0.0144	0.849
0.9	1.017	0.0152	0.854
1.0	1.082	0.0164	0.866

Şekil 5.6 da görüldüğü gibi 5 derecelik hücum açısında bileşke hıza bağlı pala kökünden ucuna doğru taşıma katsayısında artış görülmektedir.



Şekil 5.7. Taşıma Katsayısının Pala Boyunca Değişimi.

2.bölümde "Geometrik Hatve" kısmında bahsedilen, pervane ekseninden yarıçapın %70'i kadar uzaklıkta kullanılan profilin sürükleme katsayısının en düşük düzeyde olduğu görülmektedir (Şekil 5.8).



Şekil 5.8. Sürükleme Katsayısının Pala Boyunca Değişimi.

Pala elemanında kullanılan profile ait veter boyları ve kesit konum açılarının elde edilmesi, pervane katılığı için tanımlanan (4.19) bağıntısından, veter uzunlukları c çekildiğinde,

$$\sigma = \frac{n_B c}{2\pi r} \rightarrow c = \frac{2\pi r \sigma}{n_B} \tag{5.27}$$

bağıntısı elde edilir. Burada r pala boyunca seçilen istasyonun yarıçapsal konumunu ve n_B pal sayısını ve σ lokal katılığı belirtmektedir. (5.27) bağıntısındaki veteri hesaplamak için katılık σ değerine ihtiyaç vardır. (4.20) bağıntısında σ çekilirse

$$\sigma = \frac{4}{C_l} \cdot \frac{a}{1+a} \cdot \frac{(Sin(\Phi))^2}{Cos(\gamma + \Phi)} \tag{5.28}$$

bağıntısı elde edilir. Burada C_L kesit profiline ait taşıma katsayısı ve γ taşıma kuvveti ile bileşke kuvvet arasındaki açıdır. σ değerinin hesaplanabilmesi için eksenel hız katsayısı a ve profil kesit konum açısı Φ değerlerine ihtiyaç vardır. Kesit konum açısı Φ açısı (4.6) denkleminden çekilerek

$$\frac{V_\infty}{\Omega\ r} = \frac{1-b}{1+a} Tg(\Phi) \rightarrow \Phi = Tg^{-1}\left(\frac{V\infty}{\Omega\ r} \cdot \frac{1+a}{1-b}\right) \tag{5.29}$$

elde edilir. Ancak (5.29) bağıntısındaki Φ değerini hesaplamak için eksenel hız indükleme katsayısı a ve radyal hız indükleme katsayısı b değerlerinin bilinmesi gerekmektedir.

Sonuç olarak tasarım problemi, her bir pala elemanı için a ve b ile gösterilen eksenel ve radyal hız indükleme parametrelerinin bilinmesi gerekmektedir. Profil kesit konum açısı Φ değerini bulmak için (4.20) ve (4.21) denklemlerinin eşzamanlı olarak çözümünden yararlanmak mümkündür. Ancak bu çözümde iki zorluk vardır. Öncelikle her iki denklem de non-lineer olup, analitik çözüm mümkün değildir. Ayrıca (5.29) bağıntısında görüldüğü gibi Φ büyüklüğü a ve b katsayılarına bağlıdır.

a parametresi için bir kabul yaparak çözümü kolaylaştırmak mümkündür. Böyle bir kabul, Froude momentum teorisindeki kabullere dayanarak yapılabilir. Bu teoride "ideal diskin her tarafından geçen akımın aynı hızda olduğu" kabul edilmişti. Bu kabul ile a parametresinin pala boyunca sabit olduğu varsayılabilir. Böylece diskin ideal verimi önceden seçilmek kaydıyla, ideal verim ve pervane düzleminden geçen akımın hızı için yapılan (4.2) numaralı bağıntıdan hareketle a parametresi için

$$\begin{aligned} a &= \frac{V_0 - V_\infty}{V_\infty} \\ &= \frac{1}{\eta_i} - 1 \end{aligned} \tag{5.30}$$

bağıntısıyla hesaplanır. a parametresi bu şekilde belirlendiği taktirde, (4.20) ve (4.21) denklemleri arasından Φ büyüklüğü yok edilerek b için analitik çözüm elde edilir. Bunun için (4.21) denklemi (4.20) denklemine bölerek,

$$\begin{aligned} \frac{b}{1-b} &= \frac{a}{1+a} \cdot \tan(\gamma + \Phi) \cdot \tan(\Phi) \\ &= \frac{a}{1+a} \cdot \frac{\tan(\gamma) + \tan(\Phi)}{1 - \tan(\gamma)\tan(\Phi)} \tan(\Phi) \end{aligned} \tag{5.31}$$

ifadesi elde edilir. Diğer yandan, (4.6) denkleminden $\tan\Phi$ ifadesi çekilirse

$$\tan(\Phi) = \frac{1+a}{1-b} \frac{V_\infty}{\Omega\ r} \tag{5.32}$$

elde edilen (5.32) bağıntıdaki b dışında kalan tüm büyüklükleri içine alacak şekilde

$$\beta = (1+a)\frac{V_\infty}{\Omega\ r} \tag{5.33}$$

tanımlaması yapılarak

$$\tan(\Phi) = \frac{\beta}{1-b} \tag{5.34}$$

yazılabilir. Bulunan (5.34) bağıntısı (5.31) de yerine yerleştirilip, bağıntıyı b için düzenlenirse,

$$b^2 - c_1 b + c_2 = 0 \tag{5.35}$$

gibi ikinci dereceden bir bilinmeyenli denklem elde edilir. Burada c_1 ve c_2 büyüklükleri,

$$c_1 = 1 - \frac{\beta \tan(\gamma)}{1+a} \tag{5.36}$$

$$c_2 = \frac{a}{1+a}\beta\left(\beta + \tan(\gamma)\right) \tag{5.37}$$

şeklinde tanımlanabilir. İkinci dereceden bir denklem olan (5.35) un kökleri

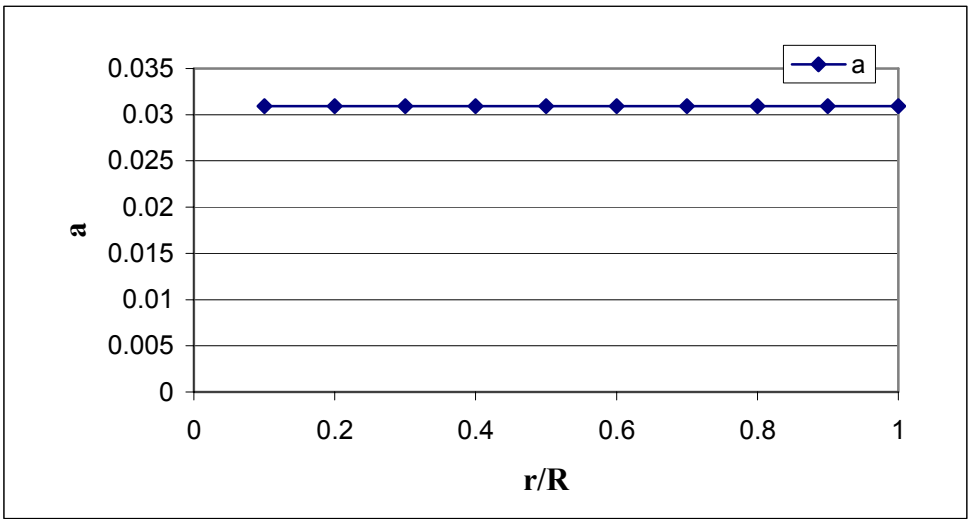
$$b_{12} = \frac{c_1 \pm \sqrt{c_1 - 4c_2}}{2} \tag{5.38}$$

şeklinde bulunur. Bulunan bu değerler ve diğer bilinen verilerle birlikte (5.29), (5.28), (5.27) bağıntılarında kullanılarak her istasyon için Φ, σ ve c değerleri hesaplanır. Hesaplanan a, b, Φ, σ ve c değerleri tablo 5.3 de verilmiştir.

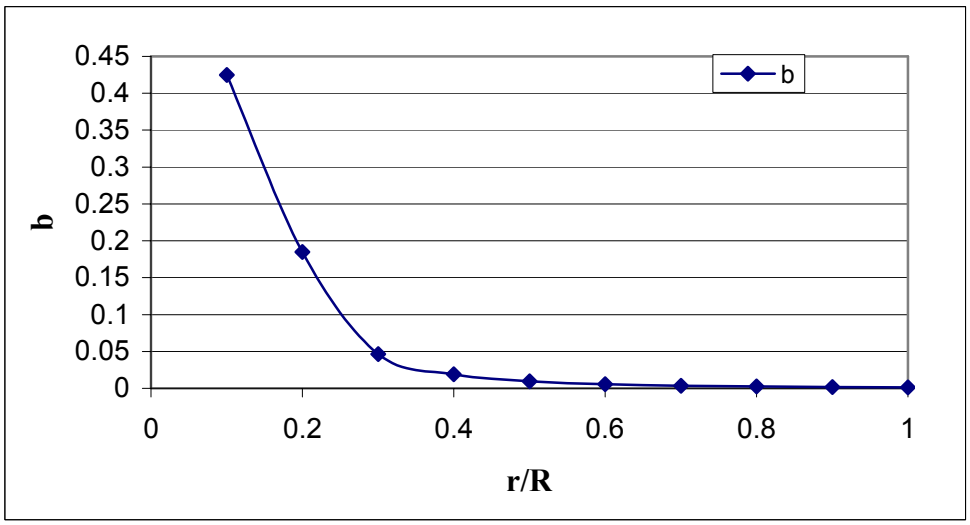
Tablo 5.3 de eksenel yöndeki hız indükleme parametresi a değerinin Frode momentum teorisindeki kabulden dolayı, pala boyunca değişmediği şekil 5.9 dede görülmektedir. Fakat şekil 5.10 da görüldüğü gibi radyal yönde hız indükleme parametresi b'nin pervane dönme ekseninden uca doğru gidildikçe azaldığı görülmektedir.

Tablo 5.3 a, b, Φ, σ ve c Değerlerinin Pala Boyunca İstasyonlardaki Değerleri.

r/R	a	b	Φ	σ	c
0.1	0.031	0.4250	67	0.315	0.086
0.2	0.031	0.1848	55	0.164	0.090
0.3	0.031	0.0465	47	0.109	0.089
0.4	0.031	0.0191	39	0.072	0.079
0.5	0.031	0.0097	34	0.050	0.068
0.6	0.031	0.0056	29	0.036	0.058
0.7	0.031	0.0036	26	0.026	0.051
0.8	0.031	0.0024	23	0.020	0.044
0.9	0.031	0.0017	20	0.015	0.038
1.0	0.031	0.0012	19	0.012	0.032

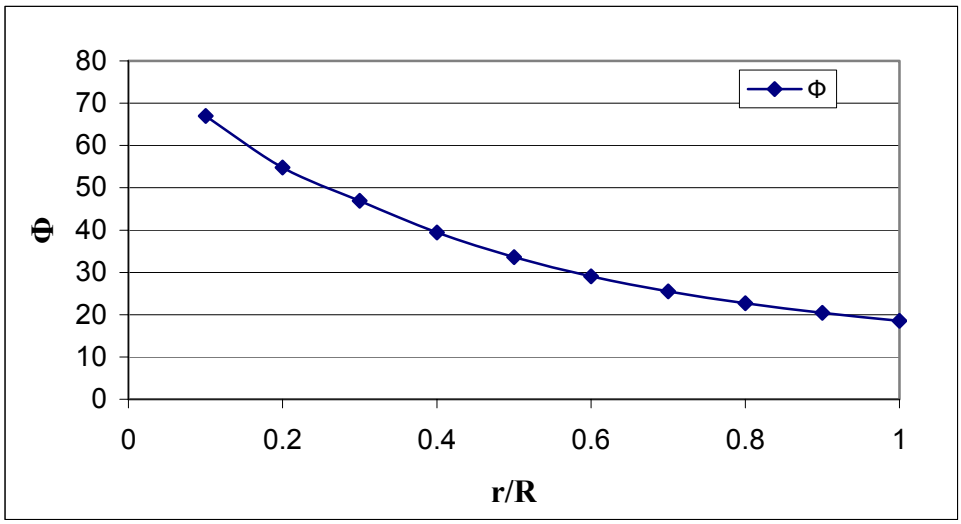


Şekil 5.9. Eksenel Yönde Hiz İndükleme Parametresinin Pala Boyunca Değişimi.

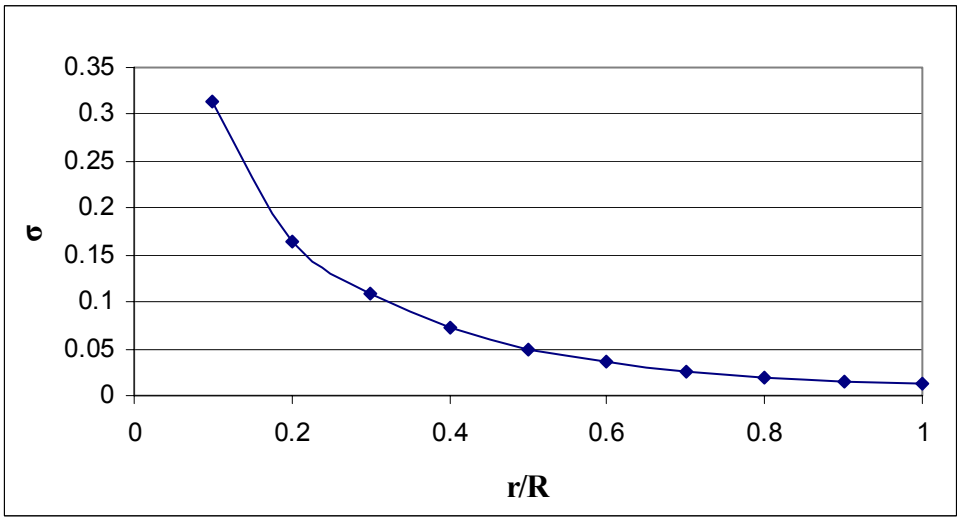


Şekil 5.10. Radyal Yönde Hiz İndükleme Parametresinin Pala Boyunca Değişimi.

Şekil 5.11 da görüldüğü gibi profil kesit konum açısı Φ değerinin ve şekil 5.12'de lokal katılık σ değerinin dönme ekseninden uca doğru gidildikçe azaldığı görülmektedir. Ayrıca veterinde pala boyunca değişimi şekil 5.13'de görülmektedir.

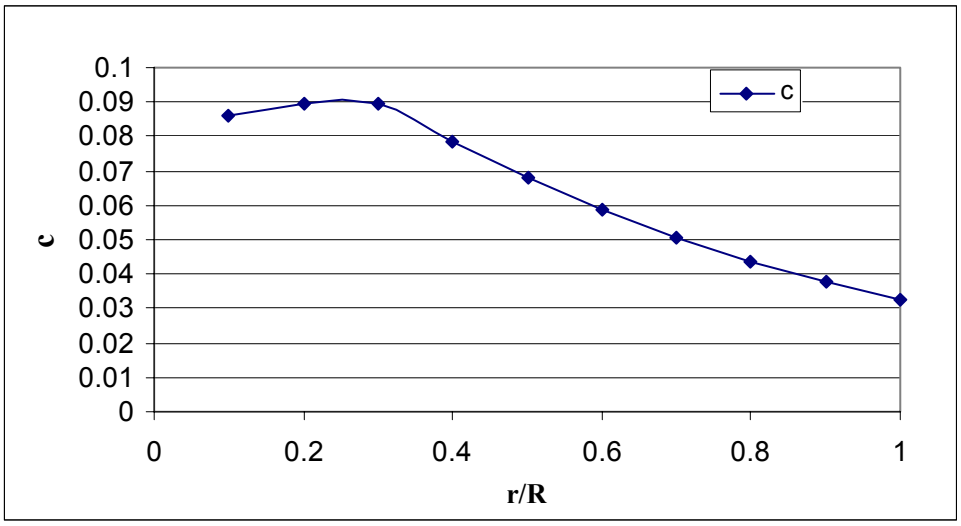


Şekil 5.11. Kesit Konum Açısının Pala Boyunca Değişimi.



Şekil 5.12. Lokal Katılığın Pala Boyunca Değişimi.

Başlangıçta pervane düzlemini geçen akışkanının hızında eksenel ve radyal yönde bir hızlanmanın olmadığı kabul edilmiş ve bileşke akım hızları bu kabullere göre elde edilmişti.



Şekil 5.13. Veterin Uzunluğunun Pala Boyunca Değişimi.

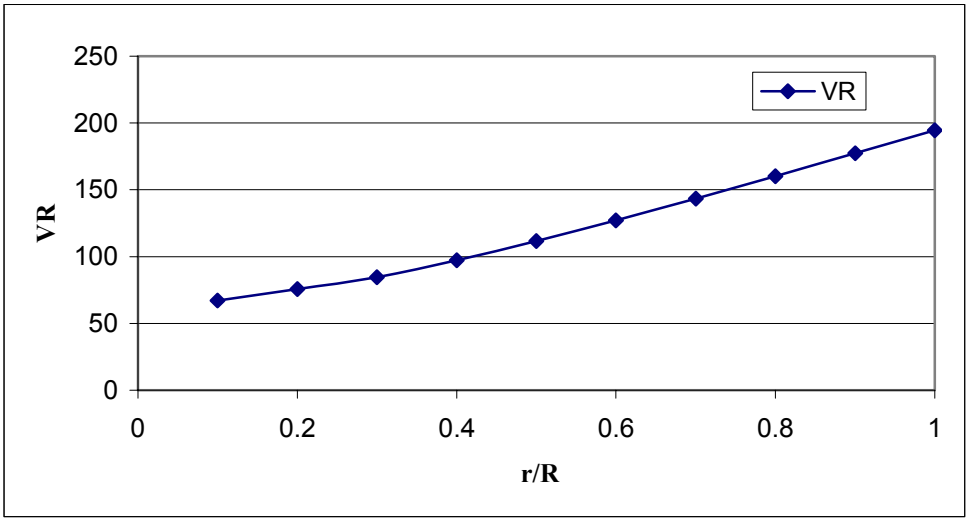
Oysa (4.1), (4.2) bağıntılarında ve şekil 4.2 dede görüldüğü gibi pervane düzlemini geçen akışkan eksenel ve radyal yönde akımı indükledikleri için pala boyunca profile etki eden bileşke hız,

$$V_{Ri}^2 = (V_\infty (1+a_i))^2 + \left(r_i \Omega (1-b_i)\right)^2 \rightarrow i = (1,2...10) \qquad (5.39)$$

bağıntısı ile hesaplanır. Hesaplanan bileşke hızlar tablo 5.4 ve şekil 5.14 de verilmiştir

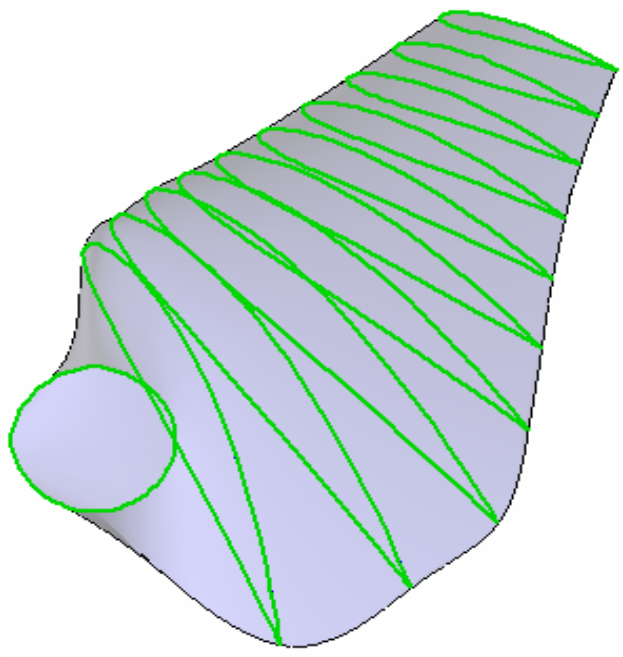
Tablo 5.4 Bileşke Hızın ve Mach Sayısının Pala Boyunca Değişimi

r/R	V_R (m/sn)	M
0.1	67	0.20
0.2	76	0.22
0.3	85	0.25
0.4	97	0.29
0.5	112	0.33
0.6	127	0.37
0.7	143	0.42
0.8	160	0.47
0.9	177	0.52
1	195	0.57



Şekil 5.14. Bileşke Akım Hızının Pala Boyunca Değişimi.

Profile etki eden bileşke hız için başlangıçta Lokal yarıçapları ve bu yarıçaplara ait profil oturma açıları hesaplanmış olan pervane pali şekil 5.15 de görülmektedir.



Şekil 5 15. Elde Edilen Verilerle Oluşturulan Pala Elemanı.

5.6 Pervane Performans Değerlerinin Elde Edilmesi

Pervane performans değerlerinden L ve D kuvvetlerini hesaplamak için (2.8) ve (2.9) denklemi her bir profil için düzenlendiğinde,

$$L_i = \frac{1}{2}\rho V_{Ri}^2 C_{li} c_i \rightarrow i = (1,2.....10) \tag{5.40}$$

$$D_i = \frac{1}{2}\rho V_{RI}^2 C_{di} c_i \rightarrow i = (1,2.....10) \tag{5.41}$$

bağıntıları elde edilir. T çekem kuvveti için (4.16) bağıntısı pala boyunca istasyonlara göre düzenlendiğinde, çekme kuvvetinin lokal yarıçapa göre değişimi,

$$\frac{\delta T_i}{\delta r_i} = \frac{n_B c_i}{2} V_{Ri}^2 C_{Li} \frac{Cos(\phi_i + \gamma_i)}{Cos(\gamma_i)} \rightarrow i = (1,2,.....10) \tag{5.42}$$

şeklinde yazılır ve toplam çekme kuvveti T

$$T = \sum_{i=1}^{10} T_i \tag{5.43}$$

bağıntısıyla elde edilir. Aynı şekilde şaft momenti Q değeri için (4.18) bağıntısı

$$\frac{\delta Q_i}{\delta r_i} = \frac{n_B c_i r_i}{2} \rho V_{Ri}^2 C_{Li} \frac{Sin(\phi_i + \gamma_i)}{Cos(\gamma_i)} \rightarrow i = (1,2,.....10) \tag{5.44}$$

şeklinde yazılır ve toplam şaft momenti Q,

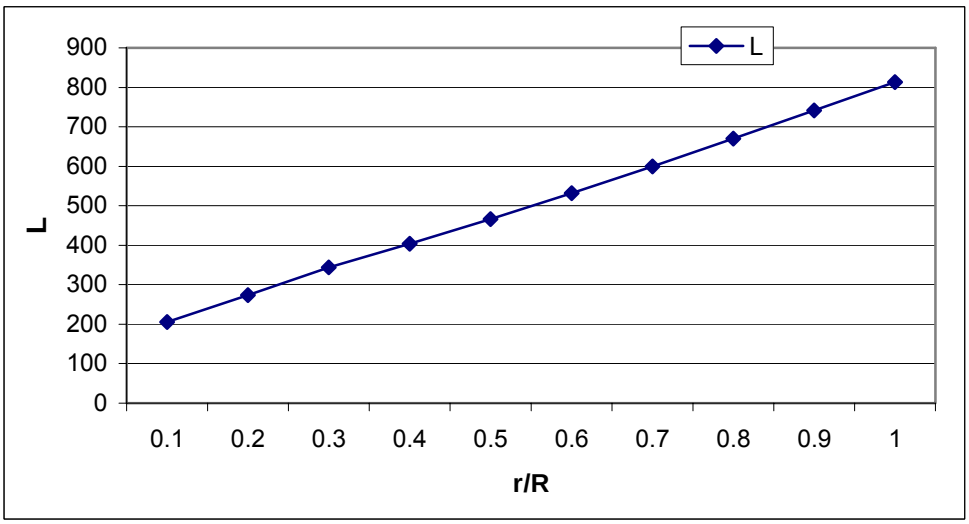
$$Q = \sum_{i=1}^{10} Q_i \tag{5.45}$$

bağıntısı ile elde edilir. İstasyonlara göre hesaplanan L,D,T ve Q değerleri tablo 5.5 de, pala boyunca değişimi ise şekil (5.17- 5.20) de verilmiştir.

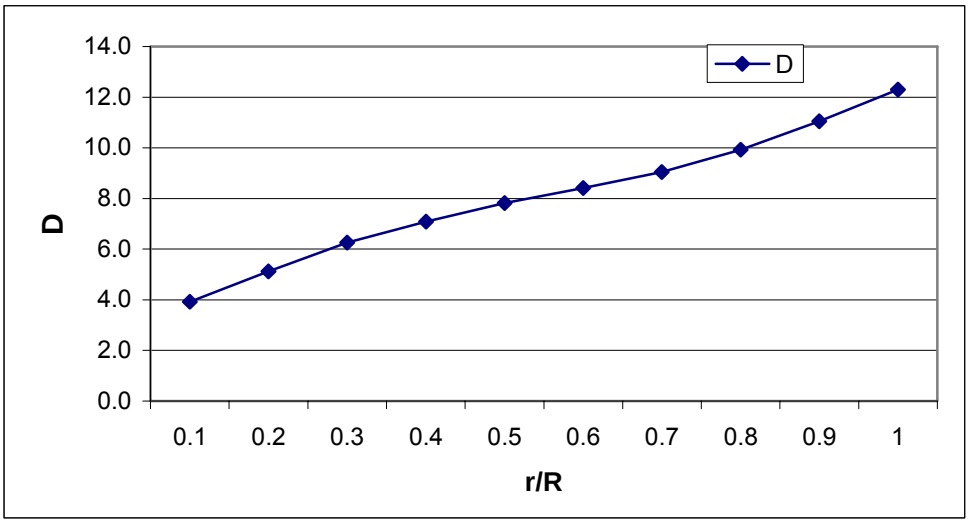
Tablo 5.5 Taşıma, Sürükleme, Çekme Kuvvetleri ve Şaft Momentinin Pala Boyunca Dağılımı.

r/R	L	D	T	Q
0.1	206	3.9	13	4
0.2	273	5.1	39	15
0.3	344	6.3	70	30
0.4	404	7.1	100	45
0.5	466	7.8	131	59
0.6	532	8.4	161	73
0.7	600	9.0	192	87
0.8	670	9.9	222	101
0.9	741	11.0	252	115
1	814	12.3	283	130

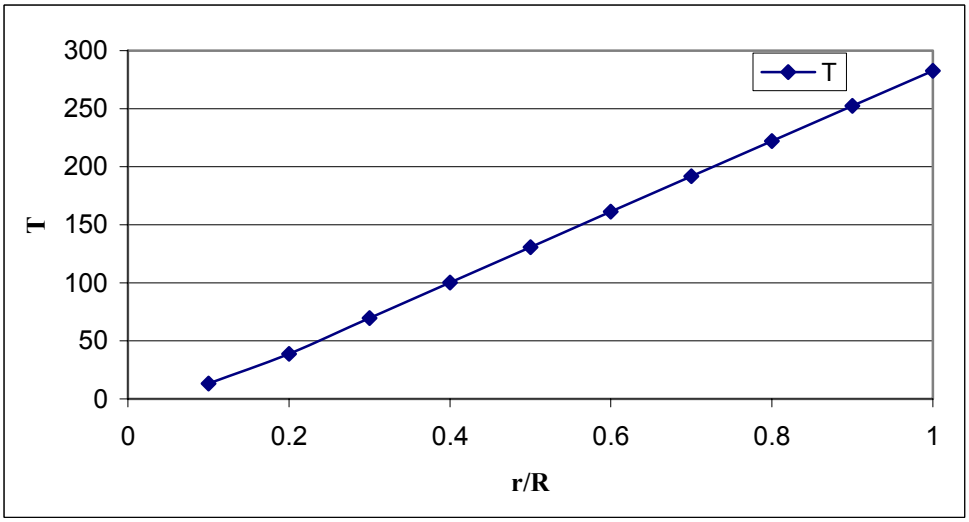
Son olarak pervane verimi η değeri için (2.28) bağıntısı $\eta = \frac{TV_\infty}{2\pi nQ}$ yardımıyla hesaplanır.



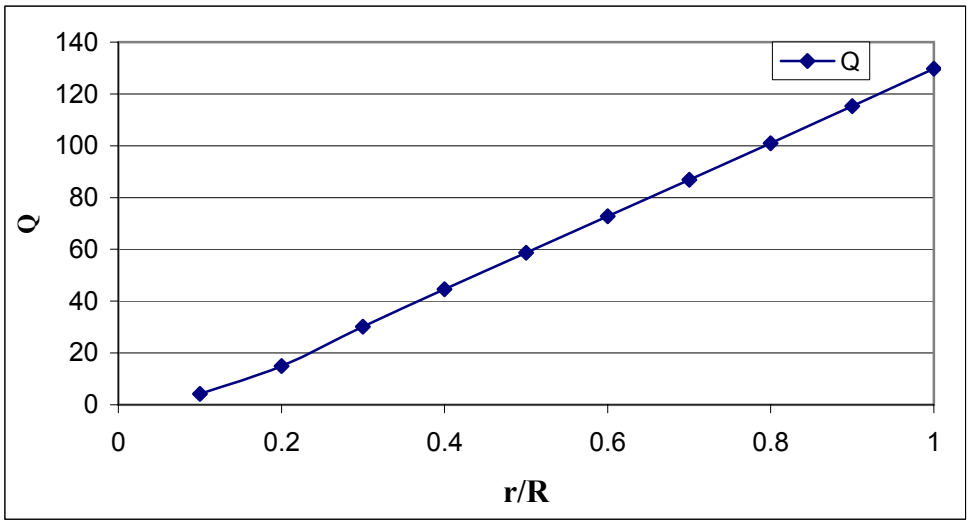
Şekil 5.17. Taşıma Kuvvetinin Pala Boyunca Dağılımı.



Şekil 5.18. Sürükleme Kuvvetinin Pala Boyunca Dağılımı.



Şekil 5.19. Çekem Kuvvetinin Pala Boyunca Dağılımı.



Şekil 5.20. Şaft Momentinin Pala Boyunca Dağılımı.

(5.43), (5.45) ve (2.28) bağıntıları yardımıyla toplam T, toplam Q ve pervane verimi ,

Çekme Kuvveti	T= 1462.721 N
Şaft momenti	Q= 658.1702 Nm
Verim	η= 0.94334

olarak elde edilir.

5.7. Pervane Analizi

Tasarım aşamasında eksenel yönde hız indükleme katsayısı a yı Froude momentum teoremi kabullerinden hareketle sabit kabul edilmişti. Tasarım bir bakıma bu kabul üzerine yapılmıştı. Fakat a nın sabit olmadığı pervane palası boyunca değişeceğini hesaba katarak a ve b değerlerinin elde edilmesi gerekmektedir. Eksenel yönde hız indükleme parametresi a için, (4.20) numaralı denklem a ya bağlı olarak düzenlendiğinde,

$$a_i = \frac{\sigma_i}{4} C_{Li} \frac{Cos(\phi_i + \gamma_i)}{(Sin(\phi_i))^2}(1 + a_i) \rightarrow i = (1,2,.....10) \qquad (5.46)$$

bağıntısı elde edilir. (5.46) numaralı denklem, iterasyon yapılarak a değeri elde edilecektir. a nın belirli bir değere yakınsaması için şöyle bir yaklaşım uygulanacaktır. İterasyona giren a_i ve itersayon sonucu elde edilen $\bar{a}_i$ değerlerinin aritmetik ortalaması

alınarak bir sonraki işlemde itersyona sokularak a_{i+1} değeri elde edilecektir. a_{i+1} değerini formüle edersek,

$$a_{i+1} = \frac{a_i + \bar{a}_i}{2} \tag{5.47}$$

elde edilir. Aynı şekilde radyal yöndeki hız katsayısı b için (4.21) numaralı bağıntı düzenlenirse

$$b_i = \frac{\sigma_i}{4} C_{li} \frac{Cos(\phi_i + \gamma_i)}{Sin(2\phi_i)} (1 - b_i) \rightarrow i = (1,2,.....10) \tag{5.48}$$

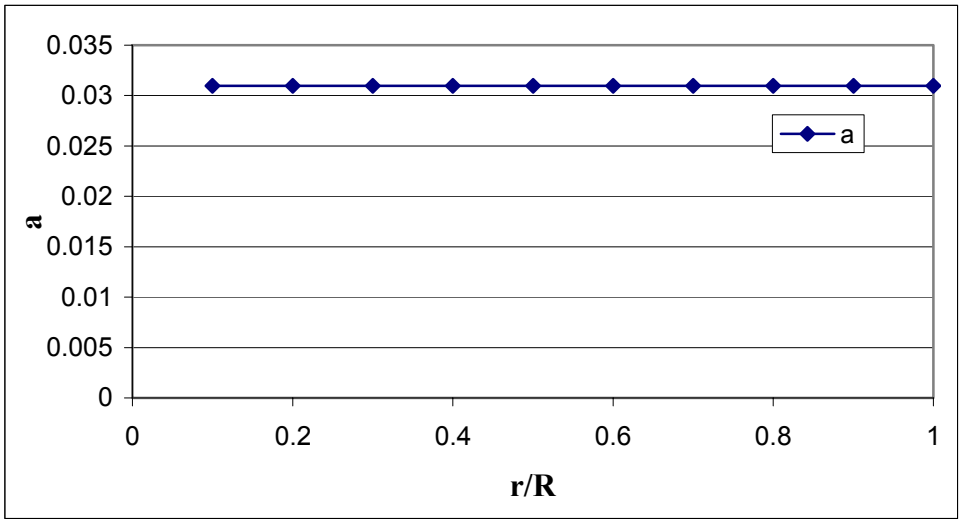
elde edilir. (4.32) numaralı denklemde b iterasyon yapılarak elde edilir. b nin belirli bir değere yakınsaması için a da uygulanan yöntemle, b_{1+i} değeri

$$b_{i+1} = \frac{b_i + \bar{b}_i}{2} \tag{5.49}$$

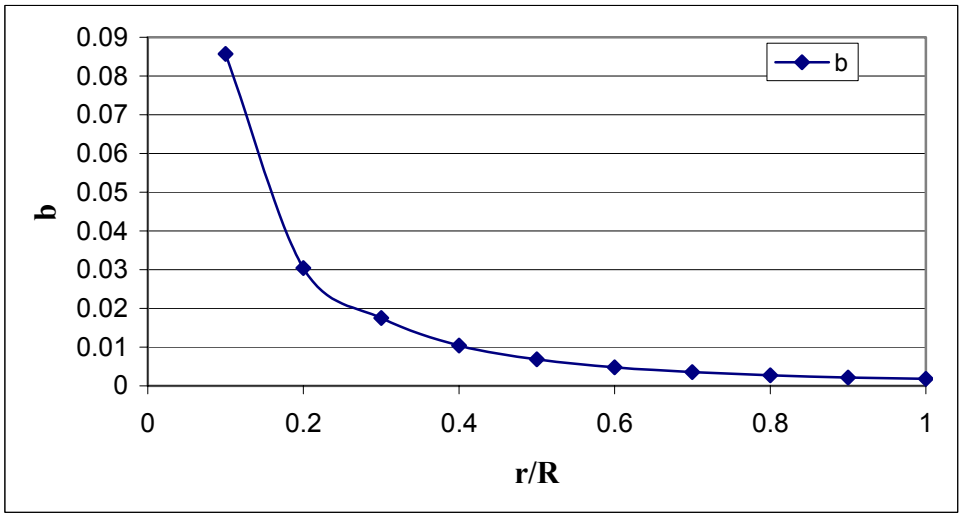
elde edilir. Optimizasyon sonucu elde edilen a ve b değerleri (5.29), (5.28), (5.27) bağıntılarında kullanılarak her istasyon için Φ, σ ve c değerleri hesaplanır. Hesaplanan a, b, Φ, σ ve c değerleri tablo 5.6 de verilmiştir. Ayrıca a, b, Φ, σ ve c değerlerinin pala boyunca değişimi şekil 5.21- şekil 5.25 de verilmektedir.

Tablo 5.6 Analiz Sonucu Elde Edilen a, b, Φ, σ ve c Değerlerinin Pala Boyunca Değişimi

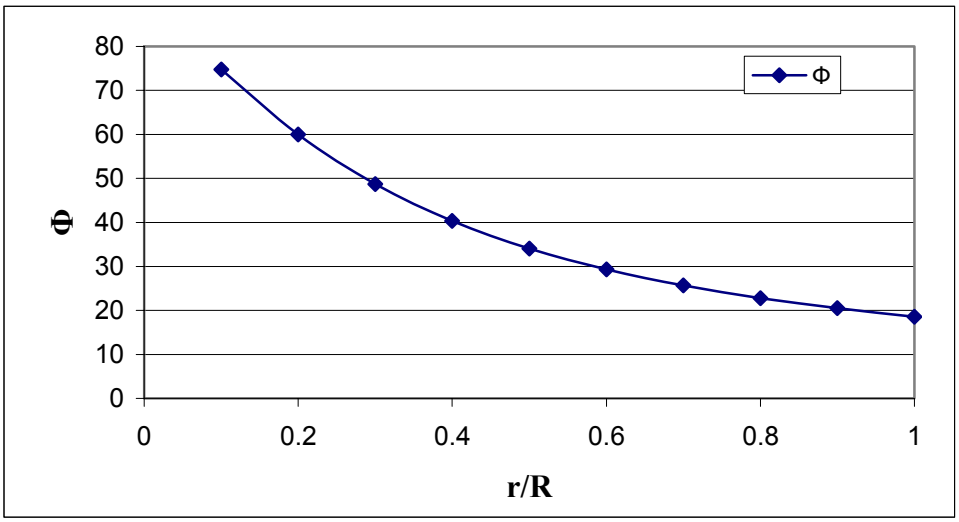
r/R	a	b	Φ	σ	c
0.1	0.031	0.0808	75	0.525	0.143
0.2	0.031	0.0304	60	0.214	0.117
0.3	0.031	0.0175	49	0.120	0.098
0.4	0.031	0.0104	40	0.075	0.082
0.5	0.031	0.0068	34	0.051	0.070
0.6	0.031	0.0048	29	0.036	0.060
0.7	0.031	0.0036	26	0.027	0.051
0.8	0.031	0.0027	23	0.020	0.044
0.9	0.031	0.0022	20	0.016	0.038
1.0	0.031	0.0018	19	0.012	0.033



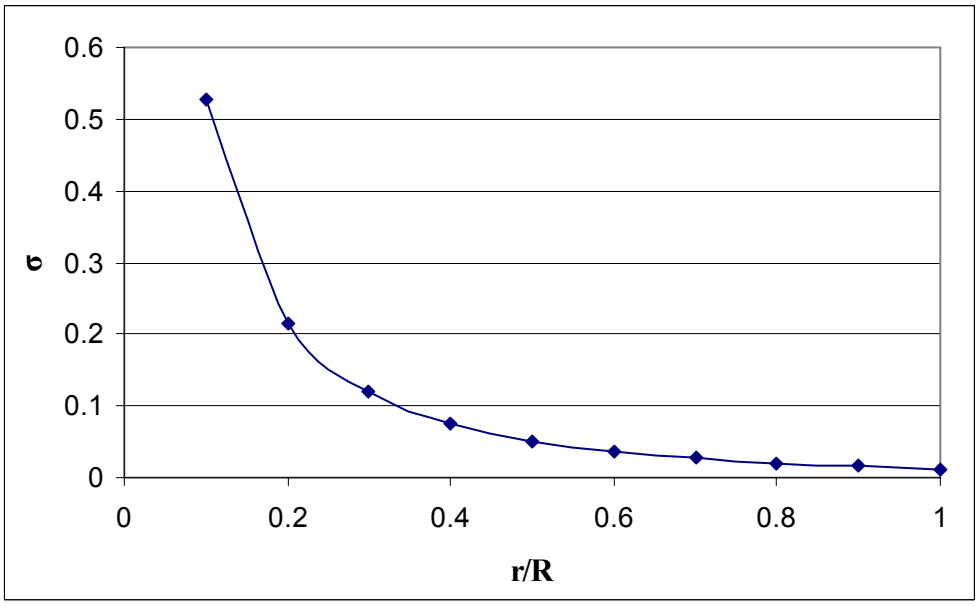
Şekil 5.21. Optimizasyon Sonrası Eksenel Yöndeki Hız İndükleme Parametresinin Pala Boyunca Değişimi.



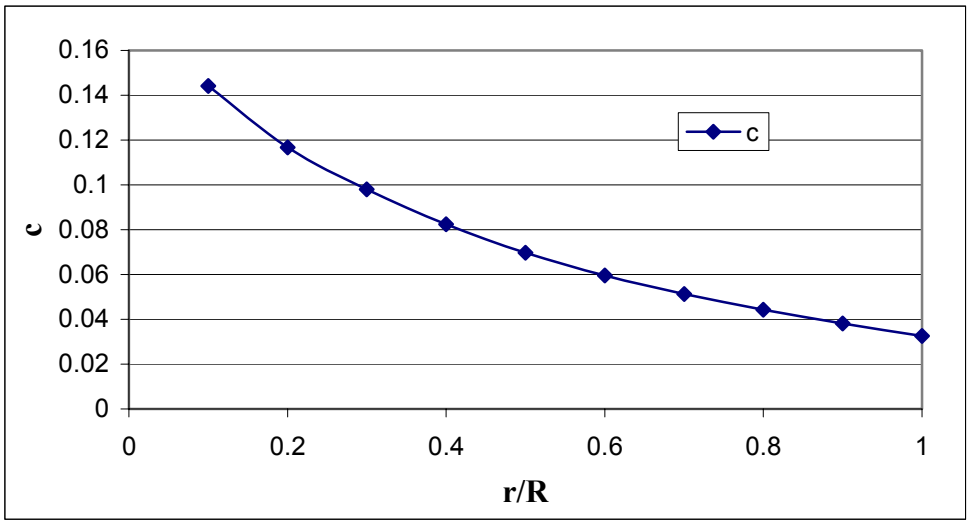
Şekil 5.22. Optimizasyon Sonrası Radyal Yöndeki Hız İndükleme Parametresinin Pala Boyunca Değişimi.



Şekil 5.23. Optimizasyon Sonrası Profil Kesit Konum Açısının Pala Boyunca Değişimi.

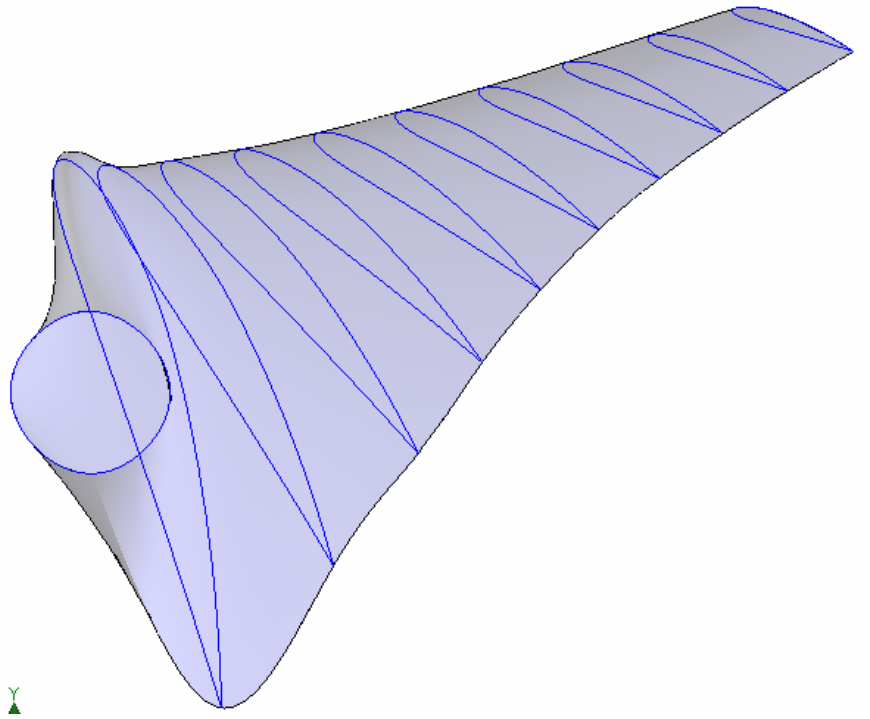


Şekil 5.24. Optimizasyon Sonrası Lokal Katılığın Pala Boyunca Değişimi.



Şekil 5.25. Optimizasyon Sonrası Veter Uzunluğunun Pala Boyunca Değişimi.

Analiz sonucu elde edilen verilerle oluşturulan pala elemanı şekil 5.26 da görülmektedir.

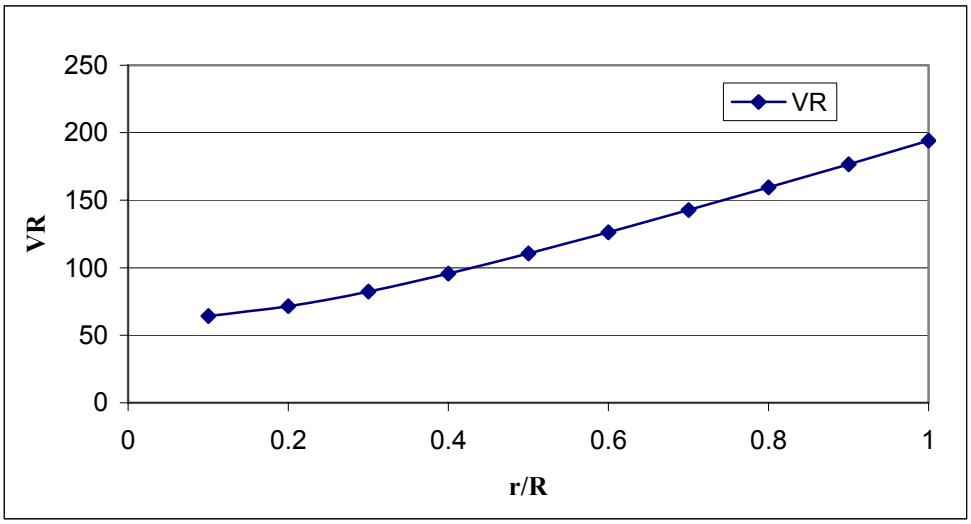


Şekil 5.26. Optimizasyon Sonucu Elde Edilen Pervane Palası.

Aynı şekilde profillere etkiyen bileşke akım hızı (5.39) bağıntısı yardımıyla hesaplandığında tablo 5.7 deki değerler elde edilir. V_R'nin pala boyunca değişimi şekil 5.27 de görülmektedir.

Tablo 5.7 Optimizasyon Sonrası Bileşke Akım Hızının Pala Boyunca Dağılımı.

r/R	a	b	V_R	M
0.1	0.031	0.0857	64	0.19
0.2	0.031	0.0304	71	0.21
0.3	0.031	0.0175	82	0.24
0.4	0.031	0.0104	96	0.28
0.5	0.031	0.0068	110	0.33
0.6	0.031	0.0048	126	0.37
0.7	0.031	0.0036	143	0.42
0.8	0.031	0.0027	160	0.47
0.9	0.031	0.0022	177	0.52
1.0	0.031	0.0018	194	0.57



Şekil 5.27. Optimizasyon Sonrası Bileşke Hızın Pala Boyunca Değişimi.

Pervane performans değerleri L, D, T ve Q değerleri için sırasıyla (5.40), (5.41), (5.43) ve (5.45) bağıntıları kullanılarak elde edilen değerler tablo 5.8 de verilmiştir.

Tablo 5.8 Optimizasyon Sonrası L, D, T ve Q Verilerinin Pala Boyunca Dağılımı.

r/R	L	D	T	Q
0.1	314	6.0	14	7
0.2	317	5.9	44	21
0.2	357	6.5	74	34
0.4	409	7.2	104	48
0.5	469	7.9	134	61
0.6	533	8.4	164	75
0.7	601	9.1	194	89
0.8	671	9.9	224	102
0.9	742	11.1	254	117
1.0	815	12.3	284	131

Analiz sonucu elde edilen verilerden L, D, T ve Q değerlerinin pala boyunca değişimi şekil (5.28 -5.31) de verilmiştir.

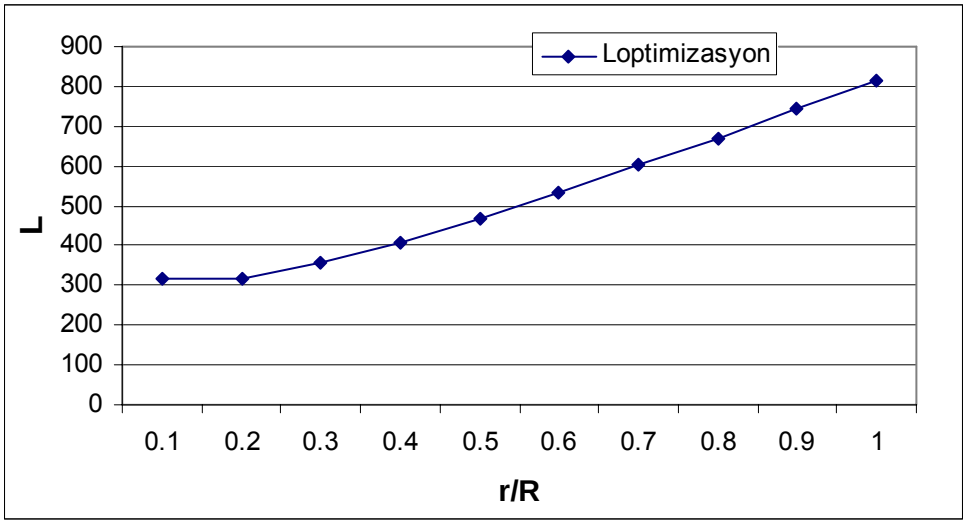
Analiz sonunda toplam T, toplam Q kuvvetleri ile verim ifadesi ise,

Çekme Kuvveti T= 1490.59 N

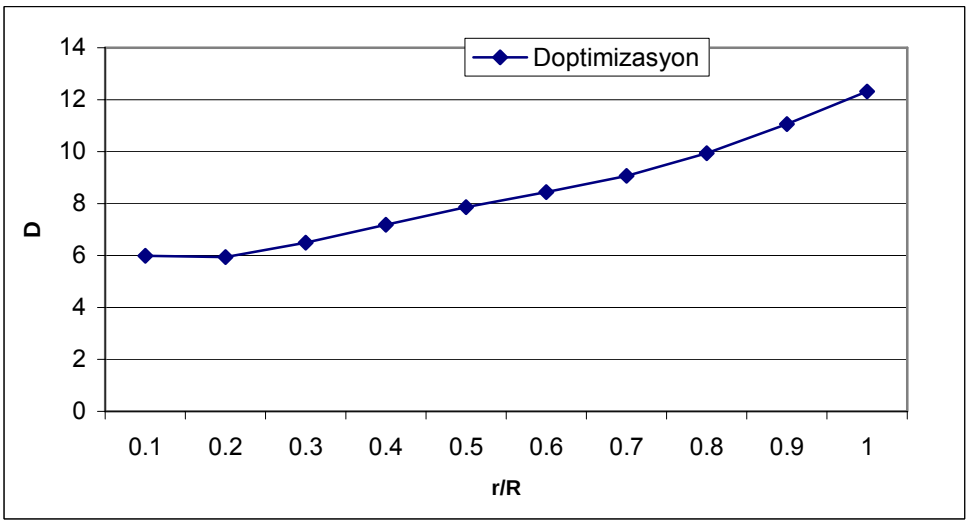
Şaft momenti Q= 683.9394 Nm

Verim η= 0.925093

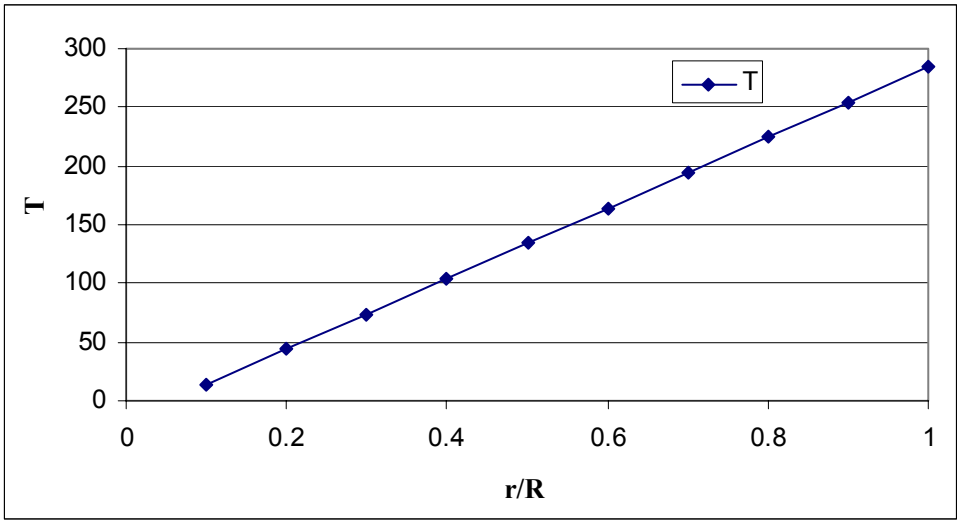
olarak elde edilir.



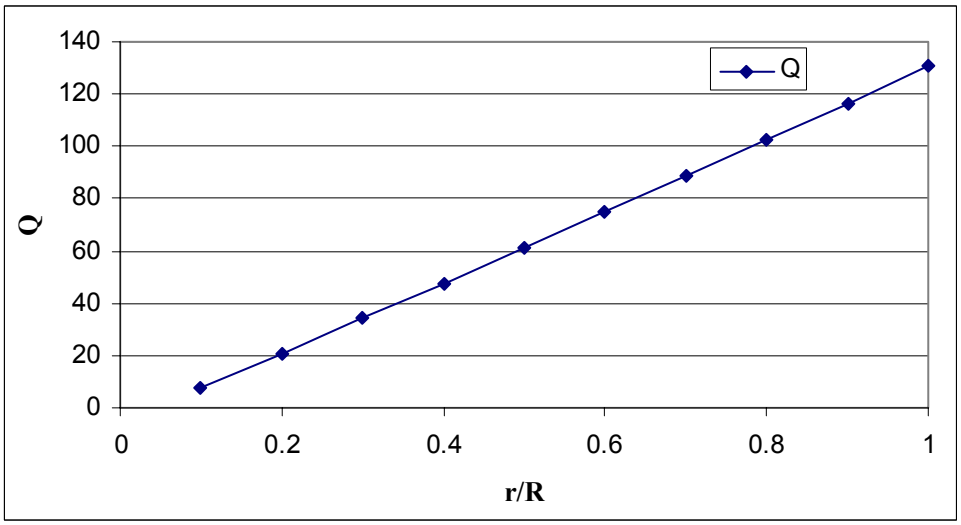
Şekil 5.28. Optimizasyon Sonrası Taşıma Kuvvetinin Pala Boyunca Değişimi.



Şekil 5.29. Optimizasyon Sonrası Sürükleme Kuvvetinin Pala Boyunca Değişimi.



Şekil 5.30. Optimizasyon Sonrası Çekme Kuvvetinin Pala Boyunca Değişimi.



Şekil 5.31. Optimizasyon Sonrası Şaft Momentinin Pala Boyunca Değişimi.

Analiz öncesi pervane verileri ile analiz sonucu elde edilen pervane verileri karşılaştırıldığında

- Eksenel yöndeki hız indükleme parametresinin pala boyunca değişmediği, optimizasyon öncesindeki değerine göre çok az artış meydana gelmiştir (Şekil 5.32).

- Şekil 5.33 de görüldüğü gibi radyal yönde hız indükleme katsayısı b, lokal katılık ve kesit konum açısındaki değişime bağlı olarak pala ucundan köküne doğru b değerinin değiştiği görülmektedir.

- Kesit konum açısı Φ, a, b deki değişime bağlı olarak şekil 5.34 de görüldüğü gibi pala ucundan köküne doğru değiştiği görülmektedir. Optimizasyon sonrası b değerindeki düşüş Φ değerinde artışı meydana getirmiştir.

- Şekil 5.35 de Φ değerindeki değişime bağlı olarak lokal katılık değeri değişmektedir. Lokal katılıktaki değişim miktarı pervane köküne doğru artış göstermektedir.

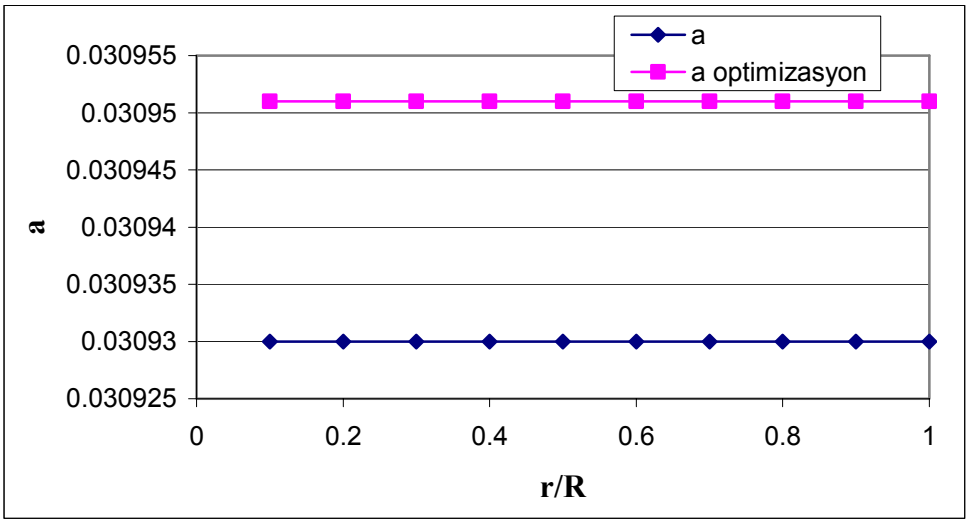
- Şekil 5.36 da σ değerindeki değişime bağlı olarak veter değeri değişmektedir. Optimizasyon öncesi 1.ve 2. istasyonlarda kullanılan profilin veter boylarındaki düzensizlik optimizasyon sonrası giderildiği görülmektedir.

- Şekil 5.38 ve şekil 5.39 da görüldüğü gibi L ve D kuvvetleri bileşke akım hızı ve veter boylarına bağlı olarak, pala ucundan kök kısmına doğru farklılaştığı görülmektedir.

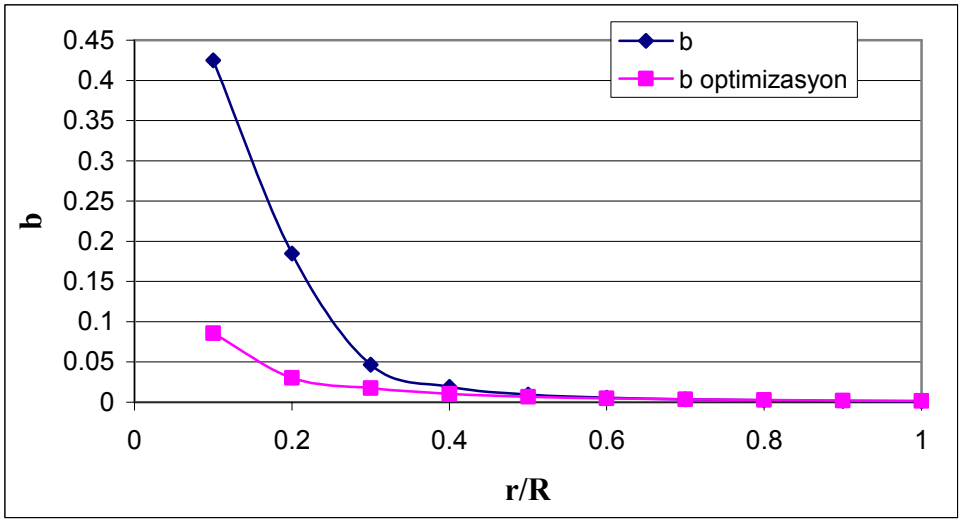
- Şekil 5.40 ve şekil 5.41 de görüldüğü gibi T ve Q kuvvetleri, pala ucunda ihmal edilebilir derecedeki fark kök kısmına doğru azda olsa farklılaşma göstermektedir.

- Analiz sonrası profile ait kesit konum açılarında ve veter uzunluklarında artışın olduğu görülmüştür. Kesit konum açılarının ve veter uzunluklarının pala boyunca değişimi şekil 5.42- şekil 5.43 de verilmiştir.

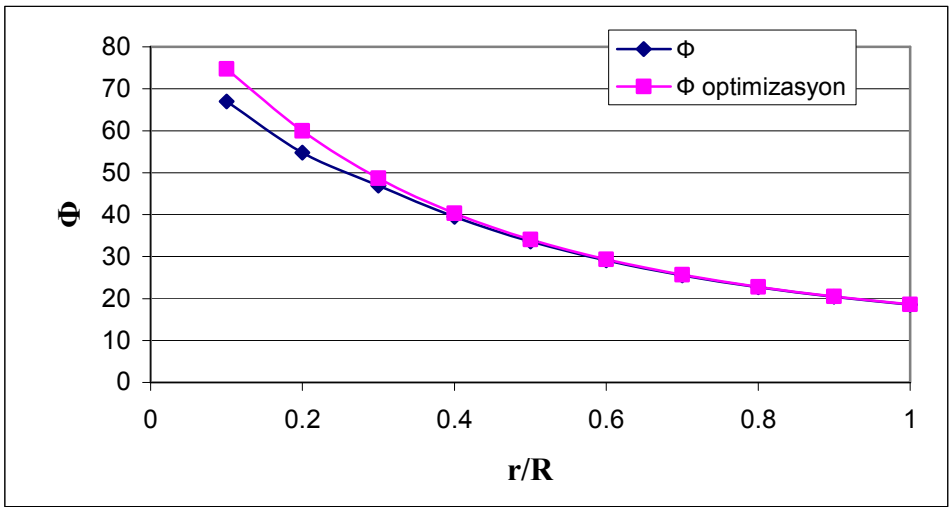
Ayrıca istasyonlarda kullanılan profillere ait hız dağılımı ve basınç katsayısının profil etrafındaki dağılımı şekil (5.44- 5.63)'de verilmiştir. Basınç katsayısındaki değişimin daha iyi anlaşılması açısından şekil 5.64 de 1 ve 10 numaralı istasyonlardaki, şekil 5.65 de 1, 5 ve 10 numaralı istasyonlardaki basınç katsayısının pala boyunca değişimi görülmektedir.



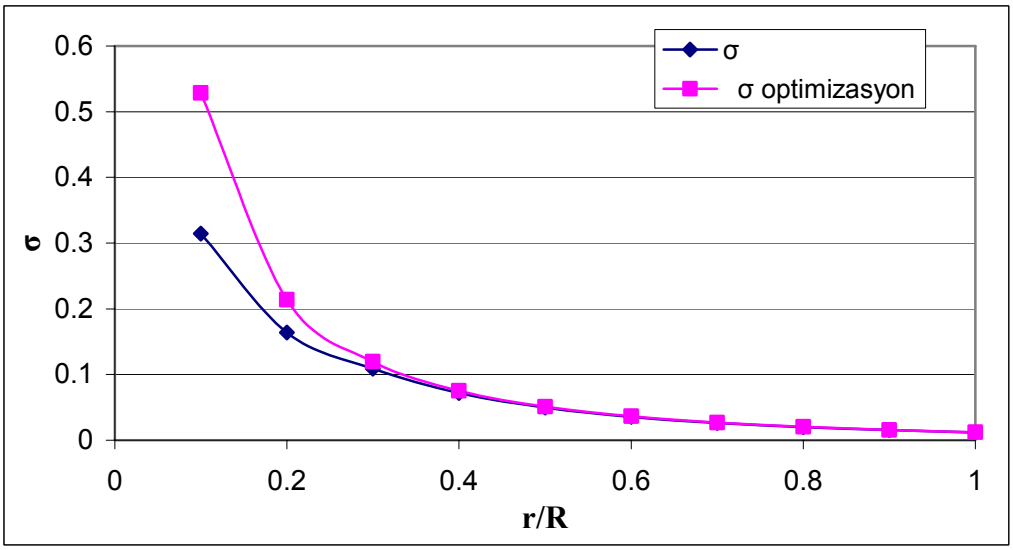
Şekil 5.32. Optimizasyon Öncesi ve Optimizasyon Sonrası Eksenel Yöndeki Hız İndükleme Parametresinin Pala Boyunca Değişimi.



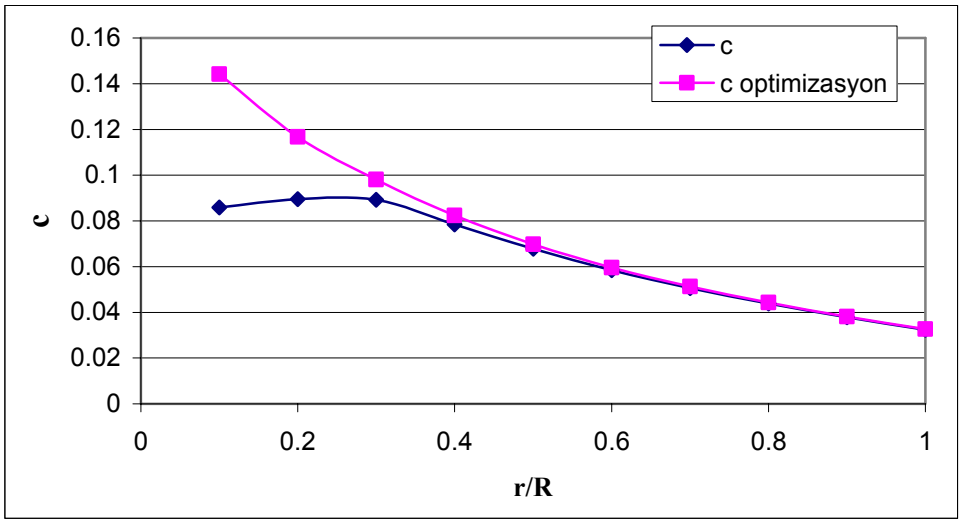
Şekil 5.33. Optimizasyon Öncesi ve Optimizasyon Sonrası Radyal Yöndeki Hız İndükleme Parametresinin Pala Boyunca Değişimi.



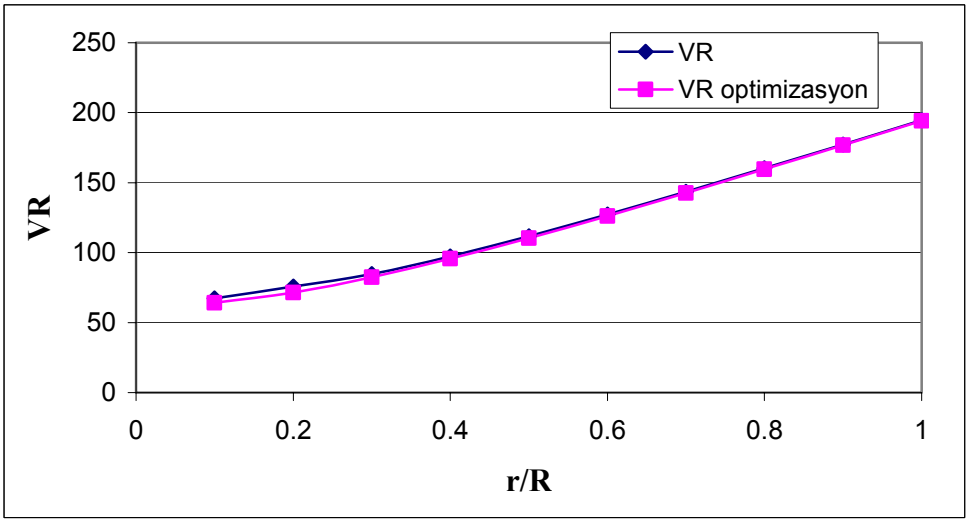
Şekil 5.34. Optimizasyon Öncesi ve Optimizasyon Sonrası Profil Kesit Konum Açısının Pala Boyunca Değişimi.



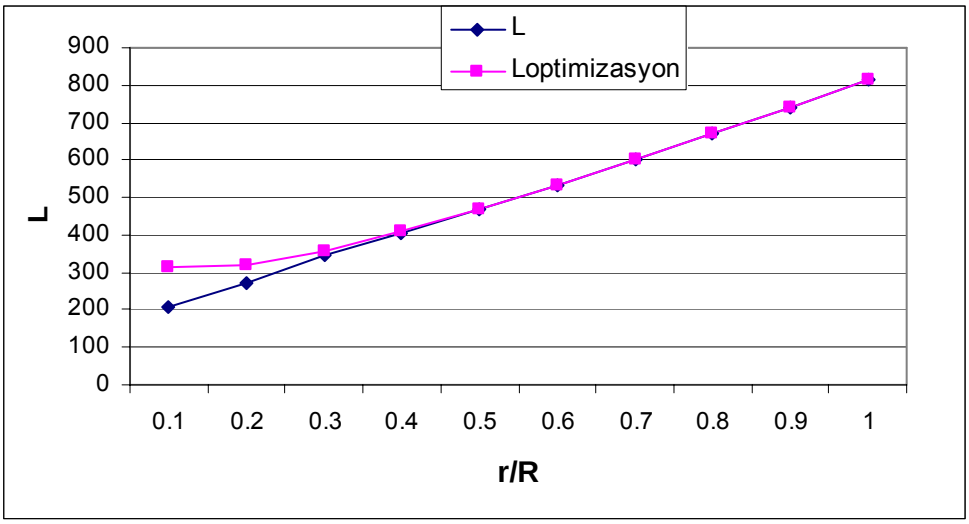
Şekil 5.35. Optimizasyon Öncesi ve Optimizasyon Sonrası Lokal Katılığın Pala Boyunca Değişimi.



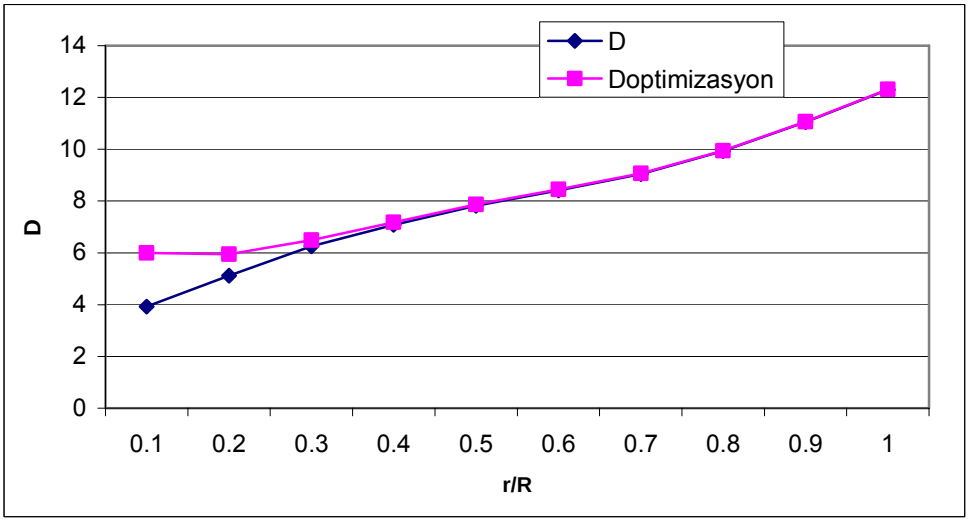
Şekil 5.36. Optimizasyon Öncesi ve Optimizasyon Sonrası Veter uzunluğunun Pala Boyunca Değişimi.



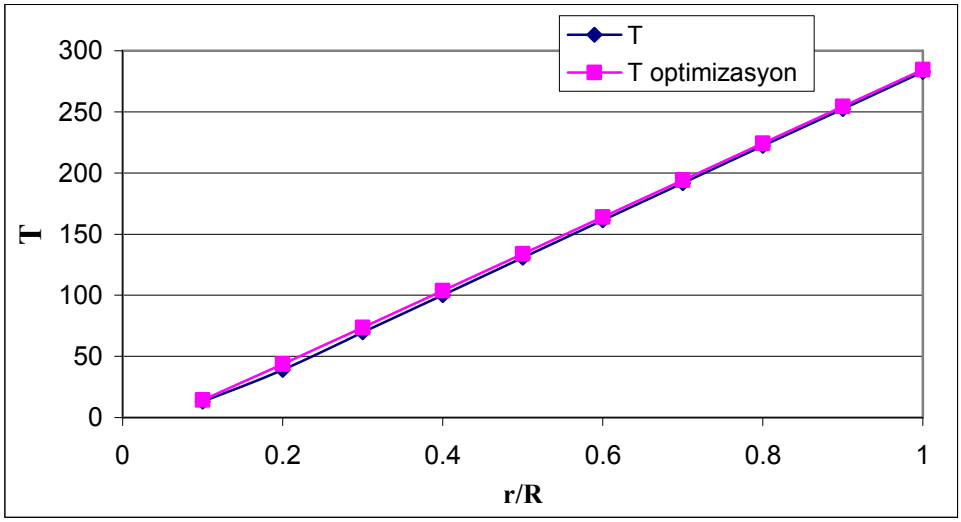
Şekil 5.37. Optimizasyon Öncesi ve Optimizasyon Sonrası Bileşke Akım Hızının Pala Boyunca Değişimi.



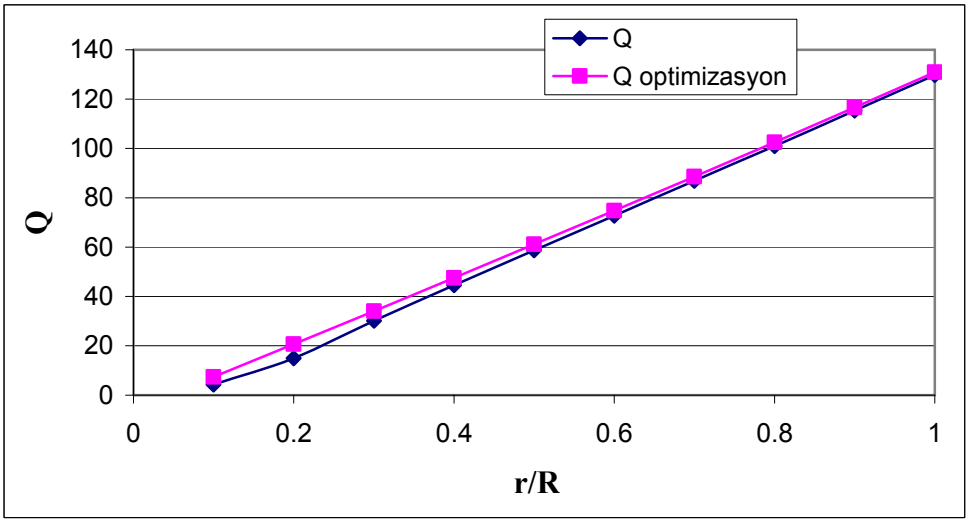
Şekil 5.38. Optimizasyon Öncesi ve Optimizasyon Sonrası Taşıma Kuvvetinin Pala Boyunca Değişimi.



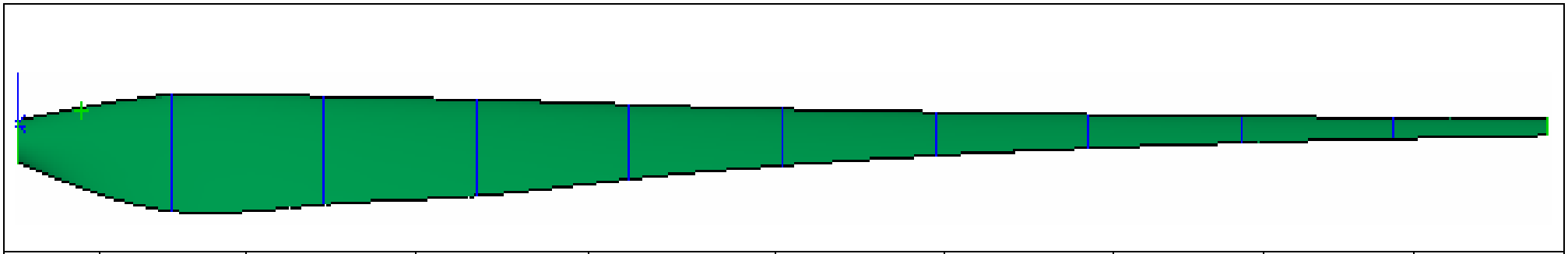
Şekil 5.39. Optimizasyon Öncesi ve Optimizasyon Sonrası Sürükleme Kuvvetinin Pala Boyunca Değişimi.

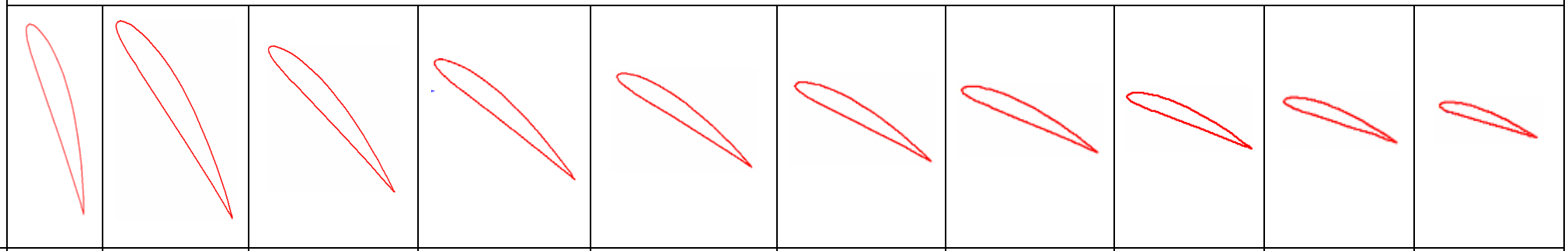


Şekil 5.40. Optimizasyon Öncesi ve Optimizasyon Sonrası Çekme Kuvvetinin Pala Boyunca Değişimi.



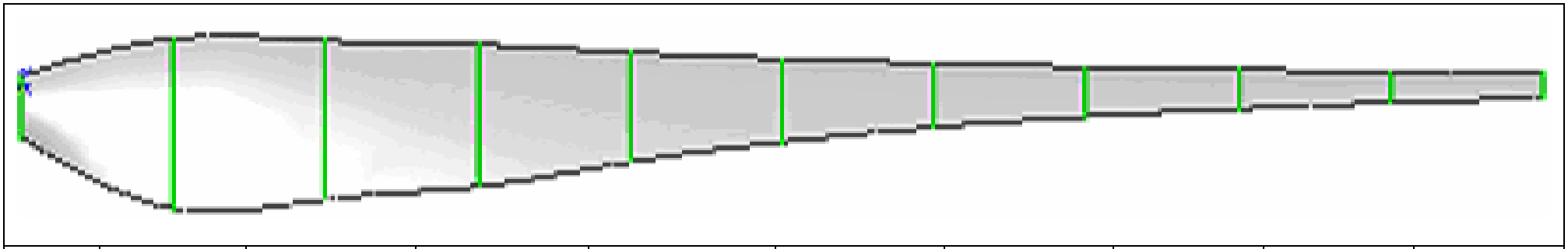
Şekil 5.41. Optimizasyon Öncesi ve Optimizasyon Sonrası Şaft Momentinin Pala Boyunca Değişimi.





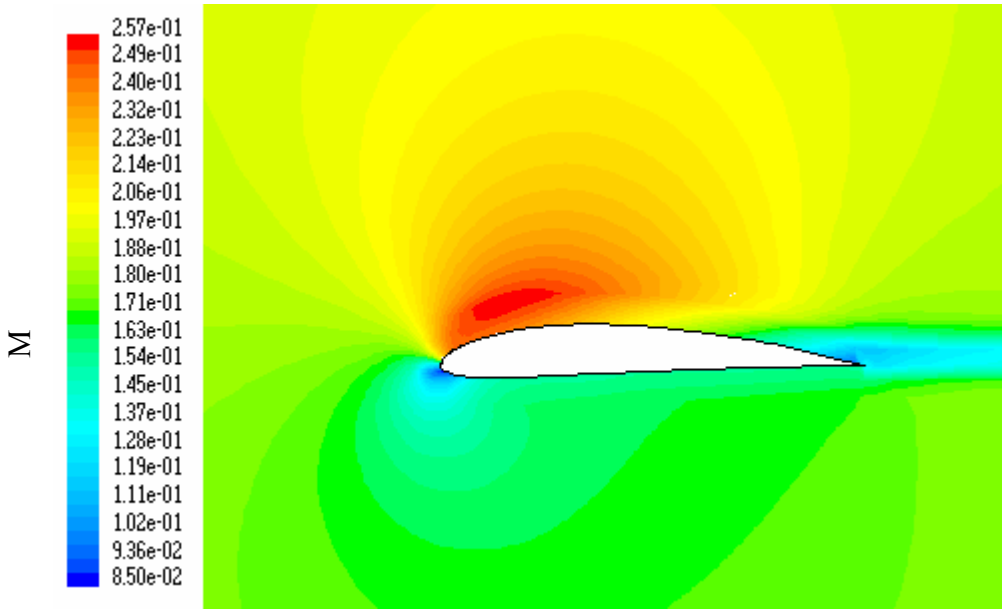
θ	66.997	54.780	46.915	39.469	33.618	29.087	25.540	22.713	20.422	18.534

Şekil 5.42. Optimizasyon Öncesi Profillerin Kökten Uca Doğru Pala Boyunca Dağılımı.

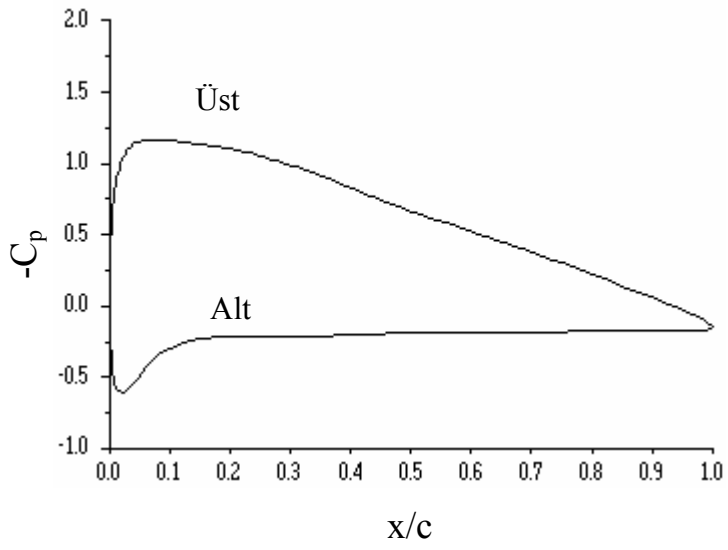


θ	74.6	59.9	48.7	40.3	34.1	29.3	25.7	22.9	20.5	18.6

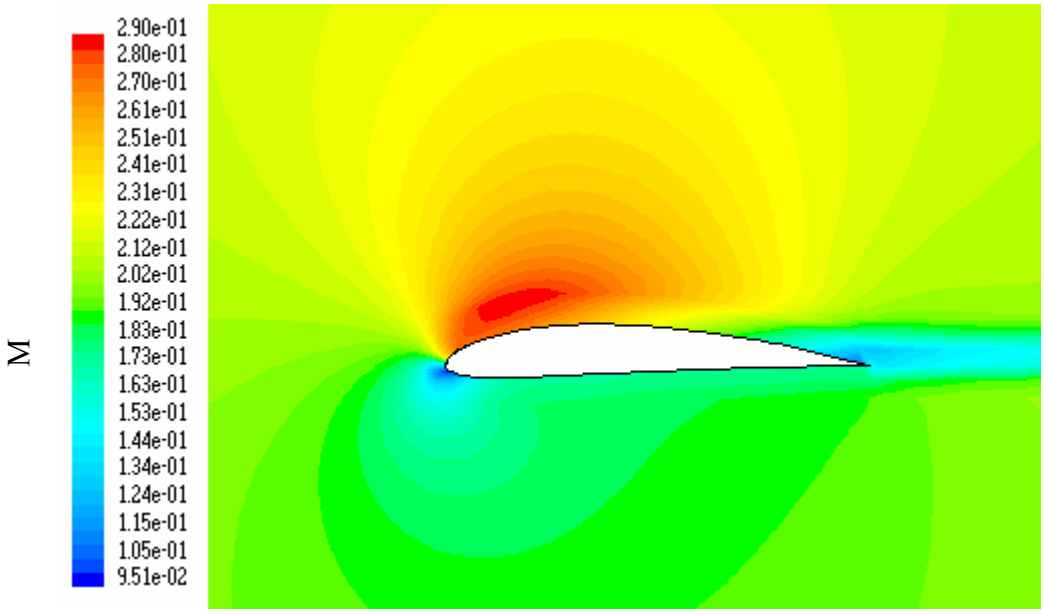
Şekil 5.43. Optimizasyon Sonrası Profillerin Kökten Uca Doğru Pala Boyunca Dağılımı.



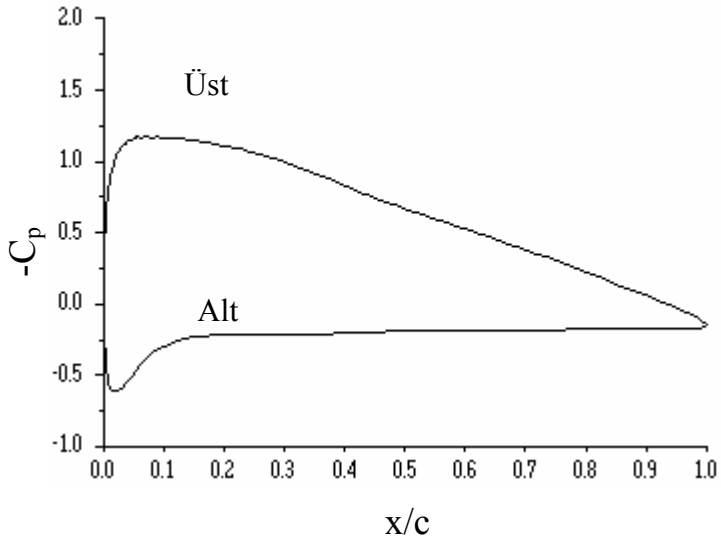
Şekil 5.44. Bir Numaralı İstasyonda Profil Etrafındaki Mach Sayısı Dağılımı.



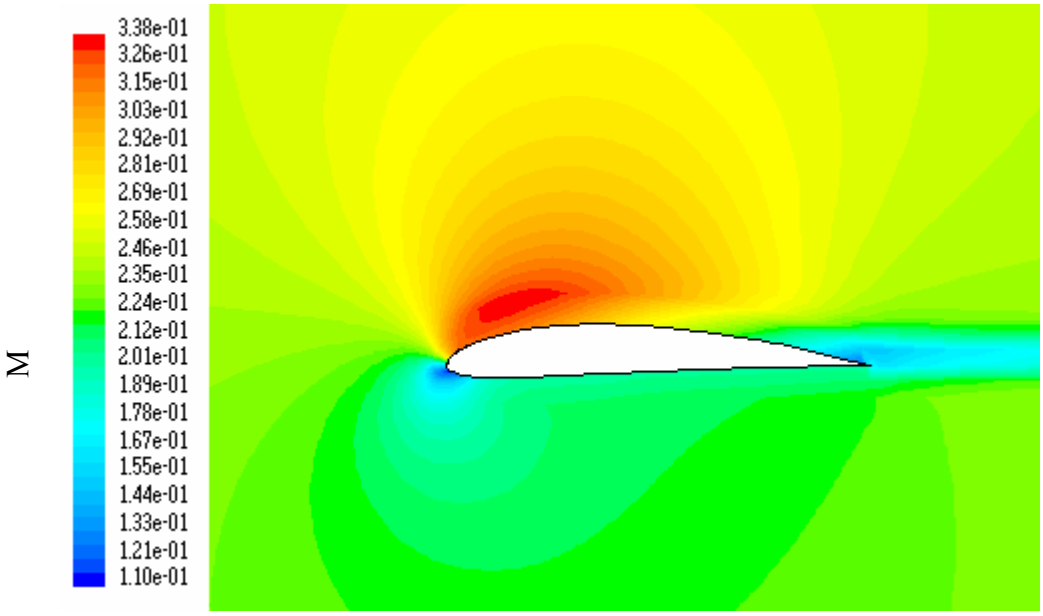
Şekil 5.45. Bir Numaralı İstasyonda Profil Etrafındaki $-C_P$ Dağılımı.



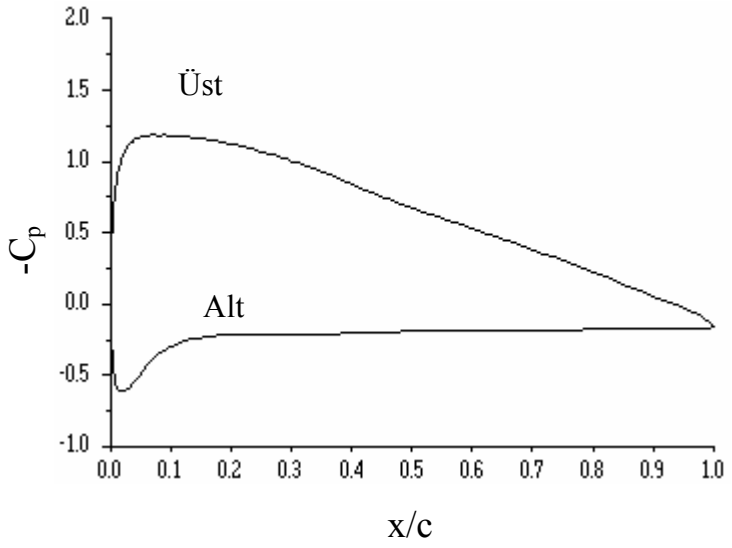
Şekil 5.46. İki Numaralı İstasyonda Profil Etrafındaki Mach Sayısı Dağılımı.



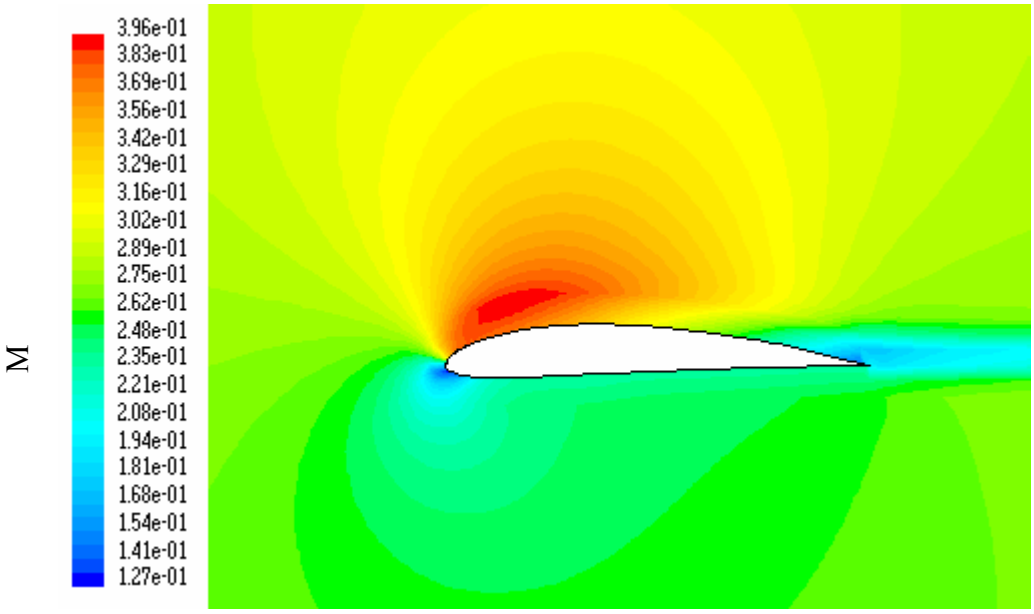
Şekil 5.47. İki Numaralı İstasyonda Profil Etrafındaki $-C_P$ Dağılımı.



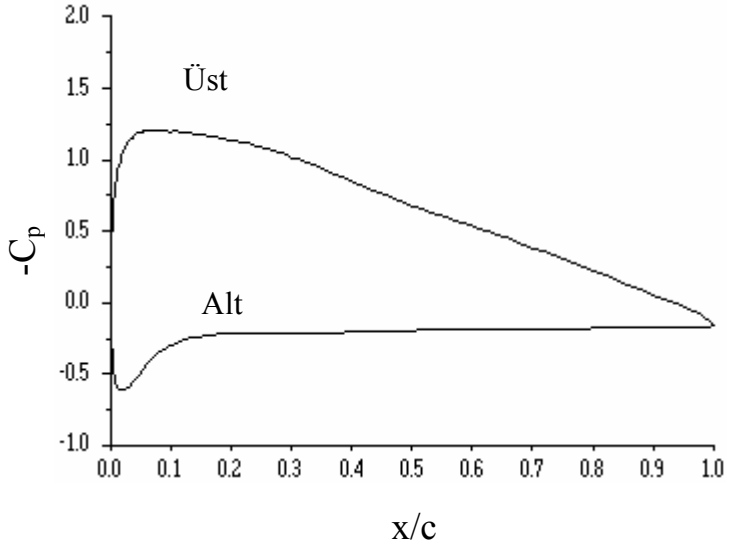
Şekil 5.48. Üç Numaralı İstasyonda Profil Etrafındaki Mach Sayısı Dağılımı.



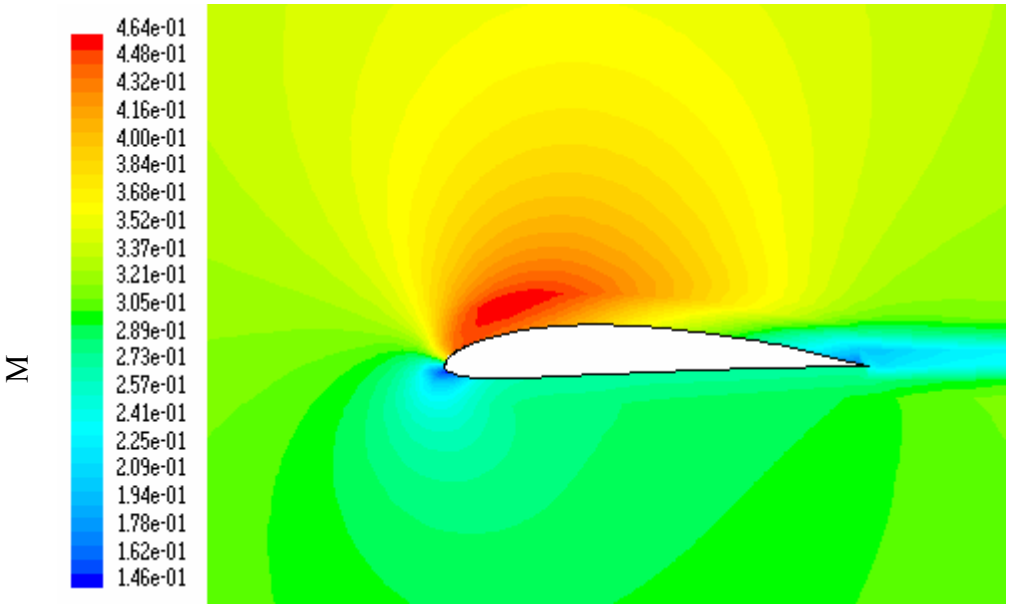
Şekil 5.49. Üç Numaralı İstasyonda Profil Etrafındaki $-C_P$ Dağılımı.



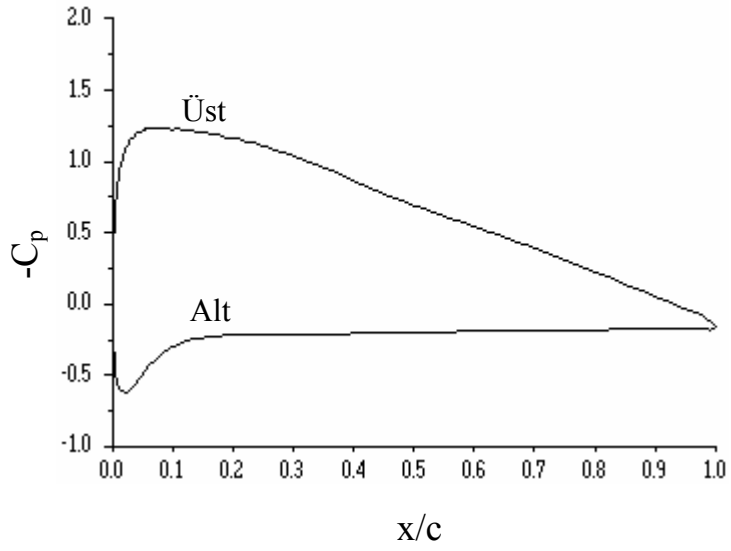
Şekil 5.50. Dört Numaralı İstasyonda Profil Etrafındaki Mach Sayısı Dağılımı.



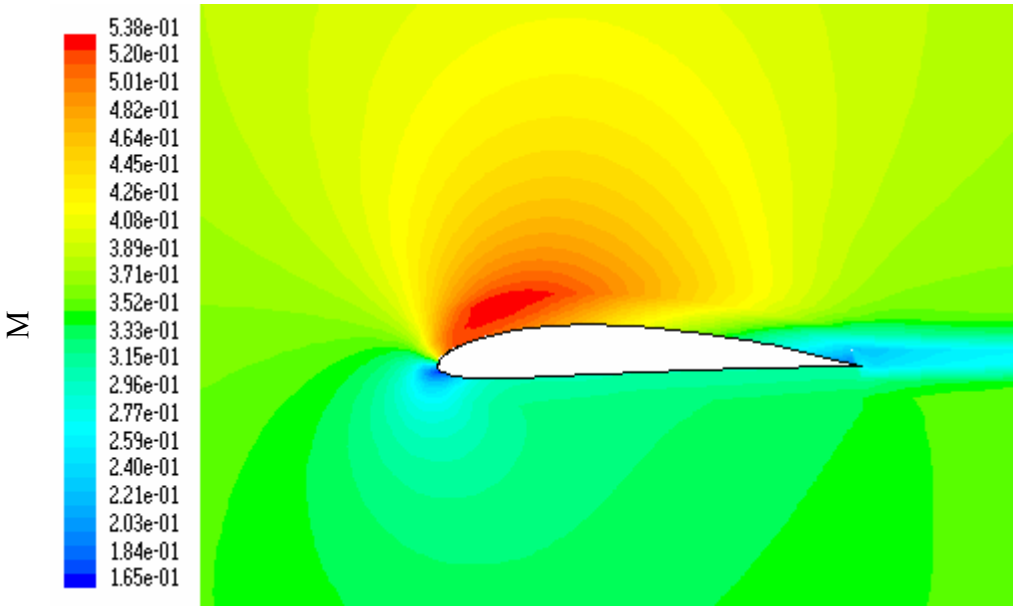
Şekil 5.51. Dört Numaralı İstasyonda Profil Etrafındaki $-C_P$ Dağılımı.



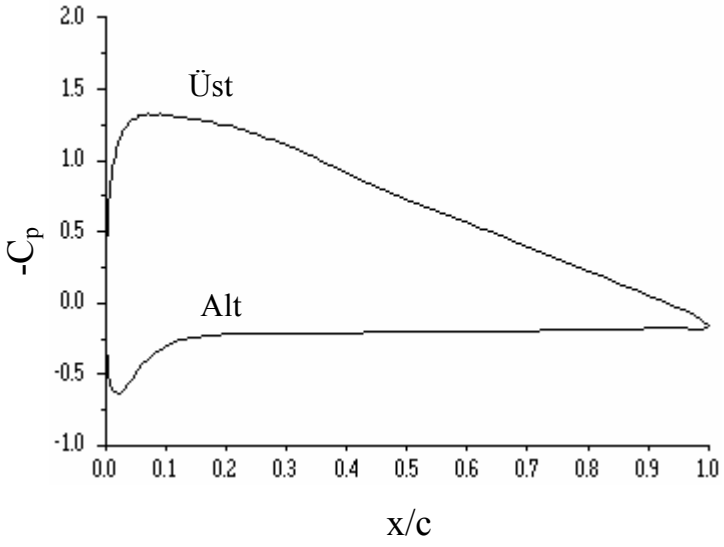
Şekil 5.52. Beş Numaralı İstasyonda Profil Etrafındaki Mach Sayısı Dağılımı.



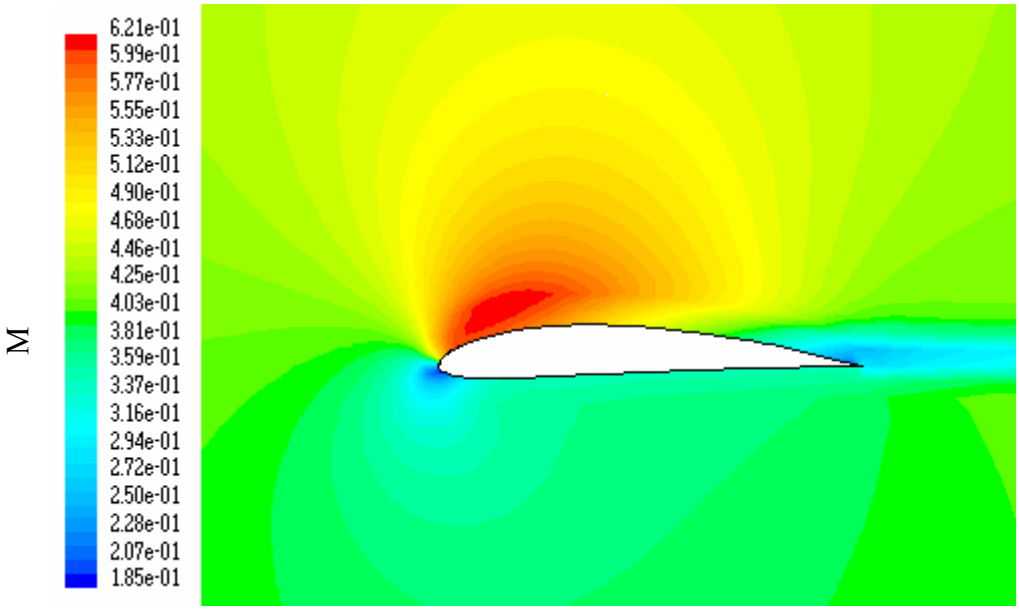
Şekil 5.53. Beş Numaralı İstasyonda Profil Etrafındaki $-C_P$ Dağılımı.



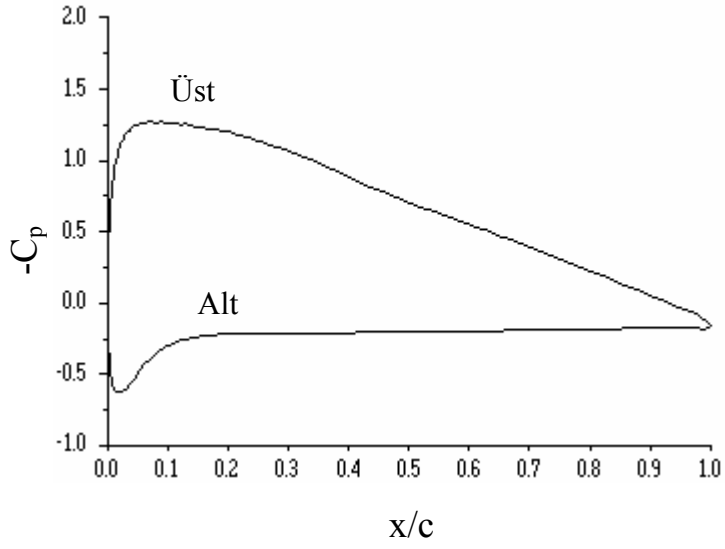
Şekil 5.54. Altı Numaralı İstasyonda Profil Etrafındaki Mach Sayısı Dağılımı.



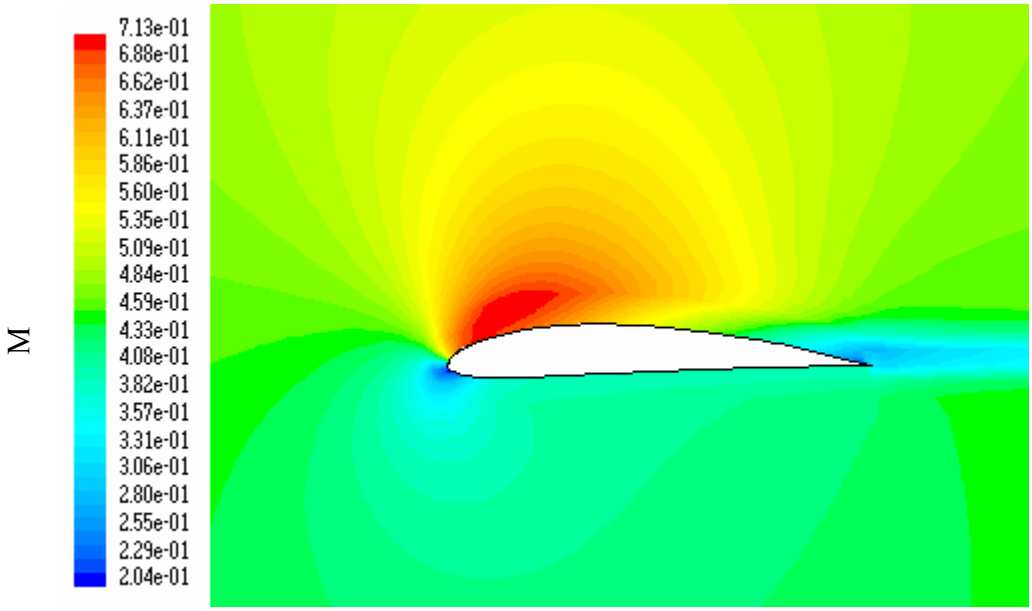
Şekil 5.55. Altı Numaralı İstasyonda Profil Etrafındaki $-C_P$ Dağılımı.



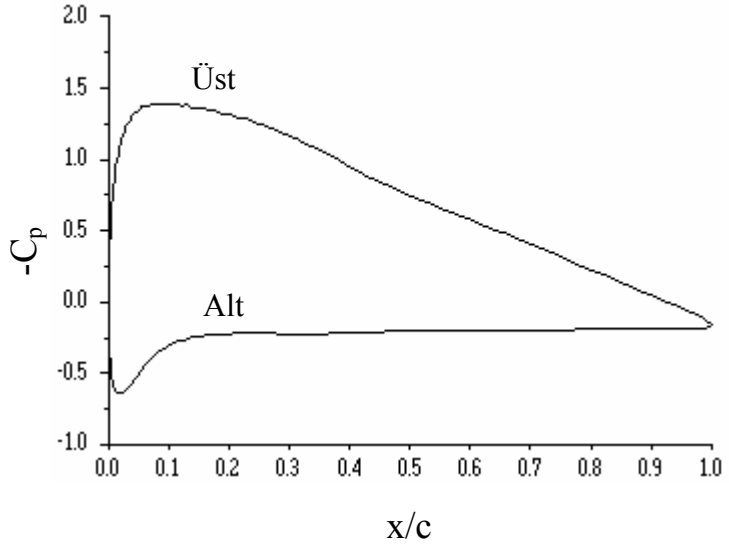
Şekil 5.56. Yedi Numaralı İstasyonda Profil Etrafındaki Mach Sayısı Dağılımı.



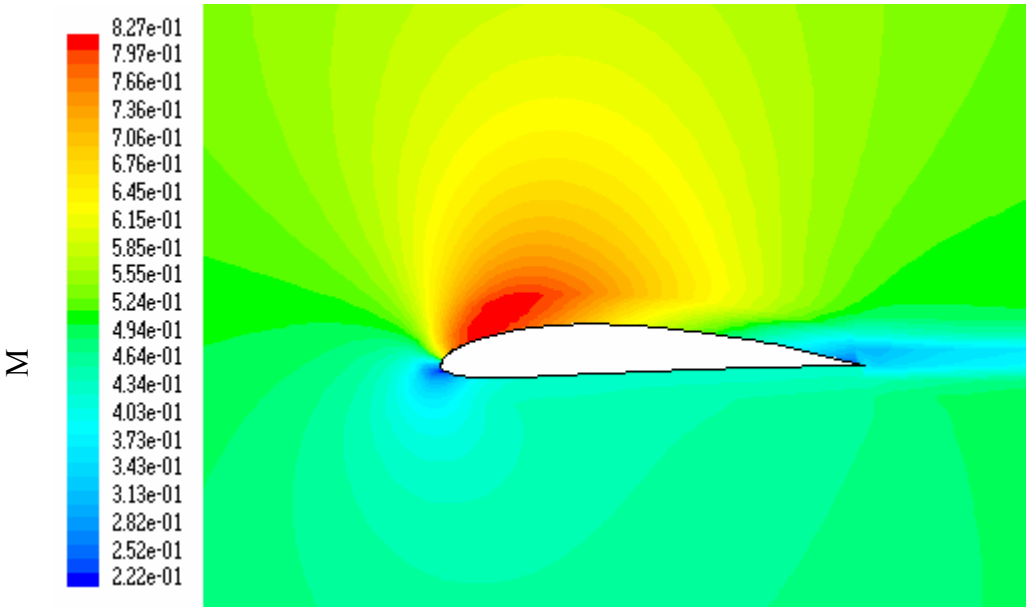
Şekil 5.57. Yedi Numaralı İstasyonda Profil Etrafındaki $-C_P$ Dağılımı.



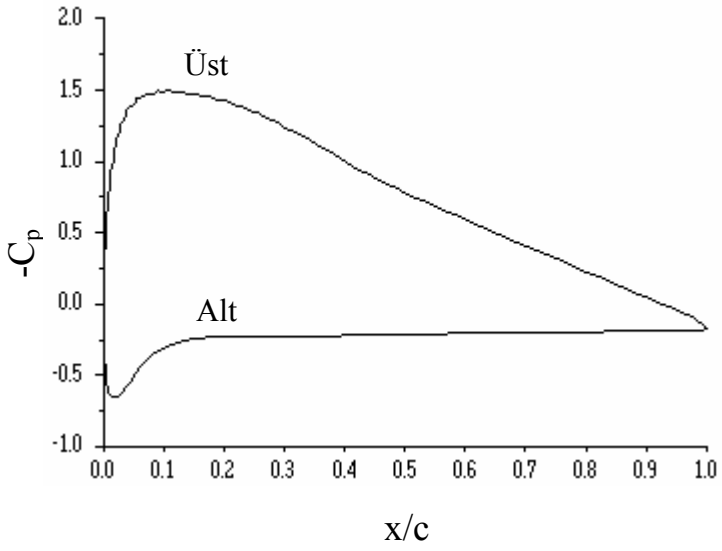
Şekil 5.58. Sekiz Numaralı İstasyonda Profil Etrafındaki Mach Sayısı Dağılımı.



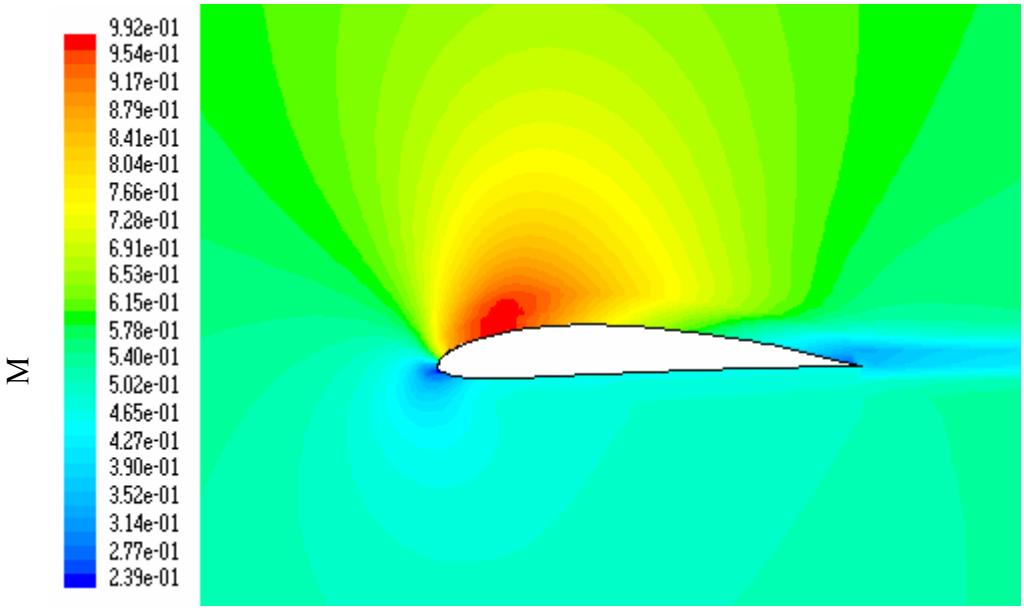
Şekil 5.59. Sekiz Numaralı İstasyonda Profil Etrafındaki $-C_P$ Dağılımı.



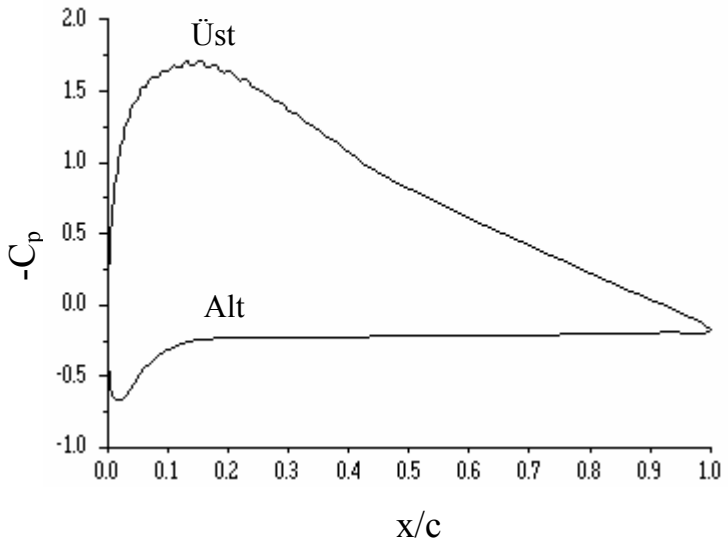
Şekil 5.60. Dokuz Numaralı İstasyonda Profil Etrafındaki Mach Sayısı Dağılımı.



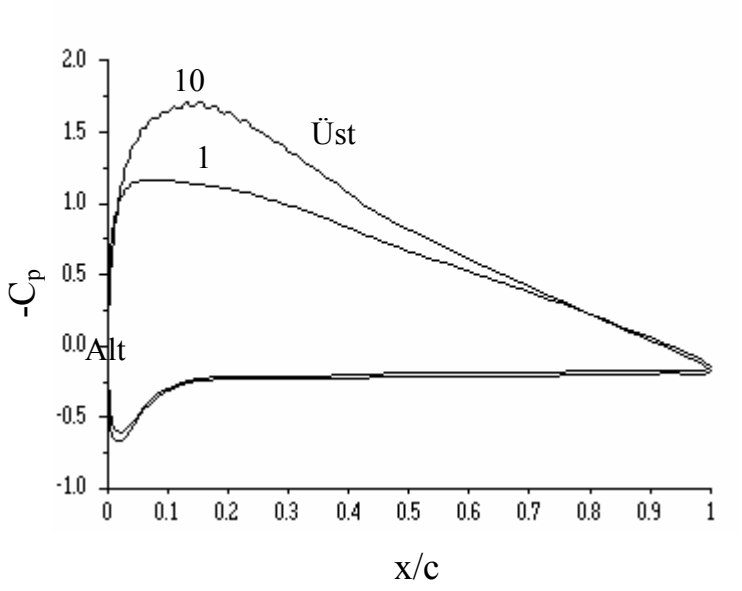
Şekil 5.61. Dokuz Numaralı İstasyonda Profil Etrafındaki $-C_P$ Dağılımı.



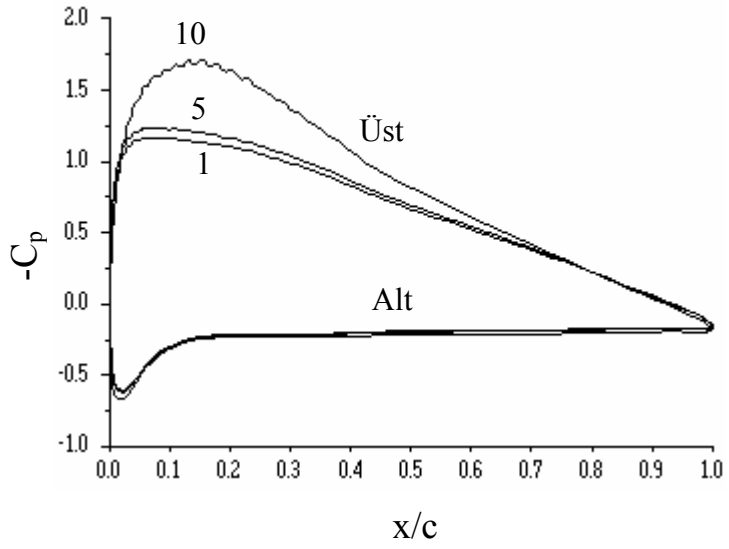
Şekil 5.62. On Numaralı İstasyonda Profil Etrafındaki Mach Sayısı Dağılımı.



Şekil 5.63. On Numaralı İstasyonda Profil Etrafındaki $-C_P$ Dağılımı.



Şekil 5.64. 1 ve 10 Numaralı İstasyonlarda Profilin Üst ve Alt Yüzeylerindeki Basınç Katsayısı Dağılımı.



Şekil 5.65 1. 5 ve 10 Numaralı İstasyonlarda Profilin Üst ve Alt Yüzeylerindeki Basınç Katsayısı Dağılımı.

6. BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1 Sonuçlar

Bu tezde bir pervane tasarımı yapılmıştır. Pervane palalarının tasarımı konusu, akışkanlar dinamiği yönünden ele alınmış ve pala elemanın aerodinamiği ile ilgili temel teoriler incelenmiştir. Pervane palalarının tasarımı için, öncelikle palalara etkiyen aerodinamik kuvvetler hesaplanmıştır.

Pervane palalarının tasarımı için, günümüz palalarının tasarımında en sık rastlanan yöntem olan *pala elemanı* teorisinden faydalanılmıştır. Tasarlanması planlanan palanın tasarımı için gerekli metod oluşturularak palanın performansı incelenmiş ve performans değerleri elde edilmiştir. Daha sonra optimizasyon için başlangıçta kabul edilen eksenel yöndeki hız katsayısı a ve radyal yöndeki hız katsayısı b değerleri, iterasyon yöntemi kullanılarak optimum a ve b değerleri elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler kullanılarak yeni performans değerleri bulunmuştur. Başlangıçta yapılan tasarımda elde edilen performans değerleriyle optimizasyon sonucu elde edilen yeni performans değerleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucu yapılan incelemede,

- Optimizasyon öncesi pala boyunca sabit kabul edilen a değeri, optimizasyon sonrasında, optimizasyon öncesindeki değerine göre çok az artış göstererek pala boyunca sabit olduğu görülmüştür.

- Optimizasyon öncesi radyal yönde hız indükleme katsayısı b değerinin, pala ucundan köküne doğru artış gösterdiği ve artışın pala köküne doğru hızlandığı görülmektedir. Optimizasyon sonrasında b değerinin, pala ucundan köküne doğru artış gösterdiği ve artışın optimizasyon öncesi değerinden az olduğu görülmektedir.

- Kesit konum açısı Φ değerinin, a, b deki değişime bağlı olarak pala ucundan köküne doğru değiştiği görülmektedir. Optimizasyon sonrası b değerinin optimizasyon öncesi b değerine göre düşmesi, optimizasyon sonrası Φ değerinde artışı meydana getirmiştir.

- Φ değerindeki değişime bağlı olarak lokal katılık değeri σ, pala ucundan köküne doğru optimizasyon öncesi değerine göre artış göstermektedir. Lokal katılıktaki artış optimizasyon sonrası veter değerinde artışın olduğunu göstermektedir.

- σ değerindeki değişime bağlı olarak veter değeri c, optimizasyon öncesi en büyük c değerine 3 numaralı istasyonda ulaşmışken, optimizasyon sonrasında en büyük c değeri 1 numaralı istasyonda elde edilmiştir. Optimizasyonla pala boyunca c değerindeki düzensizliğin giderildiği görülmüştür.

- Taşıma kuvveti L ve sürükleme kuvveti D değerleri, c ve V_R değerlerine bağlı olarak pala köküne doğru optimizasyon öncesi değerlere göre artış gösterdiği görülmüştür.

- Çekme kuvveti T değerinin pala kökünden ucuna doğru artış gösterdiği, optimizasyon sonrası toplam T değerinin, optimizasyon öncesi toplam T değerine göre artışın olduğu görülmüştür.

- Şaft momenti Q değerinin pala kökünden ucuna doğru artış gösterdiği, optimizasyon sonrası toplam Q değerinin, optimizasyon öncesi toplam Q değerine göre artışın olduğu görülmüştür.

- Verim η değerinin, T ve Q daki değişime bağlı olarak optimizasyon öncesi değerine göre düştüğü görülmüştür.

- Optimize edilerek verileri düzeltilen palaların performansında, optimize edilmemiş pervane için tasarlanmış palanın performansına göre azalma olduğu görülmüştür. Bu farklılık optimize edilmemiş pervane için tasarlanmış palanın performansı, ideal şartlar altında elde edilmiş değerler olmasından kaynaklanmaktadır.

6.2 Öneriler

Bu tezde, pervane tasarımı çalışması aerodinamik kuvvetler açısından incelenmiştir. Bu çalışmaya ek olarak aşağıdaki çalışmaların yapılması iyi olur.

- Aerodinamik kuvvetlerin, değişik malzemelerden yapılmış pervane yapısı üzerindeki etkilerinin incelenmesi,
- Pala elemanın oluşturduğu girdap akımlarının pervane performansı üzerindeki etkilerinin incelenmesi,
- Aerodinamik yüklerden kaynaklanan titreşimin yapısal ve performans açısından incelenmesi,
- Sıcaklığın pervane yapısı ve performansına etkisinin incelenmesi,
- Başlangıçta kabul edilen verim değerinin pervane performansı ve pala geometrisi üzerindeki etkisinin incelenmesi,
- Deneysel çalışmada yapılarak teorik ve simülasyon çalışmalarının deneysel çalışmalarla uyumluluğunun incelenmesi,

şeklinde sıralayabiliriz.

KAYNAKLAR

1. Walter, S. D., Statıc Thrust Of Aırplane Propellers, Naca Report No. 447, http://naca.larc.nasa.gov/reports/1934/naca-report-447.
2. Hemendra Arya, S., K. Sudhakar, Performance Mapping of Mini Aerial Vehicle Propellers, Kailash Kotwani, S.K., Indian Institute of Technology Bombay, Mumbai-400 076, India.
3. Meso, A., Scale Flight Vehicle for Atmospheric Sensing, Department of Aeronautics and Astronautics Stanford University
4. Derek, H., Designs on Idealized Aircraft ,Engine Fan Blades for Noise Reduction, Thesis submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University İn Partial Fulfillment Of The Requirements For The Degree Of Masters of Science in Aerospace Engineering.
5. Pınkerton, R. M., Calculated and Measured Pressure Distrıbutıon Over The Mıdspan Section Of The Naca 4412 Airfoil, Report No. 563
6. Sullivan, J. P., Proplet Propeller Design/Build/Test Final Report, Aeronautics and Astronautics Engineering, Purdue University, May 6, 2005.
7. Hudelson, M., British Museum, London. http://daphne.palomar.edu/mhudelson/WorksofArt/13HighRen/2156.html, 2006.
8. Hudelson, M. Leonardo Da Vinci. Helicopter (top) and experiment on lifting power of wing (nuttom), British Museum, London. http://www.scienceandsociety.co.uk/results.asp?image=10313173&wwwflag=2&imagepos=12, 2004.
9. Mohl, M., Introduction courtesy of the Connecticut River Museum, Inc. http://www.navsource.org/archives/08/0844101.jpg, 2006.
10. Publication of the National Oceanic & Atmospheric Adminstration. http://www.usna.edu/naoe/new/turtle.pdf, 2006.
11. Classic Encyclopaedia, based On The 11th Edition Of The Encyclopaedia Britannica. http://www.1911encyclopedia.org/Flight.
12. Sir Cayley's Governable Parachute. http://www.flyingmachines.org/cayl.html, 2006.
13. Kochersberger, K., An Experimental and Analytical Evaluation of the 1911 Wright Bent End Propeller, NY 14623, AIAA-2000-4122, 2000.

14. RB-50 Trent Engine, Rolls-Royce plc. http://100.rolls-royce.com/products/view.jsp?id=390, 2006. ,
15. Craig, D. P., Peter, J. G., Erisa, K. H., Hıgh Effıcıency Forward Swept Propellers at Low Speed, FL 33124, AIAA 2003-1069, 2003.
16. Acar, H., Uçuş Mekaniği Notları, 2006, http://atlas.cc.itü.edu.tr/-acarh .
17. Dover, L. M., Thomson, M., Theoretıcal Aerodynamıcs, Publıcatıons, ınc. New York, 1973.
18. Anderson, John D., JR., Fundamentals of Aerodynamics. University of Maryland, 1991.
19. Komerath, N., High Speed Aerodynamics, Ohio State University, 2006. http://www.adl.gatech.edu/classes/hispd/hispd04/Critical_Mach_Number.html
20. Cavcar, M., Pressure Distribution Round An Airfoil, 2003. http://home.anadolu.edu.tr/~mcavcar/hyo301/14_PressureDistribution.pdf#search=%22%22pressure%20distribution%20round%20an%20airfoil%22%22.
21. Houghton, E. L., P.W. Aerodynamıcs for Engineering sudents, butterworth heınemann, Tokyo, 2002.
22. Weıck, F. E. Propeller design I: Practical Application Of The Blade Element Theory, NACA:1926:naca-tn-235. Washington, DC, 1926.
23. Weıck, F. E. Aircraft Propeller Design., New York, McGraw-Hill, 1930.
24. Heperle, M., Adkins, C.N., Desing of Optimum Propellers, Journal of Propulsion And Power, 10(5),1994.
25. Heperle, M Java Prop., Design and Analysis of Propellers [Software documentation.], http://members.tripod.de/MartinHepperle/Airfoils, 2003.
26. Prop Optimizer (tm) PRO Software documentation. http://www.geocities.com/aeroopt/prop.htm, 2004.
27. Yükselen, M.Adil, Aerodinamik II Ders Notları, Hava Harp Okulu, 1996.
28. Wilbur, C., Nelsonick, F. E., Aircraft propeller principles. John Wıley & Sons, Inc, New York, 1943.
29. Manders, E.P.H., The Design of an Adaptive Ducted Propeller , For the use in Unmanned Air Vehicles, Master Thesis in Aerospace Engineering, Delft University of Technology , Terheijden, 2004.

30. Manders, E.P.H., The design of an Adaptive Ducted Propeller, Delft University of Technology Faculty of Aerospace Engineering, Terheijden, October 2004.
31. Dıehl, W., Static Thrust Of Airplane Propellers, naca-tn-447, Langley Memorial Aeronautical Laboratory, 1934.
32. Duran, S., Computer-Aided Design of Horızontal-axıs Wınd Turbıne Blades, a Thesis submıtted to the graduate school of natural and applıed scıences of Mıddle East Technıcal Unıversıty, 2005.
33. Shohei, N., Craig, P., Peter, G., Gecheng, Z., Investigation of Sweep Configuration Effects on Propeller Performance, Dept. of Mechanical Engineering, University of Miami
34. Bhaskaran, R., Flow over an Airfoil, Sibley School of Mechanical and Aerospace Engineering, Cornell University, 2002. http://instruct1.cit.cornell.edu/courses/fluent/airfoil/index.htm
35. Modeling Turbulence, Fluent Inc., January, www.afs.enea.it/fluent/public/fluent-Doc/PDF/chp10.pdf, 2003.

ÖZGEÇMİŞ

Haluk DEMİRTAŞ 1966 yılında Malatya'da doğdu. İlk, orta, lise öğrenimini Malatya'da tamamladı. Yüksek öğrenimini İstanbul Teknik Üniversitesi Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi Uçak Mühendisliği Bölümünde tamamladı. Askerlik hizmetinden sonra 1998 yılında Erciyes Üniversitesi Sivil Havacılık Meslek Yüksek Okulunda göreve başladı. Halen Erciyes Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksek Okulunda uzman olarak görev yapmaktadır.

Adres

Erciyes Üniversitesi

Sivil Havacılık Yüksekokulu

38039, Melikgazi/KAYSERİ

Tel: (352) 4374901/41103

e-mail: demirtas@erciyes.edu.tr