



**BİYO-ESİNLENMELİ KANAT MODELİNİN SES ALTI
RÜZGÂR TÜNELİNDE AERODİNAMİK
KARAKTERİSTİĞİNİN İNCELENMESİ**

(Doktora Tezi)

Samet Giray TUNCA

Kütahya - 2024

T.C.
KÜTAHYA DUMLUPINAR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

**BİYO-ESİNLENMELİ KANAT MODELİNİN SES ALTI
RÜZGÂR TÜNELİNDE AERODİNAMİK
KARAKTERİSTİĞİNİN İNCELENMESİ**

Danışman:
Prof. Dr. Mustafa Arif ÖZGÜR

Hazırlayan:
Samet Giray TUNCA

Kütahya – 2024

Kabul ve Onay

KÜTAHYA DUMLUPINAR ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Makine Mühendisliği Ana bilim dalında, 801924410104 öğrenci numaralı Samet Giray TUNCA'nın hazırlamış olduğu “*BİYO-ESİNLENMELİ KANAT MODELİNİN SES ALTI RÜZGÂR TUNELİNDE AERODİNAMİK KARAKTERİSTİĞİNİN İNCELENMESİ*” başlıklı doktora tez çalışması ile ilgili tez savunma sınavı jüri tarafından yapılmış ve adayın tezinin OY BİRLİĞİ ile kabul edilmesine karar verilmiştir.

11/09/2024

Tez Jürisi	İmza	
	Kabul	Ret
Prof. Dr. Mustafa Arif ÖZGÜR (Danışman)		
Prof. Dr. Ramazan KÖSE		
Doç. Dr. Abdullah YILDIZ		
Doç. Dr. Mustafa Ali ERSÖZ		
Dr. Öğr. Üyesi Abdullah KEÇECİLER		

Onay

Doç. Dr. Eray ACAR

Enstitü Müdürü

Bilimsel Etik Bildirimi

Doktora tezi olarak hazırladığım “*Biyo-Esinlenmeli Kanat Modelinin Ses Altı Rüzgâr Tünelinde Aerodinamik Karakteristiğinin İncelenmesi*” adlı çalışmanın öneri aşamasından sonuçlandığı aşamaya kadar geçen süreçte bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle uyduğumu, tez içindeki tüm bilgileri bilimsel ahlak ve gelenek çerçevesinde elde ettiğimi, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığımı, bu çalışmamda doğrudan veya dolaylı olarak yaptığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu beyan ederim.

11/09/2024

Samet Giray TUNCA

Özgeçmiş

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Ad : Tunca, Samet Giray

Eğitim Bilgileri

Eylül 2004- Ekim 2010

Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya-TÜRKİYE

Makine Mühendisliği, Lisans

GPA: 2.22

Eylül 2011- Aralık 2015

Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya-TÜRKİYE

Makine Mühendisliği, Yüksek Lisans

GPA: 3.00

İş Deneyimi

Nisan 2019- Halen

Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Dumlupınar Meslek Yüksekokulu Kütahya -
TÜRKİYE

Öğretim Görevlisi

2017 Eylül-2018 Mart

WAM Eurasia Makine Sanayi ve Ticaret Ltd.Şti., Kütahya – TÜRKİYE

Üretim Planlama Mühendisi

2011 Mayıs – 2013 Aralık

KÜMAŞ AŞ. Kütahya Manyezit Sanayi A.Ş., Kütahya – TÜRKİYE

Yatırım Mühendisi

Yayınlar

- Olçay K., Tunca S.G. ve Özgür M.A. “Forecasting and Performance Analysis of Energy Production in Solar Power Plants Using Long Short-Term Memory (LSTM) and Random Forest Models” , IEEE Access, Vol 12, Page(s):103299 – 103312, 2024.
- Tunca S.G. Ve Özgür M.A., “Positioning analysis of the lift force sensor in subsonic wind tunnel test chamber design and its effect on Naca0015 airfoil”, JSR-A, sy. 055, ss. 193–205, Aralık 2023, doi: 10.59313/jsr-a.1369969, 2023.
- Tunca S.G. Ve Özgür M.A. “Ses altı Rüzgâr Tünelinde Kanat Aerodinamiği Kuvvet Ve Akış Görüntüleme Analizleri” Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 9(2), 516-527. <https://doi.org/10.34186/klujes.1391434>, 2023.
- Tunca S.G. Ve Özgür M.A. ve Koşar O. “Biyo Esinlenmeli Kanat Profili Yüzeyindeki Akış Görüntüleme Analiz”, International Congress On Scientific Research-X, Proceeding Book, Pages 808-814 , Ankara, 2024
- Tunca S.G. Ve Özgür M.A. “Ses altı Rüzgar Tünelinde İki Farklı Kanat Profilinin Aerodinamik Kuvvetler Açısından Karşılaştırılması Ve Akış Görüntüleme Analizleri”, 5. Baskent International Conference On Multidisciplinary Studies, Proceedings Book, 534-541, Ankara, 2023
- Tunca S.G. Ve Özgür M.A. “Ses altı Rüzgâr Tünelinde Naca0015 Kanat Profilinin Kuvvet Ve Akış Görüntüleme Yöntemi ile Analizi”, Global Conference on Engineering Research, GLOB CER’23 Proceeding Book, Pages 385-392, 2023.
- Tunca S.G., Olçay K. ve Özgür M.A. “Güneş Enerji Santrallerinin Üretim Performans Analizi ve Kamu Kurumları İçin Santral Örneği”, Mühendislik Alanında Uluslararası Araştırma ve Değerlendirmeler, Cilt 2, Serüven Yayınevi, Sayfa 195-216, Ankara, 2023.

ÖZET

BİYO-ESİNLENMELİ KANAT MODELİNİN SES ALTI RÜZGÂR TUNELİNDE AERODİNAMİK KARAKTERİSTİĞİNİN İNCELENMESİ

TUNCA, Samet Giray
Doktora Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mustafa Arif ÖZGÜR
Eylül, 2024, 123 sayfa

Bu tez çalışması düşük Reynolds sayılı hava akışında biyo-esinlenmeli kanat modelinin aerodinamik karakteristiğini incelemek için yapılmıştır. Pterozorların yüksek uçuş kabiliyetleri ve manevra yetenekleri bu çalışmada biyo-esinlenmeli deneylerin yapılması için temel alınmıştır. Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Rüzgâr Tüneli Laboratuvarında bulunan açık çevrimli ses altı rüzgâr tüneline pterozor kanadının fosil kaynaklı yapısından esinlenilerek oluşturulan 3 farklı kesitinden elde edilmiş Pt01, Pt02 ve Pt03 kanat profillerinin aerodinamik analizlerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada kanatlar üzerinde etkisi olan aerodinamik kuvvetlerin ve laminar akış ayrılmalarının analizleri yapılmıştır. Bu deneyler kuvvet sistemi, akış görüntüleme tekniği olarak duman teli sistemi ve MiniCTA yüzey problemleri ile gerçekleştirilmiştir. Deneyler, Reynolds sayıları 25000, 50000 ve 75000 olarak seçilerek, farklı akış koşullarında yapılmıştır.

Aerodinamik kuvvet ölçümleri ve duman görüntüleme deneyleri hücum açısı 0° 'den başlayarak 20° dereceye kadar 2° lik artışlarla gerçekleştirilmiştir. Aerodinamik kuvvet ölçümlerinde kaldırma ve sürüklenme kuvvet katsayıları belirlenmiştir. 3 kanat profilinin tutunma kayıplarının olduğu hücum açıları belirlenerek kanat profillerinden elde edilen aerodinamik kuvvet değerleri birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

Duman teli ile akış görüntüleme analizleri yapılarak, kanatların etrafındaki rüzgâr akışının davranışları görselleştirilmiştir. Bu deneylerden akışın laminar, geçiş ve türbülanslı bölgelerinin tespit edilmesinde yararlanılmıştır. Bununla birlikte deney sonuçları laminar ayrılma kabarcıklarının (LSB) konumu, boyutu ve oluşumu ile ilgili görüntülerin elde edilmesinde kullanılmıştır.

MiniCTA ile laminar ayrılma kabarcıklarının (LSB) kanat profillerinin yüzeylerindeki bölgelerini tespit etmek için deneyler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler kanat yüzeyinde oluşan ayrılma kabarcıklarının (LSB) boyutu ve konumu ile bunların kanatlardaki aerodinamik performansa olan etkilerini ortaya koymuştur. Duman

görüntüleri ve MiniCTA yüzey probu ile yapılan deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonuçların birbiri ile uyumluluk gösterdiği tespit edilmiştir.

Bu çalışma biyo-esinlenmeli kanat profillerinin akış kontrolü ve enerji verimliliği açısından potansiyel faydalarını vurgulayarak, gelecekteki tasarım ve optimizasyon çalışmalarına katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Aerodinamik, Akış Görüntüleme, Biyo-esinlenme, Laminer Ayrılma Kabarcığı (LSB), Rüzgâr Tüneli



ABSTRACT**INVESTIGATION OF AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF BIO-INSPIRED WING MODEL IN SUBSONIC WIND TUNNEL****TUNCA, Samet Giray****Doctoral Thesis, Department of Mechanical Engineering****Thesis Advisor: Prof. Dr. Mustafa Arif ÖZGÜR****September 2024, 123 pages**

This thesis study was carried out to examine the aerodynamic characteristics of the bio-inspired wing model in low Reynolds number air distribution. The high flight abilities and maneuverability of pterosaurs were used as the basis for conducting bio-inspired experiments. It was aimed to obtain aerodynamic analyzes of Pt01, Pt02 and Pt03 airfoils obtained from 3 different sections inspired by the fossil-based structure of the pterosaur wing in the open-loop subsonic wind tunnel located in the Wind Tunnel Laboratory of the Mechanical Engineering Department of Kütahya Dumlupınar University. In the study, aerodynamic forces and laminar formation separations affecting the wings were analyzed. This experiment was carried out with a force system, a smoke wire system as a flow imaging technique, and MiniCTA surface probes. The experiments are a structure created under different conditions by choosing Reynolds as 25000, 50000 and 75000.

Aerodynamic force measurements and smoke imaging experiments were carried out in increments of 2^0 degrees, starting from 0^0 degrees and up to 20^0 degrees. Lift and drag force coefficients were determined in aerodynamic force measurements. The angles of attack at which the 3 airfoils had stall were determined and the aerodynamic force values obtained from the airfoils were compared with each other.

By performing flow imaging analyzes with smoke wires, the behavior of the wind flow around the wings was visualized. These experiments were used to detect laminar, transitional and turbulent regions of the flow. In addition, the experimental results were used to obtain images regarding the location, size and formation of laminar separation bubbles (LSB).

Experiments were carried out with MiniCTA to detect the regions of laminar separation bubbles (LSB) on the surfaces of airfoils. The data obtained revealed the size and location of separation bubbles (LSB) formed on the wing surface and their effects on the aerodynamic performance of the wings. Smoke images and experimental results with

the MiniCTA surface probe were compared. It has been determined that the results are compatible with each other.

This study aims to contribute to future design and optimization studies by highlighting the potential benefits of bio-inspired airfoils in terms of flow control and energy efficiency.

Keywords: Aerodynamics, Bio-inspiration, Flow Visualization, Laminar Separation Bubble (LSB), Wind Tunnel



ÖNSÖZ

Doktora çalışmamın her aşamasında bana rehberlik eden, bilgi ve tecrübelerini paylaşarak araştırmalarımın gelişimine büyük katkı sağlayan kıymetli hocam danışmanım Prof. Dr. Mustafa Arif ÖZGÜR'e sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Kendisinin akademik yolculuğum boyunca gösterdiği sabır, destek ve yönlendirmeler benim için çok kıymetlidir.

Ayrıca, değerli katkılarıyla ve yönlendirmeleriyle araştırmalarımı derinleştirmeme yardımcı olan ikinci danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Onur KOŞAR'a, deneysel çalışmalarda yardımlarını esirgemeyen Arş.Gör. Kaan Can AKBABA'ya, akademik yaşamım boyunca bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım, gösterdiği destek ve sağladığı imkanlar için değerli hocam Prof. Dr. Ramazan KÖSE'ye ve çalışmamın her aşamasında bana destek olan aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Eylül 2024

Samet Giray TUNCA

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	v
ABSTRACT	vii
TABLolar LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xiv
KISALTMALAR VE SİMGELER	xvi
GİRİŞ	1

BİRİNCİ BÖLÜM

ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

1.1. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI.....	7
---------------------------------	---

İKİNCİ BÖLÜM

RÜZGÂR TÜNELLERİ

2.1. RÜZGÂR TÜNELİ.....	27
2.2. RÜZGÂR TÜNELİ TARİHÇESİ VE GELİŞİMİ.....	27
2.3. RÜZGÂR TÜNELİNİN SINIFLANDIRILMASI.....	29
2.3.1. Çevrim Şekline Göre Sınıflandırma	30
2.3.1.1. Kapalı Çevrim Rüzgâr Tüneli	30
2.3.1.2. Açık Çevrim Rüzgâr Tüneli.....	31
2.3.2. Akış Hızına Göre Sınıflandırma	32
2.3.2.1. Ses Altı Rüzgâr Tüneli (Subsonik Tünel).....	32
2.3.2.2. Geçiş Hızlı Rüzgâr Tüneli (Transonik Tünel).....	32
2.3.2.3. Ses Üstü Rüzgâr Tüneli (Süpersonik Tünel).....	33
2.3.2.4. Hiperses Rüzgâr Tüneli (Hipersonik Rüzgâr Tüneli).....	33
2.3.2.5. Hiper Hipersonik Rüzgâr Tüneli.....	33

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

MATERYAL METOT

3.1. AERODİNAMİK TANIMLAR BOYUTSUZ PARAMETRELER	35
3.1.1. Kanat Profiline Etkiyen Parametreler	35
3.1.1.1. Hücum Açısı.....	35
3.1.1.2. Aerodinamik Kuvvetler ve Katsayılar.....	36
3.1.1.2.1. Kaldırma Kuvveti ve Kaldırma Katsayısı.....	36
3.1.1.2.2. Sürüklenme Kuvveti ve Sürüklenme Katsayısı	37
3.1.1.2.3. Yunuslama Momenti ve Moment Katsayısı.....	37

3.1.1.3. Tutunma Kaybı (Stall - Perdövites)	38
3.1.1.4. Laminer Ayrılma Kabarcıkları (LSB)	38
3.1.1.5. Sınır Tabaka Özellikleri	39
3.1.1.6. Basınç Gradyanı	39
3.1.1.7. İz Bölgesi Özellikleri	40
3.1.1.8. Reynolds Sayısının Etkisi.....	41
3.1.1.9. Mach Sayısı	42
3.1.2. Rüzgâr Tüneli Laboratuvarı	42
3.1.2.1. Rüzgâr Tünelinin Özellikleri.....	42
3.1.2.2. Aerodinamik Kuvvet Ölçüm Sistemi	46
3.1.2.3. MiniCTA Sistemi	47
3.1.2.4. Akış Görselleştirme Yöntemi.....	53
3.1.2.5. Pitot Tüpü.....	54
3.1.2.6. 3B Yazıcı Özellikleri.....	55
3.2. BİYO-ESİNLENMELİ KANAT MODELİ	56
3.2.1. Biyo-Esinlenme	56
3.2.2. Pterozorlar (Uçan Sürüngenler)	56
3.2.3. Pterozor Kanat Prototip Parametreleri	59
DÖRDÜNCÜ BÖLÜM	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	
4.1. AERODİNAMİK KUVVET ANALİZLERİ	62
4.1.1. 25000 Re Sayısında Aerodinamik Kuvvet Analizleri	62
4.1.2. 50000 Re Sayısında Aerodinamik Kuvvet Analizleri	63
4.1.3. 75000 Re Sayısında Aerodinamik Kuvvet Analizleri	64
4.2. DUMAN TELİ İLE AKIŞ GÖRSELLEŞTİRME	65
4.2.1. 25000 Re Sayısında Duman Görüntüleme Analizi.....	65
4.2.2. 50000 Re Sayısında Duman Görüntüleme Analizi.....	69
4.2.3. 75000 Re Sayısında Duman Görüntüleme Analizi.....	73
4.3. MiniCTA - YÜZEY PROBU İLE YAPILAN ANALİZLER.....	77
4.3.1. 25000 Re Sayısında Yüzey Probu Ölçümleri	77
4.3.2. 50000 Re Sayısında Yüzey Probu Ölçümleri	80
4.3.3. 75000 Re Sayısında Yüzey Probu Ölçümleri	82
BEŞİNCİ BÖLÜM	
SONUÇ VE ÖNERİLER	
5.1. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	85

EKLER.....	89
KAYNAKÇA	95
DİZİN	103



TABLolar LİSTESİ**Sayfa**

Tablo 3.1: 3B Yazıcı Teknik Özellikleri.....	56
Tablo 3.2: Pterozor Türleri ve Fiziksel Özellikleri	57
Tablo 3.3: Deneysel Çalışmada Kullanılan Pterozor Kanat Kesitleri	60
Tablo 4.1: Pt01 Kanat Profili 25000 Re Sayısındaki Duman Deneyi Görüntüleri	66
Tablo 4.2: Pt02 Kanat Profili 25000 Re Sayısındaki Duman Deneyi Görüntüleri	67
Tablo 4.3: Pt03 Kanat Profili 25000 Re Sayısındaki Duman Deneyi Görüntüleri	68
Tablo 4.4: Pt01 Kanat Profili 50000 Re Sayısındaki Duman Deneyi Görüntüleri	70
Tablo 4.5: Pt02 Kanat Profili 50000 Re Sayısındaki Duman Deneyi Görüntüleri	71
Tablo 4.6: Pt03 Kanat Profili 50000 Re Sayısındaki Duman Deneyi Görüntüleri	72
Tablo 4.7: Pt01 Kanat Profili 75000 Re Sayısındaki Duman Deneyi Görüntüleri	74
Tablo 4.8: Pt02 Kanat Profili 75000 Re Sayısındaki Duman Deneyi Görüntüleri	75
Tablo 4.9: Pt03 Kanat Profili 75000 Re Sayısındaki Duman Deneyi Görüntüleri	76

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: MIT Medya Laboratuvarı ve İlham Alınan İpekböceği	21
Şekil 2.1: Kapalı Çevrim Rüzgar Tüneli	31
Şekil 2.2: Açık Çevrim Rüzgâr Tüneli	31
Şekil 3.1: Kanat Profili	35
Şekil 3.2: Ses Altı Rüzgâr Tüneli Genel.....	43
Şekil 3.3: Ses Altı Rüzgâr Tüneli Fanı	43
Şekil 3.4: Rüzgâr Tüneli Kolektörü.....	44
Şekil 3.5: Ses Altı Rüzgâr Tüneli Separatör Bölümü.....	45
Şekil 3.6: Ses Altı Rüzgâr Tüneli Bal Peteği Separatörü	45
Şekil 3.7: İnvörtör	46
Şekil 3.8: Kuvvet Sisteminde Bulunan 2 Adet Loadcell	46
Şekil 3.9: Kuvvet Sistemine Kanat Modelinin Montajı	47
Şekil 3.10: Kuvvet Sistemi Arayüzü	47
Şekil 3.11: MiniCTA Yüzey Probu (Glue on Probe)	48
Şekil 3.12: Yüzey Probu Görüntüsü	48
Şekil 3.13: MiniCTA Sınır Tabaka Probu (55p16)	48
Şekil 3.14: MiniCTA Sınır Tabaka (55P16) Probu Bağlantısı.....	49
Şekil 3.15: MiniCTA Yazılım Programı	49
Şekil 3.16: MiniCTA 55p16 Prob Kalibrasyon Eğrisi	49
Şekil 3.17: Ses Altı Rüzgâr Tüneli Test Odası Yatay Hız Dağılımı	51
Şekil 3.18: Ses Altı Rüzgâr Tüneli Test Odası Düşey Hız Dağılımı.....	51
Şekil 3.19: Ses Altı Rüzgar Tüneli Test Odası Yatay Türbülans Dağılımı.....	52
Şekil 3.20: Ses Altı Rüzgâr Tüneli Test Odası Düşey Türbülans Dağılımı	52
Şekil 3.21: Duman Görüntüleme Sistemi	53
Şekil 3.22: Pitot Tüpü Elektronik Ekranı	55
Şekil 3.23: Pitot Tüpü.....	55
Şekil 3.24: Pterozor Kanat Yapısı	58
Şekil 3.25: Pterozor Kanat Yapısının Üst Görünüşü.....	58
Şekil 3.26: SolidWorks'te Oluşturulmuş Pterozor Kanat Modeli	59
Şekil 4.1: Pt01, Pt02 ve Pt03 Kanat Profillerinin C_L ve C_D Karşılaştırma Grafiği (Re:25000).....	62

Şekil 4.2: Pt01, Pt02 ve Pt03 Kanat Profillerinin C_L ve C_D Karşılaştırma Grafiği (Re:50000).....	63
Şekil 4.3: Pt01, Pt02 ve Pt03 Kanat Profillerinin C_L ve C_D Karşılaştırma Grafiği (Re:75000).....	64
Şekil 4.4: Kanat Profili Yüzey Prob Kullanım Noktaları (x/c)	77
Şekil 4.5: Pt01 Kanat Profili 25000 Re Sayısında Laminer Ayrılma Kabarcığı Ölçümleri (8° Hücüm Açısında).....	78
Şekil 4.6: Pt02 Kanat Profili 25000 Re Sayısında Laminer Ayrılma Kabarcığı Ölçümleri (8° Hücüm Açısında).....	78
Şekil 4.7: Pt03 Kanat Profili 25000 Re Sayısında Laminer Ayrılma Kabarcığı Ölçümleri (8° Hücüm Açısında).....	79
Şekil 4.8: Pt01 Kanat Profili 50000 Re Sayısında Laminer Ayrılma Kabarcığı Ölçümleri (8° Hücüm Açısında).....	80
Şekil 4.9: Pt02 Kanat Profili 50000 Re Sayısında Laminer Ayrılma Kabarcığı Ölçümleri (8° Hücüm Açısında).....	81
Şekil 4.10: Pt03 Kanat Profili 50000 Re Sayısında Laminer Ayrılma Kabarcığı Ölçümleri (8° Hücüm Açısında).....	81
Şekil 4.11: Pt01 Kanat Profili 75000 Re Sayısında Laminer Ayrılma Kabarcığı Ölçümleri (8° Hücüm Açısında).....	82
Şekil 4.12: Pt02 Kanat Profili 75000 Re Sayısında Laminer Ayrılma Kabarcığı Ölçümleri (8° Hücüm Açısında).....	83
Şekil 4.13: Pt03 Kanat Profili 75000 Re Sayısında Laminer Ayrılma Kabarcığı Ölçümleri (8° Hücüm Açısında).....	83

KISALTMALAR VE SİMGELER

AC	Alternatif Akım
ART	Ankara Rüzgâr Tüneli
AR-GE	Araştırma Geliştirme
AoA	Hücum Açısı
CTA	Sabit Sıcaklık Anemometresi
DC	Doğru Akım
DLR	Alman Havacılık ve Uzay Merkezi
EDS	EDS Hava Uzay Teknolojileri Mühendislik Limited Şirketi
FDM	Fused Deposition Modeling
CFD	Hesaplamalı Akışkanları Dinamiği
kW	Kilowatt
TWh	Terawatt-saat
LE	Alula
LSB	Laminer Ayrılma Kabarcığı
MIT	Massachusetts Teknoloji Enstitüsü
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NREL	National Renewable Energy Laboratory
ODTÜ	Ortadoğu Teknik Üniversitesi
PIV	Parçacık Görüntülü Hız Ölçümü
PID	Proportional Integral Derivative
RANS	Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes Denklemleri
Pt01	Pterozor kanadından elde edilen 1 nolu kanat kesiti
Pt02	Pterozor kanadından elde edilen 2 nolu kanat kesiti
Pt03	Pterozor kanadından elde edilen 3 nolu kanat kesiti
C_D	Sürüklenme kuvveti katsayısı
C_L	Kaldırma kuvveti katsayısı
C_M	Moment katsayısı
Re	Reynolds sayısı

e_{max}	Max kamburluk (m)
t_{max}	Max kanat kalınlığı (m)
ΔP	Basınç farkı (Pa)
μ	Dinamik viskozite (kg/ms)
ν	Kinematik Viskozite (m ² /s)
c	Veter uzunluğu (m)
c	Ses hızı (m/s)
Ma	Mach Sayısı
Hz	Frekans
ρ	Akışkan yoğunluğu (kg/m ³)
A	Referans Alan (m ²)
F_L	Kaldırma kuvveti
F_D	Sürüklenme kuvveti
M	Moment (Nm)
V	Akışkan hızı (m/s)
l	Pterozor vücut uzunluğu (m)
S	Pterozor kanat alanı (m ²)
b	Kanat açıklığı (m)
p	Akışkan basıncı (Pa)
t	Kanat kalınlığı (m)
α	Kanadın hücum açısı
δ	Sınır tabaka
x	Veter uzunluğuna göre kanat üzerinde belirlenen nokta



TEZ METNİ

GİRİŞ

Günümüzde enerji toplumun ihtiyaçları açısından hayati bir öneme sahiptir. Modern yaşam tarzı, endüstriyel üretim, ulaşım, iletişim, sağlık hizmetleri ve eğlence gibi birçok alan enerjiye dayanmaktadır. İnsanlar, günlük yaşamlarında elektrikli cihazlar, ısınma ve soğutma sistemleri, aydınlatma, taşıma araçları ve daha birçok enerji tüketen teknolojiyi kullanmaktadır. Aynı şekilde, endüstriyel tesisler, işletmeler, altyapı ve hizmetler de büyük miktarda enerji gerektirir.

Enerji, insanların günlük yaşamlarını kolaylaştırır ve refahlarını artırır. Isınma ve soğutma sistemleri, elektrikli cihazlar, aydınlatma ve ulaşım araçları gibi enerjiye dayalı teknolojiler, daha konforlu ve verimli bir yaşam tarzını mümkün kılar. Endüstriyel faaliyetler ve işletmeler, büyümelerini sürdürebilmek ve rekabet avantajı elde etmek için büyük miktarda enerjiye ihtiyaç duyar. Üretim tesisleri, ulaşım ağları, bilgi teknolojileri ve diğer altyapı sistemleri, enerjiye güvenmekte ve ona dayanmaktadır.

Otomobil, uçak, tren ve gemi gibi ulaşım araçları, enerjiye bağlıdır. Toplu taşıma sistemleri, lojistik ve tedarik zincirleri, enerji verimliliği ve güvenliği sağlamak için güçlü bir enerji altyapısına ihtiyaç duyar.

Modern sağlık hizmetleri, elektrikli cihazlar, tıbbi görüntüleme ekipmanları, hastane altyapısı ve ilaç üretimi gibi birçok enerji yoğun teknolojiyi kullanır. Enerji kesintileri, sağlık hizmetlerinin kesintiye uğramasına ve hatta hayat kurtaran cihazların çalışmamasına neden olabilir.

Yenilenebilir enerji kaynakları, enerji depolama teknolojileri, akıllı şebekeler ve diğer yenilikçi enerji teknolojileri, toplumun enerji ihtiyaçlarını karşılamak ve sürdürülebilirlik hedeflerini desteklemek için giderek daha fazla önem kazanmaktadır.

Türkiye Ulusal Enerji Planı sonuçlarına göre, elektrik tüketiminin 2025 yılında 380,2 TWh, 2030 yılında 455,3 TWh ve 2035 yılında 510,5 TWh seviyesine ulaşması öngörülmektedir. 2023 yılı itibarıyla elektrik üretiminin %36,3'ü kömürden, %21,4'ü doğal gazdan, %19,6'sı hidroelektrik enerjiden, %10,4'ü rüzgâr enerjisinden, %5,7'si güneş enerjisinden, %3,4'ü jeotermal enerjiden ve %3,2'si diğer kaynaklardan elde edilmiştir.

2024 yılı haziran ayı sonunda ülkemizin kurulu gücü 112.999 MW seviyesine ulaşmıştır. Temmuz 2024 itibarıyla bu kurulu gücün kaynaklara göre dağılımı ise şu

şekildedir: %28,5'i hidroelektrik, %21,9'u doğal gaz, %19,3'ü kömür, %10,9'u rüzgâr, %15,6'sı güneş, %1,5'i jeotermal ve %2,4'ü diğer enerji kaynaklarıdır.

Ayrıca, 2024 yılı temmuz ayı sonu itibarıyla ülkemizdeki elektrik üretim santrali sayısı 30.380'e yükselmiştir (lisanssız santraller dâhil). Bu santrallerin 763'ü hidroelektrik, 69'u kömür, 367'si rüzgâr, 63'ü jeotermal, 350'si doğal gaz, 28.288'i güneş ve 480'i diğer enerji kaynaklarına dayanmaktadır (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024).

2024 itibarıyla dünya genelinde yenilenebilir enerjinin elektrik üretimindeki payı büyük ölçüde artmış durumda. Yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki payı, 2023'te yaklaşık %30 civarındayken, 2024'te bu oranın %35'e yaklaşması bekleniyor. Bu artış, güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, hidroelektrik ve biyokütle gibi kaynakların artan kullanımı ve maliyetlerinin düşmesi ile destekleniyor. Ancak bu oran, ülkelere ve bölgelere göre değişiklik gösterebilir. Örneğin, bazı ülkelerde yenilenebilir enerji oranı çok daha yüksek olabilirken, diğerlerinde bu oran daha düşük kalabilir (International Energy Agency, 2024).

Yenilenebilir enerji alanı ile ilgili çalışmaların önemi gün geçtikçe daha çok artmaktadır.

Özgür M.A. çalışmasında Türkiye'deki rüzgâr enerji potansiyelini ve rüzgâr enerjisinin kullanımı ile ilgili bilgiler vermiştir (Özgür, 2008).

Köse ve Özgür tarafından Dumlupınar Üniversitesi kampüsündeki rüzgâr enerji potansiyeli araştırılmıştır. 16 ay boyunca 10 ve 30 m. yüksekliklerden veri alınarak rüzgâr hız ortalamasının 4,1 m/s ve 4,4 m/s olduğu tespit edilmiştir (Köse ve Özgür, 2003).

Koşar ve Özgür tarafından santral sınır şekline bağlı değişim oranları araştırılmıştır. Çalışmalarında iz bölgesi verimi, enerji maliyeti, toplam maliyet ve yıllık enerji üretiminin santral sınır şeklinin değişimine olan hassasiyetlerinin %10'un altında olduğu gözlenmiştir (Koşar ve Özgür, 2019)

Bu ve benzeri çalışmalar incelendiğinde enerji toplum için vazgeçilmez bir ihtiyaç haline gelmiştir ve enerji politikaları, altyapı yatırımları ve teknolojik gelişmeler, toplumun enerji ihtiyaçlarını karşılamak ve sürdürülebilir bir enerji geleceği sağlamak için önemlidir.

Enerji talebinin artmasının arkasında yatan birçok faktör bulunmaktadır. Öncelikle, dünya nüfusunun hızla artması enerji talebini artırmaktadır. Artan nüfus, daha fazla enerjiye ihtiyaç duyan konutlar, ulaşım sistemleri, sağlık hizmetleri ve endüstriyel tesisler gerektirir. Ayrıca, ekonomik büyüme de enerji talebini artıran bir etkidir. Büyüyen ekonomiler, daha fazla enerji tüketen endüstriyel üretim süreçleri ve artan ulaşım ihtiyacıyla sonuçlanır. Kentleşme süreci de enerji talebini artırır. Kentlerde yoğun nüfus, daha fazla ısınma, soğutma, aydınlatma ve ulaşım gereksinimlerine yol açar. Teknolojik gelişmeler, daha verimli olmasına rağmen, aynı zamanda daha fazla enerji tüketen cihazlar ve sistemlerin kullanımını da beraberinde getirebilir. Son olarak, yaşam tarzı değişiklikleri, artan tüketim ve daha fazla seyahat gibi unsurlar da enerji talebinde artışa neden olabilir. Bu faktörlerin bir araya gelmesi, dünya genelinde enerji talebinin artmasına etki etmektedir.

Bu sonuçlar, enerji talebinin artmasının karmaşık ve çok yönlü etkilere sahip olduğunu gösterir ve enerji politikalarının, çevresel sürdürülebilirlik, ekonomik kalkınma ve enerji güvenliği gibi çeşitli faktörleri dengelemesi gerekebilir.

Enerji ve aerodinamik arasında yakın bir ilişki bulunmaktadır çünkü aerodinamik, akışkanların hareketini ve etkileşimlerini incelerken enerji dönüşümlerini de içerir. Aerodinamik, bir akışkanın hareket enerjisini analiz eder. Hava veya diğer akışkanlar, bir cisme çarptığında veya bir yüzey boyunca hareket ettiğinde, kinetik enerjiye sahiptir. Bu hareket enerjisi, nesnelere etrafındaki hava akışının şeklini ve davranışını etkiler. Yüksek hızlı akışlarda, aerodinamik sürtünme ve diğer enerji kayıpları önemli olabilir. Özellikle hava taşıtları gibi yüksek hızlı nesnelere aerodinamik tasarımı, enerji verimliliği ve performans açısından kritiktir.

Aerodinamik kuvvetler, yani kaldırma ve sürtünme, bir nesne üzerinde etki eden enerji dönüşümlerine yol açar. Örneğin, bir uçağın kanatları hava akışını yönlendirir ve bu da kaldırma kuvvetini üretirken aynı zamanda sürtünme ve rüzgâr direnci enerji kaybına neden olur. Aerodinamik prensipleri, rüzgâr türbinlerinin tasarımında ve verimliliğinde önemli bir rol oynar. Rüzgâr türbinleri, rüzgâr enerjisini kinetik enerjiye dönüştürmek için aerodinamik prensipleri kullanır.

Bu yönlerden dolayı, enerji ve aerodinamik, birçok alanda, özellikle ulaşım, enerji üretimi ve yapısal tasarım gibi alanlarda yakından ilişkilidir. Aerodinamik

prensipieri, enerji verimliliğini artırmak, performansı optimize etmek ve enerji dönüşümlerini daha etkin hale getirmek için önemli bir araçtır.

Hızla gelişen insansız hava aracı, mikro hava aracı ve küçük ölçekli rüzgâr türbin sektörlerinde kullanılmaya yönelik kanat profillerinin geliştirilmesi son yıllarda birçok araştırmacının dikkatini çekmiştir. Bu uygulama alanı aerodinamik biliminin düşük Reynolds sayılı akışlar adı verilen alt dalının ilgi konusudur (Pope, Harper, & Barlow, 1984). Düşük Reynolds aerodinamiğinde kanat etrafındaki viskoz etkiler güçlüdür (Genç, Kahraman ve Özışık, 2008).

Rüzgâr türbinleri, rüzgâr enerjisini kullanılabilir enerjiye dönüştürmek için çeşitli kanat tasarımlarına sahiptir. Türbin performansını belirleyen en kritik faktörlerden biri, kanat modelinin aerodinamik performansındaki değişikliklerdir. Rüzgâr türbin kanatlarında potansiyel olarak kullanılacak NACA-0018 kanat modelinin aerodinamik performansı, Tanürün ve arkadaşları tarafından yürütülen çalışmada hem sayısal hem de deneysel yöntemlerle analiz edilmiştir (Tanürün, Ata, Canlı ve Acır, 2019).

Tekever (Portekiz), University Beira Interior (Portekiz), ODTÜ, Delft Teknik Üniversitesi (Hollanda), DLR (Almanya), Invent (Almanya), Swansea Üniversitesi (Galler), Cranfield Üniversitesi (İngiltere) ve Aircraft Research Association (İngiltere) gibi dokuz farklı paydaşın bir araya geldiği Change Projesi, çeşitli kanat modifikasyonlarını tek bir kanat üzerinde birleştirmeyi hedeflemektedir. Bu proje, kanat boyu değişimi (teleskopik kanat değişimi), kanat kamburu değişimi (ön kenar ve arka kenar kambur değişimleri), kanat süpürme açısı değişimi ve kanat burulma değişimi gibi özelliklerin hepsini tek bir kanatta birleştirerek ortak bir çözüm geliştirmeyi amaçlamaktadır (Arslan, vd., 2015).

Change projesinin hedefi, kanat profilini farklı uçuş aşamalarında alışılmadık yöntemlerle değiştirerek sürekli bir aerodinamik verimlilik elde etmektir. “Tam morfing” olarak adlandırılan bu yaklaşım, yakıt tüketimini ve dolayısıyla atmosfere salınan zararlı gazları azaltmayı amaçlarken, aynı zamanda aerodinamik kaynaklı gürültüyü de düşürmeyi hedeflemektedir. Projede Orta Doğu Teknik Üniversitesi Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü’nün rolü ise uçak firar kenarı kontrol yüzeyinin tasarlanması, tüm kanadın yer titreşim testlerinin yapılması, kanadın rüzgâr tüneli testlerinin yönetilmesi ve uçuş testlerine katkı sağlanmasıdır (Arslan, vd., 2015).

Yi ve Feng çalışmalarında kompakt bir tasarım alanı oluşturabilen kanat profili şeklinin son derece önemli olduğunu belirtmişlerdir. İnce kanat profili teorisini temel alan PAERO parametre haline getirme yöntemine yönelik derin öğrenme çalışması yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda fiziksel olarak makul olmayan kanat profilini otomatik olarak filtrelenebilmektedir (Yi ve Deng, 2023).

Kanat profilleri, bir uçağın aerodinamik performansını büyük ölçüde etkiler.

Kanat profili, uçağın stabilitesini ve kontrolünü etkiler. Özellikle yüksek hızlarda, uygun bir kanat profili uçağın stabilitesini artırabilir ve pilotun kontrolünü kolaylaştırabilir.

Birçok faktörün kombinasyonu, belirli bir uçağın tasarımında kullanılan kanat profilinin seçimini etkiler. Uçak tasarımcıları, belirli uçuş gereksinimlerine ve performans hedeflerine göre en uygun kanat profili seçmek için aerodinamik analizler yaparlar.

Bu çalışmada; Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarında bulunan açık çevrimli ses altı rüzgâr tüneline bio-esinlenilmiş kanat modelinin aerodinamik hesaplamaları yapılmıştır. Kanat modeli 60-220 milyon yıl önce yaşamış uçuş kabiliyetleri üst seviyede olan uçan sürüngenler olarak adlandırılan “Pterozor” kanatlarından esinlenerek tasarlanmıştır. Seçilen kanat modelinin 3 farklı kesitinde yapılan çalışmalar ile farklı hız ve açılarda karşılaştırması yapılarak elde edilen veriler sunulmuştur. Havacılık sektöründe enerji verimliliği açısından aerodinamik iyileşmeler sağlayabilecek kanat profilleri elde etmek amaçlanmaktadır. Kanat kesitleri ile elde edilen veriler yeni kanat tasarımlarının temelini oluşturmaktadır.



BİRİNCİ BÖLÜM
ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

1.1. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Aerodinamik ile ilgili literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Aerodinamik ile ilgili çalışmaların yapıldığı sektörlerin arasında havacılık, uzay, otomotiv, rüzgâr enerjisi ve inşaat sektörleri önde gelmektedir. Bu çalışmaların bir kısmı da kanat aerodinamiği ile ilgilidir. Yapılan çalışmalar ile havacılıkta kullanılan kanat profillerinde iyileştirmeler ile yeni kanat tasarımları hedeflenmiştir.

Dünyada gelişmekte olan uzay teknolojilerini yakalamak, ancak bu alanda kullanılan araçlardaki aerodinamik yapıların incelenmesi ve geliştirilmesiyle mümkün olabilir. Bilindiği gibi uydu, roket ve benzeri uzay teknolojisi ürünler ciddi aerodinamik testlerden geçerek yapılan iyileştirmeler sonucunda sektöre ve bilime kazandırılabilir. Rüzgâr tüneli bu çalışmaların temelini oluşturacak incelemelerin yapılabileceği bilimsel değeri dünya çapında kabul edilmiş ve yaygın bir şekilde kullanılan sistemlerdir.

Gelişen teknoloji ile inşaat sektörü dikey mimariye geçmekte ve fütüristik tasarımlar yaparak görselliğe önem vermektedir. Görsellik her ne kadar önemi olsa da yapının güvenilirliği her şeyden daha önemlidir. Ülkemizin deprem bölgesinde bulunmasından dolayı inşaat yapılarının güvenilir olması gerekmektedir. Özellikle deprem afetleri meydana geldiğinde deprem şiddetine göre yapıların dayanıklılığı tartışılrsa da afet gerçekleşmeden önce yapının maruz kaldığı rüzgâr yükünün de yapıyı güçsüzleştirdiği tartışmalara konu olmalıdır. Bu anlamda yapıların tasarımları ve statik hesaplamaları yapıldıktan sonra gerçek koşullarda rüzgâr yükünün yapı üzerinde nasıl etkiler bıraktığı yapılacak rüzgâr tüneli ile görülebilecektir.

Günümüzde otomobil üreticileri, araçlarının aerodinamik performansına büyük önem vermekte ve bu amaçla geniş bütçelerle AR-GE çalışmaları yürütmektedir. Firmalar, tasarladıkları araçların ilk aşamada küçük ölçekli modellerini oluşturarak rüzgâr tüneline çeşitli deneysel testler gerçekleştirmektedir. Bu testlerde, farklı hızlarda hava akışları araca yönlendirilerek aerodinamik etkiler incelenmekte ve bu veriler aracılığıyla aracın aerodinamik yapısı belirlenmektedir. Bununla birlikte, gerçek rüzgâr tüneli testlerinin yüksek maliyetleri nedeniyle, yazılım firmaları ve bu alanda uzmanlaşmış mühendisler, daha uygun maliyetli analizler yapabilmek için çeşitli yazılım ve simülasyon programları geliştirmişlerdir.

Araçlarda yakıt verimliliğinin en önemli etkenlerinden bir tanesi araç aerodinamiğidir. Taşıt aerodinamik karakteristiklerinin belirlenmesi için Gebel M.E. ve

Önaldı S. (Gebel ve Önaldı, 2018) gibi rüzgâr tüneli testlerinden yararlanılmaktadır. Literatürde yer alan İcingür Y., Solmaz H.'nin çalışmalarında uyguladıkları yöntem üzerinden, rüzgâr tüneli donanımlarının tamamlanması ile test odası ölçülerine uygun model ve prototipler ile daha düşük rüzgâr hızlarında aerodinamik karakteristiklerin belirlenebilmesi için Reynolds sayısı bağımsızlığından faydalanılarak konu üzerinde yeni gelişmeler elde edilebilecektir (İcingür ve Solmaz, 2011).

Araçlarda yakıt verimliliğinin en önemli etkenlerinden bir tanesi araç aerodinamiğidir. Bir aracın aerodinamik sürüklenme katsayısı C_d , ne kadar küçükse aracın yakıt verimliliği o ölçüde artar. (Çakmak, 2000). Rüzgâr tünellerinde yapılan deneysel ölçümlerle C_d katsayısı belirlenirken, aerodinamik çalışmalarda hesaplamalı akışkanlar mekaniği gittikçe önem kazanmaktadır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile yapılan çalışmalarda tasarım üzerinde yapılan değişiklikler kolayca sisteme uyarlanabilir ve farklı tasarım parametrelerinin C_d katsayısına etkisi üretim aşamaları olmadan elde edilebilir. Bunun için öncelikle sistemin doğru sonuçları elde edebilecek şekilde modellenmesi gereklidir. Gebel M.E., Önaldı S. ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada bir elektrikli aracın 1/16 ölçekli prototipi rüzgâr tüneline deneylere tabi tutulmuş, deney sonuçları hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile sayısal olarak incelenmiştir. Rüzgâr tüneli deney seti test hacmi 210x200x450mm³ tür. 20 farklı kademede kontrol edilen motor sayesinde akış, hızı en fazla 25 m/s olarak elde edilebilmektedir. Rüzgâr hızı kızgın tel anemometresi ile ölçülmektedir. Deney düzeneğinin 3 boyutlu CFD modeli geliştirilmiştir. Farklı akış hızlarında yapılan analiz ve deneyler sonucunda elde edilen C_d katsayısı karşılaştırılmıştır. Sonuçlar arasındaki farkın %1 mertebesinde olduğu görülmüştür. Sonuçların yakın ve uyumlu olduğu gözlemlenmiştir (Gebel ve Önaldı, 2018).

Taşıtların aerodinamik karakteristiklerini belirlemek amacıyla rüzgâr tüneli testlerinden yaygın olarak faydalanılmaktadır. Ancak, model ve prototip arasında Reynolds sayısının eşdeğerliğini sağlamak için ya çok yüksek hızlı bir rüzgâr tüneli kullanılmalı ya da daha büyük ölçekli bir model tercih edilmelidir. Bu gereklilikler, maliyetleri önemli ölçüde artırmaktadır. Bununla birlikte, daha küçük ölçekli modeller ve düşük hızlarda yapılan testlerde aerodinamik karakteristiklerin belirlenmesinde Reynolds sayısı bağımsızlığı prensibinden yararlanmak mümkündür. İcingür Y. ve Solmaz H. tarafından yapılan çalışmada, Reynolds sayısı bağımsızlığı kullanılarak 1/24 ölçekli üç otomobil modelinin aerodinamik sürüklenme katsayısını belirlemek amaçlanmıştır.

Deneyle, maksimum serbest akış hızı 28 m/s olan bir rüzgâr tûnelinde gerçekteştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, tüm modeller için Reynolds sayısı bağımsızlığının sağlanamayacağını göstermiştir. BMW X5 E53, Alfa Romeo 156 ve Volkswagen New Beetle otomobilleri üzerinde yapılan testler sonucunda, aerodinamik sürüklenme katsayıları sırasıyla %14, %12,5 ve %7,8 hata oranlarıyla hesaplanmıştır (İçingür ve Solmaz, 2011).

Başka bir çalışmada, 1/15 ölçekli bir minibüs modelinin etrafındaki akış yapısı CFD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Minibüs modeline etki eden sürüklenme kuvveti, Fluent® yazılımı aracılığıyla beş farklı serbest akış hızında hesaplanmış ve bu sayede aerodinamik direnç katsayısı (C_D) belirlenmiştir. Akış analizleri, dinamik benzerlik şartının sağlandığı 2.8×10^5 ile 6.6×10^5 Reynolds sayısı aralığında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan blokaj oranı %5.34 olup, bu oran literatürde kabul edilen blokaj oranından daha düşüktür. Akış analizi sonuçlarında, minibüs etrafında akışın ayrıldığı ve basınç kaynaklı direncin yüksek olduğu bölgeler tespit edilmiştir. Ayrıca, pasif akış kontrol parçalarının kullanılmasıyla aerodinamik performansın iyileştirilebileceği gözlemlenmiştir. Yapılan analizler sonucunda, minibüs modelinin aerodinamik direnç katsayısı (C_D) 0.415 olarak belirlenmiş ve sürüklenme katsayısının %91.20'sinin basınç, %8.80'inin ise sürtünme kaynaklı olduğu saptanmıştır. (Bayındırlı, Akansu, Salman ve Çolak, 2015).

Akansu Y.E. ve çalışma arkadaşları tarafından gerçekleştirilen bu çalışmada, rüzgâr tûneli içerisinde yerleştirilmiş 1/32 ölçekli bir ağır vasıta modeli (çekici ve römork kombinasyonu) üzerinde dokuz farklı serbest akış hızında kuvvet ölçümleri yapılmıştır. Deneyle, 113.000 ile 453.000 arasında değişen Reynolds sayılarında gerçekleştirilmiş olup, çekici ve römorkun aerodinamik direnç katsayıları (C_D) deneysel olarak belirlenmiştir. Çalışmada, hareketli yol haricinde kinematik benzerlik sağlanmış ve blokaj oranı %3 gibi oldukça düşük bir seviyede olduğu için blokaj etkileri ihmal edilmiştir. Ayrıca, dinamik benzerlik koşulları altında Reynolds sayısı bağımsızlığı prensibi kullanılmıştır. Araştırma sonucunda, çekici ve römork kombinasyonu üzerinde aerodinamik direnç yaratan bölgeler belirlenmiş ve pasif akış kontrol yöntemleri kullanılarak aerodinamik performansta iyileşmeler elde edilmiştir. Özellikle, Model 1 aracında spoiler yapısının iyileştirilmesi sonucunda %15,71 oranında bir iyileşme sağlanmıştır. Model 2'de spoiler ile birlikte pasif akış kanalı kullanılarak %22,46, Model

3'te ise spoiler, pasif akış kanalı ve yönlendiricinin bir arada kullanılmasıyla %25,58 oranında aerodinamik performans iyileştirilmiştir (Akansu, Bayındırlı ve Seyhan, 2016).

Akansu diğer bir çalışmada plazma aktüatörün Naca 2415 kanat profilinin etrafında akış kontrolüne etkilerini incelemiştir. Kanat profiline Reynolds sayılarının 8000-90000 aralığındaki etkileri rüzgâr tüneline yapılan testler ile tespit edilmiştir. Kanat profiline etki eden aerodinamik kuvvet katsayıları belirlenmiş ve iz bölgesi akış görselleştirme çalışmaları yapılarak kanat etrafındaki akış yapısı ortaya çıkarılmıştır (Akansu ve Şanlısoy, 2020).

Kurç ve çalışma arkadaşlarının gerçekleştirdiği araştırmada, kısa test kesitine sahip Ankara Rüzgâr Tüneli'nde (ART), yönetmeliklerle tanımlanan rüzgâr hız profilinin oluşturulması amacıyla yüzey pürüz elemanları tasarlanmış ve bu elemanların performansları hem sayısal hem de deneysel olarak değerlendirilmiştir. Araştırmanın ilerleyen aşamalarında, yüksek frekanslı taban balansı yöntemi kullanılarak dikdörtgen kesitli bir yüksek bina modelinin rüzgâr etkileri incelenmiştir. Bu analizde, türbülans yoğunluğu, periyodik girdap etkisi ve rüzgâr vuruş açısının rüzgâr yüklerini nasıl etkilediği araştırılmıştır. Çalışmanın son aşamasında, elde edilen taban momenti verileri, çeşitli rüzgâr yönetmeliklerinin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır (Kurç, Kayışoğlu, Shojaee ve Uzol, 2012).

Koca M.S.'nin çalışmasında, su tüneli içinde akışkan analizi yapılacak bir model için, robotik olarak eksenel hareket, yunuslama ve yalpa hareketlerini gerçekleştirebilen bir aerodinamik kuvvet ölçüm ve analiz sistemi geliştirilmesi süreci ele alınmıştır. Bu AR-GE ve tasarım sürecinde, robotik hareket düzeneği kullanılarak altı eksenli bir dış denge düzeneği oluşturulmuş ve bu düzeneğin statik, dinamik ve adım tarama deneyleri kapsamında aerodinamik kuvvet ölçümünü ve uçuş simülasyonunu gerçekleştirmesi amaçlanmıştır (Koca, 2019).

Koca M.S. tarafından gerçekleştirilen deney, Çukurova Üniversitesi Makine Mühendisliği bölüm laboratuvarındaki su tüneline, tasarlanan ve üretilen düzenek kullanılarak yapılmıştır. Bu deneyde, kanat modeline 5 tam dalga hareketi uygulanmış ve saniyede 1000 veri toplanmıştır. Veriler her 50 veride bir ortalama alınarak, saniyede 20 veri seviyesine indirilmiştir. Düzenek, kanat modeline 0,05 Hz frekansında sinüzoidal hareket uygulamıştır ve 5 döngü süresince zamanlama hatası yaklaşık %1 olarak ölçülmüştür. Ayrıca, bu 5 döngü boyunca açı sapması yaklaşık 0,02 derece olarak

bulunmuştur. Harekete eşzamanlı olarak toplanan kuvvet verileri üzerinde yapılan incelemelerde, pozisyonlama motorları ve tünel motorunun verilere olan etkisi %1'in altında kalmıştır. Filtreleme işlemi, sinyal genliğini %80 oranında azaltmakta ve faz farkı olarak +45°'lik bir kayma oluşturmaktadır. Bu etkiler göz önünde bulundurularak, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi veya düzeltilmesi gerektiği ifade edilmiştir (Koca, 2019).

K. R. Cooper ve W. F. Campbell rüzgâr tüneli testlerinden ve kamyonlarda yapılan tam ölçekli aerodinamik sürtünme ölçümlerinden elde ettikleri verileri, rüzgâr türbülans etkilerini incelemek için kullanmışlardır. Bu etkileri daha iyi temsil edebilmek amacıyla, pürüzsüz akış rüzgâr tüneli verilerinin kısmi sabit ortalamalarını kullanarak verilerin ayarlanmasına izin vermişlerdir. Teori, türbülans koşullarında gözlemlenen davranışları tam olarak açıklayamamış olsa da, türbülanslı akış rüzgâr tüneli testlerinde gözlemlenen bazı genel eğilimleri başarılı bir şekilde tahmin edebilmiştir (Cooper ve Campbell, 1981).

Rüzgâr tünelleri, günümüzde birçok farklı alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Aslan Z., bu tezinde rüzgâr tünellerinin tarihsel gelişimini incelemiştir. Tez kapsamında, rüzgâr tüneli türleri ve bileşenleri üzerine kapsamlı bir literatür taraması yapılmış ve bu bileşenlerin tasarımında nelere dikkat edilmesi gerektiği araştırılmıştır. Ayrıca, EDS Rüzgâr Tüneli kullanılarak, test odasında daha yüksek hızlara ulaşabilen rüzgâr tünellerinin tasarımı hedeflenmiştir (Aslan, 2016).

İlk tasarım olarak kullanılan TS-1 modelinin test odası boyutları 1x2x2 metre olarak belirlenmiştir. Mesh sayısı çalışmaları kapsamında, 3.9 milyon ve 5.3 milyon mesh seçenekleri karşılaştırılmış ve akışkanlar dinamiği sonuçlarında çok küçük farklılıklar gözlemlendiği için 3.9 milyon mesh sayısının yeterli olduğu sonucuna varılmıştır. Türbülans modeli olarak realizable k-ε modeli tercih edilmiştir. Basit eğri modeli daralma konisi, literatürde karşılaşılan üç farklı daralma konisi şekliyle karşılaştırılmıştır. Daralma konileri arasındaki karşılaştırmada, test odası girişindeki akış kalitesi (akışın uniformluğu ve açısallığı) kriter olarak alınmıştır. Analizler sonucunda, dört farklı daralma konisi şekli arasında en iyi performansı 7. dereceden polinom şeklinde elde edilmiştir. Bununla birlikte, test odası girişindeki akış kalitesinin daha da iyileştirilmesi gerektiği düşünülmüş ve bu amaçla dinlenme odasına ek bir ızgara yerleştirilmesine karar verilmiştir (Aslan, 2016).

TS-1, TS-2 ve TS-3 tasarımlarının difüzörsüz ve dinlenme odasına eklenen ikinci ızgara ile yapılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) simülasyonları gerçekleştirilmiştir. TS-2 tasarımının test odası boyutları 0,75x2x2 metre, TS-3 tasarımının ise 1,5x2x2 metre olarak belirlenmiştir. Sonuçlar değerlendirilirken, test odası girişindeki akış kalitesi dikkate alınmıştır. En iyi sonuçlar TS-2 tasarımı için elde edilmiştir. TS-2 tasarımında, test odası girişindeki eksenel akış hızının ortalama akış hızına göre maksimum değişimi bazı bölgeler hariç %0,3 olarak bulunmuştur. Akışın maksimum geliş açısı ise bazı bölgeler hariç $0,55^\circ$ olarak ölçülmüştür. TS-1 tasarımında, eksenel akış hızının ortalama hıza göre maksimum değişimi %0,8 ve akışın maksimum geliş açısı 1° olarak belirlenmiştir. TS-3 tasarımı ise en düşük performans sonuçlarını vermiştir; test odası girişindeki eksenel akış hızının ortalamaya göre maksimum değişimi %2,5 ve akışın açışallığı maksimum $1,2^\circ$ olarak ölçülmüştür. Sonuç olarak, EDS Rüzgâr Tünelinde kullanılmak üzere üç farklı test odası boyutuna sahip tasarımlar, akışkanlar dinamiği analizi yardımıyla incelenmiştir (Aslan, 2016).

Diğer bir çalışmada rüzgâr tünelineki test sırasında, programlanabilir lojik kontrolör ve dokunmatik ekranlı bir sistem kullanılarak, sıcaklık ve hava hızı değerleri kaydedildi ve test edilen ürünün davranışları detaylı bir şekilde izlendi. Sıcaklık artışı sürecinde kullanılan sıcaklık kontrol cihazı, otomatik ayar fonksiyonuna sahip olup, kontrol parametreleri PID ve Nichols-Ziegler yöntemlerine göre optimize edildi. Bu yöntemlerin sonuçları, bulanık mantık algoritmaları ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir (Aydın ve Gökmen, 2020).

Lindgren, makalesinde 0.5 x 0.75 x 4.2 metre boyutlarında tasarlayıp Stockholm'de ürettikleri düşük hızlı ($V = 45$ m/s) rüzgâr tünelineki kalibrasyonuna dair teknik verileri sunmuştur. Bu rüzgâr tünelineki Reynolds sayısı yaklaşık 205.000 olarak ölçülmüştür. Deney odasında türbülans yoğunluğu %0,04 seviyesindedir ve deney odası içindeki hız değişimleri ihmal edilebilir derecede küçüktür. Ayrıca, makalede modern rüzgâr tünelleri hakkında kapsamlı bilgiler verilmiş ve rüzgâr tünelineki tasarımına ilişkin tüm kriterler detaylı bir şekilde açıklanmıştır (Lindgren, 2002).

Önen B. çalışmasında, Açık çevrimli emişli tip rüzgâr tünellerinin deney odasında gerçek şartlara yakın akım özelliklerini sağlamak için akım kalitesini etkileyen faktörler incelenmiştir. İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) laboratuvarlarında, rüzgâr tünelineki deney odasının hız dağılımına bağlı olarak akım kalitesi detaylı bir şekilde araştırılmış ve simülasyon analizleriyle karşılaştırılmıştır. NACA 4412 kanat profilinin

çeşitli hücum açıları altında basınç dağılımları, taşıma, sürüklenme ve moment katsayıları simülasyon ortamında hesaplanmış ve bu sonuçlar literatürdeki verilerle karşılaştırılmıştır. Deney odası giriş ve çıkış kesitlerindeki hız dağılımları, farklı noktalarda örtüşme göstermiştir. Giriş ve çıkış kesitlerinde, yüzeylere yakın bölgelerde sınır tabaka etkisi nedeniyle hızın azaldığı ve çıkış bölgesinde hızın giriş bölgesine kıyasla bir miktar düştüğü gözlemlenmiştir. Bu hız azalmasının, giriş ve çıkış bölgelerindeki kesit alanı farkından kaynaklandığı anlaşılmıştır. Sonuç olarak, yapılan analizlerin deneysel veriler ve literatürle uyumlu olduğu, Ansys Fluent 12.0 paket programında gerçekleştirilen simülasyonlarla doğrulanmıştır (Önen, 2011).

Kaya M.'nin çalışmasında, akış alanlarının ve bu alanlardaki cisimlere etki eden taşıma, sürüklenme ve basınç gibi büyüklüklerin incelenmesi geleneksel rüzgâr tünelleri ile gerçekleştirilebilse de aerodinamik araştırmalar için daha az maliyetli ve daha hızlı çözümler sunan metotların da mevcut olduğu vurgulanmıştır. Bu çalışmada, 1 metre uzunluğunda, 4 derece hücum açısına sahip ve 0.8 Mach serbest akış alanında bulunan bir airfoil yapısının yüzeyinde ve yakın çevresinde oluşan statik basınç dağılımları ve hız alanlarındaki değişimler Fluent programı kullanılarak analiz edilmiştir. Hücum kenarına yakın bölgede, airfoil yapısının üst tarafında hava hızının ve Mach sayısının serbest akım alanındaki değerlere kıyasla arttığı, diğer bölgelerde ise pek değişmediği belirlenmiştir. Ayrıca, hücum kenarına yakın bölgede airfoil yapısının üst tarafında statik hava basıncının serbest akım alanındaki değerlere göre azaldığı tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçların, Naca gibi birçok araştırma birimi tarafından yapılan rüzgâr tüneli deney sonuçları ile uyumlu olduğu görülmüştür. Hücum kenarına yakın bölgede airfoil profilin üst tarafında Mach sayısının ve hava hızının diğer bölgelere göre yüksek, statik basıncın ise düşük olduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, kullanılacak kanat yapısına göre kaldırma kuvvetini artırmak ve düşük sürüklenme kuvvetleri elde etmek için en uygun airfoil ve hücum açısını belirlemede Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) yöntemi, düşük maliyetle, kısa sürede ve sınırsız parametrelerle çalışma imkânı sunmaktadır. (Kaya, 2014).

Ali Vakil ve Sheldon I. Green tarafından yapılan çalışmada, orta Reynolds sayılarında iki boyutlu silindir etrafındaki akış hem akışa dik hem de akışa paralel silindirler için detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu çalışmada, serbest akış koşullarında, $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ açı aralığında ve en-boy oranları $2 < L/D < 20$ olan paralel silindirlerin bilgisayar simülasyonları ele alınmıştır. Simülasyonlar, Reynolds sayıları $1 < Re < 40$

aralığında gerçekleştirilmiştir. Araştırma sonuçlarına göre, kaldırma kuvvetinin sürüklenme kuvvetine oranı, bütün boy oranları için $40^\circ < \alpha < 50^\circ$ açı aralığında maksimum değere ulaşmıştır. Ayrıca, kaldırma (C_L) ve sürüklenme (C_D) katsayıları arasındaki ilişkiler, sayısal verilerle en iyi eğri uydurmalar kullanılarak ortaya konulmuştur (Vakil ve Green, 2009).

Post M.L. ve diğerleri tarafından, manevra yapan kambur balinaların gözlenmesi ile sinüzoidal hücum kenarlı kanatların tutunma kaybının neden olduğu çarpıcı kaldırma kaybını önlediği ve tutunma kaybı sonrası rejimindeki kaldırma kuvvetinde kademeli bir düşüş meydana getirdiği görülmüştür. 6 farklı kanat geometrisini -2° ve 24° hücum açısı ve 100.000 – 500.000 Reynolds sayısı aralığında yağlı yüzey ile akış görüntüleme ve CFD analizleri ile test etmişlerdir (Post, Decker, Sapell ve Hart, 2018).

Kambur balinalar yüzerken göğüs yüzgeçlerini kullanırlar. Bu yüzgeçlerin hücum kenarlarında bir çeşit pasif akış kontrol mekanizması olarak görev yapan hidrodinamik açıdan önemli yumrucuklara sahiptir. Kambur balinalar “bubble net” beslemesi sırasında sıkı dönüşler ve yuvarlanmalar gerçekleştirerek yüksek manevra kabiliyeti gösterirler (Post, Decker, Sapell ve Hart, 2018).

Miklosevic ve arkadaşları hücum kenarı yumrucuklarının aerodinamik etkilerini inceleyen ilk takımdır ve yaptıkları çalışmada hücum kenarı yumru uygulamasının tutunma kaybı açısını %40 oranında yükselttiği söylemişlerdir. Ayrıca tutunma kaybı sonrası rejimde sürüklemenin düştüğünü belirtmişlerdir. Bu çalışma düşük hızlı bir rüzgâr tüneline 505.000 ve 520.000 aralığındaki Reynolds sayılarında yaklaşık 0,2 Mach sayısında -2° ile 20° aralığında değişen hücum açılarında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma, hücum kenarı yumrucuklarının kaldırma, sürüklenme, moment ve tutunma kaybı karakteristiğinde önemli etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Yükselen tutunma kaybı açısına ek olarak maksimum kaldırma katsayısı %6 artmış ve sürüklenme kuvveti %32 düşmüştür. Miklosevic ve diğerleri balinanın yuvarlanma yeteneğini yükseltmek için yüzgeç üzerindeki kaldırma kuvvetlerinde dengesizlik oluşturduğunu yani birinin üzerinde pozitif kaldırma var iken diğerinin üzerinde negatif kaldırma bulunduğunu öne sürmüşlerdir (Miklosovic, Murray, Howle ve Fish, 2004).

Iskandar Shah Bin Ishak'ın çalışmasında, rüzgâr tüneli test teknikleri ve düşük ölçekli küçük bir hafif uçak modelinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) aerodinamik karakteristikleri üzerine yapılan araştırmalar vurgulanmıştır. Rüzgâr tüneli

testleri, hücum açısı ve flap sapma açısındaki varyasyonları incelemek amacıyla Malezya Teknoloji Üniversitesi'nin Açık Devre Subsonik Tünel tesislerinde gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde, 'blokaj' etkileri gibi rüzgâr tüneli düzeltmeleri, sonuçların gerçek uçuş koşullarına olabildiğince yakın olmasını sağlamak amacıyla veri azaltma sürecinde dikkate alınmıştır. Ayrıca, modelin aerodinamik özelliklerinin hesaplanması için CFD simülasyonları Fluent 6.1 yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Rüzgâr tüneli test sonuçları ile CFD simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması, iki yöntemin sonuçlarının uyumlu olduğunu göstermiştir (Ishak, 2006).

Başka bir çalışmada Akış simülasyonu için açık kaynak kodlu OpenFOAM yazılımı kullanıldı. Naca 0015 kanat profili için üç farklı türbülans modeli seçildi. Yazılımda Aerodinamik kuvvetlerin tespiti yapıldı (Suvanjumrat, 2016).

Wang ve Gu, çeşitli köşe düzenlemelerine sahip iki boyutlu prizma modelleri üzerinde eş zamanlı basınç ölçümleri gerçekleştirmiştir. Bu ölçümler, düşük türbülans seviyesine sahip üniform akış koşulları altında ve Reynolds sayısının 1×10^5 ile 4.8×10^5 arasındaki değişkenlikte yapılmıştır. Deneysel model olarak, bir kare prizma, üç farklı köşe pahalılığına sahip kare prizma ($B/D = \%5, \%10, \%15$; burada B köşe boyutu, D ise kesit boyutunu temsil eder) ve altı farklı köşe yarıçapına sahip yuvarlatılmış köşeli kare prizma ($R/D = \%5, \%10, \%15, \%20, \%30, \%40$; burada R köşe yarıçapını ifade eder) kullanılmıştır. Sürüklenme katsayıları, rüzgâr basınç dağılımları, aerodinamik kuvvet katsayılarının güç spektrumu ve Strouhal sayıları gibi deneysel veriler sunulmuştur. Modeller, Reynolds sayısına bağlı olarak ortalama sürüklenme kuvvetlerinin değişimine göre çeşitli kategorilere ayrılmıştır. Özellikle, $B/D \leq \%15$ ve $R/D \leq \%15$ olan modellerin ortalama sürüklenme katsayılarının Reynolds sayısındaki değişimden etkilenmediği gözlemlenmiştir (Wang ve Gu, 2016).

Hamdani ve Sun, NACA 0012 kanat profilinin kararsız hareketlerini ve düşük Reynolds sayılarında aerodinamik kuvvetlerle akış yapısını Navier-Stokes denklemleri kullanarak nümerik olarak incelemiştir. Çalışmada, kanat profilinin serbest akım bölgesindeki hızının artış ve azalışları detaylı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, düşük Reynolds sayılarında, kanat profilinin bir hızdan diğerine ani geçiş yapmasının büyük aerodinamik kuvvetlerin ortaya çıkmasına neden olduğunu ortaya koymuştur (Hamdani ve Sun, 2000).

M. A. Özdemir ve S. Onbaşıoğlu, çalışmalarında F-4 Phantom II uçağının kanat kök profili olarak kullanılan NACA 0006 profilini incelemiştir. Bu inceleme, Spalart-Allmaras ve $k-\epsilon$ türbülans modelleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizler, 0.4, 0.6 ve 0.8 Mach sayılarında ve 0° , 2° , 4° , 6° ile 8° hücum açılarında yapılmıştır ve bu süreçte Fluent ticari yazılımı kullanılmıştır. Araştırmanın sonuçları, daha önce Naca (2003) tarafından rüzgâr tünelleri aracılığıyla elde edilen deneysel verilerle karşılaştırılmıştır (Özdemir ve Onbaşı, 2004).

E. Farsimadan ve M. R. Mokhtarzadeh-Dehghan, 90° bükümlü bir bölümde yerleştirilmiş NACA 0012 kanat profilinin türbülans özelliklerini sıcak-tel anemometresi kullanarak deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada, kanat profilinin yaklaşan akışa göre yön değişikliklerinin ve sırasıyla 1 , 1.5 ve 2×10^5 Reynolds sayılarındaki 10 m/s, 15 m/s ve 20 m/s serbest akım hızlarının etkileri araştırılmıştır. Öne çıkan hususlar, kanat profilinin veter uzunluğunda ve üst yüzeyindeki sınır tabakasındaki türbülans özellikleridir. İncelenen parametreler arasında akış boyu boyunca ortalama hız, türbülans miktarları ve bu değişimlerin normal ve uzunluk yönlerinde nasıl değiştiği bulunmaktadır. Araştırma, sınır tabakasındaki türbülans karakteristiklerinin hassasiyetini ortaya koymuştur. Türbülans içinde uzunluk yönünde elde edilen ortalama hız ve akış doğrultusundaki türbülans yoğunluğu ölçümleri, girdap benzeri yapılarla ilişkili türbülans varyasyonlarının varlığını tespit etmeyi sağlamıştır (Farsimadan ve Mokhtarzadeh-Dehghan, ty.).

Katı yüzeyler üzerindeki akışın, geometrik veya dışsal faktörlerden kaynaklanan pozitif basınca maruz kalması sonucunda yüzeyden ayrılması olayı "tutunma kaybı" olarak adlandırılmaktadır. Tutunma kaybı, hava araçlarının performansını ciddi şekilde etkileyen kritik bir durumdur ve kanat profilinin aerodinamik tasarımına bağlı olarak değişik kritik hücum açılarında meydana gelebilir. Bu bağlamda, Göv İ., Doğru M.H., ve Korkmaz Ü. tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda, kanat profilinin aerodinamik tasarım şartlarına uygun olarak uçuş sırasında değiştirilmesi yoluyla farklı hücum açılarında maksimum performansın elde edilmesi hedeflenmiştir. Bu çalışma kapsamında, Naca 4412 kanat profili temel alınarak 2 boyutlu hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) analizi kullanılmıştır. Uçuş sırasında değişken hücum açılara sahip profillerin aerodinamik performanslarını değerlendirebilmek için, Naca 4412 profiline iki farklı varyasyon (Naca 4412_1 ve Naca 4412_2) eklenmiş ve bu profillerin performansları orijinal Naca 4412 profiliyle karşılaştırılmıştır. Analizler 0° ile 23°

arasındaki hücum açılarında gerçekleştirilmiş ve bu kapsamda taşıma katsayısı, sürükleme katsayısı ve tutunma kaybı performans parametreleri incelenmiştir. Sonuç olarak, en yüksek aerodinamik verimliliği sağlamak amacıyla, 0° ile 12° hücum açıları arasında Naca 4412 profilinin, 12° ile 17° arasındaki açı aralığında Naca 4412_2 profilinin, ve 17° 'den itibaren Naca 4412_1 profilinin kullanılması önerilmiştir (Göv, Doğru ve Korkmaz, 2019).

Uçak, helikopter ve insansız hava araçları gibi çeşitli uçan sistemlerde, haricî yüklerin entegrasyonu sırasında dikkate alınması gereken önemli bir konu çırpıntı (flutter) olgusudur. Çırpıntı, haricî yükün kütsel ve boyutsal özelliklerinin yanı sıra uçuş irtifası ve hız gibi faktörlere bağlı olarak değişen dinamik salınımlar içerir. Bu salınımlar zamanla genliğini artırarak uçan platformun ana yapısal elemanlarında kalıcı hasarlara neden olabilir. Sonuç olarak, uçuş güvenliği tehlikeye girebilir ve insan taşıyan platformlarda ciddi kazalara yol açabilir. Dolayısıyla, haricî yük entegrasyonu süreçlerinde, uçan sistemin farklı uçuş konfigürasyonları açısından çırpıntı riski detaylı bir şekilde incelenmelidir.

Bu incelemeler, uygun yazılımlar kullanılarak gerçekleştirilen aeroelastik analizler, ölçeklendirilmiş rüzgâr tüneli testleri ve gerçek uçuş koşullarında yapılan çırpıntı testlerini içermektedir. Bu süreçler genellikle yüksek maliyetli olup, uçan platform için güvenli uçuş sınırlarının belirlenmesini sağlar (Ceyhan, Sümer ve Özkan, 2013).

F-16 savaş uçağı üzerinde yapılan bir çırpıntı testinde, başlangıç noktası olarak 10.000 ft yükseklik ve 0.7 Mach hızı belirlenmiştir. Testler sırasında uçuş hızı, 0.05 Mach gibi düşük değerlerle artırılarak kademeli olarak 5.000 ft ve ardından 2.000 ft irtifalarına indirilmiştir. Her test noktasında yapıya bilinen kuvvetler uygulanarak, yapı modelinin özellikleri gerçek zamanlı olarak değerlendirilmiştir.

Gerçek zamanlı analizlerin yanı sıra, insan taşıyan sistemlere göre daha az kritik olan İHA'lar ve model uçaklarda test sonrası (off-line) çırpıntı analizleri de yapılmaktadır. Bu testlerin ardından gerçekleştirilen çırpıntı analizleri, ele alınan uçan sistemin uçuş sınırlarını çırpıntı riskini önleyecek şekilde belirlemek için kullanılır (Ceyhan, Sümer ve Özkan, 2013).

Tian ve diğerleri dönme merkezinin 0,16C ile 0.52C (burada C kanadın kort uzunluğunu ifade ediyor) aralığında değiştiği pitch salınım hareketi yapan Naca 0012'nin

iz bölgesinde oluşan girdap yapılarını incelemek için deneysel bir araştırma yapmışlardır. Deneysel aralığı 3,8 ile 13,2 arasında değişen indirgenmiş frekans değerlerinde ve 3400 Reynolds sayısında düşük hızlı rüzgâr tüneline gerçekleştirilmiştir. İz bölgesindeki akış alanını karakterize etmek ve salınım hareketi nedeniyle üretilen itki performansını ölçmek için PIV (particle image velocimetry) analizleri gerçekleştirilmiştir. Dönme merkezi yerinin, salınım hareketi yapan kanadın kararsız iz bölgesi girdap yapılarını ve itki performansını etkilediği görülmüştür. Dönme merkezinin hareketinin orijinal salınım hareketine bir dalma hareketi eklentisi olarak düşünüleceğini söylemişlerdir (Tian, vd., 2016).

Kazemi ve diğerleri Naca 0021 kanat profilini kullanarak dönel şekilli değirmen formunda bir kanat yapısı üretmişlerdir. Bu dönel değirmen şekilli kanat yapısının aerodinamik performansı sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Duman görüntüleme deneyleri, kanat yapısı üzerindeki ayrılma ve durma noktalarını belirlemek için küçük boyutlu bir rüzgâr tüneline gerçekleştirilmiştir. Sayısal metod, Reynolds ortalamalı Navier-Stokes denklemlerinin sonlu hacim yöntemi ve kayma gerilmesi taşınımı türbülans modeline ($k-\omega$ SST) dayanmaktadır. Kanat yapısının dönel hareketi neticesinde oluşan Magnus etkileri, çeşitli hız oranları (dönel yüzey hızının rüzgâr hızına olan oranı) ve birkaç hücum açısı altında incelenmiştir. Sonuçlara göre hız oranı 3, hücum açısı 0° ve Reynolds sayısı 94000'de iken dönel kanat yapısının, 130 kaldırma/sürüklenme oranına ulaştığını ve bu oranın orijinal kanat yapısına kıyasla yaklaşık olarak 2,9 kat yükseldiğini söylemişlerdir (Kazemi, Ahmadabadi, Sedaghat ve Saghafian, 2016).

Hansen ve diğerleri, yumru genliğinin düşmesi ile daha yüksek maksimum kaldırma katsayısı ve daha büyük tutunma kaybı açısı elde edildiğini göstermiştir. Dalga boyunun bir sınıra düşürülmesi ile kaldırma performansının arttığı gözlenmiştir ancak bu sınır ötesinde performansta düşüş gözlenmiştir. Yazarlar bu sonuçlardan yola çıkarak, en iyi performansı veren genlik değeri için ulaşılabilecek bir optimum genlik/dalga boyu oranının var olduğunu söylemişlerdir. Kendi çalışmaları için optimum yapı 0,03 c genlik ve 0,11 c dalga boyudur. Etkin yükseklik/sınır tabaka kalınlığı oranının 0,2 – 0,5 değerleri ile iyi belgelenmiş küçük girdap üretici etkinliğinin genlikte yapılacak azalmanın yumrucuk performansının artmasına neden olabileceğini söylemişlerdir (Hansen, Kelso ve Dally, 2010).

Guerreiro ve Sousa, 70.000 – 140.000 Reynolds sayısı aralığında bir LS1-0417 kanat profilinin sinüzoidal hücum kenarlı versiyonlarını temel profil ile birlikte

incelemişlerdir. Bu çalışmada gerçekçi balina geometrilerinden daha küçük kanat açıklığı oranlarında (~ 1 ve $\sim 1,5$) gerçekleştirilmiştir. Genlik ortalama kort uzunluğunun %6 - %12'si, kanat açıklığı dalga boyları ise %25 - %50'si aralığında değişmektedir. Sonuçlar daha yumuşak tutunma kaybı karakteristiği elde edildiğini ve maksimum kaldırma kazancının %45 mertebesinde olduğunu göstermiştir fakat bu sonuçların kanat açıklığı oranına yüksek hassasiyet gösterdiği belirtilmiştir (Guerreiro ve Sousa, 2012).

Kanat yapıları hakkında birçok sayısal araştırma gerçekleştirilmiştir. Bazı araştırmacılar Reynolds ortalama Navier-Stokes (RANS) modelini kullanırken diğerleri Detached Eddy Simulation (Bağımsız girdap simülasyonu, sınır tabaka içinde RANS diğer yerlerde LES) türbülans modelini kullanmışlardır. Türbülanslı akış DES türbülans modelinin ikinci dereceden kesinliği ile hem zaman hem de konum için çözümlenmiştir. Kafes yapısı 2,6 milyon eleman içerir ve kanat yüzeyi ve tünel duvarları için kaymama koşulu uygulanmıştır. Çözümleme için MHPCC Tempest IBM P4 kümesinde 32 CPU kullanılarak 24 saat gerekmiştir. Kaldırma ve sürüklenme katsayıları deneyler ile iyi uyum sergilemiştir. Sonuçlara göre, taraklı yüzgeç modelinde yumrucuklar ile hizalanmış akış yönünde kuvvetli girdaplar gözlenirken pürüzsüz yüzgeç yapısında bu yapılar gözlenmemiştir. Taraklı yüzgecin orta noktasındaki yüksek değerli vortisitinin yüzeye yakın taşıdığı yüksek momentum akışının sınır tabakasına yeniden enerji verdiği gözlenmiştir. Yüzgeç yüzeyindeki ortalama kayma gerilmesi akış çizgisi konturları, sinüzoidal hücum kenarı modelinde firar kenarı ayrılmasının köke doğru kuvvetli bir şekilde artmadığını göstermiştir. Yazarlar bu akış davranışını, akış ayrılması gelişimini engelleyen kanat perdesi adı verilen pasif ayrılma kontrol mekanizmasına benzetmiştir. Diğer bir gözlem, daha düşük kort uzunluğu ve yerel Reynolds sayısı değerlerine sahip dış taraftaki bölümün hücum kenarı ayrılmasına sahip olduğudur. İç taraftaki bölümde akış ayrılması ilk olarak firar kenarından başlamaktadır (Guerreiro ve Sousa, 2012).

Bir başka çalışmada, iki denklemlilik γ - Re_{0t} geçiş modeli geliştirilmiş ve bu model, insansız hava araçlarında sıkça kullanılan çeşitli kanat profillerinin performanslarının tahmin edilmesinde kullanılmıştır. İlk aşamada, düz levha üzerindeki akış için daha önce deneysel olarak doğrulanan bağıntılar, düşük hız ve yüksek Reynolds sayısı koşulları altında ince bir profil olan Naca 64A006 üzerinde test edilmiştir. Bu doğrulama çalışmasının ardından, aynı yöntem, orta kalınlıktaki E387 ve SD7037 kanat profilleri üzerinde de uygulanmıştır. Çalışmada kullanılan geçiş modeli bağıntısının, literatürdeki

sayısal verilerle karşılaştırıldığında başarılı bir tahmin aracı olduğu belirlenmiştir (Çakmakçioğlu, 2013).

Diğer bir çalışmada, Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) tarafından geliştirilen S833 kanat profili incelenmiştir. Kanat performansına yüzey pürüzlülüğünün etkisini belirlemek amacıyla, 2 seviyeli tam faktöriyel deney tasarımı modeli kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, C_L/C_D oranı üzerinde en belirleyici faktörün yüzey pürüzlülüğü olduğu tespit edilmiştir (Çanakçı, vd., 2019).

Bir tez çalışmasında, NACA 651-412 kanat profilinin incelenmesi amacıyla tasarım sürecinde SolidWorks programı, akış ve yapısal analizlerde ise sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ANSYS programı tercih edilmiştir. Kanat profilinin uzunluğu 4 metre olarak belirlenmiş ve tasarım aşamasında 9 rib, 2 spar, ile kanadın alt ve üst profilleri detaylı olarak tasarlanmıştır. Yapılan akış analizi sonuçlarına göre, hücum açısının artmasıyla birlikte kanat profili yüzeyi üzerindeki basıncın da arttığı tespit edilmiştir. Statik analizler ise hücum açısındaki artışın, yer değiştirme, eşdeğer gerilme, eşdeğer gerinim, çekme gerilmesi ve basma gerilmesi gibi yapısal parametrelerde bir artışa neden olduğunu ortaya koymuştur (Çekirdek, 2023).

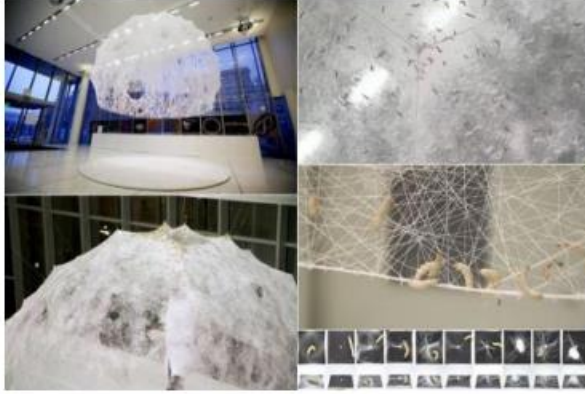
İnsanın doğayı taklit etmesinin nedeni, doğal renklere, geometriden ve hareketten anladıklarını işlevsel ve estetik açıdan güzel tasarımlara dönüştürme arzusudur. Bu bağlamda insanın kendisi dışındaki türler açısından kendisine en yakın olan hayvan iskeletlerinin biçim ve işleviyle kurduğu bağlantı, gözlem, merak ve denemenin kesişiminde halen güncel tasarım ihtiyaçlarını karşılamaktadır. Doğanın ve evrenin sırlarını keşfetmek, teknolojiyi geliştirmek ve dünyanın geleceğini şekillendirmek amacıyla yapılan tüm üretimler sayesinde modern dünyada oluşmuştur (Geylani, 2023).

Doğada, insan ihtiyaçlarına çözüm bulabilecek benzersiz çeşitlilikte ve zenginlikte materyaller mevcuttur. Son dönemde, daha sürdürülebilir bir dünya hedefiyle doğayı taklit eden ve mühendislik, mimarlık, tasarım gibi alanlarda doğadan ilham alan "biyomimikri" kavramı öne çıkmaktadır. Bu kavram, tasarımcılara biyotasarım alanında yeni ve yenilikçi yaklaşımlar keşfetme imkânı sunmaktadır. Doğadan esinlenen biyomimikri, doğa ile iş birliği yapmayı esas alan biyotasarım konsepti ile de doğrudan bağlantılıdır (Gülperçin, 2023).

Literatürde bio-esinlenmeli çalışmalardan ilham alınarak uygulamaya konulan birçok örnek vardır. Yusufçuk böceğinin kanat yapısından ilham alınarak helikopter

pervaneleri ve Münih stadyumu, Namib çöl böceğinin yapısından ilham alınarak Namibya Üniversitesi Hidroloji binası ve ipek böceğinden ilham alınarak MIT medya laboratuvarı (Şekil 1.1) gibi birçok yapı mevcuttur.

Şekil 1.1: MIT Medya Laboratuvarı ve İlham Alınan İpekböceği



Kaynak: (Anonymous, 2023d; Gülperçin, 2023).

Lu ve diğerleri çalışmalarında aerodinamik performans perspektifinden durmayı geciktirmek ve kaldırma kuvvetini artırmak için ön kenardaki açıklıklı dalgalılığın optimizasyon tasarımına vurgu yapılmıştır. Dalgalı konfigürasyonun dönüşümü için, ön kenar tüberküllerinin daha fazla varyantını üretmek için F-spline eğrilerini kullanan form parametrelili yaklaşım kullanılmıştır. CFD hesaplamaları kullanılarak gerçekleştirilen akış özelliklerine ilişkin sayısal araştırmalar, sayısal şemayı deneysel verilerle doğrulamak için kullanılmıştır. Pürüzsüz kanadın aksine, sırasıyla durma açısını ve kaldırma kuvvetini artıran dört optimal kanat profili elde edilmiştir. Bu türden optimize edilmiş biyo-ilhamlı tasarım, belirli bir işletim mekanizmasının verimliliğini artırmak için akış kontrollü cihazlara uygulanabilir (Lu, Li, Chang, Chuang ve Xing, 2021).

Kambur balina yüzgecindeki iki belirgin çıkıntıyı taklit eden yeni bir çift tümsekli hidrofoil tasarımının hidrodinamik özellikleri araştırılmıştır. Naca 634-021 bazlı folyoya sahip çift tümsekli hidrofoil ve benzer konfigürasyonda bir çıkıntıya sahip bir folyo için bir geçiş modeli kullanan deneylere ve CFD araştırmalarına dayanan ayrıntılı bir karşılaştırma çalışması sunulmaktadır. Sonuçlar, bu tür modifikasyonların yüksek saldırı açılarında akış kontrolü için etkili bir şekilde kullanılabileceğini ve belirli denizcilik uygulamaları için uygun şekilde optimize edilebileceğini göstermektedir (Kant ve Bhattacharyya, 2020).

Bir kanat profilinin üst yüzeyine monte edilen ve 'kaldırma arttırıcı efektör' olarak adlandırılan bir kanadın, rüzgâr tüneli testlerinde, ayrı akışlara yanıt olarak kanat yüzeyinden yükselen kuşun gizli tüylerine benzer bir işleve sahip olduğu gösterilmiştir. Testler NCSU ses altı rüzgâr tüneline 4×10^5 Reynolds sayısında gerçekleştirildi (Joe ve Ashok, 2012).

Biyo-esinli bir oluklu kanat profilinin aerodinamik özelliklerini, pürüzsüz yüzeyli bir kanat profili ve $Re = 58.000-125.000$ Reynolds sayısındaki düz bir plaka ile karşılaştırmak ve bu tür biyo-esinli hava profillerinin potansiyel uygulamalarını araştırmak için deneysel bir çalışma yürütülmüştür. Test edilen kanat profillerine etki eden aerodinamik kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin ölçülmesine ek olarak, kanat profilleri etrafındaki girdap ve türbülanslı akış yapılarının geçici davranışını ölçmek amacıyla ayrıntılı akış alanı ölçümleri gerçekleştirmek için bir dijital parçacık görüntülü hız ölçüm sistemi kullanıldı. Ölçüm sonucu, pürüzsüz yüzeyli kanat profili ve düz plakaya göre daha iyi performansa sahip olduğunu açıkça ortaya koydu (Jeffery ve Hui, 2010).

Murphy ve Hui yaptıkları çalışmada Re sayısı 58000-125000 aralığında mikro hava araçlarında kullanılmak üzere biyo esinlenmiş kanat çalışmışlardır (Jeffery ve Hui, 2009).

Başka bir çalışmada oluklu yüzeylere sahip biyo-esinlenmiş bir kanat profili etrafındaki sıvı akışı: Parçacık Görüntülü Hız Ölçümü (PIV) kullanılarak, Reynolds sayısı $Re = 2,0 \times 10^3$ ve 0° , 4° , 8° ve 12° hücum açılarında ölçüldü. İki kanat profili etrafındaki sıvı akışının küresel özellikleri, toplu ortalamalı hız alanı, ters akış aralıklarının dağılımı ve zaman serisi akış görselleştirmeleri ile analiz edildi. Yusufçuk kanadının pratik olarak esnek olması nedeniyle, kayan bir yusufçuğun kanat yapısının, sürüklemeyi azaltmak için periyodik yüklemeye yanıt olarak karmaşık bir şekilde deforme olabileceği tahmin edilmektedir (Sheng-xian, Ying-zheng ve Lian-min, 2012).

Martılar robot için tercih edilen modeldi çünkü daha istikrarlı bir uçuş sağlayan ve uçuşun hem yukarı hem de aşağı vuruşunda kaldırma kuvveti yaratan sürekli bir girdap oluşturan geniş bir kanat açıklığına sahiplerdi. Geliştirilen robotik kanat modeli kullanılarak, uçuş sırasında martıya tam olarak uyan gerekli kanat konumlandırması sağlanmaya çalışıldı (Fisher, vd., 2012).

İnsansız hava araçlarının tasarım sınırlarının sınırlarında sağlam ve öngörülebilir aerodinamik performansı, güvenlik ve göreve uyum sağlama açısından kritik öneme

sahiptir. Kuşlar ayrıca kanatlarının ön kenarında (LE) alula olarak bilinen ve yüksek açılı saldırı manevraları yapmalarını sağlayan tüyler geliştirmişlerdir. Bu çalışmada, alula benzeri bir LE cihazının çeşitli yerleştirme parametrelerinin, bombeli bir kanat profilinin (S1223) durma ve durma koşullarındaki aerodinamik performansı üzerindeki etkisini ölçmek için bir dizi rüzgâr tüneli deneyi gerçekleştirildi. Kanat profilinin sınır tabakası hız profili ve türbülans yoğunluğu üzerindeki etkisi, sıcak tel anemometre ölçümleriyle araştırıldı. Sonuç olarak kuş kanadının ön kenarına benzer yapının tasarıma ilave edilmesi ile oluşturulan kanat profilinde sapma açısı arttıkça, özellikle düşük hücum açılarında kaldırma katsayısının da arttığını göstermektedir. Sonuçlar, kuş kanadından ilham alınarak tasarlanmış, düşük Reynolds sayılı uçuş sırasında küçük insansız hava araçlarında görev uyarlanabilirliğini geliştirme potansiyeline sahiptir (Boris, Michael, Leonardo ve Aimy, 2017).

Yapılan diğer bir çalışmada gece kuşunun tüyelerinden ilham alınarak bir kanat profili geometrisinin sayısal bir analizini sunulmuştur. Amaç, önceki deneylerde bu tür tasarımlarda gözlemlenen kanat profili arka kenar gürültüsünü azaltma mekanizmalarını anlamaktır. Bu bulgular, gürültü azaltma mekanizmalarından birinin, artan kaynak-saçılım kenar ayırma mesafesi olduğunu göstermektedir. İki noktalı korelasyonlar, çitlerin, çit eğiminden daha büyük ayırma mesafeleri için düşük frekanslarda açıklık tutarlılığını azalttığını göstermektedir. Açıklık yönünde tutarlılığın azaltılması, düşük frekanslarda uzak alan gürültüsünü azaltmanın başka bir potansiyel mekanizmasıdır (Andrew ve Anupam, 2019).

Aerodinamik kuvvetlerden yararlanmak üzere tasarlanan kanat profilleri standartlaştırılmış olup hava araçlarında ve turbo makinelerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak standart dışı kanat profili tasarımları da araştırılmaktadır. Bunlar arasında böceklerin ve kuşların kanatlarından, balıkların kuyruklarından esinlenen çalışmalar da yer alıyor. Bu çalışma rüzgârla uzaklara taşınabilen akçaağaç tohumlarına ayrılmıştır. Akçaağaç tohumlarının boyut oranları farklı tohumlar üzerinde yapılan ölçümlerden elde edilmiştir. Çözümde kullanılan matematiksel ve sayısal modeller ilk olarak özellikleri bilinen standart Naca 0015 profiline uygulanarak validasyon çalışması yapılmıştır. Daha sonra biyo-esinleniliş yeni tasarımın analizi gerçekleştirildi. Analizler farklı Re sayıları ve hücum açılarında tekrarlandı. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak değerlendirilmiştir (Neslihan, Mehmet ve İrfan, 2020).

Phocoenoides dalli kafasının özel aerodinamik profilini temel alan bir çalışmada, yenilikçi bir şekilde Naca 0018 kanat profilini, ön kenarı beyaz yanlı musur kafasının aerodinamik profiline benzeyen yeni bir kanat profiline dönüştürmeyi önermektedir. Üç yunus kafası şeklindeki yeni kanat profilinin ve Naca 0018 kanat profilinin aerodinamik performansları, $Re = 1.6 \times 10^5$ 'te SST k- ω modeli kullanılarak simüle edilmiştir. Sonuçlar şunu göstermektedir: Naca 0018 kanat profili ile karşılaştırıldığında, öncelikle, üç tür yunus kafası şeklindeki kanat profilinin aerodinamik performansları, hücum kenarının eğriliği ve yarıçapındaki değişiklik nedeniyle birbirinden oldukça farklıdır. Bu çalışmanın sonuçları, dönen mekanik kanatlar, havacılık kanatları vb. kanat tasarımının performansının iyileştirilmesi için referans sağlayabilir (Shengxian, Yu ve Ying, 2021).

Naca 0012 kanat profili ile yapılan sayısal ve deneysel çalışmalardan birinde 0^0 - 15^0 derece aralığında aerodinamik kuvvet değerleri tespit edilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda tutunma kaybının 10 - 15^0 aralığında gerçekleştiği görülmüştür (Tarhan, 2012).

Başka bir çalışmada Naca 0012 ile Naca 2415 profilleri sayısal ve deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Aerodinamik katsayıların Naca 2415 profilinde daha büyük olduğu tespit edilmiştir (Genç, 2009).

Diğer bir uçak kanadı çalışmasında Naca 6412 kanat profili kullanılmıştır. Kanadın aerodinamik yapısını belirlemek için yapılan deneylerde 16^0 kritik hücum açısı olarak tespit edilmiştir (Selver ve Başekin, 2023).

Naca kanatları ile yapılan çalışmada Naca 008, 0009, 0010, 0012, 0015, 0018, 0021, 0024 kanat profilleri nümerik olarak incelenmiştir. Naca 0012 kanat profili ile Naca 0008 kanat profilinin benzer özellikler gösterdiği ve Naca 0012 kanat profilinin deneysel sonuçları ile sayısal sonuçlarının örtüştüğü tespit edilmiştir (Soğukpınar, 2017).

İki boyutlu RANS denklemlerini k- ω STT türbülans modeliyle çözerek, biyo-esinli modifiye kanat profilleri etrafındaki akış davranışlarını $Re=5.8 \times 10^4$ 'teki Naca 4412 kanat profiliyle karşılaştırarak incelemek için sayısal bir çalışma yapıldı. Elde edilen sonuçlar, üstten modifiye edilmiş kanat profili tarafından gösterilen hafif durmanın aksine, Naca 4412 kanat profili için durma anında kaldırma kuvvetinin oldukça ani bir düşüşünü ortaya koymaktadır (Hacımurat ve Batuhan, 2023).

Doğan Z. Tarafından yapılan doktora tezi çalışmasında Naca 0012 ve Clark Y kanat profillerini 0^0 ve 6^0 hücum açılarında farklı hızlarda aerodinamik kuvvet katsayıları, basınç katsayıları, hız dağılımı ve sıcaklık dağılımı bakımından incelenmiştir. Kaldırma

kuvveti katsayısı Clark Y kanat profilinde simetrik kanat yapılarına göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir (Doğan, 2008).

Başka bir çalışmada Koca ve diğerleri Naca 4412 kanat profilinde laminar ayrılma kabarcıklarının incelenmesi için duman görüntüleme deneyleri yapmışlardır. Bu deneyler sonucunda laminar ayrılma kabarcıklarının yeri ve oluşumu hem Re sayısına hem de hücum açısına bağlı olarak değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir (Koca, Genç, Açikel, Çağdaş ve Bodur, 2018).

Yıldırım ve Erbaş tarafından Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Makine Mühendisliği Rüzgâr tüneli laboratuvarında yapılan çalışmada Naca 0008 kanat profilinin aerodinamik kuvvetleri 60000,80000 ve 100000 Re sayılarında 0-20° aralığındaki hücum açılarında tespit edilmiştir. Duman görüntüleme yöntemi ile tutunma kaybı açıları kuvvet değerleri ile karşılaştırılmıştır (Yıldırım ve Erbaş, 2023).

Görgülü tarafından Kütahya Dumlupınar Üniversitesi'nde açık çevrimli ses altı rüzgâr tüneline yapılan çalışmada, rüzgâr türbinlerinin aerodinamik performansını geliştirmek için canlıların hareket figürlerinden esinlenen kanat yüzeyleri kullanılmıştır. Deneylerde, Gökdoğan kanadı figürü uygulanan kanatların, düz yüzeyli kanatlarla karşılaştırıldığında belirgin bir performans artışı sağladığı görülmüştür. Kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri oranlarına dayanarak yapılan değerlendirmelerde, Gökdoğan kanadı figürlü kanatların yaklaşık %9'luk bir performans artışı sağladığı belirlenmiştir (Görgülü, 2021).

Diğer bir çalışmada Naca 0015 kanat profilinin aerodinamik kuvvet katsayıları ve akış görüntüleme analizleri yapılmıştır. Çalışma 60000, 80000 ve 100000 Re sayılarında gerçekleştirilerek tutunma kaybının gerçekleştiği açılar karşılaştırılmıştır (Tunca ve Özgür, 2023).

Başka bir çalışmada Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Makine Mühendisliği Rüzgâr tüneli laboratuvarında biyo-esinlenmeli kanat modelinin 25000 Re sayısında akış görüntüleme yöntemi ile akış ayrılmaları incelenmiştir (Tunca, Özgür ve Koşar, 2024).



İKİNCİ BÖLÜM
RÜZGÂR TÜNELLERİ

2.1. RÜZGÂR TÜNELİ

Rüzgâr tüneli, sabit bir gövdeye göre yapay olarak hava akışı üreten ve ölçüm yapan bir cihazdır. Rüzgâr tünellerinin en önemli özelliği, akışın karmaşıklığına rağmen verileri doğru şekilde elde edilmesidir (Ariffuzzaman ve Mashud, 2012).

Rüzgâr tüneli, genellikle aerodinamik testler için kullanılan bir tür tesisattır. Bu tesisat, rüzgârın oluşturduğu etkileri ölçmek veya belirli bir nesnenin aerodinamik özelliklerini test etmek amacıyla kullanılır. İçinde bir fan bulunur ve bu fan, kontrol edilebilir bir rüzgâr hızı ve akışkanlığı sağlamak için kullanılır. Özellikle araçların, binaların, uçakların ve diğer aerodinamik olarak önemli nesnelerin tasarımı ve performansı üzerine çalışmalar yapılırken rüzgâr tünelleri sıkça kullanılır. Bu tesisler, gerçek dünya koşullarını simüle etmeye ve tasarım sürecindeki iyileştirmeleri belirlemeye yardımcı olur.

Rüzgâr tünelleri, belirli bir model üzerindeki hava akımının etkilerini kontrol ederek ve çeşitli hava koşullarını simüle ederek, modelin aerodinamik davranışını detaylı bir şekilde incelemek için kullanılan tesislerdir. Bu tüneller, farklı hava hızları, basınçlar ve sıcaklıklar altında çeşitli koşulları taklit edebilirler. Bu özellikleri sayesinde, mühendisler ve tasarımcılar, bir ürünün veya yapının performansını optimize etmek veya tasarımında geliştirmeler yapmak için gerekli verilere erişebilirler. Yani, rüzgâr tünelleri, aerodinamik testlerde kullanılarak ürünlerin veya yapıların tasarım sürecindeki kararları desteklemek için önemli araçlardır.

2.2. RÜZGÂR TÜNELİ TARİHÇESİ VE GELİŞİMİ

İlk rüzgâr tüneli çalışmaları, 1746 yılında İngiliz kraliyeti tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar, rüzgârın mekanik etkilerinin incelenmesini içermekte olup, daha sonraki yıllarda hız ve basınç çalışmaları yönünde yapılan araştırmaları beraberinde getirmiştir. Bu bilgiler, rüzgâr tünellerinin tarihsel gelişimi ve ilk kullanımları konusunda önemli bir perspektif sağlamaktadır. Rüzgâr tünelleri, günümüzde birçok endüstride aerodinamik testlerin yapıldığı kritik araçlardan biri olarak kullanılmaktadır (Wind Tunnels of Nasa, 2023, 2 Ekim).

Rüzgâr tünelinin konsepti, kökleri 15. yüzyıla kadar uzanır. Leonardo Da Vinci, durgun havada hareket eden bir cisim ile hava akışına karşı duran bir cismin aynı aerodinamik etkileri yaşadığına dair bir teoriyi ortaya koymuştur. Da Vinci, rüzgâr hızını

ölçmeye yönelik olarak geliştirdiği bir anemometre ile de tanınır. Bu cihazda, bir levha rüzgârın etkisiyle hareket eder ve levhanın ulaştığı en yüksek nokta, rüzgârın hızını ve kuvvetini belirlemede kullanılır. Rüzgâr tünelinin bu ilk temellerinden sonra, Avrupa ve İngiltere'de dönen kol düzenekleri tasarlanmış ve bu düzenekler çeşitli araştırmalarda kullanılmıştır. Bu düzeneklerde, dönebilme yeteneğine sahip bir şaft sistemi kullanılarak cisimler hareket ettirilir. Şaft, makaralı bir sistemle bağlı ağırlıklar tarafından döndürülür ve bu sayede cisimler durgun havada hareket ediyormuş gibi test edilebilmektedir. Bilinen ilk rüzgâr tüneli Büyük Britanya'da basınçlı hava itici ile çalıştırılrsa da (Wenham Francis, 1871, daha sonra Horatio Phillips, 1884), daha sonra kurulan rüzgâr tünelleri havayı test bölümünün önüne yerleştirilmiş bir fan tarafından hareket ettirdi. Rüzgâr tüneli kurulumundaki ilk gelişme kolektörün kullanımından ibarettir. (Aslan, 2016). Bu çalışmalara Francis Wenham tarafından 1871 yılında Greenwich, İngiltere'de imal edilmiş ve kullanılmış olan bir rüzgâr tüneli örnek verilebilir. Bu rüzgâr tüneli, (46 x 46) cm'lik bir gözlem odası kesitine sahiptir ve fan yardımıyla çalışarak yaklaşık 18 m/s hız üretebilmektedir. Bu tünelde, düz levhaların taşıma ve sürüklenme kuvvetleri üzerine yapılan çalışmalar gerçekleştirilmiştir. (Wind Tunnels of Nasa, 2023, 2 Ekim). Wright kardeşler 40x40 cm'lik test odasına sahip bir rüzgâr tünelini tasarlayıp araştırmalarında kullanmışlardır. Çalışmalarının sonucunda Wright kardeşler tarihteki ilk uçak ile uçuşu gerçekleştirmişlerdir (Aslan, 2016).

Gustave Eiffel (1832-1923), mühendislik ve teknoloji tarihinde önemli bir isimdir. Portekiz'deki Porto Viyadüğü, New York Limanı'ndaki Özgürlük Heykeli'nin destek yapısı ve isim babası olduğu Paris'teki Eysel Kulesi en önemli eserleri arasındadır. Bu uzun ve başarılı kariyer ona önemli bir servet kazandırmıştır ve hayatının sonlarında "havacılık" olarak isimlendirilen yeni araştırma alanına yatırım yapmaya karar vermiştir. 1909 yılında ünlü kulesinin eteğinde yeni bir araştırma alanı olan "Aerodinamik" bilimine adanmış ilk rüzgâr tünellerinden birini kurdu. Eiffel bu rüzgâr tünelini tamamladı ve 1909'da deneylerine başladı. Test programlarından biri, tünelin performansını doğrulamak için düşme testlerinden elde ettiği verileri sistematik olarak test etmekte. Rüzgâr tüneline ölçülen kuvvetler, düşme testleri sırasında elde edilenlerle eşleşti. Bu, bağıl hareket teorisinin ilk gerçek testiydi ve veriler bunun geçerli olduğunu kanıtladı. Eiffel'in ünü nedeniyle, öncü uçak imalatçılarının çoğu kanatlarını ve pervane tasarımlarını test etmek için onu aradılar. 1909-1912 yılları arasında Eiffel bu tünelde

4.000'in üzerinde test yaptı ve sistematik deneyleri havacılık araştırmaları için yeni bir standart oluşturdu.

Daha sonraki tasarımlarda akış kalitesini garanti altına almak için model ile fan arasındaki etkileşimin önlenmesi adına fan test odasının aşağı akım yönüne yerleştirilmiştir. Bu ilkeye göre, aşağdaki rüzgâr tünelleri tasarlandı: Nikolai Zhukovsky (Rusya, 1902), Thomas Stanton (İngiltere, 1903), Dimitri Riabouchinsky (Rusya, 1905), Gustave Eiffel (Fransa, 1909). Eiffel'in bir yeniliği olan difüzör, 28 Kasım 1911 tarihli bir patentin konusuydu: “Yapay hava akımı üretmek için tasarlanan makinenin performansını iyileştirmek için bir difüzör eklenmesi”.

1930'lara kadar rüzgâr tünelleri birçok ülkede kullanılmıştır ve özellikle NASA'nın çalışmalarıyla önemli adımlar atılmıştır. 1931'de NASA, milyon dolarları bulan maliyetle (9 x 18) m ebatlarında bir rüzgâr tüneli yapmıştır. Daha sonra dünyanın en büyük rüzgâr tüneli olan (12 x 24) m ebatlarındaki tünel, Kaliforniya'daki Ames Aeronautical Laboratory'de kurulmuştur. 1940'larda, V-2 roketlerinin havacılık teknolojisinde kullanılmasıyla birlikte süpersonik tüneller önem kazanmıştır. 1974 petrol krizi sonrasında, dünya genelinde taşıt tasarım ve imalatında yakıt tüketimi kriteri önem kazanmıştır. Bu dönemde, rüzgâr tünelleri taşıtların aerodinamik dirençlerini azaltmak için önemli bir araç haline gelmiştir (Pope, Harper ve Barlow, 1984).

Punkhurst ve Holder (1952), rüzgâr tüneli deneylerinin gerçekteştirilme yöntemlerini, kullanılan denge sistemlerini ve kuvvet ile moment hesaplama tekniklerini detaylı bir şekilde ele almışlardır (Punkhurst ve Holder, 1952). P. Bradshaw çalışmasında rüzgâr tünellerindeki sınır tabaka akımlarının oluşumunu araştırmış ve bu akımların düzensizliğe yol açmadan sınır tabaka etkilerini ortadan kaldırmak için çeşitli yöntemleri açıklamıştır (Bradshaw, 1965). Gorlin ve Slezinger (1966) ise rüzgâr tüneli türleri, bileşenleri, deney türleri ve bileşenlerin imalat ve montajı hakkında kapsamlı bilgiler sunmuştur. Rüzgâr tünelleri ihtiyaç bakımından farklı çeşitlerde olmasına rağmen tasarım aşamasında dikkat edilmesi gereken kriterler farklı değildir (Kaya, 2023).

2.3. RÜZGÂR TÜNELİNİN SINIFLANDIRILMASI

Rüzgâr tünelleri, tasarım özelliklerine ve hava akış hızlarına göre iki grupta incelenebilir. Tasarım açasından incelendiğinde çevrim tipine göre kapalı ve açık çevrim rüzgâr tünelleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Kapalı çevrim rüzgâr tünellerinde hava, bir

döngü olarak sürekli olarak sistem içerisinde dolaşmaktadır. Diğer bir tasarım türü olan açık çevrim rüzgâr tünellerinde ise test bölmesinden geçen hava dışarıya atılır.

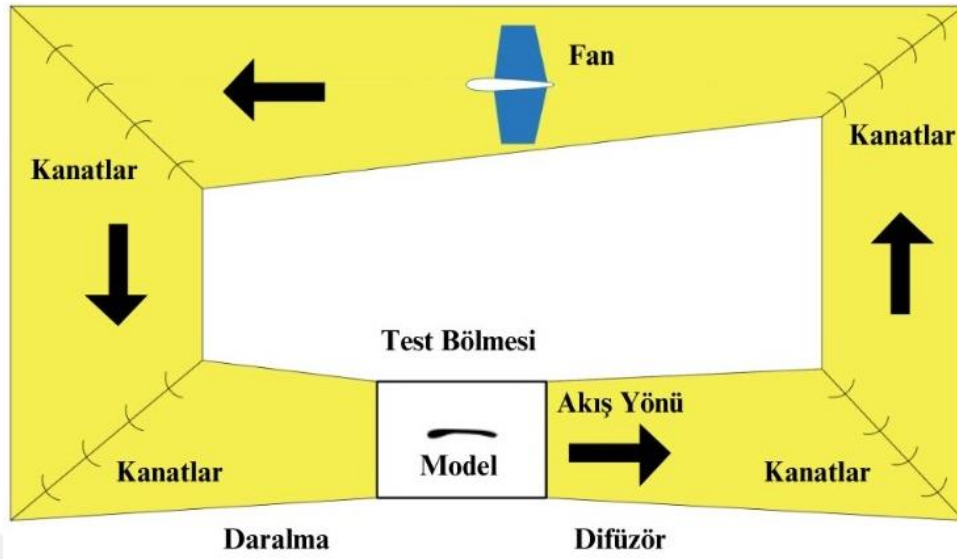
Hava akış hızlarına göre rüzgâr tünelleri beş gruba ayrılır. Ses altı rüzgâr tünelleri, hava akış hızının ses hızının altında olduğu tünellerdir. Ses hızına geçiş rüzgâr tünelleri, hava akış hızının ses hızına yaklaştığı veya ses hızını aştığı tünellerdir. Ses üstü rüzgâr tünelleri ise hava akış hızının ses hızını aştığı tünellerdir. Hiperses rüzgâr tünelleri, uzay araçlarını inceleyen ve Mach sayısının 5-15 aralığında olan tünellerdir. Son olarak Hiper hipersonik rüzgâr tünelleri Mach sayısının 15 'in üzerinde olduğu atmosferik giriş-çıkış uçuşlarının ısı değişimlerini içeren karmaşık uçuşların incelenmesinde kullanılan rüzgâr tünelleridir. Bu kategoriler, rüzgâr tünellerinin farklı tasarım gereksinimleri ve test senaryolarına nasıl adapte edilebileceğini gösterir.

2.3.1. Çevrim Şekline Göre Sınıflandırma

2.3.1.1. Kapalı Çevrim Rüzgâr Tüneli

Kapalı çevrim rüzgâr tünelleri, akış halinde olan havanın kapalı döngü içerisinde dolaştığı sistemlerdir (Gökçe, 2020). Şekil 2.1.'de görüldüğü gibi döngü sistemi tünel içerisindeki havanın tekrarlı kullanılmasını sağlamaktadır. Kesintisiz bir döngüde devam eden akış sayesinde tekrarlanabilen sürekli test koşulları oluşur. Kapalı çevrim rüzgâr tüneller genel olarak küçük ölçekli testler için uygundur. Bina tasarımları, araç modelleri ve küçük ölçekli projelerin aerodinamik yapılarının incelenmesi için kullanılan bu tünellerde hava akışı kontrol edilerek, belirli akış koşulları simüle edilebilir ve çeşitli test olanakları sağlanabilir.

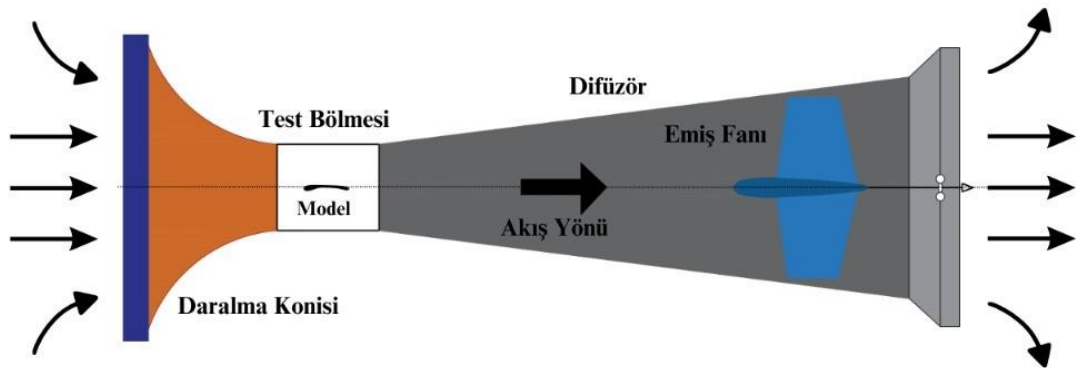
Şekil 2.1: Kapalı Çevrim Rüzgâr Tüneli



2.3.1.2. Açık Çevrim Rüzgâr Tünelleri

Açık çevrim rüzgâr tünelleri, hava akışının test bölgesinden geçtikten sonra sistem dışarı atıldığı tünellerdir (Uçar, 2022). Şekil 2.2.'de görülen sistemin kapalı bir çevrim olmadığı için aynı hava kütlesi tekrar kullanılmaz. Bu tünellerde birçok yapının aerodinamik analizleri çalışılabilir. Atmosfer ile etkileşim halinde olduğu için doğal koşullar daha iyi oluşturulur. Ayrıca, açık çevrim tünelleri genellikle daha yüksek hava akış hızlarına olanak tanır ve bu da süpersonik testler gibi yüksek hızlı testlerin gerçekleştirilmesine imkân verir.

Şekil 2.2: Açık Çevrim Rüzgâr Tüneli



Açık çevrim rüzgâr tünelleri, özellikle otomotiv endüstrisi, inşaat, enerji ve diğer büyük ölçekli projelerin aerodinamik testlerinde kullanılır. Bu tünellerde, test sırasında

kullanılan hava dışarıya atılarak çevreyle etkileşime girer, bu da geniş ölçekli testler için uygun bir ortam sağlar. Açık çevrimli rüzgâr tünellerinin hava akışını sağlamak için iki temel tasarım tipi vardır. İlk tip, fan ve motorun test odasından önce yer aldığı üflemlili (blower-type) tasarımıdır. İkinci tip ise, fanın hava akışını test odasından sonra oluşturduğu emmeli (suction-type) tasarımıdır. Her iki tasarımda da, atmosferden tünele giren hava, daralan bir koni şeklindeki kolektör sayesinde hızlanır ve test odasına ulaştığında maksimum hıza ulaşır.

Deney odasında akış kalitesini artırmak için, kolektörün geometrisinin doğru bir şekilde tasarlanması önemlidir. Emme tipi rüzgâr tünellerinde, fanın neden olduğu akış bozuklukları genellikle test odasındaki akış üzerinde çok az etkili olur ve bu etki ihmal edilebilir düzeydedir. Bu nedenle, rüzgâr tünellerinde çoğunlukla emme tipi tasarımlar tercih edilir. Bu tasarım, daha kararlı ve kolay kontrol edilebilir bir akış sağlamak açısından avantajlıdır.

2.3.2. Akış Hızına Göre Sınıflandırma

2.3.2.1. Ses Altı Rüzgâr Tünelleri (Subsonik Tüneller)

Ses altı rüzgâr tünelleri, Mach 0 ila Mach 0.3 arasında değişen hava akış hızlarına sahiptir (0-100 m/s). Bu tüneller, genellikle mimarlık ve mühendislik projelerinde kullanılan küçük ölçekli modellerin aerodinamik testleri için uygundur. Bina aerodinamiği, araç aerodinamiği ve spor ekipmanlarının testleri de bu tür tünellerde yapılır. Alçak hızlı rüzgâr tünelleri, düşük hızlarda detaylı ve hassas ölçümler yapabilmeye yeteneği nedeniyle yaygın olarak kullanılır.

2.3.2.2. Geçiş Hızlı Rüzgâr Tünelleri (Transonik Tüneller)

Geçiş hızlı rüzgâr tünelleri, Mach 0.3 ila Mach 1.0 arasındaki hava akış hızlarını kapsar (100-340 m/s). Bu tüneller, uçak kanat profilleri ve diğer havacılık elemanlarının ses hızına yakın hızlarda aerodinamik özelliklerini incelemek için kullanılır. Transonik hız aralığı, özellikle uçaklar için kritik bir bölgedir çünkü bu hızlarda akış özelliklerinde önemli değişiklikler meydana gelir. Geçiş hızlı rüzgâr tünelleri, bu tür kritik analizler için gerekli olan test ortamını sağlar.

2.3.2.3. Ses Üstü Rüzgâr Tünelleri (Süpersonik Tüneller)

Ses üstü rüzgâr tünelleri, Mach 1.0 ila Mach 5.0 arasında değişen hava akış hızlarına sahiptir (340-1700 m/s). Süpersonik tüneller, yüksek hızlı uçaklar, roketler ve füze aerodinamiği gibi süpersonik hızlardaki testler için uygundur. Bu tüneller, yüksek hızlı akış koşullarının simülasyonunu sağlar ve bu sayede süpersonik uçuş ve manevraların aerodinamik performansı ve yapısal dayanımı incelenebilir.

2.3.2.4. Hiperses Rüzgâr Tünelleri (Hipersonik Rüzgâr Tünelleri)

Hiperses rüzgâr tünelleri, Mach 5.0 ila Mach 15.0 arasındaki hava akış hızlarını kapsar (1700-5100 m/s). Bu tüneller, uzay aracı tasarımı, balistik füzeler ve hipersonik uçakların aerodinamik özelliklerini incelemek için kullanılır. Hipersonik hızlarda, ısı etkileri ve yüksek hız aerodinamiği önemli faktörlerdir. Bu tüneller, bu tür ileri seviye aerodinamik ve termodinamik analizler için gerekli ortamı sağlar (Houghton ve Carpenter, 2016).

2.3.2.5. Hiper Hipersonik Rüzgâr Tünelleri

Hiper hipersonik rüzgâr tünelleri, Mach 15.0 ve üzeri hızlarda (5100 m/s ve üzeri) hava akışını kapsar. Bu tüneller, atmosferik giriş-çıkış araçları ve ileri seviye hipersonik uçuş araçlarının aerodinamik testleri için kullanılır. Bu hızlarda, akış dinamikleri ve ısı etkileri daha da karmaşık hale gelir, bu nedenle bu tür tüneller, bu zorlu koşulları simüle edebilme yetenekleriyle kritik öneme sahiptir (Houghton ve Carpenter, 2016).

Her bir rüzgâr tüneli türü, belirli bir hız aralığında akış koşullarını incelemek için tasarlanmış olup, farklı uygulamalar ve test gereksinimlerine yönelik optimize edilmiştir.



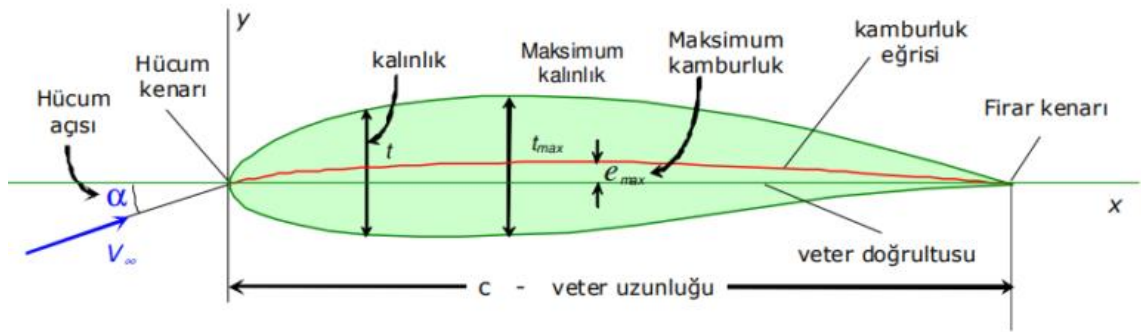
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM
MATERYAL METOT

3.1. AERODİNAMİK TANIMLAR BOYUTSUZ PARAMETRELER

3.1.1. Kanat Profiline Etkiyen Parametreler

Hava akışı sırasında, kanadın şekli, üzerinde bir basınç farkı oluşturarak cismin havada kalmasına olanak tanır. Bu basınç farkı ve yüzeyde oluşan sürtünme kuvvetleri, kanadın üzerinde aerodinamik kuvvetlerin oluşmasına yol açar. Kanat profili, bu kuvvetlerin büyüklüğünü ve yönünü belirleyerek uçuş özelliklerini etkiler. Bir uçak veya benzeri bir nesne, etrafından geçen havanın akışını yönlendirir ve bu da havanın hızını değiştirir. Havanın farklı hızlarda hareket etmesi, Bernoulli denklemi uyarınca cismin çevresinde değişen bir basınç dağılımı yaratır. Bu basınç farkları, kaldırma kuvvetinin oluşmasına neden olur ve cismin havada kalmasını sağlar (Genç, Kahraman ve Özışık, 2008).

Şekil 3.1: Kanat Profili



Kaynak: (İTÜ-Aerodinamik Ders Notları, 2021).

3.1.1.1. Hücum Açısı

Kanat hücum açısı, kanadın veter çizgisi ile hava akım çizgileri arasındaki açıyı tanımlar. Hava, belirli bir hızla kanat yüzeyine çarptığında, hücum açısının artmasıyla birlikte kaldırma kuvveti de artar, ancak bu yalnızca belirli bir açıya kadar geçerlidir. Kritik hücum açısına ulaşıldığında, hava akımı kanat yüzeyine tutunmayı zorlaştırır ve girdaplar oluşmaya başlar. Bu girdaplar, akışın türbülanslı bir hale geldiğini ve hava akışının kanat yüzeyinden ayrıldığını gösterir. Bu durumda, kanat havada kalma yeteneğini kaybetmeye başlar. Bu nedenle, hücum açısının belirli bir seviyeye kadar artırılması, maksimum kaldırma kuvveti elde etmek için önemlidir; ancak bu açının fazla

artırılması, uçağın kontrolünü kaybetmesine yol açabilir ve tehlikeli durumlar yaratabilir (Oral, 2011).

National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), havacılık alanında kanat profillerinin tasarımında önemli bir katkı sağlamıştır. NACA tarafından geliştirilen bu kanat profilleri, hava araçlarının aerodinamik performansını iyileştirmek ve verimliliğini en üst düzeye çıkarmak amacıyla özenle tasarlanmıştır. Bu profiller, uçakların hava akışını daha etkili bir şekilde yönetmelerine olanak tanıyarak hem performanslarını artırır hem de güvenliği sağlar.

Dört temel aerodinamik kuvvet;

- Kaldırma Kuvveti (Lift)
- İtme Kuvveti (Thrust)
- Yer Çekimi Kuvveti (Gravity)
- Sürüklenme Kuvveti (Drag)

Kanat geometrisiyle ilgili hücum açısı ve veter uzunluğu gibi parametreler, bir hava aracının aerodinamik performansını doğrudan etkiler. Bununla birlikte, hava akışının özellikleri de bu performans üzerinde önemli bir rol oynar. Havanın hızı, yönü ve viskozitesi, kanadın hava ile nasıl etkileştiğini belirler ve bu da kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerini doğrudan etkiler. Bu faktörlerin doğru bir şekilde optimize edilmesi, hava aracının istenen performans düzeyine ulaşmasını sağlar.

3.1.1.2. Aerodinamik Kuvvetler ve Katsayılar

Kanat aerodinamiği çalışmalarında tasarıma etkiyen iki önemli aerodinamik kuvvet ve moment bulunmaktadır. Bunlar yunuslama momenti, kaldırma ve sürüklenme kuvvetleridir. Aerodinamik kuvvet ve momentler yerine, aerodinamik katsayıları kullanarak benzer özelliklere sahip araçların aerodinamik performanslarını daha doğru bir şekilde karşılaştırmak mümkündür.

3.1.1.2.1. Kaldırma Kuvveti ve Kaldırma Katsayısı

Aerodinamik bileşke kuvvetinin kanat yüzeylerine dik olan bileşenidir. Bu kuvvet, hava aracının havada tutunabilmesini sağlar. Kanatlar üzerindeki hava akımı, kanat profili ve hücum açısı gibi faktörlerle etkileşime girerek kaldırma kuvvetini üretir. Kaldırma kuvveti, genellikle yer çekimi kuvvetini (gravite) dengelemek için kullanılır.

Eşitlik 3.1 de kaldırma kuvveti denklemi gösterilmiştir. Eşitlik 3.2.'de ise boyutsuz kaldırma katsayısı verilmiştir (Çengel, Cimbala ve Mcgraw-Hill, 2018).

$$F_L = C_L \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_\infty V_\infty^2 A = f(\alpha, R_e, M_\infty) \quad (3.1)$$

$$\frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho_\infty V_\infty^2 A} = C_L = f(\alpha, R_e, M_\infty) \quad (3.2)$$

3.1.1.2.2. Sürüklenme Kuvveti ve Sürüklenme Katsayısı

Aerodinamik bileşke kuvvetinin kanat yüzeyine yatay olan bileşenidir. Bu kuvvet, hava sürtünme kuvvetidir ve hava aracının gidiş yönüne göre ters yönde oluşur. Sürüklenme kuvveti, hava aracının hava akımı içinde ilerlerken karşılaştığı dirençtir.

Sürüklenme kuvveti, hava aracının hızının artmasıyla genellikle artar, bu da enerji tüketimini ve yakıt tüketimini etkiler. Havacılık mühendisliğinde, sürüklenme kuvvetini minimize etmek önemlidir çünkü daha düşük sürüklenme, daha iyi aerodinamik performans ve daha etkin yakıt tüketimi anlamına gelir. Eşitlik 3.3 de sürüklenme kuvveti denklemi gösterilmiştir (Çengel, Cimbala, & Mcgraw-Hill, 2018).

$$F_D = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_\infty V_\infty^2 A = f(\alpha, R_e, M_\infty) \quad (3.3)$$

$$\frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho_\infty V_\infty^2 A} = C_D = f(\alpha, R_e, M_\infty) \quad (3.4)$$

3.1.1.2.3. Yunuslama Momenti ve Moment Katsayısı

Yunuslama (yaw), bir nesnenin dikey eksenini etrafında dönme eğilimini ifade eder. Örneğin, bir uçağın burun kısmının sağa veya sola yönelmesi bu hareketi tanımlar. Bu hareket, aracın yatay düzlemdeki yönünü değiştirir ve genellikle dümen gibi kontrol yüzeyleri tarafından kontrol edilir.

Yunuslama momenti, nesnenin bu şekilde dönmesine neden olan kuvvetlerin etkisiyle oluşur. Özellikle uçaklar, gemiler ve araçlar gibi hareketli nesnelere, çevresel faktörlerin ve aerodinamik/hidrokinamik kuvvetlerin etkisiyle ortaya çıkar. Bu moment, aracın yönlendirilmesinde ve stabilizasyonunda kritik bir rol oynar. Eşitlik 3.5 de yunuslama momenti denklemi eşitlik 3.6 te yunuslama moment katsayısı gösterilmiştir (Çengel ve Cimbala, 2013).

$$M = C_M \frac{1}{2} \rho_{\infty} V_{\infty}^2 A = f(\alpha, R_e, M_{\infty}) \quad (3.5)$$

$$\frac{M}{\frac{1}{2} \rho_{\infty} V_{\infty}^2 A} = C_M = f(\alpha, R_e, M_{\infty}) \quad (3.6)$$

Bu ifadelerin sağ taraflarındaki boyutsuz büyüklükler, aerodinamik kuvvet ve moment katsayıları olarak adlandırılır.

3.1.1.3. Tutunma Kaybı (Stall - Perdövites)

Tutunma kaybı (stall veya perdövites), bir hava aracının kanadının kaldırma kuvvetini kaybetmesi durumunu ifade eder ve genellikle kanadın hücum açısının kritik bir eşik değeri aştığı durumlarda meydana gelir. Bu olay, akışkanlar mekaniğinde, laminer akışın yüzeyden ayrılması ve türbülanslı akışların oluşması ile karakterizedir. Kritik hücum açısına ulaşıldığında, hava akımı kanat yüzeyini düzgün bir şekilde takip edemez ve yüzeyden ayrılmaya başlar, bu da akışın türbülanslı hale gelmesine yol açar. Sonuç olarak, kanat üzerindeki basınç farkı azalır ve kaldırma kuvveti ani bir şekilde düşer. Bu durum, hava aracının kaldırma yeteneğini zayıflatır ve sürüklenme kuvvetinin artmasına neden olur, bu da uçağın kontrolünü ve performansını olumsuz yönde etkiler. Tutunma kaybının önlenmesi ve etkilerinin minimize edilmesi için hücum açısının dikkatli bir şekilde yönetilmesi ve kanat profilinin optimize edilmesi önemlidir.

3.1.1.4. Laminer Ayrılma Kabarcıkları (LSB)

Düşük reynolds çalışmalarında kanat performansına etkiden önemli etkenlerden birisi laminer ayrılma kabarcıklarıdır.

Laminer ayrılma kabarcıkları, akışkanlar mekaniğinde, özellikle laminer akışın türbülanslı akışa dönüşme sürecinde ortaya çıkan küçük düzensizliklerdir. Laminer akış, akışkanın düzgün ve düzenli bir şekilde hareket ettiği bir akış türüdür. Ancak, bu düzenli akış belirli koşullar altında bozulabilir ve laminer ayrılma gerçekleşir.

Ayrılma, laminer akışın yüzeyden ayrılması ve türbülanslı bir akışın başlaması anlamına gelir. Bu ayrılma sürecinde, akışkanın yüzeye yakın olan kısmı, akışkanın hızının değiştiği bölgelerde bozulur ve küçük kabarcıklar veya girdaplar oluşur. Bu kabarcıklar, akışkanın yüzeye olan etkileşimini değiştirir ve akışın türbülanslı hale gelmesine yol açar. Laminer ayrılma, genellikle bir yüzeyin üzerindeki akışkanın, yüzeye yakın bölgelerdeki hız ve basınç değişimlerinden kaynaklanır. Bu ayrılma, aerodinamik

verimliliği etkileyebilir ve drag (sürtünme) gibi aerodinamik kuvvetlerin artmasına neden olabilir.

3.1.1.5. Sınır Tabaka Özellikleri

Viskozite, bir akışkanın içindeki farklı tabakaların birbirine karşı gösterdiği sürtünme direncini tanımlayan bir özelliktir. Özellikle sınır tabakasında, akışkanın moleküler yapısının ve akış hızının etkisiyle bu sürtünme direnci artar. Bu ifade, akışkanın viskozitesini belirler.

Sınır tabaka, akışkanın hızının önemli derecede değiştiği ve viskoz etkilerin belirgin bir şekilde gözlemlendiği bir bölgedir. Bu tabakada, akışkanın hız profili sınır tabakasının dışındaki akışla karşılaştırıldığında farklılık gösterir. Bu farklılık, viskoz etkilerin sınır tabakasında ne denli etkili olduğunu ve akışkanın sürtünme nedeniyle hız profilinin nasıl değiştiğini yansıtır (Ayduramaz, 2015).

Sınır tabakası, akışkanlarla etkileşimde kritik bir rol oynar ve özellikle aerodinamik ve hidrodinamik analizlerde önemli bir bileşendir. Bu tabakada meydana gelen olaylar, akışkan üzerindeki sürtünme, kaldırma kuvveti ve sürüklenme gibi faktörlerin belirlenmesinde temel etkiye sahiptir. Sınır tabakasının gelişimi, akışkanın özellikleri, yüzeyin fiziksel nitelikleri ve çeşitli diğer parametreler gibi birçok faktörden etkilenir. Bu faktörler, sınır tabakasının kalınlığını, yapısını ve davranışını şekillendirerek, akışkanın yüzeyle etkileşimini ve dolayısıyla aerodinamik veya hidrodinamik performansını doğrudan etkiler.

3.1.1.6. Basınç Gradyanı

Bir katı cisimle temas eden akışkanın sınır tabakası üzerindeki basınç değişimleri, akışın genel karakteristiği üzerinde önemli etkiler yaratır. Bu etkiler, sınır tabakasının gelişim süreci, geçiş bölgesinin konumu ve laminer ile türbülanslı ayrılma olaylarının meydana gelme biçimleri gibi faktörler aracılığıyla ortaya çıkar. Sınır tabakasındaki basınç değişimleri, akışkanın yüzeyle etkileşim şeklini, akışın düzenini ve aerodinamik performansı etkileyerek, akışın türü ve davranışı üzerinde belirleyici bir rol oynar.

Sınır tabakası, bir akışkanın bir katı cisme temas ettiği bölgede oluşan ince tabaka olarak tanımlanır ve bu tabaka, akışkanın hızının katı cisme yaklaşarak düşmesiyle

ortaya çıkar. Bu sınır tabaka yapısı, basınç değişimi ve akışkanın hız değişimi ile değişebilir. Laminer ve türbülanslı akışların oluşumunu ve konumunu, ayrılma noktalarını belirlenmesi bu etkenlere bağlıdır.

Negatif basınç gradyanı, sınır tabakasının gelişimi üzerinde olumlu etkiler oluşturabilir. Sınır tabakası, bir akışkanın katı bir yüzeye temas ettiği bölgeyi ifade eder ve bu tabaka içinde, akışkanın hızı yüzeye yaklaştıkça azalır. Basınç gradyanı, bir bölgede basınç değişiminin uzaydaki değişime oranını tanımlar. Negatif basınç gradyanı, basıncın uzaydaki düşüşünün arttığı bir durumu ifade eder ve bu durum, sınır tabakasında akışkanın yüzeye yaklaşırken hızının daha belirgin bir şekilde azalmasına yol açabilir. Hızdaki bu hızlı düşüş, sınır tabakasının kalınlığını azaltır ve böylece sınır tabakasının daha etkin bir şekilde yönetilmesini sağlar.

Pozitif basınç gradyanı, sınır tabakasının gelişimini olumsuz yönde etkileyebilir. Basınç gradyanı, bir bölgede basınç değişiminin uzaydaki değişime oranını tanımlar. Pozitif basınç gradyanı, basıncın uzaydaki düşüş hızının azaldığı bir durumu ifade eder. Bu durum, sınır tabakasında akışkanın katı yüzeye yaklaşırken hızının daha yavaş bir şekilde azalmasına neden olabilir. Sonuç olarak, hızdaki bu yavaş azalma, sınır tabakasının kalınlığının artmasına ve akışkanın sınır tabakası üzerindeki etkisinin daha az etkin bir şekilde kontrol edilmesine yol açabilir.

Daha yavaş bir hız düşüşü, sınır tabakasının kalınlığının artmasına neden olabilir. Artan sınır tabakası kalınlığı, akışkanın katı yüzeye yakın bölgede daha fazla enerji taşımaya yol açar ve bu durum, sınır tabakasının daha zor bir şekilde kontrol edilmesine neden olabilir. Ayrıca, pozitif basınç gradyanı koşulları altında, sınır tabakası daha hızlı ayrılabilir; bu da akışkanın katı yüzeyden daha erken ayrılmasına sebep olabilir.

3.1.1.7. İz Bölgesi Özellikleri

İz bölgesi, katı cisim üzerinde akış etkisi ile oluşan sınır tabakanın sona erdiği ve firar kenarından sonra akışın düzensiz hale geldiği bölgedir. Akış cisimden ayrılmış olmasına rağmen akışı etkileyen etkenler ile iz bölgesi oluşmaktadır. Özellikle aerodinamik analizlerde ve sınır tabaka teorisinde önemlidir.

Başka bir deyişle iz bölgesi, firar kenarı sonrasındaki akışın özelliklerini yansıtır. İz bölgesi, akışkanın düzensiz hale geçtiği, hız ve basıncın farklı değerlerinin etkisinde olduğu bir bölgedir.

3.1.1.8. Reynolds Sayısının Etkisi

Reynolds sayısı akışkanın karakterini belirlemek için kullanılır. Atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranı olarak ifade edilir.

Reynolds sayısı, akışkanlar mekaniğinde bir akışkanın nasıl hareket ettiğini anlamamıza yardımcı olan temel bir ölçüdür. Bu sayı, akışkanın hareketinin laminar (düzenli) ya da türbülanslı (karmaşık) olduğunu belirlemede kullanılır.

Reynolds sayısının büyüklüğü, birkaç önemli faktöre bağlıdır;

- Akışkanın Hızı,
- Yoğunluğu,
- Viskozitesi,
- Akışın Gerçekleştiği Ortamın Karakteristik Boyutu.

Düşük Reynolds sayısı, genellikle akışkanın yavaş hareket ettiği, yoğunluğun yüksek olduğu veya viskozitenin büyük olduğu durumlarda ortaya çıkar ve bu durumda akış düzenli, katmanlı bir şekilde ilerler. Buna karşılık, Reynolds sayısı yüksek olduğunda, yani akışkan hızlı hareket ettiğinde, yoğunluk düşük veya viskozite küçük olduğunda, akış türbülanslı hale gelir, yani düzensiz ve karışık bir akış görünümü sergiler. Reynolds sayısı, mühendislik uygulamalarında akışkanların davranışını tahmin etmek ve farklı akış rejimlerini anlamak için kritik bir role sahiptir.

Eşitlikte (3.7) de Reynolds sayısı denklemi gösterilmiştir.

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\mu} = \frac{V \cdot L}{\nu} \quad (3.7)$$

Burada:

ρ , akışkanın yoğunluğu (kg/m^3),

V , akışkanın hızı (m/s),

L , referans uzunluk (metre),

μ , akışkanın dinamik viskozitesi (Pas veya Ns/m^2)

ν , akışkanın kinematik viskozitesi (m^2/s) olarak adlandırılır.

Akışın dinamik benzerliğini sağlamak ve karşılaştırılabilir sonuçlar elde etmek için deneylerde Reynolds sayısı sabit tutulmaktadır. Sabit Reynolds sayısı, farklı boyutlarda veya farklı hızlarda yapılan deneylerin, benzer akış karakteristiklerine ve akış

rejimlerine sahip olmasını sağlar. Böylece deneylerin ölçeklendirilebilmesini ve sonuçların genellenebilmesini kolaylaştırır.

Tez çalışmasında 25000, 50000 ve 75000 Re sayılarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Re sayısı hesaplanırken kinematik viskozite 20⁰C sıcaklıkta $1.5111 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak, Re sayısının formülündeki hız ve veter uzunluğu değişkenleri deney türüne ve ortamına göre farklı büyüklüklerde kabul edilmiştir.

3.1.1.9. Mach Sayısı

Akışkanlar mekaniğinde Mach sayısı hareket halindeki bir kütlenin hızının ses hızına oranı olarak tanımlanan boyutsuz bir sayıdır.

Mach sayısı 1'e eşit olduğunda, akışkan ses hızını aştığı için ses duvarını kırma olayı yaşanır. Bu olay, uçaklar ve diğer hızlı hareket eden cisimler için aerodinamik etkilere neden olabilir. Mach sayısı 1'in üzerindeki hızlarda, akışkanın dinamik özellikleri değişir, genellikle daha karmaşık akış modelleri ve şok dalgaları oluşur.

Hızla ilgili çalışmalarınızda Mach sayısının rolünü ve etkilerini anlamak, aerodinamik performansı ve tasarım faktörlerini değerlendirmenize yardımcı olabilir.

Burada; Mach sayısı Ma ile ifade edilmektedir. V (m/s) cismin hızı, c (m/s) ses hızı olarak tanımlanmıştır.

$$Ma = \frac{V}{c} \quad (3.8)$$

3.1.2. Rüzgâr Tüneli Laboratuvarı

Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Makine Mühendisliği laboratuvarında bulunan ses altı açık çevrimli rüzgâr tüneli proje kapsamında faaliyete geçirilmiştir. Sistem birçok aerodinamik çalışmanın yapılabileceği bir tesis olarak oluşturulmuştur. Rüzgâr tüneli emiş fanı, difüzör, test bölmesi, kolektör ve separatörlerden oluşmaktadır. Test bölmesi 50x50 cm. boyutlarındadır. Deneysel ölçümlerinin yapılması istenilen model test bölmesine uygun ölçeklerde yerleştirilmelidir.

3.1.2.1. Rüzgâr Tünelinin Özellikleri

Çalışma hızlarını elde etmek amacıyla 0-50 Hz frekans aralığında ve 0,1 Hz adım hassasiyetine sahip bir frekans inverteri kullanılmıştır. Tünel içindeki akışın sağlanması

için Şekil. de görülen 11 kW gücünde ve aksenal fana sahip bir motor kullanılmaktadır. Ayrıca, kolektörün ölçüleri 1400x500 mm olup, sistemde 3 adet 10 mm ve 3 adet 5 mm baklava tipi mesh ile 1 adet körük tipi separator yer almaktadır. Ses altı rüzgar tünelinin laboratuvardaki genel görünüşü Şekil 3.2.'de verilmiştir.

Şekil 3.2: Ses Altı Rüzgâr Tüneli Genel

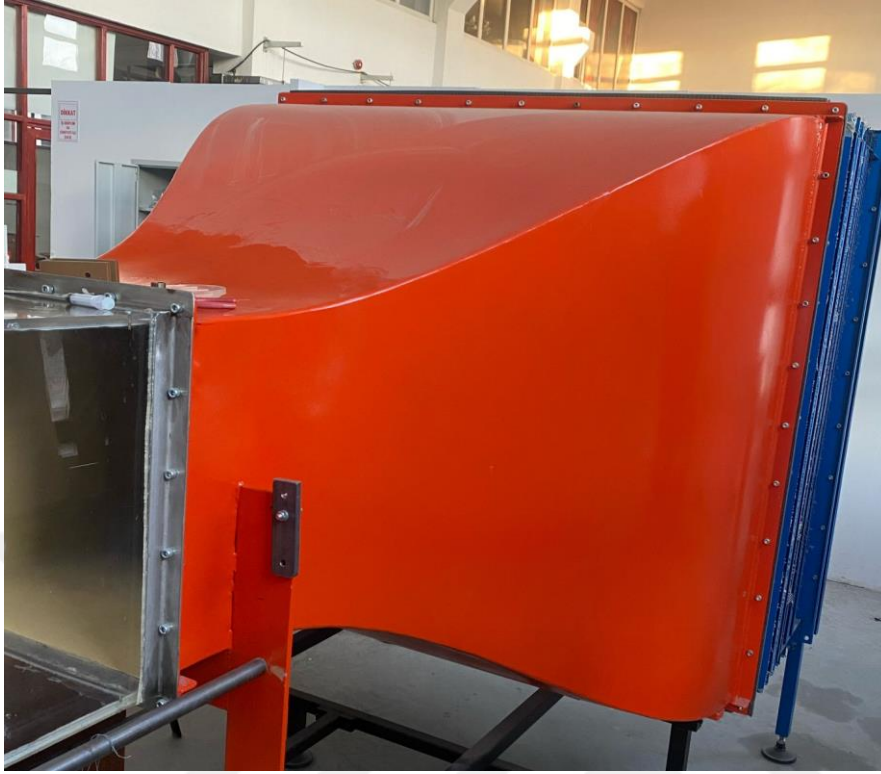


Şekil 3.3'te görülen emiş fanı ses altı rüzgâr tüneli içinde düşük basınç alanına doğru havayı emerek çekmesiyle deneyler için gerekli hava akımı oluşturulmaktadır.

Şekil 3.3: Ses Altı Rüzgâr Tüneli Fanı



Şekil 3.4: Rüzgâr Tüneli Kolektörü



Rüzgâr tüneline kolektör, hava akışını düzenlemek ve dağıtmak için kullanılan bir bileşendir. Şekil 3.4.'teki kolektör, rüzgâr tüneline çalışma ortamında akışkanın homojen bir şekilde dağılmasını ve doğru şekilde yönlendirilmesini sağlar. Ortamdan bal peteği ve separatörlerden geçerek kolektöre gelen hava akımı kolektör sayesinde test bölmesine düzgün ve homojen olarak girmektedir.

Kolektör test bölmesindeki türbülanslı bölgenin azalmasında önemli rol oynamaktadır. Testlerin doğruluğu rüzgâr akımının karakteristiği ile doğrudan bağlantılıdır.

Deneysel çalışmada kullanılan ses altı hava emişli açık çevrim rüzgâr tüneline, hava akışını düzenlemek ve kontrol etmek amacıyla toplam yedi adet ayrıştırıcı (separatör) bulunmaktadır. Bunlar, Şekil 3.5.'te görülen üç adet 10 mm ve üç adet 5 mm baklava mesh ile Şekil 3.6.'da görülen bir adet körük tipi bal peteği ayrıştırıcıdan oluşmaktadır. Bu ayrıştırıcılar, tünel içindeki hava akışının homojenliğini sağlamak ve türbülansı azaltmak için kritik bir rol oynar. Böylece, test edilen modelin etrafındaki akış daha istikrarlı hale gelir, bu da deneysel sonuçların doğruluğunu ve güvenilirliğini artırır.

Şekil 3.5: Ses Altı Rüzgâr Tüneli Separatör Bölümü



Şekil 3.6: Ses Altı Rüzgâr Tüneli Bal Peteği Separatörü



Elektrik enerjisinin bir formunu diğerine dönüştüren cihazlar, genellikle doğru akımı (DC) alternatif akıma (AC) çevirirler. Bu cihazlar, giriş ve çıkış güç kapasiteleri, dalga formları, verimlilikleri, koruma özellikleri ve izleme yetenekleri gibi çeşitli özelliklerle donatılmıştır. Enerji dönüşümü ve dağıtımında kritik bir rol oynarlar. Deneysel çalışmada, ses altı hava emişli açık çevrim rüzgâr tüneline 11 kW'lık motorun hızını ayarlamak için kullanılmıştır. Şekil 3.7.'de görülen invertör, 0 Hz ile 50 Hz arasındaki frekans değerlerinde çalışabilmektedir. İnvirtörün yer aldığı panoda, frekans değiştirme işlevini sağlayan anahtar panonun ön yüzüne yerleştirilmiştir. Şekil 5.7'de, invertör ve frekans kontrol panosunun detayları gösterilmektedir.

Şekil 3.7: İnvörtör



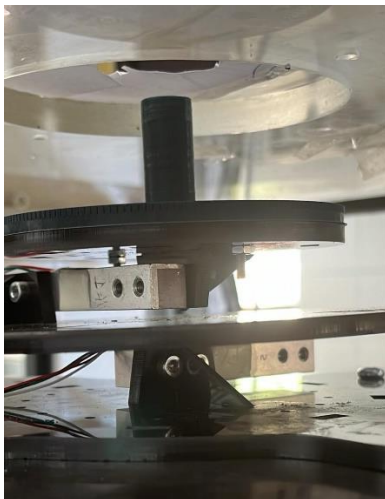
Yapılan ÖNAP çalışması ile rüzgâr tüneli deneysel ölçüm ekipmanları temin edilmiştir. Aerodinamik kuvvetlerin ölçümü için kuvvet sistemi, laminer ayrılma kabarcıklarının tespitinde kullanılan MiniCTA sistemi ve tünel içerisindeki hızın tespiti için kullanılan pitot tüpü alınmıştır.

Rüzgâr tüneline akış görselleştirme çalışmaları duman teli yöntemi ile gerçekleştirilmektedir.

3.1.2.2. Aerodinamik Kuvvet Ölçüm Sistemi

Ses altı rüzgâr tüneline kullanılmak üzere tasarlanmış olan aerodinamik kuvvet ölçüm sisteminde 2 adet loadcell kullanılmıştır. Tasarıma göre rüzgâr tüneline test bölmesinin alt yüzeyine dışarıdan konumlandırılmıştır. Kanat modelleri Şekil 3.8.'deki sisteme bağlanarak aerodinamik ölçümler gerçekleştirilmektedir.

Şekil 3.8: Kuvvet Sisteminde Bulunan 2 Adet Loadcell



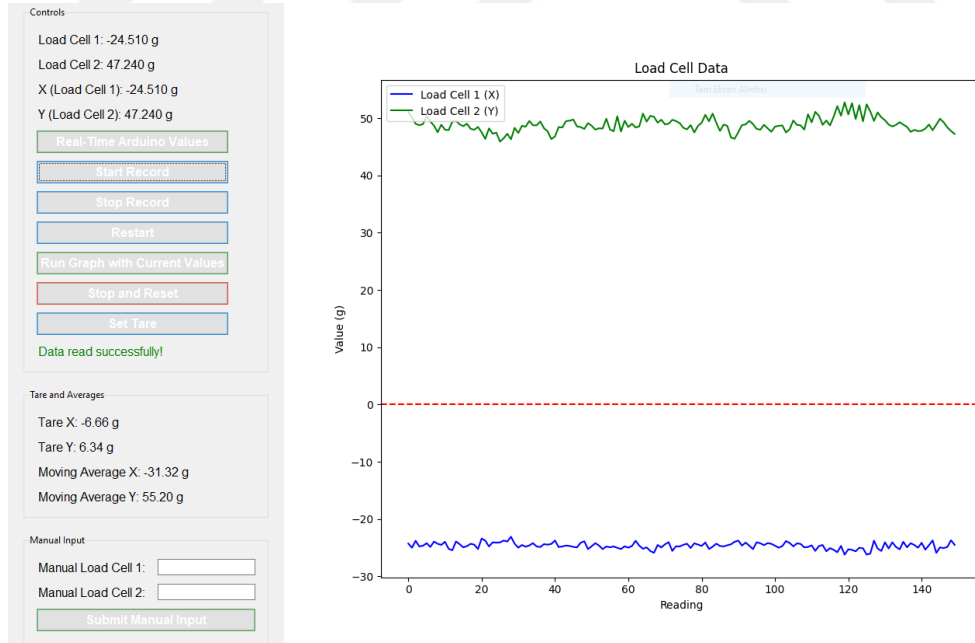
Şekil 3.9.'da görüldüğü gibi kuvvet sistemine bağlanan kanat modeline ölçümü alınmak istenilen açı verilerek testler gerçekleştirilmektedir.

Şekil 3.9: Kuvvet Sistemine Kanat Modelinin Montajı



Ölçümler anlık olarak bilgisayarda bulunan arayüz programına yansımaktadır (Şekil 3.10.). Kanat üzerine gelen kuvvet arayüzde grafikten takip edilerek stabil hale ulaştığında kaydedilmektedir.

Şekil 3.10: Kuvvet Sistemi Arayüzü

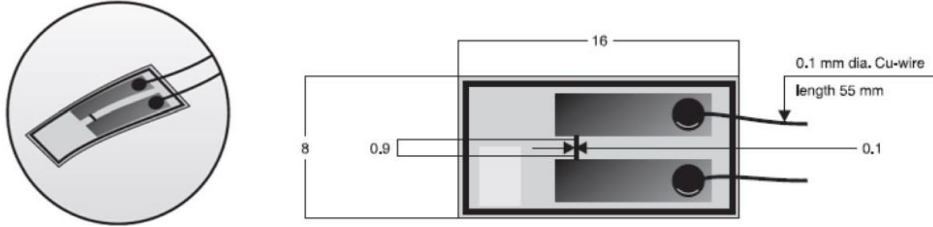


3.1.2.3. MiniCTA Sistemi

Şekil 3.11.'deki sensör 50 µm kalınlığında gömme montajlı özel bir probtur. Sensör 0,9×0,1 mm'dir ve altın kaplamalı kurşun alanlara bağlanır (Şekil 3.12). Öncelikle

geçiş ve ayrılma noktalarının niteliksel ölçümleri için tasarlanmıştır. İlgi duyulan noktalarda doğrudan duvara yapıştırılır. Geçiş ve ayrılma noktalarını belirler ve yüzey sürtünmesini ölçer. Doğrudan yüzey duvara yapıştırılır. Sensör akış yönüne dik olarak yerleştirilir.

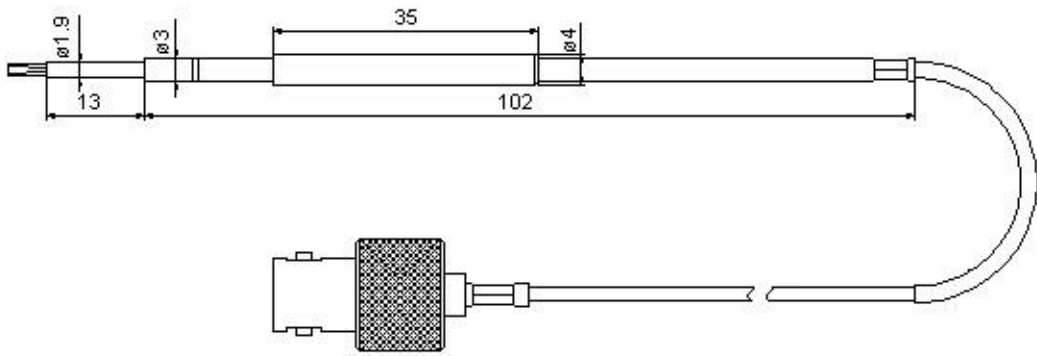
Şekil 3.11: MiniCTA Yüzey Probu (Glue on Probe)



Şekil 3.12: Yüzey Probu Görüntüsü

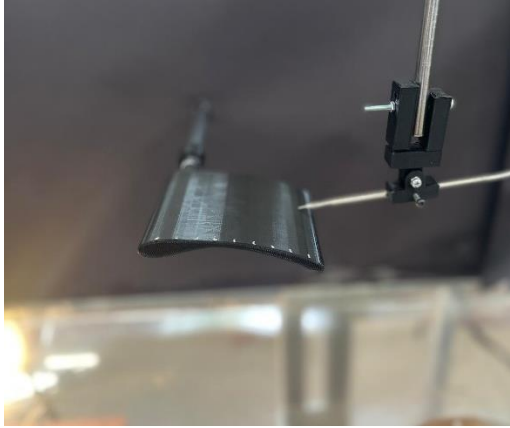


Şekil 3.13: MiniCTA Sınır Tabaka Probu (55p16)

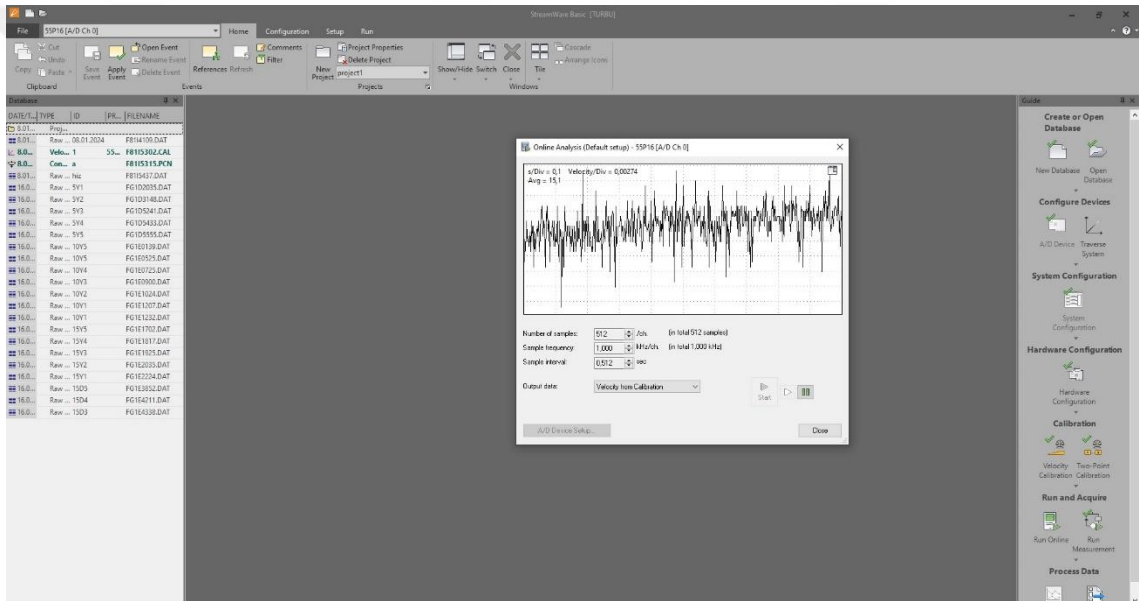


Sınır tabaka probu ile rüzgâr tüneli karakteristiği belirlenmiştir. Şekil 3.13'te teknik çizimi gösterilen prob bağlantısı ses altı rüzgâr tüneline Şekil 3.14'te gösterildiği gibi gerçekleştirilmiştir. Veriler Şekil 3.15'te görülen MiniCTA yazılım programı ile elde edilmektedir. Bu veriler ile oluşturulan grafikler Rüzgâr tüneli test odasının yatay hız dağılımı, düşey hız dağılımı ve türbülans aralıkları yatay ve düşeyde olmak üzere belirlenmiştir.

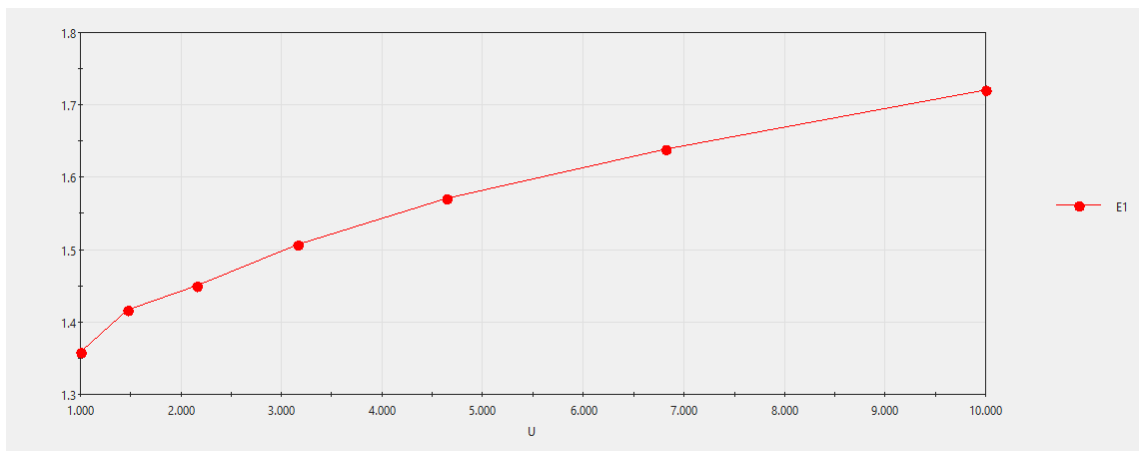
Şekil 3.14: MiniCTA Sınır Tabaka (55P16) Probu Bağlantısı



Şekil 3.15: MiniCTA Yazılım Programı



Şekil 3.16: MiniCTA 55p16 Prob Kalibrasyon Eğrisi



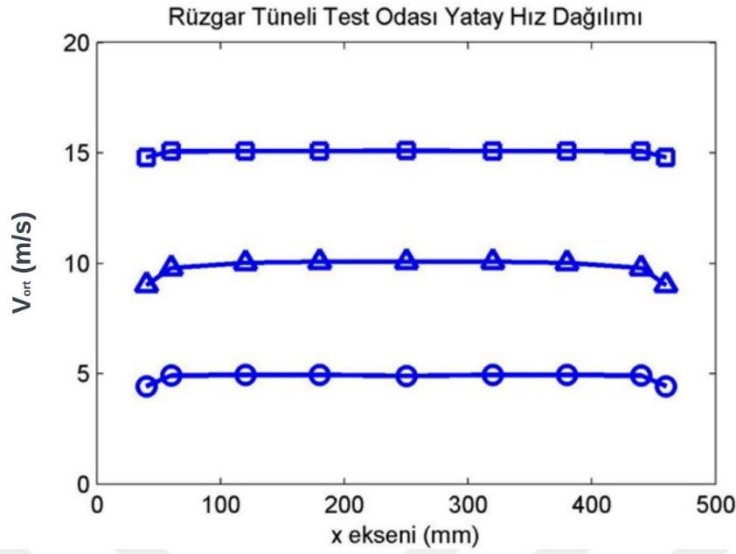
Rüzgâr tünellerinin ölçüm doğruluğunu sağlamak ve güvenilir veriler elde etmek için hız kalibrasyonu kritik bir işlemdir. Hız kalibrasyonu, rüzgâr tüneline ölçülen hızların doğru olup olmadığını kontrol etmek ve gerekirse düzeltmek için yapılır. Bu işlem, rüzgâr tünelineki hava hızının kesin ve doğru bir şekilde ölçülmesini garanti eder. Tünelin hız kalibrasyonunun yapılması için öncelikle 55p16 ölçüm probunun kalibrasyonu yapılmış ve eğrisi Şekil 3.16.'da gösterilmiştir.

Hız kalibrasyonunun yapılma amacı;

- *Ölçüm hassasiyetini sağlama;* Rüzgâr tüneline yapılan deneylerde akış hızı, basınç dağılımları, kuvvet ve moment ölçümleri gibi birçok parametreye doğrudan etki eder. Bu nedenle, akış hızının doğru bir şekilde ölçülmesi çok önemlidir. Hız kalibrasyonu, rüzgâr tüneline ölçüm sisteminin hassasiyetini ve doğruluğunu kontrol eder.
- *Güvenilirlik ve Tutarlılık:* Farklı deneyler arasında tutarlılığı sağlamak ve sonuçların güvenilir olmasını temin etmek için rüzgâr tüneline hız ölçümleri belirli aralıklarla kalibre edilmelidir.
- *Akış Rejimi Kontrolü:* Doğru bir hız ölçümü, akış rejiminin (laminer, geçiş veya türbülanslı) doğru bir şekilde belirlenmesine yardımcı olur. Bu, deneylerin sonuçlarının doğruluğu ve geçerliliği için kritik öneme sahiptir.

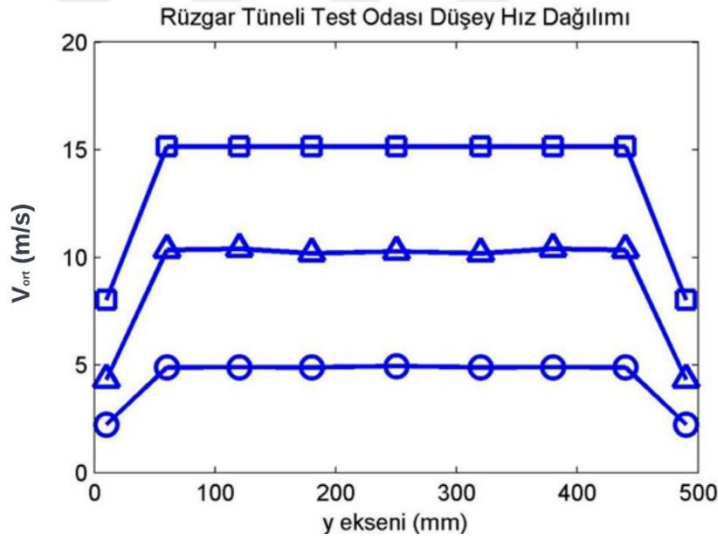
Hız kalibrasyonu, rüzgâr tüneline deneylerinin doğruluğunu ve tekrarlanabilirliğini sağlar. Bu da, deneylerden elde edilen verilerin güvenilir olmasını ve gerçek dünya uygulamaları için geçerli olmasını mümkün kılar. Özellikle aerodinamik çalışmalar ve mühendislik uygulamaları için hız kalibrasyonu, deney sonuçlarının güvenilirliği açısından vazgeçilmez bir işlemdir.

Şekil 3.17: Ses Altı Rüzgâr Tüneli Test Odası Yatay Hız Dağılımı



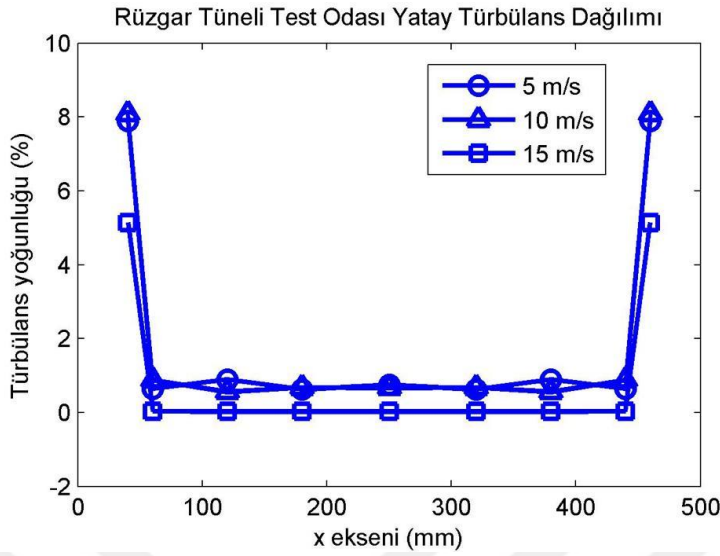
Test bölmesinin içerisindeki hız dağılımı yatay düzlemde 5,10 ve 15 m/s 'lik hızlarda test edilmiştir. Yapılan testlerde kenar yüzeylerden 50 mm.'lik mesafelerden itibaren hız dağılımının yatay seyrettiği ve test bölümünde bu alanda ölçümlerin gerçekleştirilebileceği belirlenmiştir (Şekil 3.17).

Şekil 3.18: Ses Altı Rüzgâr Tüneli Test Odası Düşey Hız Dağılımı



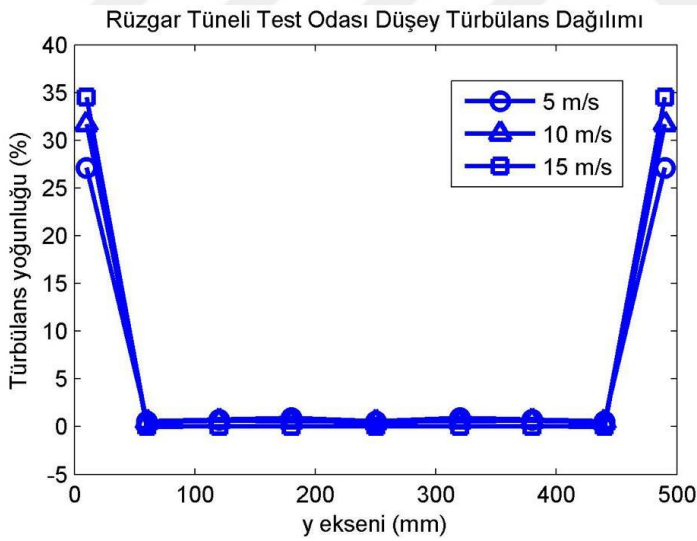
Test bölmesinin içerisindeki hız dağılımı Şekil 3.18.'de görüldüğü gibi düşey düzlemde 5,10 ve 15 m/s 'lik hızlarda test edilmiştir. Yapılan testlerde rüzgâr akımının kenar yüzeylerde gerçekleştirdiği sürtünme nedeniyle 50 mm.'lik mesafelerden itibaren hız dağılımının grafikte yatay seyrettiği ve test bölümünde bu alanda içerisinde ölçümlerin gerçekleştirilebileceği belirlenmiştir.

Şekil 3.19: Ses Altı Rüzgâr Tüneli Test Odası Yatay Türbülans Dağılımı



Ses altı rüzgâr tünelinin yatay türbülans dağılımı Şekil 3.19.'da gösterilmiştir. Test bölgesinin kenar duvarlarından içeriye doğru 50 mm. lik mesafeden itibaren türbülans dağılımının %0,1 – 1 aralığında olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 3.20: Ses Altı Rüzgâr Tüneli Test Odası Düşey Türbülans Dağılımı



Düşeyde yapılan türbülans dağılımı ölçümlerinde düşük bir türbülans değeri olduğu görülmektedir (Şekil 3.20). Türbülans değeri %0,1-1 aralığında olduğu tespit edilmiştir. Alt ve üst yüzeylerde yüksek türbülansların olması kenar yüzey sürtünmelerinden kaynaklı bir durumdur.

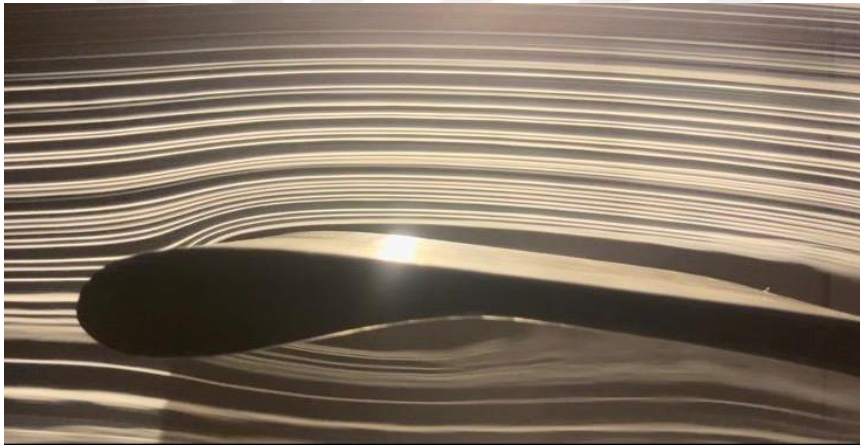
Ses altı açık çevrimli rüzgâr tüneli için yapılan hız ve türbülans dağılımı ölçümlerinin yapılacak olan çalışmalar için ideal değerlerde olduğu tespit edilmiştir.

3.1.2.4. Akış Görselleştirme Yöntemi

Akış görselleştirme, bir modelin aerodinamik performansını incelemek için kullanılan görsel bilgi sağlama yöntemidir. Rüzgâr tünellerinde yaygın olarak uygulanan tekniklerden biri de duman-tel akış görselleştirme yöntemidir. Bu teknik, bir model etrafındaki aerodinamik akışı görsel olarak analiz etmek amacıyla kullanılır.

Duman-tel akış görselleştirmesi, modelin etrafına ince teller yerleştirilerek gerçekleştirilir. Bu teller, modelin etrafındaki dumanın akışını sağlamak için bir duman jeneratörü kullanılarak kaplanır. Rüzgâr tünelineki hava akışı, teller üzerindeki dumanın hareketini etkiler ve böylece akışın model üzerindeki etkileri gözlemlenebilir hale gelir. Bu yöntem, özellikle sınır tabakalarının özelliklerini, akış ayrılmalarını ve diğer kritik aerodinamik fenomenleri anlamada etkilidir (Seyhan, Sarıoğlu ve Akansu, 2018).

Şekil 3.21: Duman Görüntüleme Sistemi



Duman görüntüleme, genellikle rüzgâr tünellerinde veya benzeri akış test ortamlarında aerodinamik akışı incelemek için başvurulan bir tekniktir. Bu teknik, hava veya gaz akışının görselleştirilmesini sağlar ve akışın dinamiklerini daha iyi anlamak için dumanın belirgin olduğu bir ortam oluşturur. "Duman görüntüleme" olarak adlandırılan bu süreç, çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilebilir.

Bu yöntemlerden biri Direnç Teli Duman Yöntemi'dir. Bu yöntemde, duman telleri modelin etrafına yerleştirilir ve bu teller, bir duman jeneratörü tarafından yayılan dumanla kaplanır. Rüzgâr tüneline oluşturulan akış, teller üzerindeki dumanın hareketini etkileyerek akışın nasıl davrandığını görsel olarak ortaya koyar.

Bir diğerk yöntem ise Renkli Duman Yöntemi'dir. Bu teknikte, dumanın farklı renklere boyanması veya farklı renklerde dumanların kullanılması, akış yönü ve hızı hakkında daha ayrıntılı bilgi sağlar.

Lazer Duman Pürüzsüzleştirme (Laser Light Sheet) Yöntemi ise lazer ışığı kullanılarak oluşturulan ince bir levha yardımıyla, ortamdaki partiküllerin aydınlatılmasını ve böylece akış alanındaki değişimlerin gözlemlenmesini mümkün kılar.

Son olarak, Sis Makineleri Yöntemi ile modelin etrafındaki hava üzerine sis püskürtülür ve bu sis sayesinde akışın yolu takip edilebilir. Bu yöntemler, modelin etrafındaki hava akışının genel yapısını, sınır tabakalarını, akış ayrılma noktalarını ve diğerk önemli aerodinamik detayları görsel olarak tespit etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada Şekil 3.21'de görülen Direnç Teli ile Duman Görselleştirme Yöntemi uygulanmıştır.

Rüzgâr tünelinin akış yönünde test bölmesinin giriş kısmına dikey ekseninde direnç teli gerilmiştir. Kullanılan direnç teli 0.25 mm. çapındadır. Elektrik akımı ile tel üzerine damlatılan parafinin yanması ile duman elde edilmektedir. Elektrik akımı güç kaynağından sağlanmaktadır. Güç kaynağı 30 V.'luk gerileme göre ayarlanmıştır. Direnç teli üst ve alt kısımlarından krokodil uçlar ile tutturularak güç kaynağına bağlanmıştır.

Rüzgâr tüneli içerisinde akış başlamadan sıvı parafin direnç teli üzerinde damlatılmaktadır. Telin yüzeyi kaplandığında rüzgâr tüneli çalıştırılarak güç kaynağından 30 V. Gerilim tele gönderilmektedir. Tel üzerindeki sıvı parafin elektrik akımı sayesinde yanarak duman oluşturmaktadır. Duman test bölmesinde akış yönünde kanat üzerindeki aerodinamik akışı görselleştirmektedir.

3.1.2.5. Pitot Tüpü

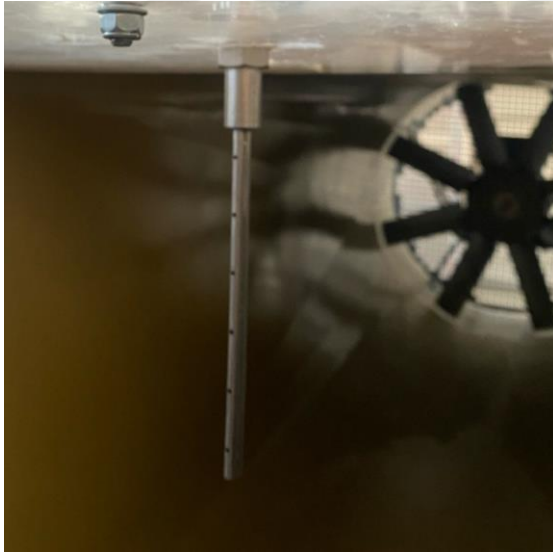
Deneysel çalışmada kullanılan ses altı hava emişli açık çevrim rüzgâr tüneline, pitot tüpü, hava akışındaki dinamik basıncı (P) ölçen bir boru tipi sensör olarak işlev görür. Dinamik basınç, hava akışının hareketinden kaynaklanan basınç değişimlerini temsil eder. Pitot tüpü ayrıca, çevresel basıncı (statik basınç) ölçmek için ek bir yan delik de içerebilir. Bu iki basınç ölçümü arasındaki fark (ΔP) kullanılarak, hava hızının yanı sıra, bazı durumlarda irtifa gibi diğerk hava akış parametreleri hesaplanabilir.

Şekil 3.23.'de test bölgesinin içinde yer alan pitot tüpü üzerinde bulunan deliklerden gelen havanın basınç değişimlerinden elde ettiği değerler Şekil 3.22.'de yer alan ekranda m/s birimi cinsinden görülmektedir. Farklı hızlarda yapılacak çalışmalar için hız ayarı bu ekran üzerinden takip edilerek ayarlanmaktadır.

Şekil 3.22: Pitot Tüpü Elektronik Ekranı



Şekil 3.23: Pitot Tüpü



3.1.2.6. 3B Yazıcı Özellikleri

Kanat profili prototipinin imalatında kullanılan en önemli ekipman Creality K1 3 boyutlu yazıcıdır. FDM (Fused Deposition Modeling) teknolojisine sahip bu yazıcı normal bir FDM 3D yazıcıdan 12 kat daha hızlı olmasıyla birlikte 600 mm/s'ye kadar baskı hızına ulaşabilmektedir. Bir termoplastik filamentin eritilmesi ve katman katman bir nesne oluşturmak için bir tabana ekstrüde edilmesiyle çalışır. 3B yazıcının teknik özellikleri aşağıdaki Tablo 3.1'de gösterilmiştir.

Tablo 3.1: 3B Yazıcı Teknik Özellikleri

Baskı Teknolojisi: FDM (Fused Deposition Modeling)
PC kaplı yay çeliği manyetik tabla
Baskı Alanı: 220x220x250 mm
Nozzle Çapı: 0.4 mm
Maksimum Baskı Hızı: 600 mm/s
Baskı Hassasiyet: ± 0.1 mm
Baskı Kalınlığı: 0.05-0.35 mm
Hotend Tipi: Pirinç Nozzle
Extruder: Bowden
Max Nozzle Sıcaklığı: 300 Derece
Max Tabla Sıcaklığı: 100 Derece
Giriş Voltajı: AC 115-230V
Çıkış: DC 24V 350W
Yazıcı Boyutları: 355x355x480 mm

Tez çalışmasında kullanılacak olan kanat profil modelleri yapılan çizimler sonrasında Creality K1 3 boyutlu yazıcı ile baskısı alınarak elde edilmiştir.

3.2. BİYO-ESİNLENMELİ KANAT MODELİ

3.2.1. Biyo-Esinlenme

Biyo esinlenme, doğadaki yapıların, süreçlerin, sistemlerin ve stratejilerin incelenerek bunlardan ilham alınarak geliştirilen teknolojik, mimari veya mühendislik çözümlerine verilen isimdir. Bu yaklaşım, doğada milyarlarca yıl süren evrim süreci boyunca geliştirilmiş olan etkili, sürdürülebilir ve yenilikçi çözümleri taklit etmeyi amaçlar.

3.2.2. Pterozorlar (Uçan Sürüngeçerler)

Pterozorlar, tarihte uçabilen ilk omurgalılar olarak bilinen, dikkat çekici bir sürüngeçer grubuydu. Yaklaşık 220 milyon yıl önce Triyas Dönemi'nde ortaya çıktılar ve 66 milyon yıl önce Kretase-Paleojen kitlesel yok oluşuyla birlikte nesilleri tükendi. Pterozorlar, kanatlarıyla güçlü uçuş yeteneklerine sahip olmalarına rağmen, kökenleri ve uçuş kapasitelerinin nasıl evrimleştiği konusunda paleontologlar uzun süredir tartışıyorlar (Ezcurra, vd., 2020).

19. yüzyıldan bu yana araştırmacılar, pterozorların evrimsel geçmişini anlamaya çalışırken, bu canlıların uçuşu nasıl geliştirdiklerine dair birçok teori ortaya atıldı. Kanat yapıları, iskelet sistemleri ve kas gelişimleri üzerinde yapılan incelemeler, bu

sürüngelelerin uçuş yeteneklerini zamanla nasıl kazandıklarına dair ipuçları sunmaktadır (Ezcurra, vd., 2020).

Çeşitli büyüklüklerde olmasına rağmen aerodinamik açıdan kendi içerisinde bulunan türlerde yaklaşık aynı uçuş özellikleri göstermektedir. Bir zürafa boyutlarında türleri bulunan pterozorların uçuş kabiliyetlerinin üst düzey olma nedenlerinden biri olarak kemik yapılarının hafif olması gösterilmektedir. Bu sayede büyüklüklerine rağmen uçuş yetenekleri gelişmiştir. Kanat açıklıkları 11 metre olan pterozor türleri olduğu fosil bilimciler tarafından ortaya çıkarılmıştır. Bu büyüklükteki bir pterozorun ağırlığı kemik yapısından kaynaklı olarak 200-250 kg. aralığında olduğu tespit edilmiştir (Witton, 2013; Witton ve Habib, 2010). Kıtalar arası mesafeleri kat ettiği düşünüldüğünde kanat yapılarının önemli derecede uçuşlarına etki ettiği düşünülmektedir. Tablo 3.2.'de bazı pterozor türlerinin fiziksel özellikleri belirtilmiştir.

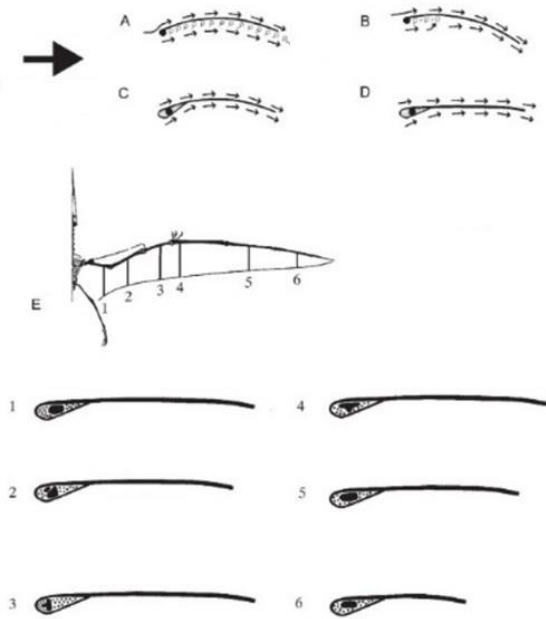
Tablo 3.2: Pterozor Türleri ve Fiziksel Özellikleri

Türler	Vücut uzunluğu l (m)	Kütle m (kg)	Kanat alanı S (m ²)	Kanat açıklığı b (m)	Uzunluk oranı AR= $\frac{b}{S}$	Kanat açıklığı/vücut uzunluğu Oran $\frac{b}{l}$	Kanat yüklemesi WL= $\frac{mg}{S}$ (N/m ²)	Mevcut Güç P (W)	Seyir hızı (m/s)
Eudimorphodon ranzii	0,075	0,015	0,021	0,412	8,08	5,49	7	0,608	3,8
Pterodactylus antiquus	0,108	0,0386	0,0274	0,538	10,56	5,23	13,6	1,13	5
Rhamphorhynchus muensteri	0,156	0,134	0,072	0,864	10,34	5,52	18,25	2,62	6,4
Dorygnathus bathensis	0,188	0,232	0,104	0,92	8,14	4,89	21,88	3,776	8
Tapejara wellnhoferi	0,229	0,418	0,166	1,35	10,98	5,91	24,7	5,59	8
Nyctosaurus gracilis	0,376	1,86	0,409	2,72	18,08	7,23	44,6	15,12	9,6
Dsungaripterus weii	0,512	4,7	0,747	3,24	14,05	6,33	61,7	28,1	13
Anhanguera piscator	0,7	7,58	2,118	4,69	10,39	6,69	35,1	38,59	11,6
Pteranodon longiceps	0,78	16,6	2,65	6,18	14,42	7,91	61,4	65,1	13
Quetzalcoatlus northropi	1,76	70	9,55	10,39	11,3	8,25	71,88	170	16

Kaynak: (Chatterje ve Templin, 2004).

Chatterje ve Templin tarafından yapılan çalışmada pterozor kanadı üzerinden hava akışının geçiş şekli örneklenmiştir. Kanat modelinin farklı yerlerinden alınan kesit görüntüleri Şekil 3.24'te gösterilmiştir.

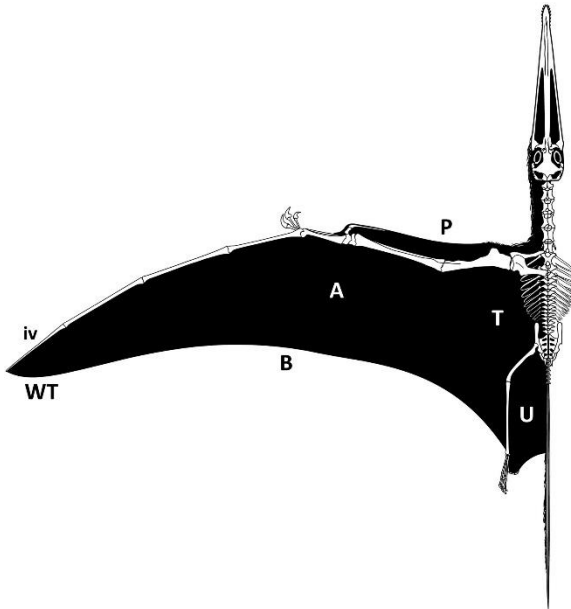
Şekil 3.24: Pterozor Kanat Yapısı



Kaynak: (Chatterje ve Templin, 2004).

Hone ve arkadaşları tarafından paleontoloji alanında yapılan çalışmada pterozor kanadının üstten görünüşünü oluşturmuşlardır (Şekil 3.25).

Şekil 3.25: Pterozor Kanat Yapısının Üst Görünüşü

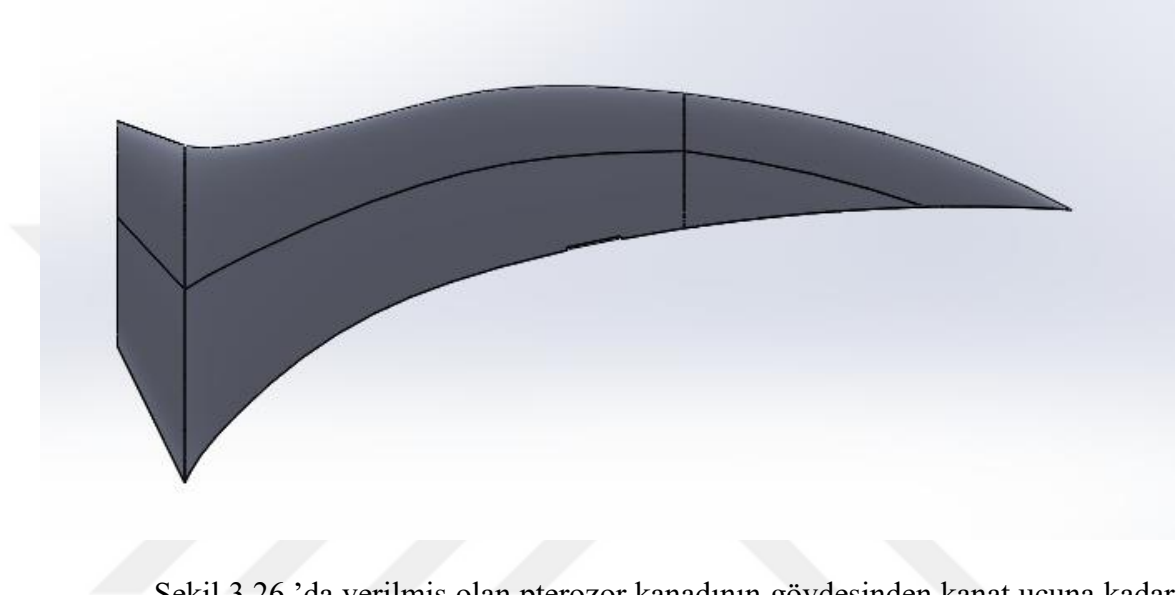


Kaynak: (Hone, Van Rooijen ve Habib, 2015).

3.2.3. Pterozor Kanat Prototip Parametreleri

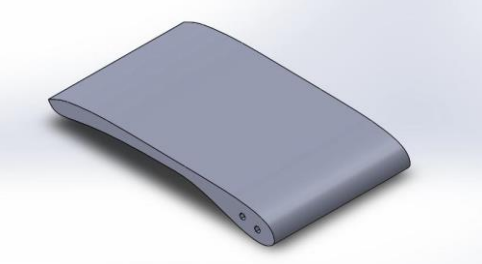
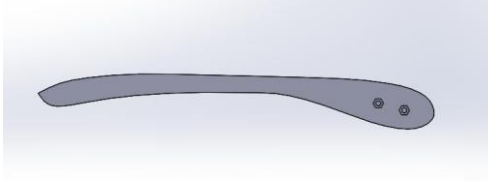
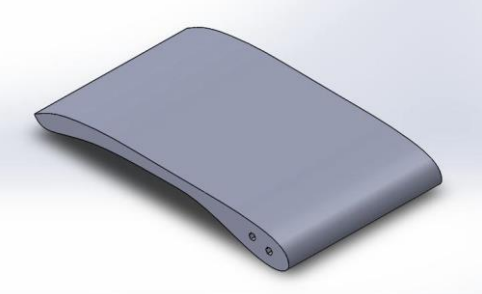
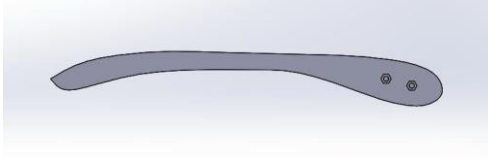
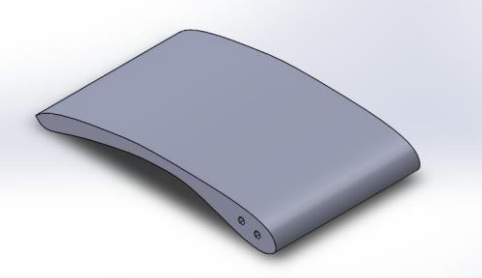
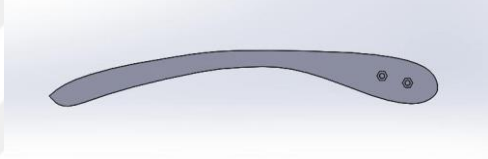
Paleontoloji ve biyoloji bilim dallarında pterozorlar ile ilgili çalışmalar bulunmaktadır. Fiziksel yapıları üzerinde durulan bu çalışmalardan faydalanarak deneylerimizde kullanacağımız kanat kesitlerinin elde edileceği kanat modeli Şekil 3.26.'da gösterilmiştir.

Şekil 3.26: SolidWorks'te Oluşturulmuş Pterozor Kanat Modeli



Şekil 3.26.'da verilmiş olan pterozor kanadının gövdesinden kanat ucuna kadar 3 farklı kısımdan kesit alınarak deneylerde kullanılacak olan kanat kesitleri oluşturulmuştur. Tablo da verilen kanat kesitleri Pt01, Pt02 ve Pt03 olarak kodlanmıştır. Kanat üzerindeki eğim, çizimlerden de görüldüğü gibi Pt01'den Pt03'e kadar artarak devam etmiştir. Bu eğimin etkisi yapılan deneylerin analizlerinde belirtilmiştir.

Tablo 3.3: Deneysel Çalışmada Kullanılan Pterozor Kanat Kesitleri

	
Pt01 Pterozor Kanat Profili	
	
Pt02 Pterozor Kanat Profili	
	
Pt03 Pterozor Kanat Profili	

Pterozorlar ile ilgili bilgiler incelendiğinde kanat uçlarına doğru ön kanat veter uzunluğunun kısaldığı, buna rağmen ön taraftaki kemik yapının (hucüm tarafında bulunan yumru geniş yapı) büyüklüğünün veter uzunluğuna göre daha az değiştiği tespit edilmiştir. Kanat üst kısmındaki eğimin kanat ucuna doğru arttığı görülmüştür. Kanat profilleri arasında yapılacak olan kıyaslamalar aynı Re sayılarında gerçekleştirileceği için veter uzunluları eşitlenmiştir. Bu durumda kanat ucuna daha yakın noktadan elde edilen kanat modelinin üst yüzeyinde eğimin diğerlerine göre daha belirgin olduğu görülmektedir.



DÖRDÜNCÜ BÖLÜM
DENEYSEL ÇALIŞMALAR

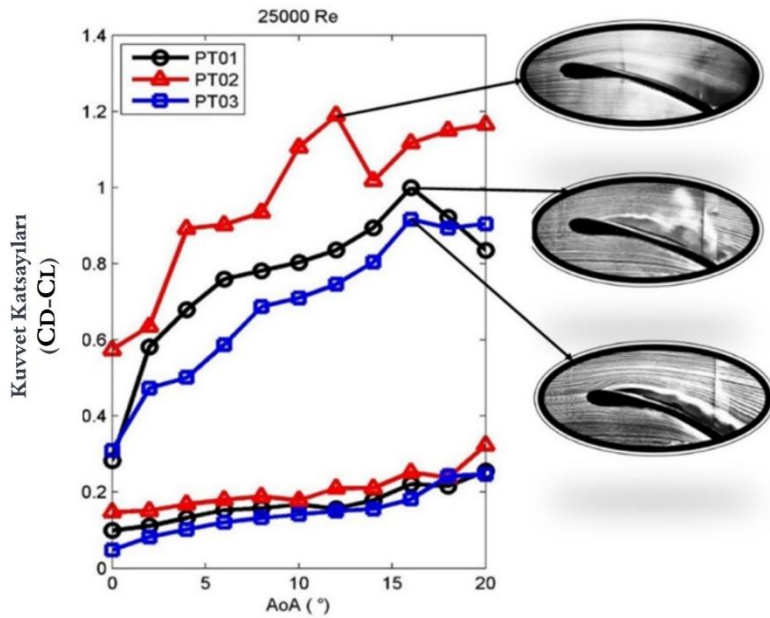
4.1. AERODİNAMİK KUVVET ANALİZLERİ

Ses altı rüzgâr tüneline pterozor kanat yapısından esinlenilerek oluşturulmuş kanat kesitlerinin kuvvet analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler 25000, 50000 ve 75000 Re sayılarında gerçekleştirilmiştir. 0°'den başlayarak 20°'ye kadar 2°'lik aralıklarla C_L ve C_D testleri yapılmıştır. Kanat profilleri Pt01, Pt02 ve Pt03 olarak adlandırılmıştır.

4.1.1. 25000 Re Sayısında Aerodinamik Kuvvet Analizleri

Kanat profillerinin 25000 Re sayısındaki karşılaştırılmaları yapılmıştır.

Şekil 4.1: Pt01, Pt02 ve Pt03 Kanat Profillerinin C_L ve C_D Karşılaştırma Grafiği (Re:25000)



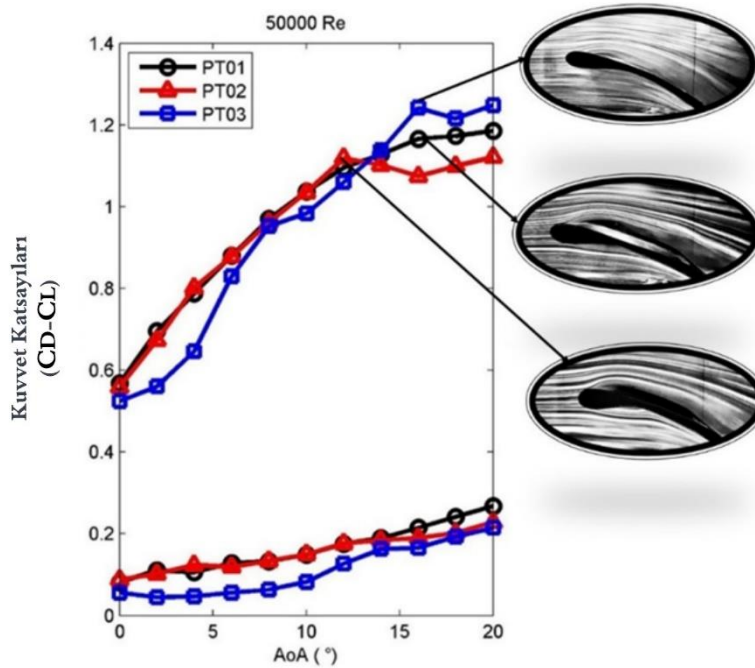
Şekil 4.1.'deki grafikte Pt01, Pt02 ve Pt03 kanat profillerinin 25000 Re'deki kuvvet değerlerini tespit etmek için deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kritik hücum açısına kadar kaldırma katsayılarının genelde doğrusal arttığı görülmektedir. Pt02 kanat profilinin kaldırma katsayısı eğimi Pt01 ve Pt03'e göre daha fazladır. Maksimum C_L Pt02 için $\alpha=11^\circ$ 'de $C_L=1,2$ değerinde, Pt01 için $\alpha=16^\circ$ 'de $C_L=1$ değerinde ve Pt03 için $\alpha=16^\circ$ 'de $C_L=0,9$ değerinde olduğu görülmektedir. Grafikte görüldüğü gibi kanat profilleri maksimum kaldırma katsayılarının olduğu açılarda tutunma kaybına uğramıştır. Düşük Re sayısında yapılan deneylerde sürüklenme katsayılarının artışı az olmaktadır. $C_D=0-0,2$ aralığında başlayarak $C_D=0,3$ değerine kadar sürüklenme katsayıları görülmektedir. Tutunma kaybı gerçekleşen açılarda kaldırma katsayısının düşüşü ile sürtünme katsayısı

değerlerinin arttığı görülmektedir. Tutunma kaybının olduğu bölgelerdeki duman görüntüleri akışın kanat yüzeyinden ayrıldığını göstermektedir.

4.1.2. 50000 Re Sayısında Aerodinamik Kuvvet Analizleri

Kanat profillerinin 50000 Re sayısındaki karşılaştırılmaları yapılmıştır.

Şekil 4.2: Pt01, Pt02 ve Pt03 Kanat Profillerinin C_L ve C_D Karşılaştırma Grafiği (Re:50000)



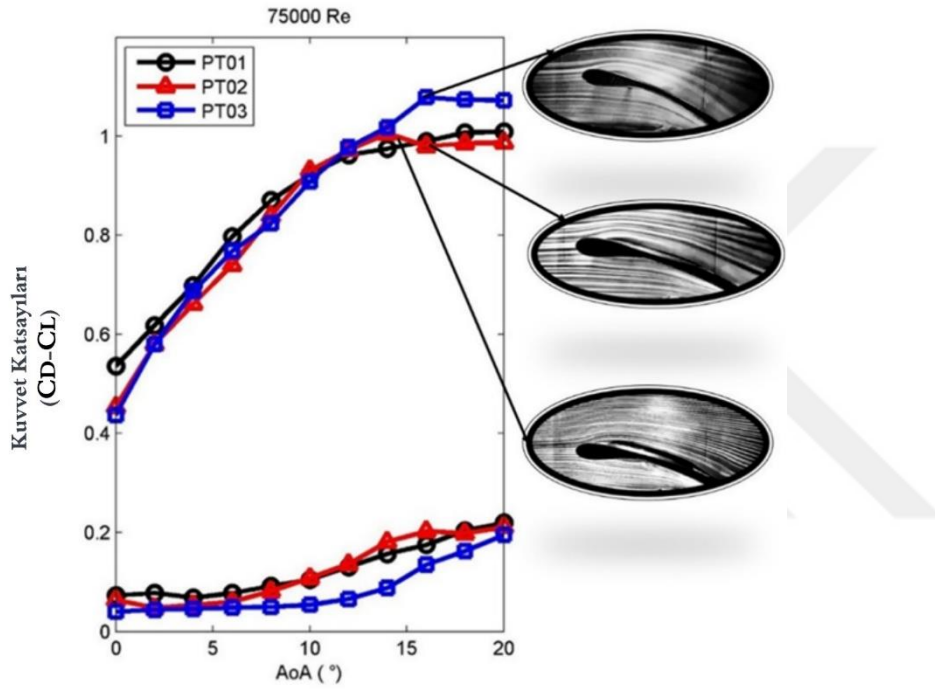
Şekil 4.2'deki grafikte Pt01, Pt02 ve Pt03 kanat profillerinin 50000 Re'deki kuvvet katsayıları için deneyleri yapılmıştır. Kritik hücum açlarına kadar kaldırma katsayılarının genelde doğrusal arttığı görülmektedir. Re=50000 sayısında Pt02 ve Pt01 kanat profillerinin C_L eğimleri Pt03'e göre daha fazladır. Maksimum C_L Pt01 için $\alpha=16^\circ$ 'de $C_L = 1,2$ değerinin üzerine çıktığı, Pt02 için $\alpha=11^\circ$ 'de $C_L = 1,1$ değerinde olduğu ve Pt03 için $\alpha=16^\circ$ 'de $C_L = 1,1-1,2$ değerleri aralığında olduğu görülmektedir. Kanat profilleri maksimum C_L olduğu açılarda tutunma kaybı oluşmuştur. Duman görüntülerinde görüldüğü gibi tutunma kaybı sonrası türbülans yoğunluğundan dolayı C_L değerlerindeki olması gereken düşüş sürekliliği görülmemektedir. Sürüklenme katsayısı değerleri 25000 Re olduğu gibi düşük bir eğimle yaklaşık $C_D = 0,2-0,3$ değer aralığına kadar artmıştır. Pt03 kanat profilinin kaldırma katsayısındaki gibi sürüklenme katsayısında

da düşük bir eğim ile artış göstermiştir. Sürüklenme katsayısı değerleri tutunma kaybının olduğu açılarda yataya yakın bir eğim olduğu görülmektedir.

4.1.3. 75000 Re Sayısında Aerodinamik Kuvvet Analizleri

Kanat profillerinin 75000 Re sayısındaki karşılaştırılmaları yapılmıştır.

Şekil 4.3: Pt01, Pt02 ve Pt03 Kanat Profillerinin C_L ve C_D Karşılaştırma Grafiği (Re:75000)



Şekil 4.3.'deki grafikte Pt01, Pt02 ve Pt03 kanat profillerinin 75000 Re'deki kuvvet katsayıları için deneyleri yapılmıştır. 75000 Re'deki kuvvet ölçümlerinde diğer iki Re sayısında olduğu gibi Pt02 kanat profili Pt01 ve Pt03 kanat profillerine göre daha önce tutunma kaybına girmektedir. Pt02 kanat profili için $\alpha=13^\circ$ ve $C_L=1$ olduğu değerde tutunma kaybı gerçekleşmiştir. 50000 Re sayısında olduğu gibi türbülansın fazla olması nedeniyle tutunma kaybı sonrasındaki açılarda C_L değerlerinde düşüş görülmemektedir. Pt03 kanat profili 16° 'lik hücum açısında maksimum C_L değerine ulaşmıştır. C_D eğimleri üç kanat içinde yaklaşık aynı şekilde olduğu grafikte görülmektedir. Diğer Re sayılarında yapılan deneylere göre 75000 Re sayısındaki deneylerde tutunma kaybı sonrasındaki sürüklenme katsayılarındaki artış daha belirgindir. Pt03 kanat profilinin sürüklenme katsayısı değerleri diğer iki kanat profiline göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Pt02 kanat profili $Re=25000$ sayısında $\alpha=5-9^0$ 'lerde C_L değerlerinin eğiminin düşük olduğu görülmektedir. Yüzey probu ile yapılan miniCTA ölçümlerinde aynı Reynolds sayısında uzun laminer ayrılma kabarcığının olduğu ve oluşan bu laminer ayrılma kabarcığının (LSB) C_L 'na olumsuz etkisi olduğu düşünülmektedir.

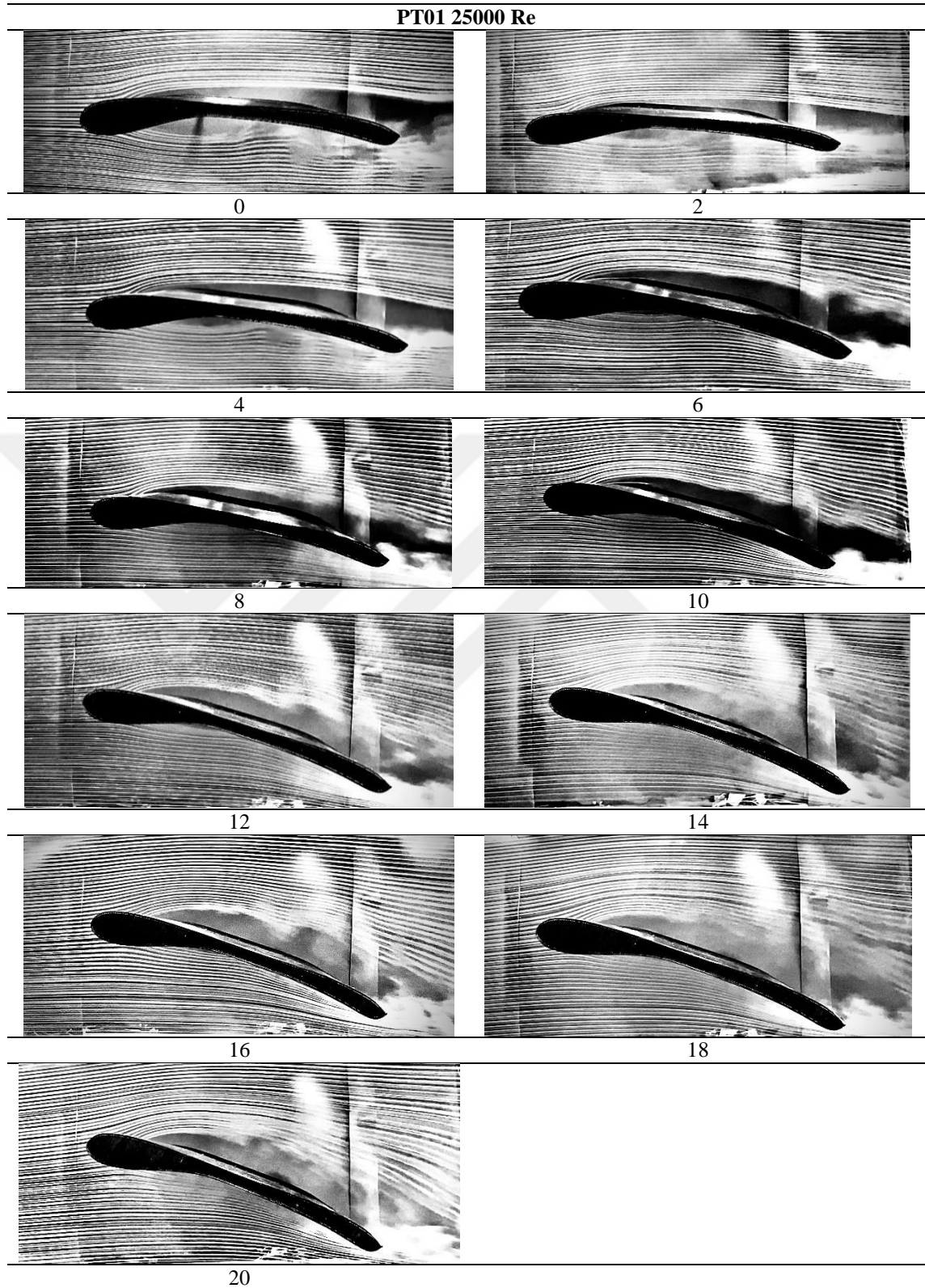
4.2. DUMAN TELİ İLE AKIŞ GÖRSELLEŞTİRME

Pterozor kanat profilinin 3 kesitinin duman ile akış görüntüleme analizleri yapılmıştır. Analizler 0^0 'den başlayarak 2^0 'lik artıŐlar ile 20^0 dereceye kadar yapılmıştır. Kanat profilleri Pt01, Pt02 ve Pt03 olarak adlandırılmıştır. Duman teli ile akış görsellerinin görüntülendiği tablolarda 0^0 'dan 20^0 'ye kadar olan rakamlar hücum açısını (α) ifade etmektedir.

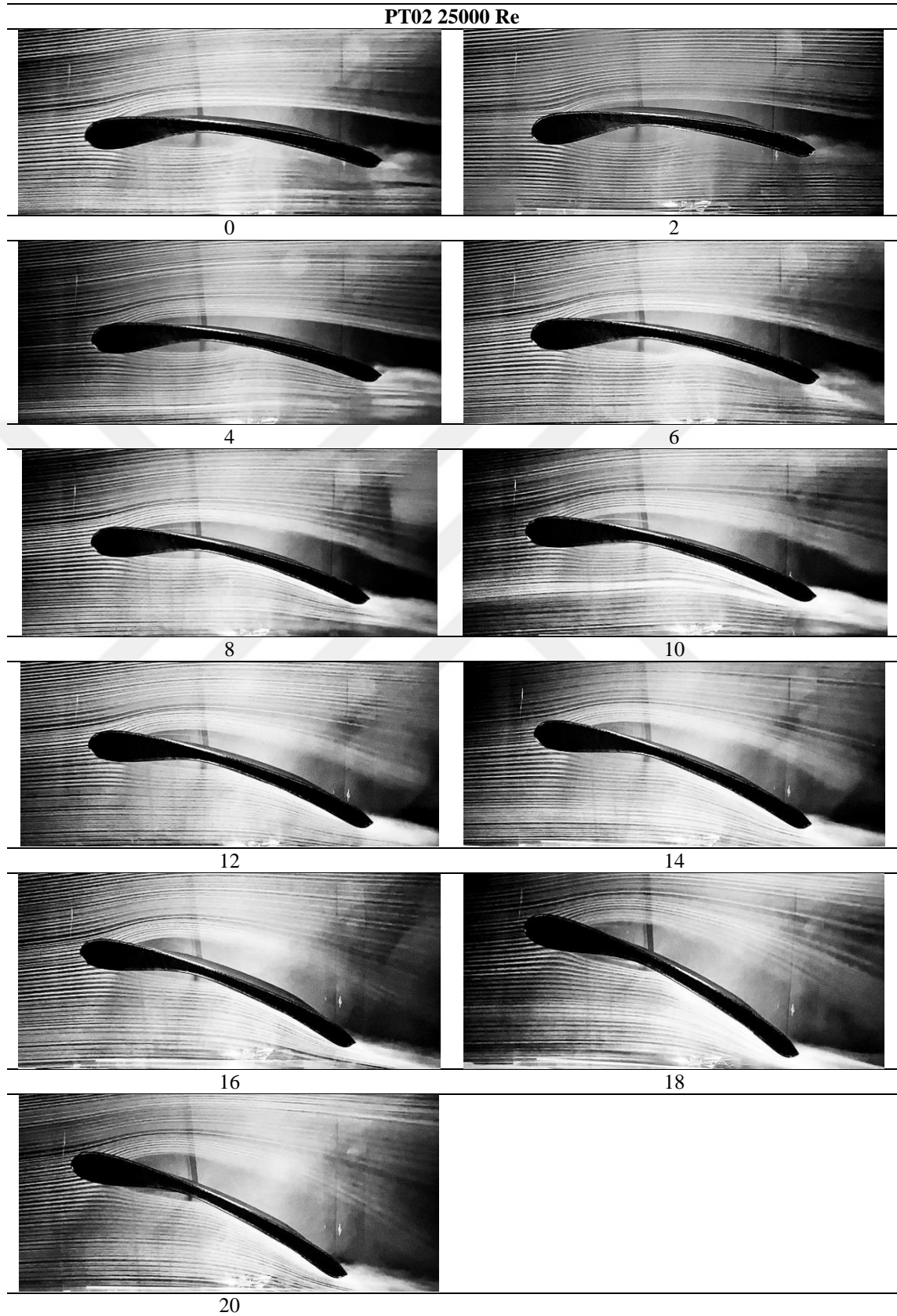
4.2.1. 25000 Re Sayısında Duman Görüntüleme Analizi

Pt01, Pt02 ve Pt03 kanat profilleri için Re sayısı 25000'de Tablo 4.1, 4.2. ve 4.3.'deki duman görüntüleri incelendiğinde tutunma kayıpları ve laminer ayrılma kabarcıklarının boyut ve konumları görülmektedir. Pt01 kanat profilinde $\alpha=14^0$ ye kadar olan görüntülerde akışın genel olarak laminer iplikçikler halinde olduğu görülmektedir. $\alpha=16^0$ 'de kanat yüzeyindeki oluşan ve art bölgesinde yoęunlaŐtıęı görülen türbülanslı yapı tutunma kaybının gerçekleŐtięini belirtmektedir. Yüzey probu ile yapılan ölçümlerde de görüldüğü gibi $\alpha=8^0$ 'de kısa laminer ayrılma kabarcığının oluştuğu belirlenmiştir. Pt02 kanat profilinde $\alpha=8^0$ ye kadar akışın genel olarak laminer yapıda olduğu görülmektedir. $\alpha=10^0$ 'de kanat yüzeyindeki oluşan ve art bölgesinde yoęunlaŐtıęı görülen türbülanslı yapı tutunma kaybının baŐladıęını ifade etmektedir. $\alpha=12^0$ 'de akışın kanat yüzeyinden uzaklaştığı ve tutunma kaybının gerçekleştiği görülmektedir. Kuvvet analizinden elde edilen veriler ile değerlendirildiğinde tutunma kaybının $\alpha=11^0$ gerçekleştiği belirlenmiştir. $\alpha=8^0$ de 55R47 glue-on prob ile yapılan ölçümlerde ise hücum kenarına yakın bir bölgeden başlayan laminer ayrılma kabarcığının kanat yüzeyinin ortalarına kadar geldiği görülmektedir. Pt03 kanat profilinin 25000 Re sayısındaki görüntülerde laminer akış yapısının $\alpha=16^0$ 'de kanat yüzeyi üzerinde türbülanslı akış yapısına donŐtę bölgelerin bulunduğu görülmektedir. Kuvvet ölçümlerinde tespit edildiği gibi $\alpha=16^0$ 'de tutunma kaybı gerçekleşmiştir.

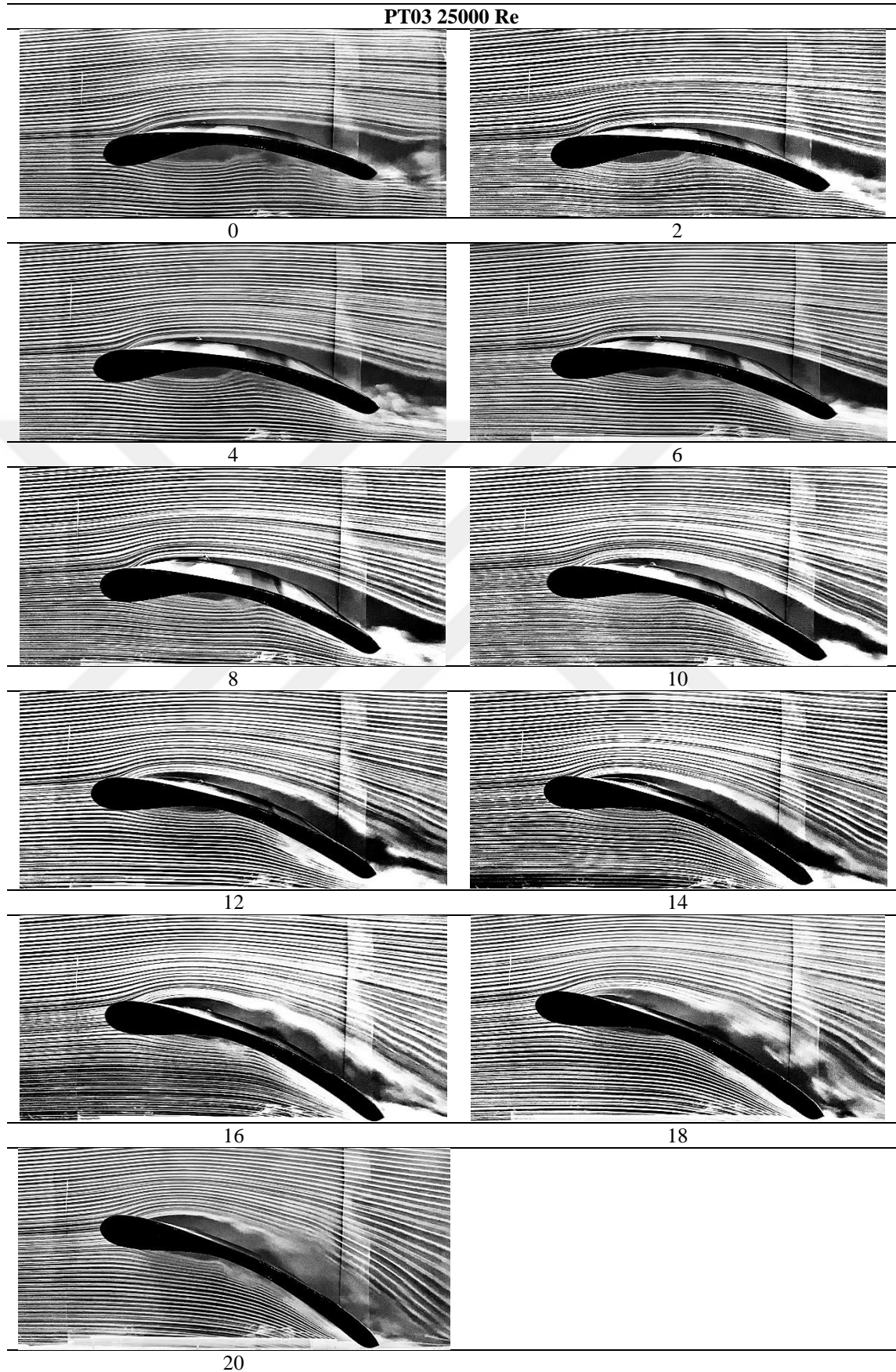
Tablo 4.1: Pt01 Kanat Profili 25000 Re Sayısındaki Duman Deneyi Görüntüleri



Tablo 4.2: Pt02 Kanat Profili 25000 Re Sayısındaki Duman Deneyi Görüntüleri



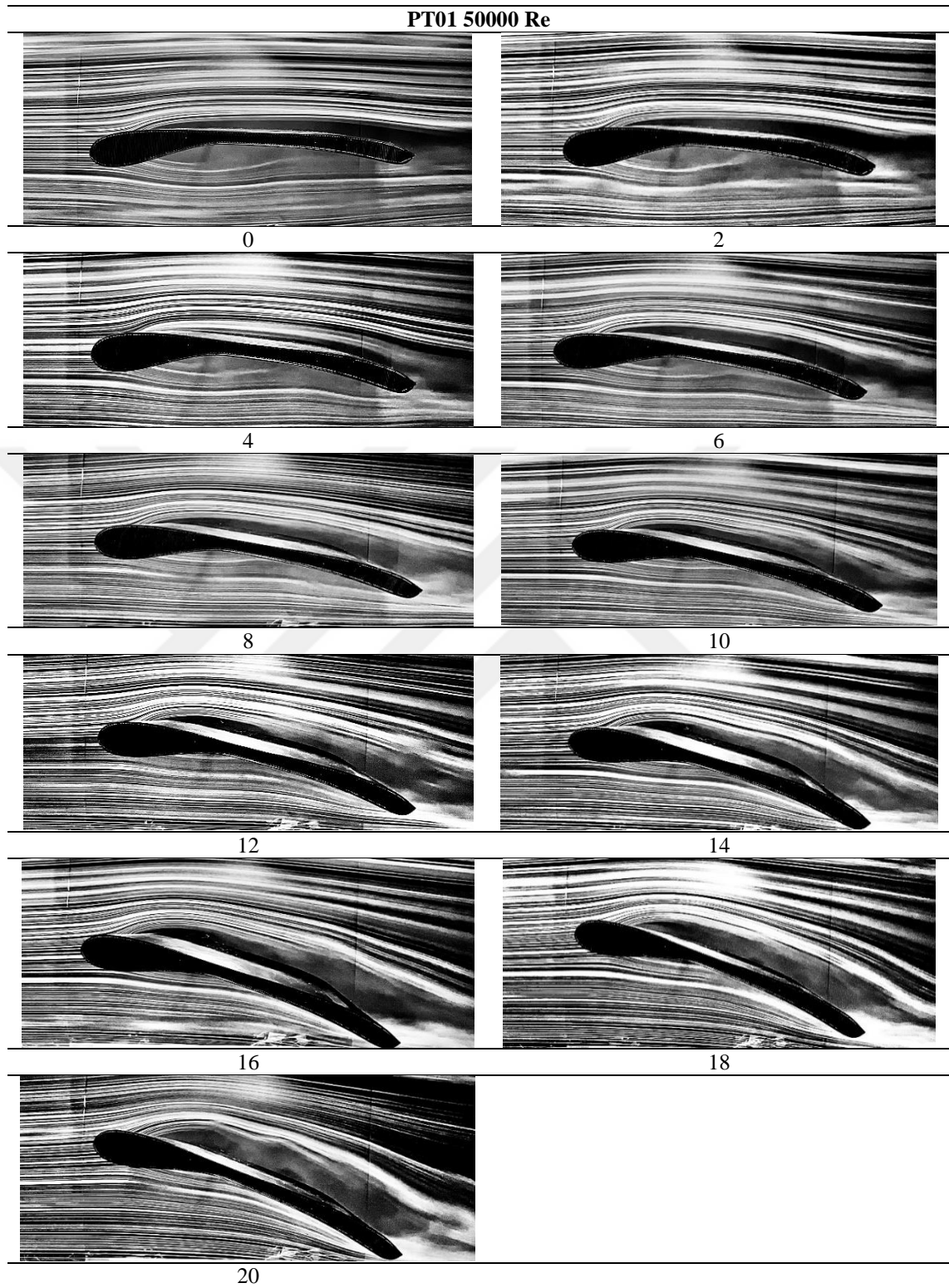
Tablo 4.3: Pt03 Kanat Profili 25000 Re Sayısındaki Duman Deneyi Görüntüleri



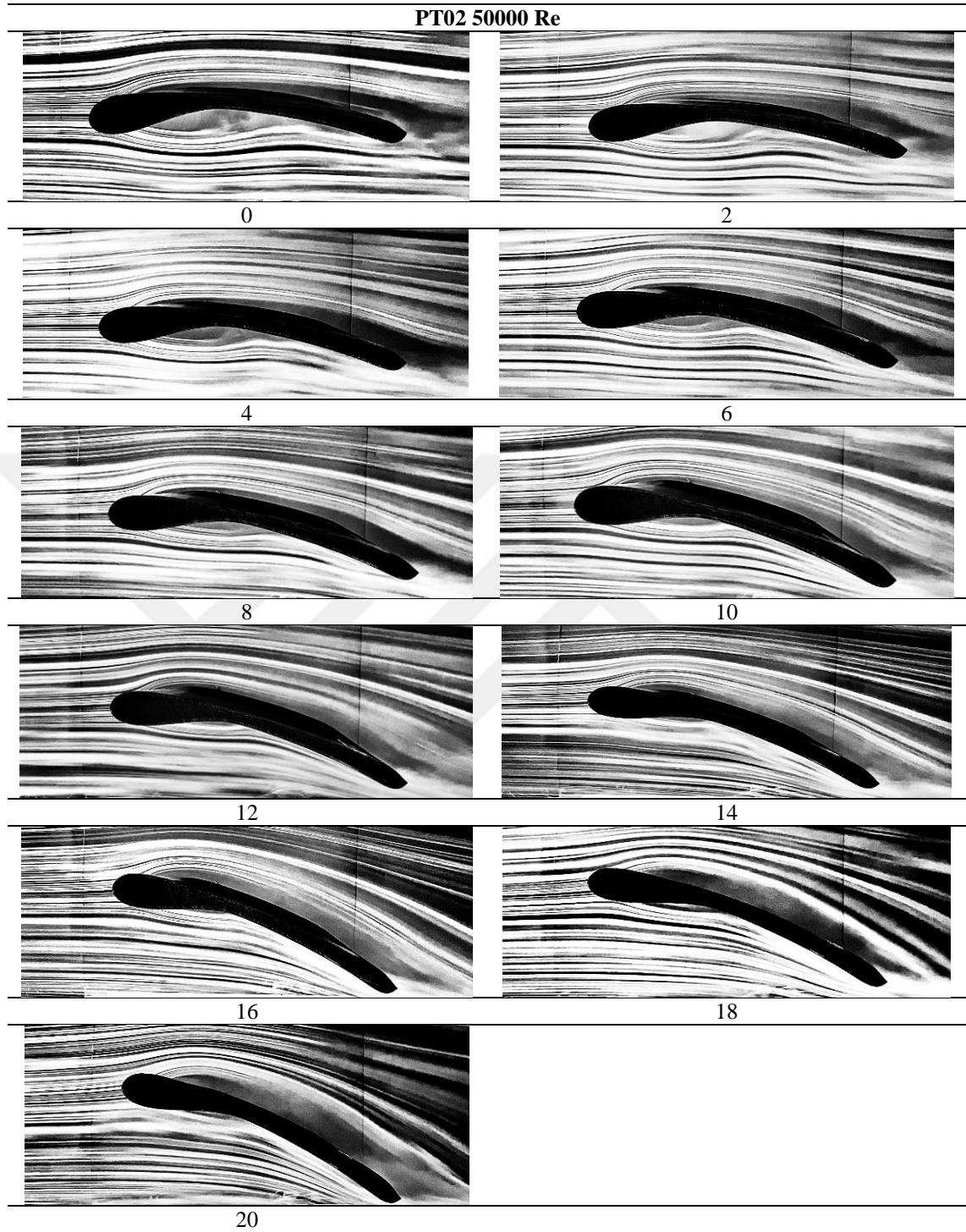
4.2.2. 50000 Re Sayısında Duman Görüntüleme Analizi

Elde edilen görüntülerde Pt01 kanat profili $\alpha=16^0$ ' de tutunma kaybına girmiştir (Tablo 4.4.). $\alpha=14^0$ ' ye kadar akışın kanat yüzeyine daha yakın seyrettiği ve tutunma kaybı sonrasında akış yapısının kanattan koparak uzaklaştığı görülmektedir. Yüzey probu ile yapılan ölçümlerde de görüldüğü gibi $\alpha=8^0$ 'de laminer ayrılma kabarcığının oluştuğu belirlenmiştir. Pt02 kanat profilinde $\alpha=8^0$ ' ye kadar akışın genel olarak laminer olduğu Tablo 4.5.'te görülmektedir. $\alpha=12^0$ 'de kanat profilinin yüzeyinde yaygın şekilde oluşan türbülanslı yapı pozitif basınç gradyanının oluştuğunu düşündürmektedir. Bu açıda tutunma kaybının başladığı görülmektedir. Pt02 kanat profili için $Re=25000$ 'de görüldüğü gibi $\alpha=8^0$ ' de hücum kenarına yakınından başlayan uzun laminer ayrılma kabarcığının oluştuğu görülmektedir. Pt03 kanat profilinin kuvvet ölçümleri ve duman görüntüleri incelendiğinde Tablo 4.6.'da görüldüğü gibi $\alpha=16^0$ 'de tutunma kaybına girdiği belirlenmiştir. $\alpha=8^0$ 'de hücum kenarından başlayan ve kanat yüzeyi üzerinde veter uzunluğunun ortalarına kadar oluşan uzun laminer ayrılma kabarcığının oluştuğu gözlemlenmiştir.

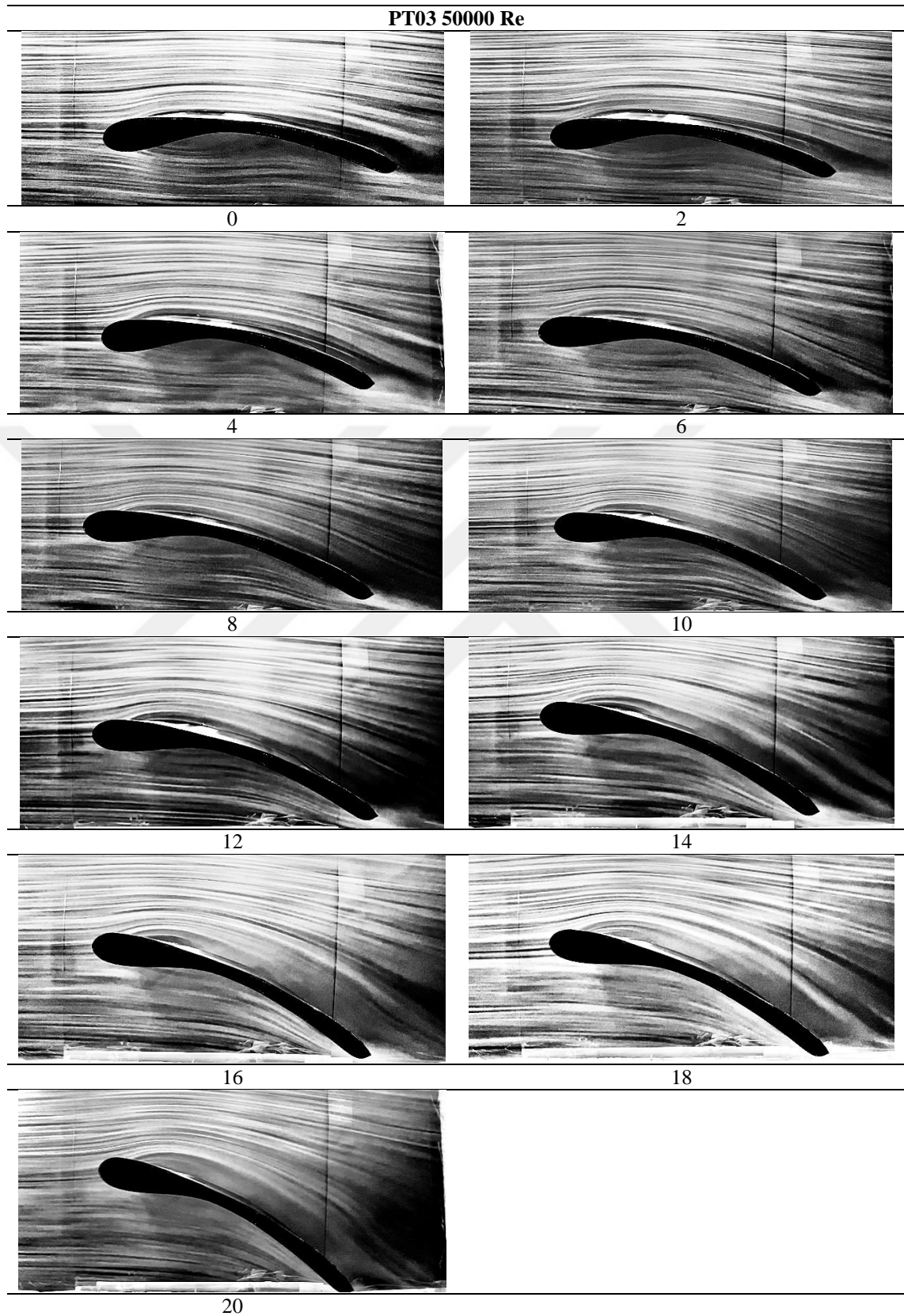
Tablo 4.4: Pt01 Kanat Profili 50000 Re Sayısındaki Duman Deneyi Görüntüleri



Tablo 4.5: Pt02 Kanat Profili 50000 Re Sayısındaki Duman Deneyi Görüntüleri



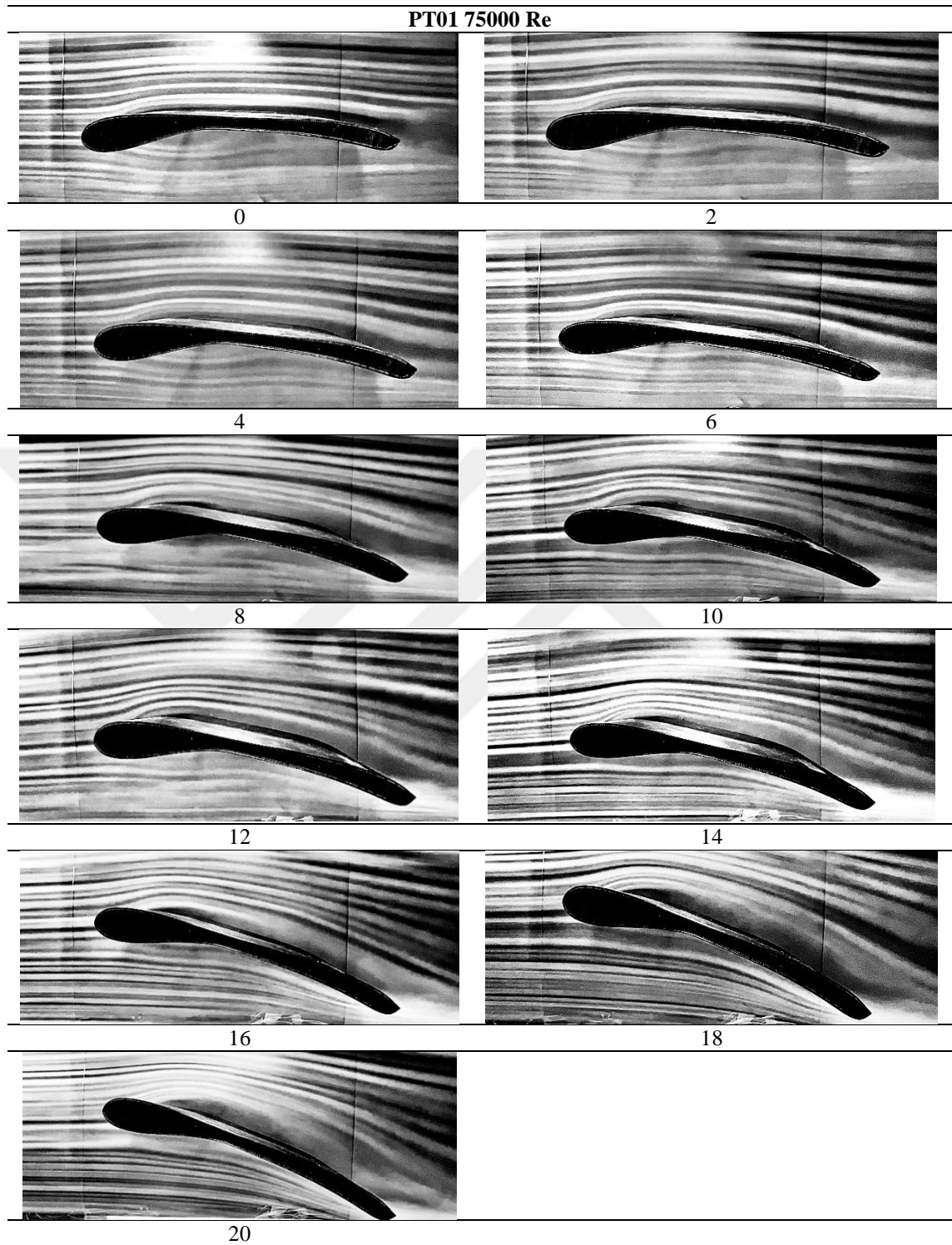
Tablo 4.6: Pt03 Kanat Profili 50000 Re Sayısındaki Duman Deneyi Görüntüleri



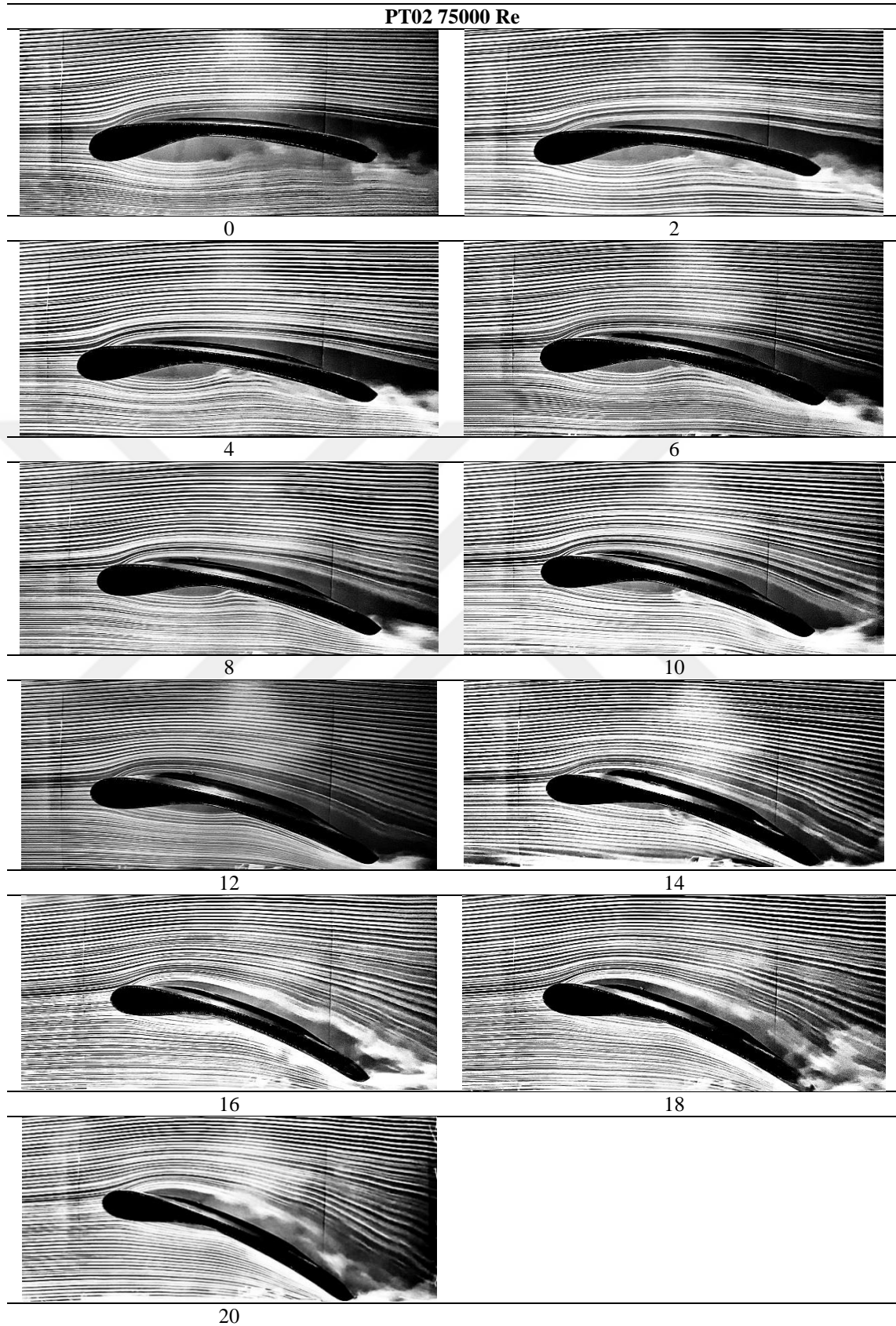
4.2.3. 75000 Re Sayısında Duman Görüntüleme Analizi

Duman görüntülerinde akış Pt01 kanat profili yüzeyinden $\alpha=16^0$ ' de uzaklaştığı görülmektedir (Tablo 4.7.). Kuvvet ölçümleri dikkate alındığında Pt01 kanat profili $\alpha=16^0$ ' de tutunma kaybına girmektedir. $\alpha=14^0$ ' ye kadar akışın kanat yüzeyine daha yakın seyrettiği ve tutunma kaybı sonrasında akış yapısının kanattan koparak uzaklaştığı duman görüntülerinde tespit edilmiştir. Yüzey probu ile yapılan ölçümlerde görüldüğü gibi $\alpha=8^0$ 'de laminer ayrılma kabarcığının kanat profilinin ön bölgelerinde oluştuğu belirlenmiştir. Tablo 4.8.'e bakıldığında Pt02 kanat profilinde $\alpha=12^0$ ' ye kadar akışın genel olarak çalkantısız olduğu ve bu hücum açısından sonra $\alpha=14^0$ 'de kanat profil yüzeyinde oluşan türbülanslı yapı ile tutunma kaybının başladığı görülmektedir. Pt03 kanat profili kuvvet ölçümleri ve duman görüntüleri incelendiğinde $\alpha=16^0$ 'de tutunma kaybına girdiği görülmektedir. $\alpha=8^0$ 'de hücum kenarından başlayan ve kanat yüzeyi ortalarına kadar oluşan laminer ayrılma kabarcığının oluştuğu belirlenmiştir (Tablo 4.9.).

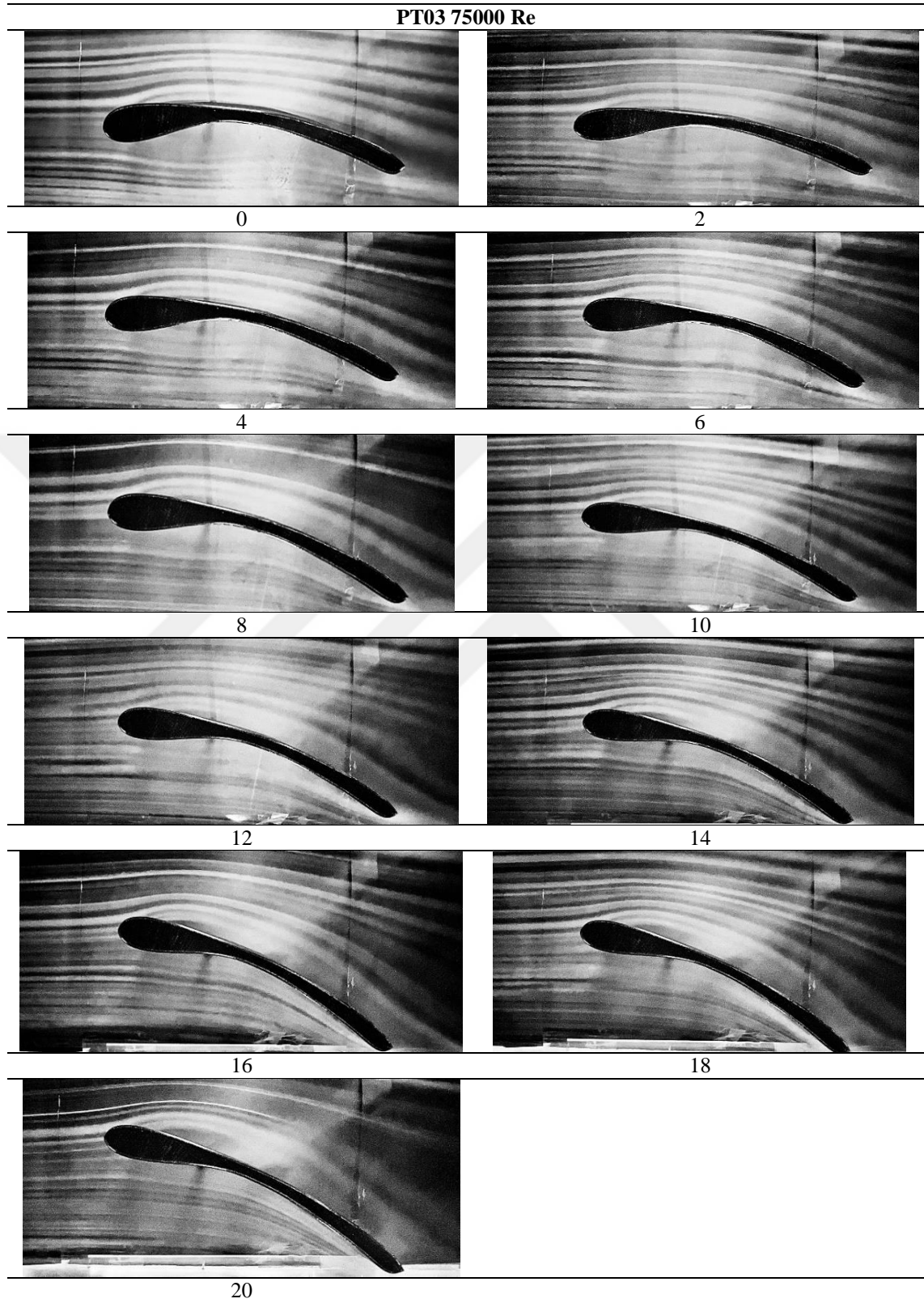
Tablo 4.7: Pt01 Kanat Profili 75000 Re Sayısındaki Duman Deneyi Görüntüleri



Tablo 4.8: Pt02 Kanat Profili 75000 Re Sayısındaki Duman Deneyi Görüntüleri



Tablo 4.9: Pt03 Kanat Profili 75000 Re Sayısındaki Duman Deneyi Görüntüleri



4.3. MiniCTA - YÜZEY PROBU İLE YAPILAN ANALİZLER

Ses altı rüzgâr tüneline model kanat profillerimizdeki laminer ayrılma kabarcıklarını incelemek için MiniCTA sistemi kullanılmıştır. Bu sistemde glue on prob (yüzey probu) kanat yüzeyine yapıştırılarak zaman bağlı voltaj değişim verileri elde edilmiştir.

Şekil 4.4: Kanat Profili Yüzey Prob Kullanım Noktaları (x/c)

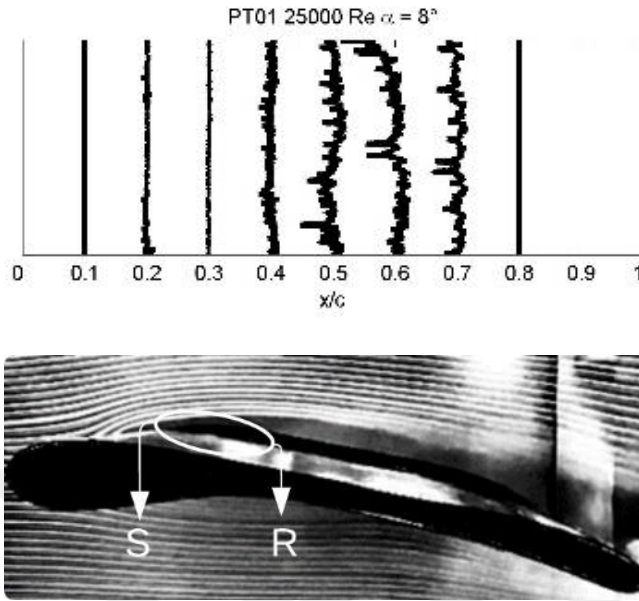


Şekil 4.4.'te kanat yan yüzeyinde işaretlenmiş hizalarda kanat üst yüzeyine prob yapıştırılmıştır. Duman görüntüleri incelenerek laminer ayrılma kabarcıklarının oluşabileceği açı tespit edilmiştir. Deneyler bütün kanatlar ve Re sayıları için 8° 'de gerçekleştirilmiştir. Düşük hızlarda (seyir uçuşu) genel olarak 0° - 10° 'lik hücum açıları kullanılmaktadır. Bu nedenle yüzey probu (55r47 Glue-on) ölçümleri için duman görüntülerinden LSB ile ilgili fikir oluşturulmuştur. Duman görüntüleri incelendikten sonra laminer ayrılma kabarcıkları (LSB) ölçümlerinin $\alpha=8^{\circ}$ 'de yapılmasına karar verilmiştir.

4.3.1. 25000 Re Sayısında Yüzey Probu Ölçümleri

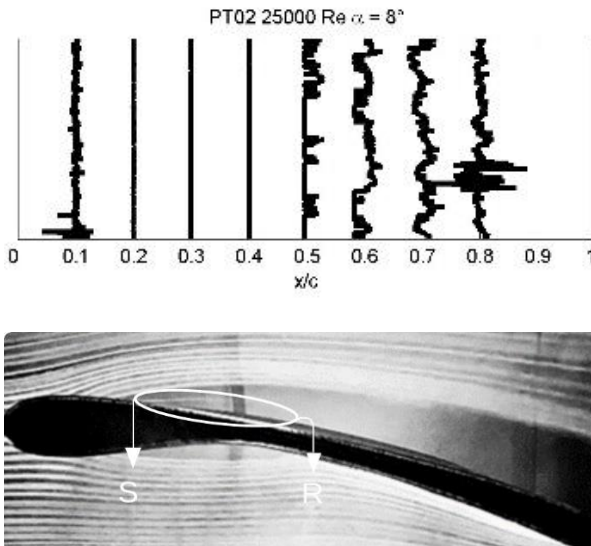
Kanat profillerinin 25000 Re sayısında $\alpha=8^{\circ}$ 'de yapılan yüzey probu ölçümleri ve karşılık gelen duman görüntüleri verilmiştir. Pt01, Pt02 ve Pt03 kanat profillerinin voltaj dalgalanmaları ve duman görüntüleri yorumlanmıştır.

Şekil 4.5: Pt01 Kanat Profili 25000 Re Sayısında Laminer Ayrılma Kabarcığı Ölçümleri (8° Hücüm Açısında)



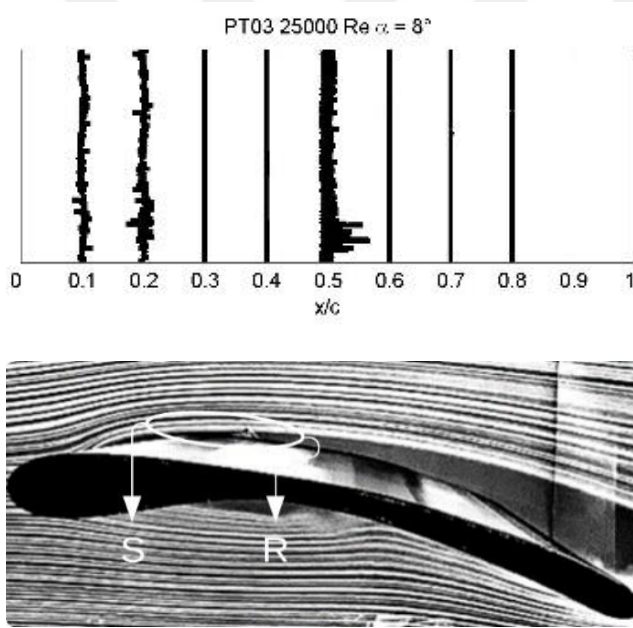
Şekil 4.5.'te kanat profili duman görüntüsü ve MiniCTA ölçümleri karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Pt01 kanat profili incelendiğinde $x/c=0.2$ hafif türbülanslı yapı ile kanat yüzeyine tutunan akışta $x/c=0.4$ ' e kadar kısa laminer ayrılma kabarcığının oluştuğu görülmektedir. $x/c=0.4$ noktasında kanat yüzeyine tekrar tutunarak türbülanslı yapıya geçiş bölgesi oluştuğu ve kanat firar kenarına doğru türbülansın arttığı görülmektedir. $x/c=0.7$ noktasına kadar türbülanslı yapının devam ettiği ve sonrasında akışın kanat yüzeyini terk ettiği görülmüştür.

Şekil 4.6: Pt02 Kanat Profili 25000 Re Sayısında Laminer Ayrılma Kabarcığı Ölçümleri (8° Hücüm Açısında)



Şekil 4.6.'da Pt02 kanat profilinin $x/c=0.1$ noktasında görülen transition, kanat yapısının hücum kenarında bulunan kamburluktan kaynaklanmaktadır. Duman görüntüleri incelendiğinden hücum kenarlarının kamburluğundan kaynaklanan laminer akışın üst serbest akımda bulunan duman iplikçiklerine yaklaştığı ve sıkıştırdığı görülmektedir. Bu durum neticesinde hücum kenarına yakın noktalarda ($x/c=0,1$, $x/c=0.2$ gibi) hafif türbülanslı yapı görülebilmektedir. Pt02 kanat profilinde $x/c=0,1$ noktasından başlayan ve $x/c=0,5$ noktasına kadar uzanan uzun laminer ayrılma kabarcığı (LSB) görülmektedir. $x/c=0.5$ noktasında tekrar kanat yüzeyine tutunmanın başladığı ve transition bölgesi oluştuğu görülmüştür. Firar kenarına doğru türbülanslı yapının arttığı voltaj dalgalanmalarından belli olmaktadır.

Şekil 4.7: Pt03 Kanat Profili 25000 Re Sayısında Laminer Ayrılma Kabarcığı Ölçümleri (8° Hücum Açısında)

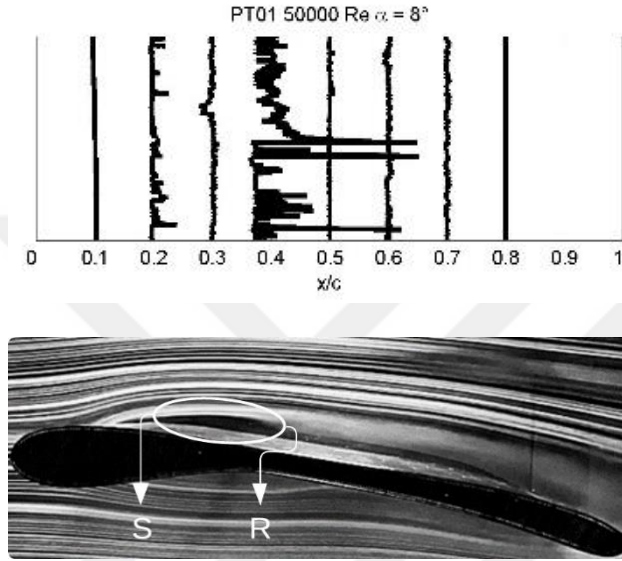


Pt03 kanat profilinde kanat hücum kenar yapısından kaynaklanan $x/c=0.1$ ve $x/c=0.2$ noktalarında hafif türbülanslı yapı görülmektedir (Şekil 4.7). Devamında ise $x/c=0.2$ noktasından başlayan $x/c=0.5$ noktasına kadar devam eden laminer ayrılma kabarcığı (LSB) belirlenmiştir. $x/c=0.5$ noktasında kanat yüzeyine tutunmaya çalışan akış türbülans oluşturmuştur. Bu noktadan sonra kanat yüzeyinden ayrılarak firar kenarı noktalarında akış olmayan bölge oluşturmuştur.

4.3.2. 50000 Re Sayısında Yüzey Probu Ölçümleri

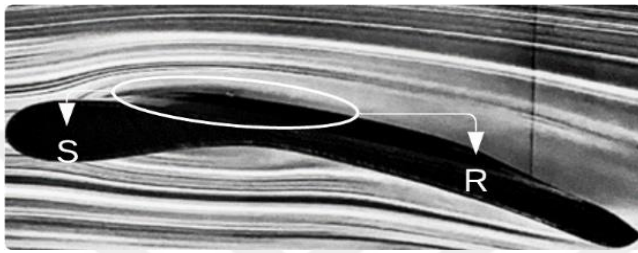
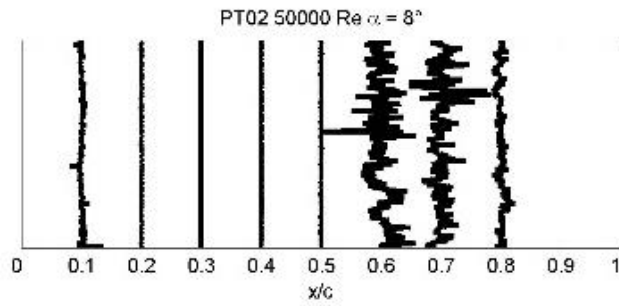
Kanat profillerinin 50000 Re sayısında $\alpha = 8^\circ$ de yapılan yüzey probu ölçümleri ve karşılık gelen duman görüntüleri verilmiştir. Pt01, Pt02 ve Pt03 kanat profillerinin voltaj dalgalanmaları ve duman görüntüleri yorumlanmıştır.

Şekil 4.8: Pt01 Kanat Profili 50000 Re Sayısında Laminer Ayrılma Kabarcığı Ölçümleri (8° Hücüm Açısında)



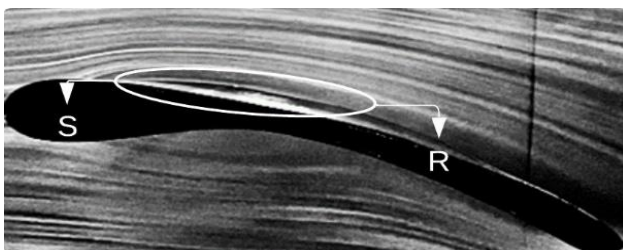
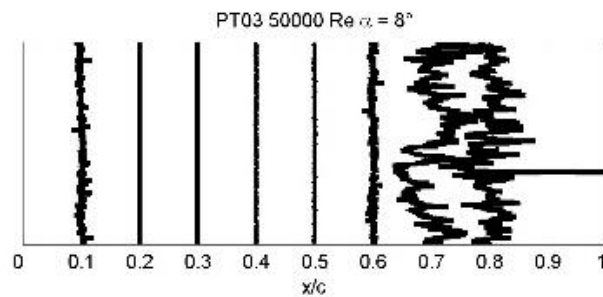
Şekil 4.8.'de yapılan ölçümlerde Pt01 kanat profili hücüm kenarına yakın olan $x/c=0.2$ noktasında türbülanslı yapı oluşumu görülmüştür. $x/c=0.4$ noktasına kadar kısa laminer ayrılma kabarcığı (LSB) oluştuğu ve daha sonra firar kenarına doğru hafif türbülanslı yapı ile kanat yüzeyinden akışın ayrıldığı görülmüştür.

Şekil 4.9: Pt02 Kanat Profili 50000 Re Sayısında Laminer Ayrılma Kabarcığı Ölçümleri (8° Hücüm Açısında)



Pt02 kanat profilinde Pt01'e benzer bir durum vardır. Şekil 4.9.'da $x/c=0.4$ noktasında türbülanslı yapı diğer noktalara göre daha fazla olduğu görülmektedir. $x/c=0.4$ ile $x/c=0.7$ arasında laminer ayrılma kabarcığı belirlenmiştir.

Şekil 4.10: Pt03 Kanat Profili 50000 Re Sayısında Laminer Ayrılma Kabarcığı Ölçümleri (8° Hücüm Açısında)



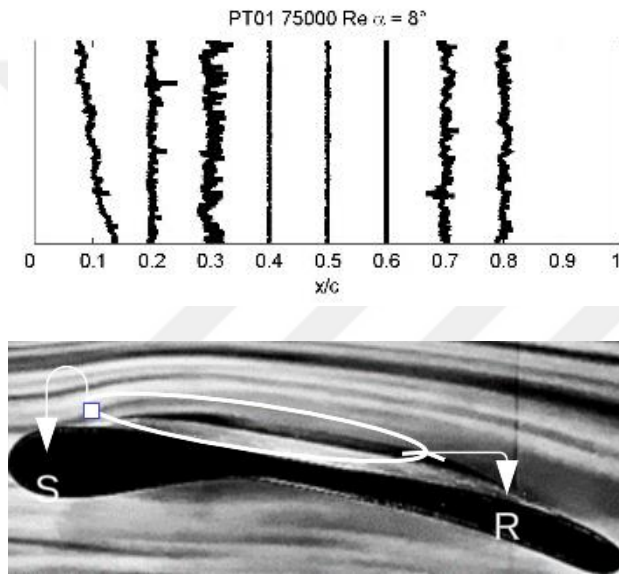
Pt03 kanat profili ölçümlerinde (Şekil 4.10) laminer ayrılma kabarcığı öncesi $x/c=0.2$ noktasında transition bölgesi oluştuğu görülmüştür. $x/c=0.2$ noktasından sonra

başlayan laminer ayrılma kabarcığı $x/c=0.5$ noktasında bitmiştir. $x/c=0.5$ noktasında kanat yüzeyine tutunmaya çalışan akış türbülanslı bölge oluşturmuştur.

4.3.3. 75000 Re Sayısında Yüzey Probu Ölçümleri

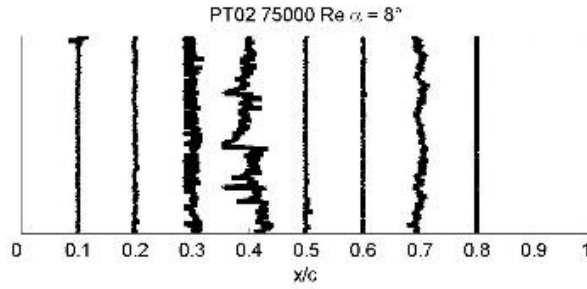
Kanat profillerinin 75000 Re sayısında $\alpha=8^\circ$ de yapılan yüzey probu ölçümleri ve karşılık gelen duman görüntüleri verilmiştir. Pt01, Pt02 ve Pt03 kanat profillerinin voltaj dalgalanmaları ve duman görüntüleri yorumlanmıştır.

Şekil 4.11: Pt01 Kanat Profili 75000 Re Sayısında Laminer Ayrılma Kabarcığı Ölçümleri (8° Hücum Açısında)



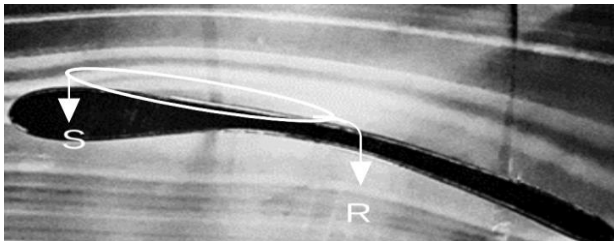
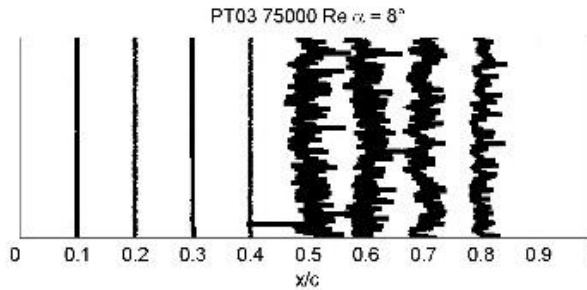
Pt01 kanat profili için yapılan ölçümlerde hücum kenarına yakın noktalarda türbülans başlangıcı görülmektedir (Şekil 4.11). $x/c=0.3$ noktasında voltaj dalgalanması diğer noktalara daha yüksektir. Duman görüntüsü incelendiğinde hücum kenarında bulunan türbülansların laminer ayrılma kabarcığı içerisinde olabilen bir yapı olduğu görülmüştür. Bu nedenle laminer ayrılma kabarcığının (LSB) hücum kenarından itibaren başladığı ve uzun bir LSB olduğu görülmektedir.

Şekil 4.12: Pt02 Kanat Profili 75000 Re Sayısında Laminer Ayrılma Kabarcığı Ölçümleri (8° Hücüm Açısında)



Pt02 kanat profilinde Pt01'e benzer bir durum vardır. $x/c=0.3$ noktasındaki türbülanslı yapı laminer kabarcığın içerisinde oluştuğu anlaşılmıştır.

Şekil 4.13: Pt03 Kanat Profili 75000 Re Sayısında Laminer Ayrılma Kabarcığı Ölçümleri (8° Hücüm Açısında)



Pt03 kanat profili ölçümlerinde laminer ayrılma kabarcığı öncesi $x/c=0.2$ noktasında transition bölgesi oluştuğu görülmüştür (Şekil 4.13). $x/c=0.1$ noktasından sonra başlayan laminer ayrılma kabarcığı $x/c=0.5$ noktasında sonlanmıştır. $x/c=0.5$ noktasında kanat yüzeyine tutunmaya çalışan akış türbülanslı bölge oluşturmuştur.



BEŞİNCİ BÖLÜM
SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1. SONUÇ VE ÖNERİLER

Biyo-esinlenmeli kanat modelinin aerodinamik analizi ile ilgili olan tez çalışmasındaki deneyler gelecekte yapılacak olan tasarım ve optimizasyon çalışmalarına katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

Çalışmamızda pterozor canlı türüne ait kanat modelinin 3 farklı bölgesinden kesit alınması ile oluşturulmuş kanat profillerinin aerodinamik analizleri yapılmıştır. Bu analizlerde aerodinamik kuvvetler, tutunma kaybı ve laminer ayrılma kabarcıkları incelenmiştir. Düşük hızlarda (seyir uçuşu) genel olarak 0^0 - 10^0 'lik hücum açıları kullanılmaktadır. Bu nedenle yüzey probu (55r47 Glue-on) ölçümleri için duman görüntülerinden LSB ile ilgili fikir oluşturulmuştur. Duman görüntüleri incelendikten sonra laminer ayrılma kabarcıkları (LSB) ölçümlerinin $\alpha=8^0$ 'de yapılmasına karar verilmiştir.

Aerodinamik kuvvet deneylerinin 25000 Re sayısında yapılan testlerinde Pt02 kanat profilinin kuvvet katsayıları Pt01 ve Pt03 kanat profillerine göre daha yüksek olduğu, fakat diğer kanat profillerine göre daha önce tutunma kaybına maruz kaldığı görülmüştür. Pt01 kanat profilinin aerodinamik kuvvet ölçümlerinde hücum açısının 16^0 olduğu bölgede tutunma kaybına girdiği grafikte görülmektedir. MiniCTA ölçümlerinde bu kanat profilinin 25000 Re sayısında $x/c = 0,2$ 'de başlayan ve $x/c=0,4$ 'te biten kısa laminer ayrılma kabarcığı oluştuğu belirlenmiştir. Laminer ayrılma kabarcığının oluştuğu bölge 8^0 olduğu duman görüntülerinde görülmektedir. Yapılan deneyler birbiri ile uyumlu olarak yorumlanmıştır.

Aynı Re sayısında Pt02 kanat profili hücum açısı 11^0 'de tutunma kaybına girmiştir. Kuvvet grafiğinde görüldüğü gibi 8^0 'den 11^0 'ye kadar kaldırma katsayısında ivmelenme görülmektedir. Bu durum duman görüntüleme ile kıyaslandığında ise hücum açısı 8^0 ve 10^0 görüntülerinde türbülanslı yapının kanat üzerinde görüldüğü, daha sonraki 12^0 ' lik hücum açısında ise kanat üzerinden ayrılmış bir akış yapısı bulunduğu tespit edilmiştir. MiniCTA yüzey probu deneylerinde ise Pt02 kanat profilinin hücum açısının 8^0 'de olduğu ölçümlerde hücum kenarı $x/c=0,1$ bölgesinde türbülanslı yapı görülmektedir. $x/c= 0,2$ bölgesi laminer ayrılma kabarcığının başladığı noktadır. Akış yapısı $x/c= 0,5$ bölgesinde türbülanslı yapıya geçmeye başlamıştır. $x/c= 0,6$ bölgesinden başlayan türbülanslı bölge duman görüntüsü ile kıyaslandığında net bir şekilde

görülmektedir. Kanat firar kenarına kadar türbülanslı yapı bölgesi genişleyerek devam etmektedir.

Pt03 kanat profilinin 25000 Re sayısındaki aerodinamik kuvvet ölçümleri diğer iki kanat profiline göre değerlendirildiğinde kaldırma katsayısının daha düşük olduğu görülmektedir. Pt01 gibi hücum açısının 16^0 olduğu konumda tutunma kaybı gerçekleştiği grafikte anlaşılmaktadır. Kamburluğu diğer iki kanat profiline göre daha fazla olan Pt03 kanat profilinin yüzey probu ile ölçümlerinde hücum kenarından $x/c=0,2$ bölgesine kadar türbülanslı olduğu, $x/c=0,3$ ve $0,4$ bölgelerinde laminer ayrılma kabarcığı yapısı oluştuğu ve akışın $x/c=0,5$ bölgesinde kanat yüzeyine temas etmesinden dolayı yüksek türbülansa girdiği görülmüştür. Hücum açısının 8^0 olduğu duman görüntüsünde de yüzey probu ile yapılmış testlere uyumlu olarak laminer akış ayrılması görülmüştür.

Aerodinamik kuvvet deneylerinde 50000 Re sayısındaki ölçümlerde Pt01 ve Pt02 kanat profillerinin C_L değerleri ve eğimleri birbirine yakın olduğu görülmektedir. 25000 Re sayısında olduğu gibi Pt03 kanat profili daha düşük C_L değerlerine sahiptir. Pt01 ve Pt03 kanat profilleri 16^0 'lik hücum açısında tutunma kaybına uğrarken, Pt02 kanat profili 11^0 hücum açısında tutunma kaybına girmiştir. Duman görüntülerini incelediğimizde Pt01 ve Pt03 kanat profillerinin tutunma kaybına girdikleri açılarda kanat yüzeylerinde yoğun bir düzensizlik görülmektedir. Pt03'ün aerodinamik kuvvet ölçümlerinde C_L değerinin $4^0 - 8^0$ hücum açısı aralığında eğimin arttığı ve bu durumun duman görüntülerinde aynı açılarda olduğu belirlenmiştir. Duman görüntülerinde 10^0 hücum açısından itibaren kanat üzerindeki akışın yüzeyden uzaklaştığı görülmektedir. Pt02 kanat profilinin ise 11^0 hücum açısında tutunma kaybı duman görüntülerinde görülmektedir. Yüzey probu ile yapılan testlerde Pt01 kanat profilinin hücum kenarında türbülanslı yapıyla birlikte laminer ayrılma kabarcığı (LSB) tespit edilmiştir. $x/c=0,4$ bölgesinde yüksek voltaj dalgalanmasından anlaşıldığı üzere kanat yüzeyine temas etmiştir. 8^0 'lik hücum açısında duman görüntüsü incelendiğinde $x/c=0,5$ 'den sonra kanat üst bölgesinde firar kenarına doğru türbülans kaynaklı girdapların kanat yüzeyinden uzaklaşarak oluştuğu görülmektedir. Pt02 kanat profili $x/c=0,2 - 0,6$ aralığında uzun laminer ayrılma kabarcığı oluşmuştur. Pt01 kanat profiline göre LSB daha büyüktür. $x/c=0,6$ 'da yüzeye tutunan akış yapısı türbülanslı bölge oluşturmuştur. Duman görüntüsünde $x/c=0,6$ bölgesinden firar kenarına doğru akışta türbülansın oluştuğu görülmektedir. Pt03 kanat profilinin hücum kenarında kanat yapısı gereği türbülanslı bir

bölge oluşmuştur. Daha sonra $x/c=0,2$ 'den $x/c=0,6$ 'ya uzanan laminer ayrılma kabarcığının (LSB) oluştuğu gözlemlenmiştir. Yüzey probu ile tespit edilen kanat üzerindeki türbülanslı bölge duman görüntüsü ile tespit edilmiştir.

Deneilerin 75000 Re sayısında yapıldığı aerodinamik kuvvet ölçümlerinde Pt01 ve Pt03 kanat profilleri 16° lik hücum açısında tutunma kaybına girmişlerdir. Pt02 13° hücum açısında tutunma kaybına girmiştir. 50000 Re sayısında olduğu gibi türbülansın fazla olması nedeniyle tutunma kaybı sonrasındaki açılarda C_L değerlerinde düşüş net bir şekilde görülmektedir. Tutunma kaybına girilen açılarda C_D değerlerindeki artış görülmektedir. Duman görüntüleri ile kıyaslandığında tutunma kayıplarının olduğu açılarda türbülanslı bölgenin genişlediği ve akışın kanat üzerinde ayrıldığı görülmektedir. Yüzey probu ile yapılan laminer ayrılma kabarcığı deneylerinde Pt01 kanat profili $x/c=0,3$ bölgesinde türbülanslı bir yapıda görülmektedir. Laminer ayrılma kabarcıkları içerisinde akış kaynaklı türbülans etkilerinin görülebileceği düşünülmektedir. Duman görüntüsü incelendiğinde bu kanat profilinde laminer akış ayrılmasının hücum kenarından başladığı ve $x/c=0,6$ 'ya kadar devam ettiği görülmektedir. $x/c=0,8$ bölgesinden itibaren firar kenarına doğru türbülans bölgesinin artmasıyla kanat yüzeyinden ayrılmıştır. Pt02 kanat profilinde Pt01'e benzer bir durum vardır. Hücum kenarına yakın $x/c=0,3$ ve $x/c=0,4$ noktalarındaki düşük seviyede bulunan türbülanslı yapı laminer ayrılma kabarcığı içerisindedir. Bu yapı $x/c=0,5$ noktasına kadar devam etmektedir. Duman görüntüsünde bu açıda belirgin bir şekilde laminer ayrılma kabarcık bölgeleri görülmektedir. Pt03 kanat profilinin yüzey probu deneylerinde akış hücum kenarından itibaren $x/c=0,5$ noktasına kadar uzun laminer ayrılma kabarcığı oluştuğu ve $x/c=0,5$ noktasından itibaren türbülansın arttığı görülmüştür. Duman görüntüleri ile kıyaslandığında laminer ayrılma kabarcığının hücum kenarından başladığı tespit edilmiştir.

MiniCTA ile laminer ayrılma kabarcıklarının kanat profillerinin yüzeylerindeki bölgelerini tespit etmek için deneyler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler kanat yüzeyinde oluşan ayrılma kabarcıklarının (LSB) boyutu ve konumu ile bunların kanatlardaki aerodinamik performansa olan etkilerini ortaya koymuştur. Duman görüntüleri ve MiniCTA yüzey probu ile yapılan deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonuçların birbiri ile uyumluluk gösterdiği tespit edilmiştir.

Literatürde aerodinamik analizleri bulunan birçok kanat profilinin tutunma kaybına girdikleri hücum açıları 10^0 - 15^0 aralığında olduğu bilinmektedir. Kanatların

kullanım alanları ve uygulama yöntemleri de önemli olmakla birlikte, yüksek hücum açılarında C_L verilerinin elde edilmesi, çalışmamızdaki kanat profilleri ile gerçekleştirilebilir. Pt01, Pt02 ve Pt03 kanat profillerinin aerodinamik verimliliğinin artırılması amacıyla, kanat yüzeylerinde oluşan laminer ayrılma kabarcıklarının (LSB) ortadan kaldırılması gerekmektedir. Akış kontrolü çalışması ile iyileştirme yapılarak verimin artırılabilceği ön görülmektedir.

Bu çalışma biyo-esinlenmeli kanatların akış kontrolü ve enerji verimliliği açısından potansiyel faydalarını vurgulayarak, gelecekteki tasarım ve optimizasyon çalışmalarına katkı sağlamayı amaçlamaktadır.





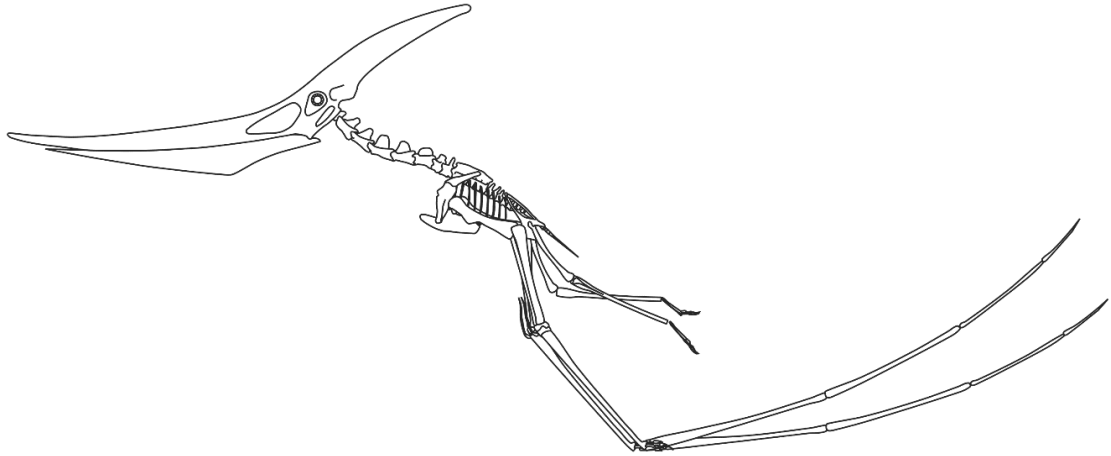
EKLER

Ek-1: Pterozor Fossil Haritasi

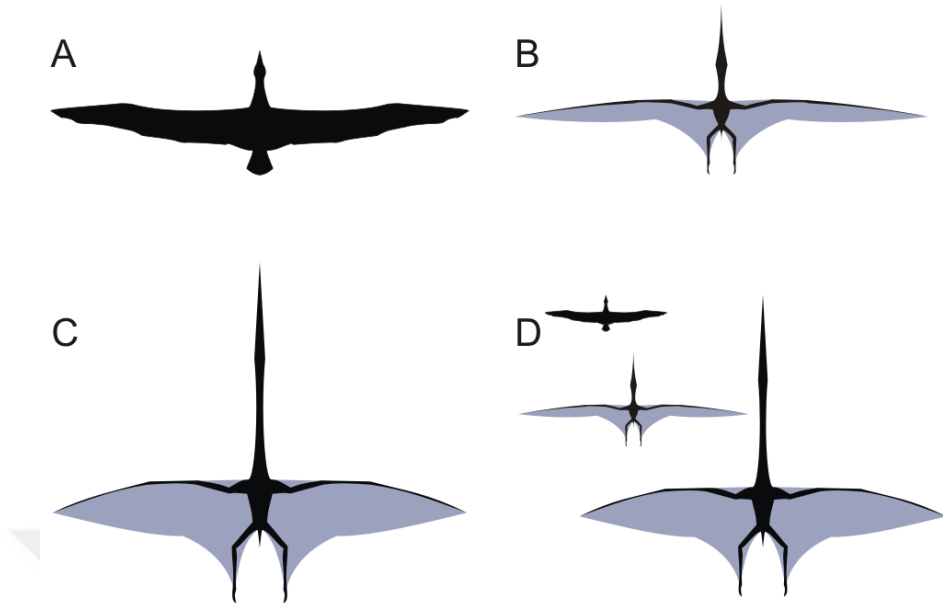


Kaynak: (Witton, 2013; Wikipedi Özgür Ansiklopedi, 2024).

Ek-2: Pterozorların İskelet Sistemi

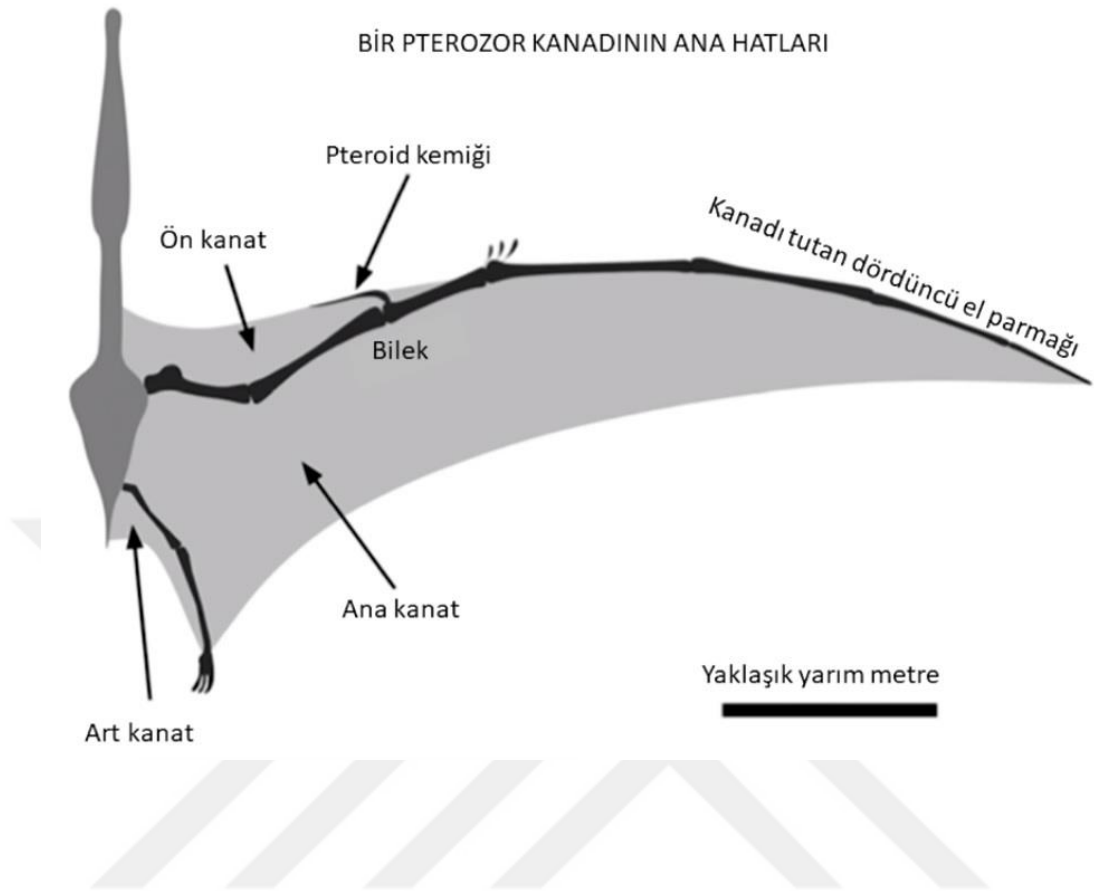


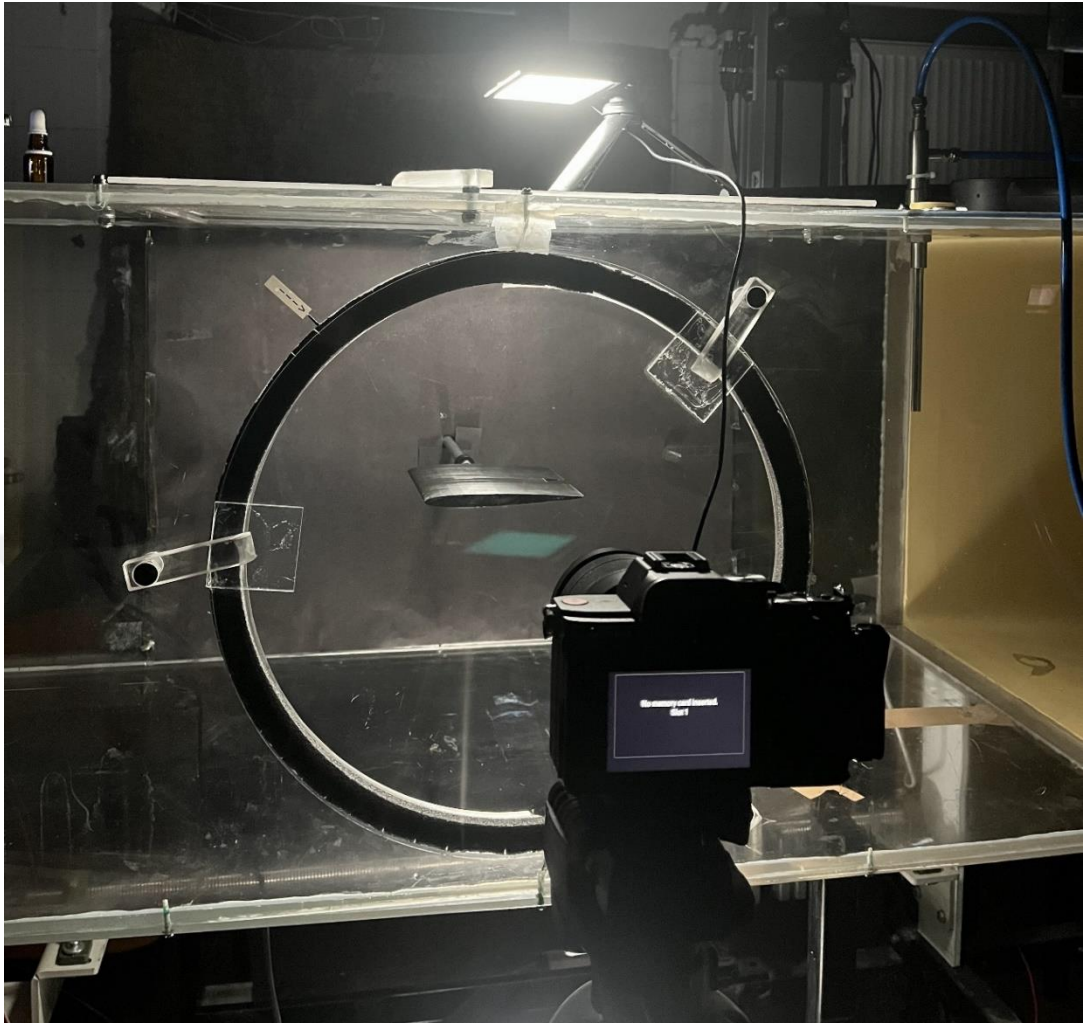
Kaynak: (Witton, 2013; Vikipedi Özgür Ansiklopedi, 2024).

Ek-3: Pterozorların Zaman İçerisinde Değişen Boyutları

Kaynak: (Witton, 2013; Vikipedi Özgür Ansiklopedi, 2024).

Ek-4: Pterozorların Kanat Yapıları



Ek-5: Duman Görüntüleme Ekipmanları

KAYNAKÇA

- Akansu, Y. ve Şanlısoy, A. (2020). Plazma aktüatörün Naca2415 airfoil etrafında akış kontrolüne etkilerinin araştırılması. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 40(1), 131-139.
- Akansu, Y., Bayındırlı, C. ve Seyhan, M. (2016). Bir çekici römork aracında sürüklenme kuvvetinin pasif akış kontrol yöntemleri ile iyileştirilmesi. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 36(1), 133-141.
- Andrew, B., & Anupam, S. (2019). Numerical investigation of noise reduction mechanisms in a bio-inspired airfoil. *Journal of Sound and Vibration*, 453, 314-327.
- Ariffuzzaman, M., & Mashud, M. (2012). Design construction and performance test of a low cost subsonic wind tunnel. *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)*, 2(10), 83-92.
- Arslan, P., Kalkan, U., Tıraş, H., Tunçöz, İ., Yang, Y., Gürses, E., . . . Yaman, Y. (2015, 22-23 Mayıs). *Bir hibrit firar kenarı kontrol yüzeyinin tasarımı ve analizi*. TMMOB Makina Mühendisleri Odası VIII. Ulusal Uçak, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Kurultayı. MMO Yayınları, Erişim Adresi: <https://hdl.handle.net/11511/72354>.
- Aslan, Z. (2016). *Sesaltı rüzgar tüneli tasarımı* (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Aydın, Ö. C., ve Gökmen, G. (2020, 20 Haziran). *Kapalı çevrim rüzgâr tüneli tasarımı ve kontrolü*. Erişim Adresi: https://www.imascon.com/dosyalar/imascon2020_bahar/imascon_fen_bildiriler_ozet_bahar_2020.pdf.
- Ayduramaz, C. (2015). *Naca 0012 kanadın rüzgar tüneline sınır tabaka ve aerodinamik analizi* (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bayındırlı, C., Akansu, Y., Salman, M., & Çolak, D. (2015). The numerical investigation of aerodynamic structures of truck and trailer combinations. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 4(3), 139-145.
- Boris, M., Michael, K., Leonardo, P., & Aimy, A. (2017). An experimental study of an airfoil with a bio-inspired leading edge device at high angles of attack. *Smart Materials and Structures*, 26(9), 94-108.

- Bradshaw, P. (1965). The effect of wind tunnel screens on nominally two dimensional boundary layers. *Journal of Fluid Mechanics*, 22, 679-687.
- Ceyhan, Ü., Sümer, Ö., ve Özkan, B. (2013, 2 Ekim). *Uçan sistemlere haricî yük entegrasyonu kapsamında gerçekleştirilen çirpinti analiz ve test çalışmalarının değerlendirilmesi*. Erişim Adresi: https://www.dropbox.com/scl/fo/hg6rbdmar8nwrwwuhbyza/ADk25qq2D3kH3ev_FihsQIg?rlkey=pamp85j8a1h9mpnwcjk04nvvb&e=1&dl=0.
- Chatterje, S., & Templin R.J. (2004). *Posture, locomotion, and paleoecology of pterosaurs* (1st ed.) London: Special Paper.
- Cooper, K., & Campbell, W. (1981). An examination of the effects of wind turbulence on the aerodynamic drag of vehicle, *journal of wind engineering and industrial aerodynamics. Elsevier Scientific Publishing Company*, 9(1-2),167-181.
- Çakmak, M. A. (2000). Kara taşıtlarının aerodinamik bakımdan incelenmesi. *Mühendis ve Makina*, 41(489), 35-41.
- Çakmakçioğlu, S. Ç. (2013). *Kanat profillerinde düşük reynolds ve yüksek ses altı mach sayıları için türbülansa geçiş* (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). TOBB Ekonomi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Çanakçı, B., Çakır, U., Aytaç, A., Özdemir, T., Aztekin, K., & Işık, M. S. (2019). *S833 kanat profili aerodinamik performansına etki eden parametrelerin belirlenmesi*. İçinde C. Rugierro (Ed.). *II. International congress on new trends in science engineering and technology*, (ss. 60-63). London: Young Scholar Union.
- Çekirdek, B. (2023). *NACA 651- 412 kanat profilinin yapısal analizi* (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2013). *Akışkanlar mekaniği temelleri ve uygulamaları* (T. Engin, Çev.). Ankara: Palme Yayınevi.
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2018). *Akışkanlar mekaniği temelleri ve uygulamaları* (3. Baskıdan Çeviri) (T. Engin, Çev.). Ankara: Palme Yayıncılık.
- Doğan, Z. (2008). *Ses altı hızlarda kanat profili etrafında akışın incelenmesi* (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.

- Ezcurra, M., Nesbitt, S., Bronzati, M., Vecchiha, F., Agnolin, F., Benson, R., . . . Max, L. (2020). Enigmatic dinosaur precursors bridge the gap to the origin of pterosauria, *Nature*, 588, 445-449.
- Farsimadan, E., & Mokhtarzadeh-Dehghan, M. (2010). An experimental study of the turbulence quantities in the boundary layer and near-wake of an airfoil placed at upstream of a 90 bend. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 34(8), 979-991.
- Fisher, E., Anton, B., Christine, B., Brian, D., Stephen, M., Cory, M., . . . Andrew, K. (2012, 8-12 July). *A bio-inspired aircraft design concept*. Retrieved from: <https://asmedigitalcollection.asme.org/FEDSM/proceedingsabstract/FEDSM2012/44755/855/229839?redirectedFrom=PDF>.
- Gebel, M., ve Önalı, S. (2018, 8 Mayıs). *Bir elektrikli aracın aerodinamik özelliklerinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi*. Erişim Adresi: <https://www.otekon.org/2018/>.
- Genç, M. S. (2009). *Kanat profilleri etrafındaki düşük reynolds sayılı akışın kontrolü ve aerodinamik performansın incelenmesi* (Yayımlanmamış Doktora Tezi). Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Genç, M. S., Kahraman, N., ve Özışık, G. (2008). Düz flaplı Naca0012 kanat profilinin aerodinamik performansının incelenmesi. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 28(1), 1-8.
- Geylani, Ö. (2023). Hayvan İskeletinin sanat ve mimarideki yansımaları. *İdil Sanat ve Dil Dergisi*, 12(108), 1139-1151.
- Gökçe, H. (2020). Kapalı devre ses altı rüzgar tüneli için türbülans perdesi tasarımı, üretimi ve bütünleme sürecinin incelenmesi. *Selcuk University Journal of Engineering Sciences*, 19(3), 84-93.
- Görgülü, Y. F. (2021). *Doğada hızlı ve çevik hareket eden canlıların yüzey özelliklerinin rüzgâr türbini kanatlarına uygulanması ve aerodinamik performans etkileri* (Yayımlanmamış Doktora Tezi). Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
- Göv, İ., Doğru, M. ve Korkmaz, Ü. (2019). Improvement of the aerodynamic performance of NACA 4412 using the adjustable airfoil profile during the flight. *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(2), 1109-1125.

- Guerreiro, J., & Sousa, J. (2012). Low-reynolds-number effects in passive stall control using sinusoidal leading edges. *AIAA Journal*, 50(2), 461-469.
- Gülperçin, N. (2023). Biyotasarımda yeni bir perspektif: Böcekler. *Uluslararası Gıda Tarım ve Hayvan Bilimleri Dergisi*, 3(2), 59-74.
- Hacımurat, D., & Batuhan, K. (2023). Investigation of the aerodynamic effects of bio-inspired modifications on airfoil at low Reynolds number. *Mechanical Engineering and Sciences*, 17(4), 9715-9724.
- Hamdani, H., & Sun, M. (2000). Aerodynamic forces and flow structures of an airfoil in some unsteady motions at small Reynolds number. *Acta Mechanica*, 145, 173-187.
- Hansen, K., Kelso, R., & Dally, B. (2010, 9 December). *An investigation of three-dimensional effects on the performance of tubercies at low reynolds numbers* Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/267700453_An_Investigation_of_ThreeDimensional_Effects_on_the_Performance_of_Tubercles_at_Low_Reynolds_Numbers#fullTextFileContent
- Hone, D., Van Rooijen, M., & Habib, M. (2015). The wingtips of the pterosaurs: Anatomy, aeronautical function and ecological implications, palaeogeography, palaeoclimatology. *Palaeoecology*, 440(1), 431-439.
- Houghton, E. L., Steven H., Collicot, D. T. & Carpenter, P. (2016). *Aerodynamics for engineering students* (1st ed.). London: Butterworth-Heinemann is an Imprint of Elsevier.
- IEA Market Report Series. (2024, 10 March). Erişim Adresi: <https://www.iea.org/analysis>.
- Ishak, I. (2006). Computational fluid dynamics simulation and wind tunnel testing on microlight model. *Universiti Teknologi Malaysia Institutional Repository*, 1(1), 1-8.
- İçingür, Y. ve Solmaz, H. (2011). Düşük hızlı bir rüzgar tüneline değişik otomobil modellerinin aerodinamik direnç katsayılarının belirlenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 26(2), 455-460.
- İstanbul Teknik Üniversitesi Aerodinamik Ders Notları. (2021, 20 Eylül). Erişim Adresi: https://web.itu.edu.tr/~yükselen/Uck351/5%20Kanat%20profillerinin%20aerodinami%F0i_PPT.pdf .

- Jeffery, M., & Hui, H. (2009, 8 January). *An experimental investigation on a bio-inspired corrugated airfoil*. Retrieved from: <https://arc.aiaa.org/doi/book/10.2514/MASM09>.
- Jeffery, M., & Hui, H. (2010). An experimental study of a bio-inspired corrugated airfoil for micro air vehicle applications. *Springer*, 49, 531-546.
- Joe, J., & Ashok, G. (2012). Investigation of a bio-inspired lift-enhancing effector on a 2D airfoil. *Bioinspiration & Biomimetics*, 3(7), 9-16.
- Kant, R., & Bhattacharyya, A. (2020). A bio-inspired twin-protuberance hydrofoil design. *Ocean Engineering*, 218, 108-129.
- Kaya, M. (2014). Airfoil yapının yakın çevresindeki hız ve basınç dağılımının hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi ile incelenmesi. *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 4(1), 59-69.
- Kaya, M. (2023). *Sesaltı rüzgar tünelleri, dizayn esasları ve emmeli tip sesaltı rüzgar tüneli tasarımı* (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kazemi, S., Ahmadabadi, M., Sedaghat, A., & Saghafian, M. (2016). Aerodynamic performance of a circulating airfoil section for Magnus systems via numerical simulation and flow visualization. *Energy*, 104, 1-15.
- Koca, K., Genç, M., Açikel, H., Çağdaş, M., & Bodur, T. (2018). Identification of flow phenomena over NACA 4412 wind turbine airfoil at low Reynolds numbers and role of laminar separation bubble on flow evolution. *Energy*, 144, 750-764.
- Koca, M. S. (2019). *Su tünellerinde model hareket kontrolü ve senkron aerodinamik kuvvet ölçüm sistemi tasarımı* (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Koşar, O. ve Özgür, M. (2019). Santral sınır şeklinin rüzgar santrali konumlandırma problemine olan etkisinin araştırılması. *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University*, 42, 55-69.
- Köse, R. ve Özgür, M. A. (2003). Dumlupınar Üniversitesi kampüs alanında rüzgar enerjisi potansiyelinin araştırılması. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5, 187-196.

- Kurç, Ö., Kayışoğlu, B., Shojaee, M., & Uzol, O. (2012). An experimental study of the effects of pitch-pivot-point location on the propulsion performance of a pitching airfoil. *İMO Teknik Dergisi*, 389(1), 6163-6186.
- Lindgren, B. (2002). *Flow facility design and experimental studies of wallbounded turbulent shear-flows* (1st ed.). Stockholm: Technical Reports from Royal Institute of Technology Department of Mechanics.
- Lu, Y., Li, Z., Chang, X., Chuang, Z., & Xing, J. (2021). An aerodynamic optimization design study on the bio-inspired airfoil with leading-edge tubercles. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics* 15(1), 293-313.
- Miklosovic, D., Murray, M., Howle, L., & Fish, F. (2004). Leading-edge tubercles delay stall on humpback whale (*Megaptera novaeangliae*) flippers. *Physics of Fluids*, 16(5), 39-43.
- Neslihan, A., Mehmet, E. Ç., & İrfan, K. (2020). A study on a new bio-inspired wing design and 2d analysis of its aerodynamic characteristics. *Euroasia Journal Of Mathematics-Engineering Natural & Medical Sciences*, 97(8), 126-136.
- Oral, M. F. (2011). *Uçuş kumandaları* (1. Basım). İstanbul: Mng Technic Training Center.
- Önen, B. (2011). *Bir ses altı rüzgar tünelinin performansının ve bazı modeller üzerindeki akışın deneysel ve bilgisayar destekli analizi* (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Özdemir, M. ve Onbaşı, S. (2004). F-4 Phantom II uçağının etrafındaki akışın h.a.d. analizi kısım 1: kanat kök profili Naca0006. *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 1(4), 1-6.
- Özgür, M. A. (2008). Türkiye rüzgar enerjisi potansiyeli ve kullanımı. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 15, 75-84
- Pope, A., Harper, W., & Barlow, J. B. (1984). *Low-speed wind tunnel testing* (1st ed.). New York: John Wiley & Sons Inc.
- Post, M., Decker, R., Sapell, A., & Hart, J. (2018).). Effect of bio-inspired sinusoidal leading-edges on wings. *Aerospace Science and Technology*, 81, 128-140.
- Punkhurst, R., & Holder, D. (1952). *Wind tunnel technique* (1st ed.). London: Sir Isaac Pitman & Sons Comp.

- Selver, R. ve Başekin, M. (2023). Naca6412 uçak kanadının aerodinamik parametrelerinin araştırılması. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(2), 566-580.
- Seyhan, M., Sarıoğlu, M., & Akansu, Y. (2018). Effect of attack angle on flow around a square prism with a splitter plate. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 23(2), 233-240.
- Shengxian, H., Yu, H., & Ying, W. (2021, 13 April). *Research on aerodynamic performance of a novel dolphin head-shaped bionic airfoil*. Retrieved from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036054422031286X>
- Shengxian, S., Yingzheng, L., & Lianmin, C. (2012). An experimental study of flow around a bio-inspired airfoil at reynolds number 2.0×10^3 . *Journal of Hydrodynamics*, 24, 410-419.
- Soğukpınar, H. (2017). Uçak kanatlarında en ideal hücum açısını bulmak için 4 rakamlı Naca 00xx kanat profillerinin nümerik analizi. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 22(1), 169-178.
- Suvanjumrat, C. (2017). Comparison of turbulence models for flow past. *Engineering Journal*, 21(3), 207-221.
- Tanürün, H. E., Ata, İ., Canlı, M. E. ve Acır, A. (2019). Farklı açıklık oranlarındaki Naca-0018 rüzgâr türbini kanat modeli performansının sayısal ve deneysel incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 23(2), 371-381.
- Tarhan, C. (2012). *Naca0012 kanat profili etrafındaki hava akışının sayısal ve deneysel incelenmesi* (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Tian, W., Bodling, A., Liu, H., Wu, J., He, G., & Hu, H. (2016). An experimental study of the effects of pitch-pivot-point location on the propulsion performance of a pitching airfoil. *Journal of Fluids and Structures*, 60, 130-142.
- Tunca, S. G. ve Özgür, M. A. (2023). Sesaltı rüzgar tüneline Naca 0015 kanat profilinin kuvvet ve akış görüntüleme analizleri. *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 9(2), 516-527.
- Tunca, S., Özgür, M. ve Koşar, O. (2024, 25-27 Haziran). *Biyo esinlenmeli kanat profili yüzeyindeki akış görüntüleme analizi*. Erişim Adresi: <https://www.ankara.kongresi.org/books>.

- Türkiye Ulusal Enerji Planı. (2022, 2 Ocak). Erişim Adresi: https://enerji.gov.tr//Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/TUEP/T%C3%BCrkiye_Ulusal_Enerji_Plan%C4%B1.pdf.
- Uçar, R. (2022). *Ses altı açık çevrimli bir rüzgar tüneli tasarımı, kurulumu ve sayısal analizi* (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik.
- Vakil, A., & Green, S. (2009). Drag and lift coefficients of inclined finite circular cylinders at moderate reynolds numbers. *Computers & Fluids*, 38, 1771-1781.
- Vikipedi Özgür Ansiklopedi (2024, 20 Ağustos). Erişim Adresi: https://tr.wikipedia.org/wiki/Teruzor#cite_note-5.
- Wang, X., & Gu, M. (2016). Experimental study on re number effects on aerodynamic characteristics of 2d square prisms with corner modifications. *Wind and Structures*, 22(5), 573-594.
- Wind Tunnels of Nasa. (2023, 2 October). Retrieved from: <https://history.nasa.gov/SP-440/ch1-2.htm>.
- Witton, M. P. (2013). *Pterosaurs: Natural history, evolution, anatomy* (1st ed.). New Jersey: Princeton University Press.
- Witton, M., & Habib, M. (2010). On the size and flight diversity of giant pterosaurs, the use of birds as pterosaur analogues and comments on pterosaur flightlessness. *PLoS One*, 5(1), 1-18.
- Yıldırım, M. ve Erbaş, O. (2023, 25 Kasım). *Naca0008 kanat yapısının sesaltı rüzgar tüneline kuvvet ve akış görselleştirme ile aerodinamik analizi*. Erişim Adresi: <https://www.ispecongress.org/books>.
- Yi, J., & Deng, F. (2023). Cooperation of thin-airfoil theory and deep learning for a compact airfoil shape parameterization. *Aerospace*, 10(7), 1-18.

DİZİN

3

3B Yazıcı, 55, 56

A

Aerodinamik, 4, 6, v, vi, x, xi, 3, 7, 15,
23, 24, 28, 36, 37, 46, 62, 63, 64, 85,
86, 98

Akış, v, vi, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15,
16, 18, 19, 20, 21, 22, 24, 25, 29, 30,
31, 32, 33, 38, 39, 40, 41, 42, 44, 46,
48, 50, 53, 54, 65, 69, 73, 79, 82, 83,
85, 86, 87, 88, 95, 101, 102

B

Biyo-esinlenme, v, vi, 25, 88

H

Hücum açısı, v, xvii, 13, 14, 15, 18, 20,
24, 25, 35, 36, 38, 62, 64, 65, 73, 85,
86, 87, 101

K

Kaldırma katsayısı, 14, 18, 23, 37, 62,
63, 85, 86

Kanat profili, v, 4, 5, 10, 12, 15, 16, 18,
20, 21, 22, 23, 24, 25, 36, 38, 62, 63,
64, 65, 69, 73, 78, 79, 80, 81, 82, 83,
85, 86, 87, 88, 96, 97, 101, 102

L

Laminer ayrılma kabarcıkları, v, 25, 38,
46, 65, 77, 85, 87, 88

M

Moment, xvi, xvii

R

Rüzgâr Tünelleri, 31

S

Sürüklenme katsayısı, 8, 9, 17, 63, 64

T

Tasarım, vi, 3, 5, 8, 10, 11, 16, 20, 21,
22, 27, 29, 30, 32, 42, 85, 88

Tutunma kaybı, 14, 16, 18, 19, 24, 25,
62, 63, 64, 65, 69, 73, 85, 86, 87, 88

Türbülans, 10, 11, 12, 15, 16, 18, 19,
23, 24, 48, 52, 63, 79, 82, 86, 87, 97