



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



DOĞADAN ESİNLENMİŞ BÜTÜNLEŞİK
UÇAN KANAT TASARIMININ
AERODİNAMİK KARAKTERİSTİKLERİNİN
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Muhammed Akif ÖZDEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Uçak Mühendisliği Anabilim Dalı

Eylül-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Muhammed Akif Özden tarafından hazırlanan “Doğadan Esinlenmiş Bütünleşik Uçan Kanat Tasarımının Aerodinamik Karakteristiklerinin Deneysel Olarak İncelenmesi” adlı tez çalışması 27/09/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Uçak Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Prof.Dr. Mesut UYANER

Danışman

Prof.Dr. Muammer ÖZGÖREN

Üye

Doç.Dr. İlker ÖRS

İmza

.....

.....

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun .../.../2024 gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY
FBE Müdürü

Bu tez çalışması NEÜ-BAP tarafından 24YL16001 nolu proje ile desteklenmiştir. Dr.Öğr.Üyesi Mehmet Seyhan bu tez çalışmasının ikinci danışmanıdır.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Muhammed Akif ÖZDEN

Tarih: 27/09/2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DOĞADAN ESİNLENMİŞ BÜTÜNLEŞİK UÇAN KANAT TASARIMININ AERODİNAMİK KARAKTERİSTİKLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Muhammed Akif ÖZDEN

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Uçak Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Muammer ÖZGÖREN

2024, 66 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Muammer ÖZGÖREN

Prof. Dr. Mesut UYANER

Doç. Dr. İlker ÖRS

Hızla gelişen günümüz dünyasında, hızlı ve güvenli ulaşımın yanı sıra uzak veya tehlikeli bölgelere erişim talebi artmaktadır. İnsansız Hava Araçları (İHA'lar) veya dronlar, bu talepleri karşılamada kilit bir rol oynar. İnsan müdahalesini ortadan kaldırarak, İHA'lar keşif, gözetim ve zorlu arazilerde ulaşım gibi görevlerde mükemmel performans gösterirler. Bu çok yönlü araçlar aynı zamanda tarım, medya, eğlence ve askeri sektörlerde yüksek manevra kabiliyeti, uzun uçuş süresi ve maliyet etkinliği gibi avantajlar sunmaktadır. Bu tez çalışmasında doğadan esinlenilmiş bütünleşik kanatlı hava aracı tasarımının aerodinamik özelliklerinin deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan araştırma biyomimetik bir uygulama olup İHA'ların aerodinamik verimliliğini artırmaya yönelik katkıda bulunulmuştur. Hayalet vatozun kıvrık kanat yapısı ve akrobatik manevralarından esinlenerek taklit edilerek modeller SolidWorks yazılımı ile tasarlandı ve üç boyutlu baskı teknolojisi kullanarak üretildi. Simetrik olan her bir modelin rüzgâr tüneline çeşitli hücum açıları ve giriş hızı şartlarında incelendi. Bu testler, emme tipi bir rüzgâr tüneline kuvvet ölçümlerini, yüzeydeki akış formlarını incelemek için yağ deneyleri olarak gerçekleştirildi. Bütünleşik Kanat (BK) tasarımının aerodinamik karakteristikleri, yağ ve duman deneyleri ile akış görselleştirme nitel sonuçları farklı hücum açılarında sunularak yorumlandı. Altı eksenli kuvvet ölçüm sensörü ile yüksek frekansta sürüklenme ve taşıma kuvvetleri zamanla değişimi ve zaman ortalaması değerlerinin hem hücum açısına hem de geometrik veter (kiriş) uzunluğuna bağlı olarak tarif edilen Reynolds sayısının ses altı akış şartlarında akış karakteristiklerinin belirlenmesi üzerine çalışıldı. Rüzgâr tüneline deneyleri, farklı hücum açıları (0° - 25°), farklı Reynolds sayılarında ($Re=70.000$ ve $Re=150.000$) akış karakteristikleri, taşıma kuvveti, sürüklenme direnç katsayısı, C_L/C_D oranları, değerleri farklı geometrik modeller için yapılarak deney sonuçları karşılaştırmalı bir şekilde sunuldu. Hücum açısı arttıkça taşıma kuvvet katsayısı artmaktadır ve sürüklenme direnç katsayısı da artmaktadır. Ancak artan hücum açısıyla birlikte hücum kenarından ayrılan akış yüzeye tutunamadığı için taşıma katsayısında düşme olurken direnç katsayısı artmakta ve sonuç stol (havada tutunamama) durumuna düşmektedir. Önerilen biyomimetik kanat geometrisi ile stol açısı değerinin 14 dereceye kadar geciktirilebileceği görülmüştür. Elde edilen veriler farklı Türbülans modelleri kullanılarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği analiz sonuçlarının öncelikle doğrulanması amaçlı kullanılabilir. Ayrıca, Rüzgâr tüneline deneyleri düşük hızlarda sınırlı olduğu için tam sağlanamayan dinamik benzerlik analizinin sağlanması için yüksek hızlarda sayısal analizleri yapılması da faydalı olabilir.

Anahtar Kelimeler: Akış Görselleştirme, Biyomimetik Kanat, İnsansız Hava Aracı, Hayalet Vatoz, Kıvrık Kanat Ucu, Pasif akış kontrolü

ABSTRACT

MS THESIS

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF BIO-INSPIRED INTEGRATED BLENDED WING DESIGN

Muhammed Akif Özden

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN AERONAUTICAL ENGINEERING**

Advisor: Prof. Dr. Muammer ÖZGÖREN

2024, 66 Pages

Jury

Advisor Prof. Dr. Muammer ÖZGÖREN

Prof.Dr.Mesut UYANER

Assoc. Prof.Dr. İlker ÖRS

In the rapidly evolving world of today, there is an increasing demand for fast and secure transportation, as well as access to remote or hazardous areas. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), or drones, play a key role in meeting these demands. By eliminating human intervention, UAVs excel in missions such as reconnaissance, surveillance, and traversing challenging terrains. These versatile vehicles also offer advantages like high maneuverability, prolonged flight durations, and cost-effectiveness in sectors such as agriculture, media, entertainment, and military. This thesis study has been experimentally investigated the aerodynamic characteristics of bio-inspired integrated wing aircraft designs. The performed research is a biomimetic application aimed at enhancing the aerodynamic efficiency of UAVs. Models inspired by the flexible wing structure and acrobatic maneuvers of manta rays were designed using SolidWorks software and produced using 3D printing technology. The models were test by using wind tunnel testing to examine it under various attack angles and inflow speeds. These tests performed in a suction-type wind tunnel have included force measurements, surface oil and smoke flow experiments to study surface flow patterns in the flow field. The results obtained has presented a comparative analysis of experimental outcomes for different geometric models at varying angles of attack (0° - 25°) and Reynolds numbers ($Re=70.000$ and $Re=150.000$), focusing on flow characteristics, lift/drag forces, lift/drag coefficients and C_L/C_D ratio. Both the lift force coefficient and the drag force coefficient rise with increasing angle of attack. Stall results from the flow exiting the leading edge being unable to stick on to the surface, which causes the lift coefficient to decrease and the resistance coefficient to increase as the angle of attack increases (inability of air vehicle to hold in the air). The stall angle value can be delayed by up to 14° when using the suggested biomimetic wing geometry. First, the data gathered can be utilized to confirm, using various turbulence models, the findings of computational fluid dynamics research. Additionally, given the limitations of wind tunnel studies conducted at low speeds, numerical analysis carried out at high speeds could be helpful in providing dynamic similarity analysis.

Keywords: Bio-Inspired, Curved Wingtip, Flow visualization, Manta Ray, Unmanned Aerial Vehicle, passive control

ÖNSÖZ

İnsansız hava araçlarının (İHA) aerodinamik verimliliği önemi göz ardı edilemez. Aerodinamik verimlilik, enerji tüketimini azaltma ve uçuş performansını artırma anlamına gelir. Günümüzde bu amacı gerçekleştirmek için yapılan uygulamalardan birisi de bütünleşik kanat tasarımları olarak öne çıkmaktadır. Geleneksel uçaklardan farklı olarak, bu tasarımlar gövde ve kanadı sorunsuz bir şekilde birleştirerek daha yüksek verimlilik, manevra kabiliyeti ve daha düşük sürüklenme katsayıları gibi avantajlar sunmaktadır. Bu tür bütünleşik kanatlı İHA'larının aerodinamik özelliklerini deneysel analiz yoluyla araştırmak, İHA performansını daha da geliştirmek için faydalı olabilecektir.

Akış kontrolü, küt ve akım çizgili aerodinamik cisimlerde önemlidir. Pasif veya aktif akış kontrolü ile sürüklenme, akış ayrılması, ayrılma baloncuğu girdap kaynaklı titreşim gibi istenmeyen etkileri ortadan kaldırmak veya azaltmak için uygulanmaktadır. Geçmişten günümüze, araştırmacılar hidrodinamik ve aerodinamik cihazlar için taşıma kuvvetinde artış ve daha iyi manevra kabiliyeti, sürtünmede azalma, taşıma kuvvetinde artış ve verimlilik artışı ve stabilitenin korunması gibi istenen etkileri elde etmek için akış kontrol yöntemleri geliştirmeye çalışmaktadır. Bu çalışmada da farklı kanat geometrileri uygulaması ile akış kontrol uygulamaları araştırılmıştır.

Tez çalışmalarımın gerçekleşmesinde deneysel çalışma ortamı sağlayan ve bu esnada proje asistanı olarak da görev yapma imkânı sunan Prof. Dr. Mustafa Sarioğlu'na ve Dr. Öğretim Üyesi Mehmet Seyhan'a tez çalışmalarımı gerçekleştirmek için sunmuş oldukları tüm katkıları için teşekkür ederim.

Tez konumun belirlenmesi ve tez çalışmalarının gerçekleştirilmesi esnasında sürekli teşvik edici desteklerinden dolayı danışmanım Prof. Dr. Muammer Özgören'e, Prof. Dr. Mesut Uyaner hocama ve ikinci danışmanım Dr. Öğretim Üyesi Mehmet Seyhan'a, Jüri üyelerime, Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde laboratuvarında deneylerin yapılmasına katkı sağlayan ve desteklerini esirgemeyen Prof. Dr. Mustafa Sarioğlu'na, Dr. Öğretim Üyesi Veysel Demirci'ye, Dr. Öğretim Üyesi Furkan Eren Kan'a, Dr. Öğretim Üyesi Mehmet Sağlam'a, Gizem İrem Seyis'e, Ebubekir Dinç'e, Ali Haydar Çamtekne'ye, Baran Güler'e ve teknikerler dahil ismini yazmadığım tüm laboratuvar mensuplarına teşekkür ederim.

Desteklerini ve sevgilerini benden hiçbir zaman esirgemeyen çok kıymetli aileme sonsuz minnetlerimi ve teşekkürlerimi sunarım. Bu süreçte her zaman yanımda olan ve bana moral ve motivasyon veren abim Dr. Abdulkadir Özden'e de tez çalışmamın her aşamasında sağladığı destekten dolayı teşekkür ederim.

Bu çalışmanın fikir aşamasından son aşamasına kadar yardım, zaman ve desteklerini asla esirgemeyen öğrencisi olmaktan her zaman gurur duyacağım sayın Prof. Dr. Muammer ÖZGÖREN'e sonsuz teşekkür ederim.

Tez çalışmasına vermiş olduğu katkılarından dolayı Necmettin Erbakan Üniversitesi BAP Koordinatörlüğüne (Proje No: 24YL16001) teşekkür ederim.

Muhammed Akif ÖZDEN
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİLLER.....	ix
ÇİZELGELER.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	5
2.1. İnsansız Hava Araçları ve Tarihçesi	5
2.2. Biyomimetik Tasarımlar	6
2.3. Bütünleşik Kanat Tasarımları	7
2.4. Hayalet Vatoz Esinlenmesi	8
2.5. Bütünleşik Kanatların Akış ve Yapısal Analizleri.....	13
2.6. Deneysel ve Hesaplamalı Çalışmalar	13
2.7. Literatür Özeti ve Tez Çalışmasının Katkıları	14
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	15
3.1. Deney Dış Ortamı Seçimi ve Özellikleri	15
3.2. Model Tasarım ve Üretimi.....	17
3.3. Kuvvet Ölçümü Deneyi Yapılışı ve Parametreleri	21
3.4. Belirsizlik Analizi	29
3.5. Yüzey Yağ Akış Görüntüleme Yöntemi, Deneyi Yapılışı ve Parametreleri	30
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	33
4.1. Taşıma / Sürüklenme Deneyi Sonuçları	33
4.2. Kıvrık Kanat Taşıma/Sürüklenme Katsayısı Deneyi Sonuçları	41
4.3. Yüzey Yağ Akış Görselleştirme Deney Sonuçları	49
4.3.1. Akışın Başlangıcı ve Geçiş Bölgeleri	51
4.3.2. Akış Ayrılması ve Ayrılma Kabarcığı Bölgesi.....	51
4.3.3. Akış Yeniden Tutunması	53
4.3.4. Tam Ayrılma ve Arka Kısımda Oluşan Ters Akış Bölgeleri.....	54
4.3.5. Bombeli Bölgede Akış Özellikleri.....	55
4.3.6. Kanat Ucu Girdapları.....	56
4.4. Duman Deneyi Sonuçları.....	57

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	60
5.1 Sonuçlar	60
5.2 Öneriler	62
6. KAYNAKLAR	64



ŞEKİLLER

Şekil 1. Emmeli tip rüzgâr tünelinin 3D şematik hali (Seyhan ark. 2021)	15
Şekil 2. Necmettin Erbakan Üniversitesi emmeli tip rüzgâr tüneli görselleri	16
Şekil 3. MY Z35 model 3D yazıcı (Seyhan ve ark., 2021b).....	17
Şekil 4. Tezde kullanılan hayalet vatoz görsellerinin üstten görünümü ve görünümüne uygun model tasarımları	18
Şekil 5.Kanat modellerinin farklılıklarını belirten 2D görselleri.....	18
Şekil 6. Solidworks Programında çizilen kanat modellerinin ara kesitlerinin görünümü	19
Şekil 7. MY Z35 üç boyutlu yazıcı ile üretilen PLA baskı kanat modeli.....	20
Şekil 8. İki parça olarak üretilen kanat modellerinin birleştiği bölgenin yapısının görseli.	20
Şekil 9. Deforme olmuş bölgenin macun ile kaplandıktan sonra kurumaya bırakılmasının görseli	20
Şekil 10. Kurumuş macun sonrası vurulan zımpara numaraları ve aşamaları.....	21
Şekil 11. (a) Emmeli tip rüzgâr tüneli test bölgesi ve kuvvet ölçüm sistemi ve (b) kuvvet ölçüm Deney düzeneğinin şematik gösterimi	22
Şekil 12. Taşıma ve sürüklenme kuvvetleri ölçüm anı ve ölçüm doğruluğunun lazer hizalama destekli ölçüm cihazı yardımı ile gösterilmesi anı	25
Şekil 13. Kanat modelinin Rüzgâr tüneline görünümü.....	26
Şekil 14. Rüzgâr Tüneli içerisinde deneye hazır Baz model	28
Şekil 15. Yüzey yağ akış görüntülemesinde kullanılan malzemeler ve yüzey yağ akış görüntülemesi örneği (Seyhan, 2022).....	30
Şekil 16. Yüzeye yağ uygulaması ile akış görüntüleme MR3-Modeli ve $Re=150.000$ için deney sonuçları	31
Şekil 17. Hayalet vatoz kanat modellerinin SolidWorks programında çizilmiş kıvrık model görselleri	32
Şekil 18. $Re=70.000$ için taşıma katsayılarının modellere göre hücum açısı ile değişimi	33
Şekil 19. $Re=70.000$ için sürüklenme direnç katsayılarının modellere göre hücum açısı ile değişimi.....	35
Şekil 20. $Re=150.000$ için sürüklenme direnç katsayılarının modellere göre hücum açısı ile değişimi.....	36
Şekil 21. $Re=150.000$ için taşıma katsayılarının modellere göre hücum açısı ile değişimi	37
Şekil 22. $Re=70.000$ değerinde taşıma/sürüklenme direnç katsayıları oranı hücum açısı ile değişimi.....	38
Şekil 23. $Re=150.000$ değerinde taşıma/sürüklenme direnç katsayıları oranı hücum açısı ile değişimi.....	40
Şekil 24. $Re=70.000$ değerinde kıvrık kanat ucu uygulamasının taşıma katsayısı (C_L) grafiği hücum açısı ile değişimi.....	41
Şekil 25. $Re=70.000$ değerinde kıvrık kanat ucu eklentisinin sürüklenme katsayısı (C_D) nin hücum açısı ile değişimi	43
Şekil 26. $Re=150.000$ kıvrık kanat ucu taşıma katsayısı (C_L)'nin hücum açısı ile değişimi.....	44
Şekil 27. $Re=150.000$ değerinde kıvrık kanat ucu sürüklenme katsayısı (C_D) nin hücum açısı ile değişimi	45

Şekil 28. $Re=70.000$ değerinde kıvrık kanat ucu C_L/C_D oranının hücum açısı ile değişimi.....	46
Şekil 29. $Re=150.000$ değerinde kıvrık kanat ucu C_L/C_D oranının hücum açısı ile değişimi.....	47
Şekil 30. MR3 modeli için hücum açısı $\alpha=9^\circ$ ve $Re=150.000$ değerinde akış görselleştirme sonucu	49
Şekil 31. Yüzey yağ akış deney videosunun her 3 dakikada bir alınan görsel kesitleri ($t=0$ ile $t=9s$).....	50
Şekil 32. Yüzey yağ akış deney videosunun her 3 dakikada bir alınan görsel kesitleri ($t=12s$ ile $t=20s$)	50
Şekil 33. MR3 modelinin ön bölgesinde oluşan laminer akış ayrılma kabarcığı	51
Şekil 34. Laminer ayrılma kabarcığı şeması ölü hava bölgesi (durgun akış bölgesi)	52
Şekil 35. Laminer kabarcık ayrılması bölgesi (A: Ayrılma Noktası – B: Birleşme Noktası).....	53
Şekil 36. Geçiş ve akışın tekrar yüzeye bağlandığı bölge	54
Şekil 37. Tam akış ayrılmasının olduğu ters akış bölgeler (1) ($Re=150.000$ ve $\alpha=9^\circ$)	55
Şekil 38. Tam akış ayrılmasının olduğu ters akış bölgeler (2) ($Re=150.000$ ve $\alpha=9^\circ$)	55
Şekil 39. Bombeli bölge türbülans akış yapısı.....	56
Şekil 40. Kanat ucu girdap oluşumu	57
Şekil 41. MR3 modeli için farklı hücum açılarında duman akış görselleri görüntüleri ($Re=50.000$)	58

ÇİZELGELER

Çizelge 1. Rüzgâr tüneli genel özellikleri (Seyhan ark., 2021b)	17
Çizelge 2. Grup 1 Deney Parametreleri Çizelgesi	27
Çizelge 3. Grup 2 Deney Parametreleri Çizelgesi	27
Çizelge 4. Baz modeli Deney Parametreleri Çizelgesi	28
Çizelge 5. Kullanılan ölçü aletlerinin doğruluk değerleri.....	29
Çizelge 6. Yağ ile Akış Görüntüleme Deney Parametreleri ve Modeller	31



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A: Kanat profilinin üst projeksiyon alanı (m^2)
 C_D : Sürüklenme direnç katsayısı,
 C_L : Taşıma katsayısı,
f: baskın frekans (Hz)
 F_D : Sürüklenme kuvveti (N),
 F_L : Taşıma kuvveti (N),
 f_{nq} : Nyquist frekansı
 f_{sf} : Örnekleme frekansı (Hz)
 Ma : Mach sayısı
P: Basınç (Pa)
St: Strouhal sayısı
U: Serbest akım hızı (m/s)
 w_c : Veter uzunluğu ölçüm doğruluğu
 w_{cl} : Taşıma Kuvveti belirsizliği
 w_f : Kuvvet ölçüm doğruluğu
 w_s : Kanat açıklığı ölçüm doğruluğu
 w_u : Serbest akım hızı ölçüm doğruluğu
 w_p : Yoğunluk belirleme doğruluğu
 α : Hücüm açısı ($^\circ$)
 ρ : Havanın yoğunluğu (kg/m^3)
Re: Reynolds sayısı

Kısaltmalar

BK: Bütünleşik Kanat
BWB: Bütünleşik Kanat Gövdesi (Blended Wing Body)
İHA: İnsansız Hava Aracı
MİHA: Mikro İnsansız Hava Araçları
MİHA(s): Mikro Hava Araçları (Micro Air Vehicles)
MRFO: Manta Ray Toplayıcı Optimizasyon
PIV: Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçme Metodu (Particle Image Velocimetry)
SAE: Otomotiv Mühendisleri Birliği (Society of Automotive Engineers)
UAV(s): İnsansız Hava araçları (Unmanned Aerial Vehicle)

1. GİRİŞ

Bu tez çalışması, hayalet vatozdan esinlenerek tasarlanmış olan bütünleşik kanat (BK) modelinin aerodinamik karakteristiklerinin deneysel olarak incelenmesini ele almaktadır. Doğadan esinlenmiş tasarımlar, biyomimetik mühendislik yaklaşımlarının önemli bir parçasını oluşturmaktadır ve aerodinamik performansı optimize etmek için kullanılan biyo-ilhamlı yöntemler, havacılık ve uzay mühendisliği alanında büyük ilgi görmektedir. Hayalet vatozun aerodinamik yapısı, düşük hızda yüksek manevra kabiliyeti ve enerji verimliliği sağlaması nedeniyle dikkat çekici bir model sunmaktadır.

Bu çalışma, insansız hava araçları (iHA) teknolojisinden mikro hava araçları (MİHA) teknolojisine geçiş sürecine odaklanmaktadır. iHA'lar, geniş uygulama alanları ve daha büyük boyutlarıyla bilinirken, MİHA'lar daha kompakt yapıları ve düşük enerji tüketimleri sayesinde özellikle zor erişilebilir bölgelerde kullanılabilir. MİHA'ların geliştirilmesi, daha küçük boyutlarda yüksek manevra kabiliyeti ve enerji verimliliği sağlamak adına biyomimetik tasarımların entegrasyonunu gerektirmektedir. Bu geçiş, hem tasarım hem de kontrol sistemlerinde yenilikçi yaklaşımların benimsenmesini zorunlu kılmakta ve biyomimetik mühendisliğin bu alandaki önemini artırmaktadır.

Çalışma kapsamında, farklı varyasyonlara sahip kanat tasarımları, akış görselleştirme teknikleri (yağ ve duman kullanılarak), taşıma ve sürüklenme kuvvetleri ile yüzeydeki farklı noktadaki basınç ölçümlerinin analizleri açısından değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme süreci, hücum açılarının 0 ila 25 derece aralığında gerçekleştirilmiştir. Tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, hayalet vatozdan ilham alınarak tasarlanmış kanat modelinin aerodinamik özelliklerini detaylı bir şekilde incelemeyi amaçlamaktadır.

Biyomimetik kanat tasarımında hayalet vatozun önemi, bu canlıların aerodinamik verimliliği ve kıvrık yapıları sayesinde ortaya çıkmaktadır. Hayalet vatozun vücut yapısı, aerodinamik akışın kontrolünde sağladığı avantajlar, tasarım sürecinde ilham kaynağı olmuştur. Bu yapının taklit edilmesi, MİHA'ların kanatlarının daha kıvrık ve uyarlanabilir olmasını sağlayarak, değişken uçuş koşullarında daha yüksek performans göstermelerine olanak tanımaktadır. Hayalet vatozdan esinlenen kanat yapısı, düşük hızda dahi yüksek manevra kabiliyeti ve enerji tasarrufu sağlayarak, MİHA'ların operasyonel verimliliğini artırmaktadır.

Literatürde, biyomimetik tasarımların aerodinamik performansa etkileri üzerine yapılan araştırmalar sınırlıdır. Bu çalışma, mevcut literatürdeki boşlukları doldurmayı ve bu tür tasarımların aerodinamik davranışlar üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde analiz etmeyi hedeflemektedir. Tasarımın aerodinamik davranışları üzerindeki testler, duman ve yağ deneyleri ile akış görselleşmiş, pitot tüpü kullanılarak hız ve basınç ölçümleri gerçekleştirilmiş ve altı eksenli kuvvet ölçüm sensörü ile sürüklenme ve taşıma kuvvetlerinin zamanla değişimi incelenmiştir. Elde edilen veriler, ses altı akış koşullarında farklı hücum açıları ve geometrik vetere (chord=kiriş) uzunluklarına bağlı olarak tarif edilen Reynolds sayısının etkilerini ortaya koymaktadır.

Tez çalışmasının sonuçları, günümüzde dikkat çeken savunma araçlarının tasarımına, bu ve benzeri sayısal benzeşim çalışmalarının doğrulanmasına, ayrıca yeni türbülans modellerinin geliştirilmesine katkı sağlaması beklenmektedir. Bu bağlamda, çalışmanın hava aracı tasarımında yenilikçi yaklaşımların değerlendirilmesine ve hava taşıtlarının aerodinamik performansının deneysel olarak analiz edilerek özgün bir katkı sağlaması amaçlanmıştır. Tez çalışmasının bilimsel katkıları, hava araçları ve bütünleşik yapılar alanında stratejik ve genişleme açılarından değerli bir katkı sağlamaktadır. Literatürdeki boşlukları gidermesi ve sayısal analizlerin doğrulanmasına yardımcı olması beklenmektedir.

Akış kontrolü, çeşitli uygulamalarda istenen sonuçları elde etmek için sıvı/gas akışının manipülasyonunu ve yönetimini kapsamaktadır. Genel olarak aktif ve pasif akış kontrolü olarak iki ana türe ayrılır. Aktif akış kontrolü, aktüatörlerin veya kontrol yüzeylerinin kullanımı yoluyla akış özelliklerini aktif olarak etkilemek için harici enerji girişinin kullanılmasını içerir. Öte yandan pasif akış kontrolü, genellikle ek enerji girişine ihtiyaç duymadan akış davranışını pasif olarak değiştirmek için akış kanalının veya nesnesinin şeklinin değiştirilmesini içerir (Shakouchi, 2020).

Pasif akış kontrol teknikleri, karmaşık ve enerji yoğun aktif sistemlere ihtiyaç duymadan aerodinamik performansı artırma yetenekleri nedeniyle Mikro Hava Araçları (MİHA'lar) bağlamında özellikle önemlidir. Pasif akış kontrol yöntemleri, MİHA'nın veya bileşenlerinin şeklini değiştirerek akış direncini azaltabilir, taşıma kuvveti üretimini iyileştirebilir ve genel uçuş verimliliğini artırabilir. Bu, genellikle enerji verimliliği ve manevra kabiliyetinin çok önemli olduğu ortamlarda çalışan MİHA'lar için çok önemlidir (Shakouchi, 2020).

Ayrıca, sabit kanatlı Mikro Hava Araçlarının aerodinamik performansını daha da artırmak için pasif ve aktif akış kontrol tekniklerinin entegrasyonu araştırılmıştır.

Araştırmacılar, Őekil ayarlamaları gibi pasif modifikasyonları aktüatörler gibi aktif akış kontrol elemanları ile birleştirerek üstün aerodinamik özelliklere yol ačan etkiler elde etmeyi amaçlıyor. Bu entegre yaklaşım, MİHA'ların daha verimli çalışmasına ve artan çeviklikle manevra yapmasına olanak tanıyarak daha kapsamlı ve etkili bir akış kontrol stratejisine olanak tanır (Esmaeili, 2023).

MİHA'lara yönelik biyomimetik harmanlanmış kanat tasarımlarının bağlamında akış kontrolü, doğada gözlemlenen aerodinamik ilkelerin taklit edilmesinde çok önemli bir rol oynar. Araştırmacılar, kuşlar ve böcekler gibi biyolojik uçucularda bulunan akış kontrol mekanizmalarını inceleyerek, MİHA'ların uçuş stabilitesini ve verimliliğini artırmak için bu stratejileri kopyalamayı ve uyarlamayı amaçlamaktadır. Karışık kanatlı MİHA'lardaki biyomimetik akış kontrolü, rüzgâr bozuklukları gibi zorlu koşullarda uçuş performansını iyileştirmek için doğal hava akışı algılama mekanizmalarının ve aerodinamik adaptasyonların taklit edilmesini içerir (Wang ve ark., 2022).

Şekil modifikasyonlarına ve akış direncinin azaltılmasına vurgu yapan pasif akış kontrolü, karmaşık aktif sistemlere ihtiyaç duymadan MİHA'ların aerodinamik performansını optimize etmek için umut verici bir yol sunar. Araştırmacılar, pasif akış kontrol tekniklerini aktif akış kontrol yöntemleriyle birlikte kullanarak, çeşitli çalışma koşullarında Mikro Hava Araçlarının verimliliğini, manevra kabiliyetini ve stabilitesini artıran yenilikçi aerodinamik çözümler geliştirebilirler. Pasif akış kontrolünün MİHA tasarımına entegrasyonu yalnızca aerodinamik performansı artırmakla kalmıyor, aynı zamanda doğanın verimli uçuşlarından ilham alan biyomimetik uçuş teknolojilerinin ilerlemesine de katkıda bulunur.

Biyomimetik bütünleşik kanatlı mikro hava araçlarında (MİHA'ler) akış kontrolü, tasarımlarında kritik bir rol oynar. Araştırma aerodinamik, kanat dönüşümü ve uçuş kontrol mekanizmaları gibi çeşitli unsurlara odaklanmıştır. Çalışmalar, yusuşuk ve sinek kuşu gibi böceklerden ilham alan biyomimetik kanat tasarımlarının kullanımını araştırmıştır (Ravi ve ark., 2016). Akış kontrolü için yenilikçi aktüatörlerin entegrasyonu önerilmiştir (Lee & Park, 2006). Ek olarak, aerodinamik performansı ve kontrolü optimize etmek için kanat dönüşümü ve bükülme dağılımına ilişkin araştırmalar yapılmıştır (Ismail ve ark., 2022; Ahmed ve ark., 2011). Kanat/duvar etkileşimleri ve pervane kayma akışı etkileri gibi aerodinamik etkileşimleri anlamak, MİHA uçuş kontrolünü geliştirmek için çok önemlidir (Geyman, Altman, & Parker, 2014; Sudhakar, Chandankumar, & Venkatakrishnan, 2016). Genel olarak, biyomimetik bütünleşik kanatlı

MİHA'ların başarılı bir şekilde geliştirilmesi için biyoloji, aerodinamik ve kontrol teorisini birleştiren çok disiplinli bir yaklaşım esastır.

Yapılan literatür çalışması kaynak araştırması bölümünde verilmiştir. Yeteri kadar deneysel çalışma olmadığı için bu tür çalışmaların güvenliği günümüzde sorgulanmaktadır. Yapılan bu deneysel çalışma sayısal çalışmaların doğrulanmasına temel teşkil edebilmesi ve bundan sonra yapılacak olan çalışmaların pekiştirilmesine ve değerlendirilmesine katkı sağlaması açısından özgündür ve önem arz etmektedir.

Bu tez çalışması, hava aracı tasarımında yenilikçi yaklaşımların değerlendirilmesine ve hava taşıtlarının aerodinamik performansını deneysel olarak analiz ederek özgün bir katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Bu tez çalışmasının bilimsel katkıları, hava araçları ve bütünleşik yapılar alanında stratejik ve genişleme açılarından değerli bir katkı sağlamaktadır. Literatürdeki boşlukları gidermesi ve sayısal analizlerin doğrulanmasına da yardımcı olması beklenmektedir.

Bu tez çalışmasının giriş bölümünde genel bilgi verilmiş, kaynak araştırması hakkında pasif akış kontrolleri ve biyomimetik kanatlar hakkında sayısal ve deneysel çalışmalar hakkında yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir ve mevcut tez konusunun özgünlüğü ortaya konulmaya çalışılmıştır. Kaynak araştırması bölümünde doğrudan ve dolaylı olarak ilgili çalışmalardan bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde materyal ve yöntem hakkında bilgi verilmiş, son olarak araştırma sonuçlarında yapılan deneyler tablo ve grafiklerle tezde paylaşılmış ve değerlendirilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Doğadan esinlenmiş tasarımlar, biyomimetik mühendislik alanında önemli bir yer tutmakta ve bu tasarımların havacılık mühendisliğinde kullanımını giderek artmaktadır. Hayalet vatoz gibi deniz canlılarından ilham alınarak geliştirilen kanat tasarımları, yüksek manevra kabiliyeti, enerji verimliliği ve düşük hızlarda bile üstün aerodinamik performans sağlaması nedeniyle dikkat çekmektedir. Bu tez çalışması, biyomimetik tasarımların havacılık alanındaki potansiyelini ortaya koymayı ve mevcut literatüre katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Bu bağlamda, biyomimetik tasarımların aerodinamik performansını inceleyen çalışmaların kapsamlı bir değerlendirmesi yapılmıştır.

Literatür taramasında, biyomimetik tasarımların farklı varyasyonları, akış kontrol teknikleri ve bu tekniklerin aerodinamik performansa etkileri üzerinde durulmuştur. Pasif akış kontrol yöntemleri ve bu yöntemlerin Mikro Hava Araçları (MİHA'ler) bağlamında kullanımı, literatürde geniş bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca, aktif ve pasif akış kontrol tekniklerinin entegrasyonu, sayısal ve deneysel çalışmaların doğrulanması açısından önemli bir araştırma alanı olarak ortaya çıkmaktadır. Bu bölümde, hayalet vatoz ve diğer biyomimetik tasarımlardan ilham alınarak geliştirilen kanat modellerinin aerodinamik performansına yönelik çalışmalar detaylı bir şekilde ele alınacaktır.

2.1. İnsansız Hava Araçları ve Tarihçesi

Yaygın olarak dron olarak bilinen İnsansız Hava Araçları (İHA), 20. yüzyılın başlarına kadar uzanan bir geçmişe sahiptir. Başlangıçta askeri amaçlarla geliştirilen İHA'lar, yıllar geçtikçe teknolojik gelişmelerin de etkisiyle önemli bir gelişme göstererek farklı alanlarda yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. İHA'ların geçmişi, büyük, askeri odaklı uçaklardan, artık sivil uygulamalarda yaygın olarak kullanılan daha küçük, daha çevik modellere geçişle işaretlenmiştir (Anderson & Gaston, 2013). Bu hafif İHA'lar ekolojide devrim etkisi oluşturmuş ve makul maliyetlerle temin edilebilir hale gelmiştir, bu durum onları geniş bir kullanım yelpazesi için erişilebilir hale getirmiştir (Anderson & Gaston, 2013).

Teknoloji ilerledikçe Mikro İnsansız Hava Araçlarının (MİHA) geliştirilmesi ve kullanımında da artış yaşanmıştır. Bu küçük ölçekli İHA'lar, olağanüstü esneklikleri ve manevra kabiliyetleri nedeniyle askeri keşif, acil kurtarma operasyonları, çevresel izleme ve diğer çeşitli alanlarda uygulama alanı bulmuştur (Liu, Qiao, Lu, & Jiang, 2014). Mikro

dronlar olarak da bilinen MİHA'ler, ulaşılması zor veya tehlikeli konumlara hızlı ve verimli bir şekilde erişme yetenekleri nedeniyle giderek daha popüler hale geldi (Spurny ve ark., 2021). Mikro İHA'lar alanında dikkate değer gelişmelerden biri de Bütünleşik Kanatlı Mikro İHA'ların geliştirilmesidir. Bu İHA'lar, aerodinamik performanslarını ve verimliliklerini artıran yeni bir Karma Kanat-Gövde (BWB) düzeni konfigürasyonunu içerir (Dimitriou ve ark., 2022). BWB İHA'larının tasarım ve hesaplamalı aerodinamik araştırmaları, özellikle otoyol trafiğinin izlenmesi ve izinsiz giriş denetimleri gibi uygulamalarda umut verici sonuçlar göstermiştir (Raja ve ark., 2023). Karma kanat tasarımı, gelişmiş stabilite ve kontrol sunarak bu mikro İHA'ları çeşitli gözetleme ve izleme görevleri için ideal hale getirir.

2.2. Biyomimetik Tasarımlar

Zarif yüzme yetenekleriyle bilinen manta vatozları, biyomimetik özelliklerinden özellikle havacılık ve aerodinamik gibi çeşitli uygulamalar için yararlanmak isteyen araştırmacıları cezbetmiştir. Wang ve ark. (2016), Chen ve ark. (2012) ve Zhang ve ark. (2022) tarafından yapılan çalışmalar, geleneksel tasarımlarla karşılaştırıldığında hidrodinamik performans, taşıma-sürüklenme oranları, süzülme hızları ve itiş verimliliğindeki ilerlemeleri sergileyen biyomimetik hayalet vatoz robotlarının ve su altı planörlerinin gelişimini araştırmıştır (Wang, Yu, & Zhang, 2016; Chen, Um, & Bart-Smith, 2012; Valencia ve ark. 2018; Zhang ve ark., 2022).

Taheri (2021) tarafından yapılan araştırma, aerodinamik performansı artırmak için hayalet vatozdan ilham alan kanat tasarımlarında biyomimetik değişikliklerin uygulanmasına odaklanmıştır. Ayrıca Menzer ve ark. (2022), hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonları yoluyla hayalet vatoz benzeri yüzmede göğüs yüzgeci kinematiğinin rolünü araştırarak, biyomimetik kanat çırpma mekanizmalarının hidrodinamik avantajlarına ışık tutmaktadır.

Biyomimetik alanı, verimli yağ-su ayırımı için solungaçlardan ilham alan nano lifli bir membran geliştiren Li ve ark. (2018) tarafından gösterildiği gibi malzeme bilimini de kapsamaktadır. Ayrıca, Pan ve ark. (2019), biyomimetik su altı araçları için kanat profillerinin şekil optimizasyonu üzerine çalışmalar yaparak biyomimetrik disiplinler arası doğasını vurgulamaktadır.

Biyomimetik algoritmalar, karmaşık mühendislik sorunlarına yenilikçi çözümler sunmaktadır. Biyomimetik algoritmalar arasında öne çıkan Hayalet vatoz Toplayıcı Optimizasyon (MRFO) algoritması, karmaşık mühendislik sorunlarına yenilikçi

çözümler sunmaktadır, MRFO algoritmasının tasarım optimizasyonu ve mühendislikteki uygulamalarını daha ayrıntılı olarak araştırarak, problem çözme için manta vatozlarının yiyecek arama stratejilerini taklit etmedeki etkinliğini vurgulamaktadır (Biçer, 2021; Turgut, 2020; Zhao, Zhang, & Wang, 2020).

Sonuç olarak, manta vatozunun biyomimetik özellikleri, gelişmiş hidrodinamik performans, itiş verimliliği ve yapısal tasarım yoluyla havacılık ve aerodinamik sistemlerin geliştirilmesinde umut vaat etmektedir. Araştırmacılar ve mühendisler, doğanın tasarımlarından ilham alarak mühendislik sistemlerini optimize eden ve sürdürülebilir teknolojik ilerlemelere katkıda bulunan yenilikçi çözümler geliştirmektedir.

2.3. Bütünleşik Kanat Tasarımları

Biyomimetik bütünleşik kanatlı İHA'lar, doğadan ilham alan benzersiz tasarımları nedeniyle giderek önem kazanmaktadır. Bu tasarım yaklaşımı, doğada gözlemlenen aerodinamik verimliliği ve yapısal avantajları taklit ederek insansız hava araçlarında (İHA) performans özelliklerinin geliştirilmesine yol açmaktadır (Su & Cesnik, 2010). Gövdenin kanat yapısına entegre edilmesi ile karakterize edilen BWB uçak tasarımı, gelişmiş aerodinamik verimlilik ve artırılmış yük kapasitesi sunan yüksek en-boy oranlı kanatları nedeniyle yüksek irtifa uzun ömürlü İHA'lar (HALE İHA'lar) için özellikle önemlidir (Su & Cesnik, 2010). Biyomimetik bütünleşik kanatlı İHA'lar, kuş uçuşunun doğal verimliliğini taklit ederek üstün dayanıklılık ve operasyonel yetenekler elde edebilir ve bu da onları çeşitli uygulamalar için ideal kılar.

Biyomimetik bütünleşik kanatlı İHA'ların en önemli avantajlarından biri, BWB konfigürasyonu tarafından önemli ölçüde geliştirilen aerodinamik performanslarında yatmaktadır. Bu tasarım yalnızca İHA'nın genel verimliliğini arttırmakla kalmaz, aynı zamanda görev yükleri ve aviyonikler için daha geniş bir dahili alana olanak tanıyarak bu İHA'ları çok çeşitli uygulamalar için çok yönlü hale getirir (Dimitriou ve ark., 2022). Ek olarak, bütünleşik kanat-gövde konfigürasyonunun karakteristik bir özelliği olan uçan kanatlı İHA'larda kuyruk düzeninin ortadan kaldırılması, gelişmiş aerodinamik, yapısal ve gizlilik performansı ile sonuçlanır. Bu, azaltılmış radar kesiti, daha düşük yakıt tüketimi ve azaltılmış aerodinamik gürültü gibi faydaları içerir ve bunların tümü biyomimetik bütünleşik kanatlı İHA'ların genel etkinliğine katkıda bulunur (Zhao, Yang, & Ma, 2021).

Biyomimetik bütünleşik kanatlı İHA'lar, aerodinamik ve yapısal avantajlarının yanı sıra enerji verimliliği ve dayanıklılık açısından da öne çıkmaktadır. Sınır katmanını alımı gibi yenilikçi teknolojilerle birleştirilen BWB tasarımının, İHA tahrik sistemlerinde itici verimliliği artırdığı, yakıt tüketimini azalttığı ve genel enerji kullanımını iyileştirdiği gösterilmiştir (Qin ve ark., 2004). Bu artan verimlilik, uçuş sürelerinin uzatılması, operasyonel menzillerin genişletilmesi ve İHA görevlerinin genel sürdürülebilirliğinin artırılması açısından çok önemlidir.

2.4. Hayalet Vatoz Esinlenmesi

Hayalet vatozun hidrodinamik özelliklerini anlamaya yönelik yapılan çalışmalar, düşük sürüklenme ve yüksek taşıma değerlerine odaklanmıştır. Ancak, hayalet vatozun aerodinamik özellikleri ile BK tasarımı arasındaki ilişkiyi inceleyen literatürde sınırlı sayıda çalışma vardır. Mevcut literatürde, hayalet vatozdan esinlenilmiş kanat tasarımlarının BK modellerinde deneysel olarak incelendiği sınırlı çalışmalar yer almaktadır. Bu tezin amacı, bu eksikliği giderecek ve BK tasarımının aerodinamik performansını deneysel olarak analiz ederek literatüre ve tasarımcılara katkı sağlamaktır.

Literatür araştırması sonucunda bütünleşik kanat modellerinin diğer modellere göre daha üstün bir taşıma/sürüklenme oranına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Qin ve ark., yüksek L/D (taşıma/sürüklenme) oranına sahip bir bütünleşik kanat-gövde tasarımı oluşturmuş ve normal bir uçağa kıyasla %20 daha yüksek L/D oranı sunduğunu belirtmiştir. Wang ve ark. (2016), biyomimetik bir vatozun görünümünü temel alarak su altında hareket eden bir planör kinematik modeli tasarlamış ve analiz etmiştir. Analiz sonuçları, bütünleşik kanat modellerinin daha düşük süzülme açılara sahipken daha yüksek süzülme hızlarına ulaştığını göstermiştir (Wang, Yu, & Zhang, 2016; Qin ve ark., 2004).

Gad-el-Hak ve Blackwelder (1985), tasarladığı veter uzunluğu 25 cm olan NACA 0012 kanat profiline sahip alüminyum gövde bütünleşik kanat modeli ile çalışmalar yapmıştır. Uzunluğu 18 metre, genişliği 1,2 m ve derinliği 0,9 m olan su tüneline yapılan çalışmalar $Re=13.000$ ve 35.000 değerleri arasında, $a=45^\circ$ ve 60° olan ve $f=2.2-15.4$ girdap kopma frekans aralığında deneysel analizler yapmışlardır. Yapılan çalışmaların sonucunda akış karakteristiklerini görselleştirilmiş ve farklı akış koşullarında girdap ayrılmalarının davranışları gösterilmiştir.

Gad-el-Hak ve Blackwelder (1987), tarafından test alanı 1 m genişliğe, 0,8 m yüksekliğe ve 1 m uzunluğa sahip bir rüzgâr tüneline, 25 cm veter uzunluğuna ve 60°

ok açısına sahip bir bütünleşik kanat modelinin $Re=2.500$ ile $Re=750.000$ aralığında ve 0° ile 40° arasında koşullarındaki akış karakterizasyonu ve bu kanat üzerinde enjeksiyon (üfleme) akış kontrol yöntemiyle girdap kopmalarının değişimi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Bu yöntemle hücum kenarından akışa enjekte edilen başka bir akışkanın kayma gerilmesinin önemli oranda değiştiğini göstermişlerdir (Gad-el-Hak ve Blackwelder, 1987).

Seyhan (2022), Seyhan ve ark. (2021, 2023) yapılan çalışmalarında pasif akış kontrolü uygulaması ile taşıma kuvvetinin artırılması, tutunamama hücum açısının geciktirilmesi, manevra kabiliyetine artırılmasını ve aerodinamik özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik balina yüzgecinden esinlenerek değişik kanat geometrileri deneysel olarak araştırmışlardır.

Payne ve ark. (1988), tarafından yapılan çalışmada 70° , 75° , 80° ve 85° ok açılara, 406 mm veter uzunluğuna ve 6,4 mm kalınlığa sahip bütünleşik kanatlar üzerinde $Re=85.000$ Reynolds sayısına sahip yavaş rüzgâr hızlarında (3 m/s) duman ve lazer ışını levhası yöntemi ile 30° hücum açılarındaki davranışları incelenmiştir. Bu deneyler sonucunda elde edilen girdap kopma noktaları birbirleriyle kıyaslanmıştır. İncelenen bütünleşik kanatlar için baloncuk modu ve spiral mod olmak üzere iki girdap kopması tipi tespit etmişlerdir.

Lowson ve Riley (1995), tarafından yapılan çalışmada birbirlerinden 10° ile 40° aralığında farklı hücum açılara, 65° ile 85° aralığında ok açılara, $Re=9.800$ ile $Re=1.400.000$ aralığında Reynolds sayılarına sahip bütünleşik kanat çalışmalarını derleyerek, girdap kopma noktalarını karşılaştırmıştır. Bu şekilde farklı kanat özelliklerine sahip 14 bütünleşik kanat konfigürasyonunun girdap kopma noktalarına etkileri araştırılmıştır.

Özgören ve ark. (2022), çalışmalarında yüksek hücum açılarındaki bir bütünleşik kanadın hücum kenarında oluşan girdap yapısını lazerli yüksek çekim yoğunluklu PIV (parçacık görüntülemeli hız ölçüm) tekniği ile görüntülemişlerdir. Düşük hücum açılarındaki küçük ölçekli vortisite gözlemlenmesi mümkündür. Bunların tamamı küçük ölçekli yoğunlukta azimut girdapları oluşturmaktadır. Ardından aniden kanadın ayrılma kenarının alt akış bölgesinde, en dış girdap katmanlarında büyük ölçekli konsantrasyonlar oluşmaktadır. Yeterli derecede yüksek hücum açılara gelindiğinde ise içteki ikincil girdap katmanlarından girdap dökülmesi meydana gelmektedir.

Qin ve ark. (2004), yaptıkları çalışmada Kaynaştırılmış Kanat Gövde bir uçak geometrisinin yüksek kalite RANS çözücüsü ile hesaplamalı akışkanlar dinamiği

çözümlerini oluşturmuşlardır. Oluşturulan tasarım 80 metre kanat açıklığına, 50,8 m veter uzunluğuna, $63,8^\circ$ ok açısına, $AR=4,26$ kanat açıklığı/veter oranı ve $S=3079 \text{ m}^2$ kanat alanına sahip bir uçak tasarlamıştır. Uçuş koşulları ise $M=0.85$ Mach sayısı, $Re=5.000.000$ Reynolds sayısı ve 11.500 metre irtifada uçmakta olduğu kabul edilmektedir. Yapılan analizler sonucunda L/D (taşıma/sürüklenme) oranının normal bir uçağa göre %20 daha fazla olduğu görülmüştür.

Farnsworth ve ark. (2008), hayalet vatoz şeklinde İHA'nın aerodinamik performansı üzerindeki sentetik jetler ve sabit üfleme jetleri aracılığıyla aktif akış kontrolünün etkinliğini, bir rüzgâr tüneline PIV ölçümleri ile deneysel olarak araştırmıştır. Çalışma veter uzunluğu 25 cm, kanat açıklığı 38 cm, ok açısı 50° olan hayalet vatozdan esinlenen benzeri modelin Reynolds sayısının 185.000 değerinde gerçekleştirilmiştir.

Luo ve ark. (2019), manta vatozlarının görünümünden esinlenerek biyomimetik bir sualtı aracının hidrodinamik yapı şekli oluşturmuş ve manta vatozunun taşıma-sürüklenme oranlı süzülme itiş gücünü taklit etmek için, CST parametrelendirme yöntemi ile 11 tasarım değişkenli kanat profilleri için bir optimizasyon sistemi kurmuşlardır. Su altı aracının süzülürken hidrodinamik performansını Navier-Stokes formülü ile desteklemişlerdir. Optimize edilmiş kanat profillerinin süzülme esnasında %10 daha iyi hidrodinamik performans elde ettiğini gözlemlemişlerdir.

Körbahtı (2010) tarafından yapılan çalışmada bütünleşik kanatlarda da görülen limit çevrimi titreşimleri modern aeroelastisite de önemli bir araştırma alanıdır. Bu tarz bir olay ya geometrik doğrusal olmayan ya aerodinamik doğrusal olmayan ya da her ikisinin birden sonucu olarak ortaya çıkabilir. Bu çalışmada kıvrık bütünleşik kanat profili düşük hızlı rüzgâr tüneline test edilmiştir. Bütünleşik kanat modelinin maruz kaldığı doğrusal olmayan limit çevrimi titreşimlerine, hücum açısının etkileri ses altı hızlarda araştırılmıştır. Hava hızının ve hücum açılarının çeşitli kombinasyonlarında, bütünleşik kanadın limit çevrimi titreşimlerinin etkisinde olduğu görülmüştür. Ardından yapılan deneyler de Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçme Metodu (Particle Image Velocimetry – PIV) tekniği kullanılarak bütünleşik kanadın arkasındaki iz bölgesini (wake) gözlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümlerin mod şekilleri ve vektör alanları grafikler üzerinde gösterilmiştir.

Saha ve Majumdar (2012), tarafından yapılan çalışmada, 65° ok açısına sahip bir bütünleşik kanat modelinin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizlerini Ansys Fluent programı ile yapmışlardır. Analizler RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes /

Reynolds ortalamalı Navier Stokes) yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Daha sonra bu sonuçlar, 0,6 m genişliğe, 0,6 m yüksekliğe ve 1,2 m uzunluğa sahip bir rüzgâr tüneline yapılan aerodinamik ve akış görüntüleme test sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. SST k- ω türbülans modelinin RANS HAD çözücüsü ile bütünleşik kanat üzerindeki girdap kopmalarını iyi mertebede tespit edebildiği ve akış yapısını kabul edilebilir seviyede doğru yansıttığı görülmüştür.

Kashitani ve ark. (2015) yaptığı çalışmada, NACA 0012 kanat modeli, geniş bir kanat geri çekikliği (eğikliği), washout (kanat burnunun aşağı burulması) ve refleks (esnek) kanat konfigürasyonlarına sahip bütünleşik gövde kanat modelinin düşük hız akışlardaki aerodinamik özelliklerinin temel verilerini kanatçık ile beraber incelemiştir. Çalışma sonucunda kanat üzerinde 8° ve 10° hücum açısında sürüklenme katsayısında düşüş gözlemlenmiştir.

Yanıktepe ve ark. (2016) tarafından yapılan çalışmada mevcut deneysel çalışma ile insansız hava aracı model olarak düşünülen X-45 tipi bütünleşik kanat modeli üzerinde oluşan yakın yüzey akış yapısı ve aerodinamik karakteristikleri, boya görüntüleme, üç boyutlu Stereoskopik Parçacık Görüntüleme Tekniği (stereo PIV) ve aerodinamik kuvvet ölçümleri kullanılarak araştırılmıştır. Anlık görüntüler ile üst görünüş düzleminde zaman ortalama akış verileri $5^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$ hücum açılarında elde edilmiştir. Bütünleşik ve Lamda tipi diğer düşük süpürme açılara sahip bütünleşik kanat modelleri ile akış yapılarını karşılaştırmak için önceki sunulan boya görüntüleri ve stereo-PIV sonuçları kullanılmıştır. Düşük hücum açılarında X-45 tipi bütünleşik kanat modeli üzerinde iyi tanımlanmış ön uç yanal girdaplar bütünleşik ve lamda modellerine benzer kanat yüzeyinde oluşmaktadır. X-45 tipi bütünleşik kanat modelinde ölü akış yapısı $\alpha = 32^\circ$ de oluşmaktayken basit bütünleşik kanat ve lamda modellerinde daha düşük hücum açılarında meydana gelmektedir.

Wang ve ark. (2016), yaptığı çalışmada, biyomimetik manta vatoz görünümlü su altı planörünün hidrodinamik performansını incelemiştir. Ticari CFX yazılımı aracılığıyla yapılan analizlerde net taşıma kuvveti ve ağırlık merkezi konumunun değiştirilmesi ile hücum açısının azaldığını ve hayalet kanat modellerinin geleneksel sualtı kanat modellerine göre %200 daha verimli olduğunu gözlemlemiştir.

Panagiotou ve ark. (2017), yaptıkları çalışmalarında BWB geometrisine sahip bir uçağın farklı konseptlerde tasarlandıklarında verimliliklerinin hesaplamasını ve birbirleriyle kıyaslanmasını konu almışlardır. Üç farklı konsept tasarımının yanında kanat profillerinin seçimi, gövde uzunlukları gibi parametrelerin ayrı ayrı HAD ile verimlilik

hesabını yaparak seçilecek boyutlandırmanın üzerine çalışmışlardır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözümlerini Ansys kullanılarak yapılmıştır. Her bir tasarım için 6.000.000 düğüm oluşturulmuş ve analizleri yapılmıştır. Üç konsept tasarım arasından BWB en verimli taşıma/sürüklenme oranına sahip olan uçak olarak belirlenmiştir.

Kaparos ve ark. (2018) tarafından yapılan çalışmada DBD PA (Dielektrik bariyer deşarj plazma aktivatör) aktif akış kontrol yöntemi kullanarak BWB tipinde bir uçağın deneysel davranışını incelemişlerdir. İki farklı senaryo incelenmiştir: Bunlardan birincisi aktivatörü hücum kenarı boyunca yerleştirilerek akış ayrılmasını ve stol durumlarını incelemek, ikincisi ise aktivatörü ana veter boyunca yerleştirip hücum kenarındaki girdapları düzenleyerek girdap kırılmasını kontrol etmek ve taşıma kuvvetinin artışını gözlemlemektir. Bu deneysel verileri gözlemlemek için duman testleri, lazer levhası yöntemi ile PIV uygulanmıştır. Hız ölçümlerini ise üç boyutlu lazer doppler anemometresi kullanılmıştır. Reynolds sayıları ise ana veter üzerinde 250.000 iken kanat uçlarında 140.000 olarak seçilmiştir. Hücum açısının $2,5^\circ$ değeri taşıma katsayısının bu yöntemlerle %5 arttığı gözlemlenmiştir.

Jenkins ve Yao (2019) tarafından yürütülen çalışmada, gövde-kanat şeklinde bir efsane uçak geometrisinin NASA Langley Araştırma Merkezi 4,27 m-6,71 m düşük hız ses altı rüzgâr tüneline PIV yöntemi ile deneysel karakteristikleri incelemişlerdir. Hücum açısının 5° değerinde $Re=2.400.000$ Reynolds sayısında deneyler yapılarak PIV akış vektörleri görüntülenmiş ve akış ayrılması noktaları belirlenmiştir. Karşılaştırmalı deneyler sonucunda sistem güncellemeleri yapılarak test verimlilikleri artırılmıştır. Ayrıca çözümler Hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile desteklenerek deneysel verilerle uyumluluğu gösterilmiştir. Yapılandırılmamış iyi bir çözüm ağı oluşturulmuş, NASA FUN3D çözücüsü ile RANS kullanılarak elde edilen HAD sonuçlarının oldukça iyi seviyede sonuçlar verdiği anlaşılmıştır.

Omidvarnia ve Sarhadi (2024) tarafından yürütülen çalışma, biyomimetik ilkelerin rüzgâr enerjisinde uygulanmasını araştırmaktadır. Sürdürülebilir ve yenilenebilir çözümleri öne çıkaran çalışma, yaprakların yapıları ve kambur balinaların kanatları gibi doğa olaylarından ilham alan tasarımların rüzgâr türbini performansını nasıl artırdığını incelemektedir. Çalışmadaki biyomimetik tasarımlar, hava akışını optimize ederek ve sürtünmeyi azaltarak verimliliği artırmakla beraber gürültüyü ve görsel rahatsızlıkları azaltarak çevresel etkileri de minimize etmiştir. Çalışmadan çıkan bulgulara göre, rüzgâr enerjisi teknolojisinin geliştiği vurgulanmakta ve sürdürülebilir enerji uygulamalarını teşvik etme üzerine doğadan ilham alan yeniliklerin potansiyelinin önemini ön plana

çıkarmaktadır. İnceleme sonucunda, Kambur balina yumruları ve baykuş kanadı gibi tasarımlardan yararlanan biyomimetik yapıların aerodinamik performansı arttırdığı gözlemlenmiştir. Yapılan çalışma, sürdürülebilir rüzgâr enerjisi çözümlerinde ve hizmet dışı bırakılan türbinlerin geri dönüşümünde biyomimetik uygulamaların daha fazla araştırılması gerektiğini vurgulamaktadır.

2.5. Bütünleşik Kanatların Akış ve Yapısal Analizleri

Bütünleşik kanat tasarımları, taşıma ve sürüklenme kuvvetlerinin optimize edilmesi amacıyla çeşitli akış ve yapısal analizler gerektirir. Bütünleşik kanat modelleri üzerinde su ve rüzgâr tüneline gerçekleştirildikleri deneylerde, akış karakteristiklerini ve girdap kopma davranışlarını incelemiştirler [29-30]. Farklı ok açlarına sahip bütünleşik kanatlar üzerinde yaptıkları deneylerde, girdap kopma noktalarını belirlemiştirler. Bu çalışmalar, bütünleşik kanat tasarımlarının aerodinamik performansını ve akış kontrolü üzerindeki etkilerini anlamak için önemli veriler sunmaktadır (Payne, Ng, Nelson, & Schiff, 1988).

Yüksek hücum açlarındaki bir bütünleşik kanadın hücum kenarında oluşan girdap yapısını PIV tekniği ile görüntülemiştirler. Kaynaştırılmış Kanat Gövde bir uçak geometrisinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözümlerini oluşturarak, bu tasarımın normal uçaklara göre %20 daha yüksek taşıma/sürüklenme oranına sahip olduğunu göstermiştir. Hayalet vatoz şeklinde İHA'nın aerodinamik performansını sentetik jetler ve sabit üfleme jetleri ile aktif akış kontrolü kullanarak deneysel olarak araştırmışlardır (Qin ve ark, 2004; Özgören, Şahin, & Rockwell, 2002; Farnsworth, Vaccaro, & Amitay, 2008).

2.6 Deneysel ve Hesaplamalı Çalışmalar

Bütünleşik kanat tasarımlarının etkinliği, deneysel ve hesaplamalı çalışmalar ile değerlendirilmektedir. Kıvrık bütünleşik kanat profilinin düşük hızlı rüzgâr tüneline test edilerek doğrusal olmayan limit çevrimi titreşimlerine olan etkilerini araştırmıştır (Körbahtı, 2010). Saha ve Majumdar (2012), 65° ok açısına sahip bir bütünleşik kanat modelinin HAD analizlerini gerçekleştirerek, bu modelin akış yapısını ve girdap kopmalarını değerlendirmiştir [37]. Kashitani ve ark. (2015), kanatçıklarla beraber geniş bir kanat geri çekikliği (eğikliği), washout (kanat burnunun aşağı burulması) ve refleks (esnek) kanat konfigürasyonlarına sahip bütünleşik gövde kanat modelinin düşük hız akışlardaki aerodinamik özelliklerini incelemiştirler.

X-45 tipi bütünleşik kanat modeli üzerinde boya görüntüleme, stereo PIV ve aerodinamik kuvvet ölçümleri kullanarak yakın yüzey akış yapısı ve aerodinamik karakteristikleri araştırılmıştır (Yanıktepe, Özalp, & Canpolat, 2016). Biyomimetik manta vatoz görünümlü su altı planörünün hidrodinamik performansını incelemiş ve hayalet kanat modellerinin geleneksel sualtı kanat modellerine göre %200 daha verimli olduğunu gözlemlenmiştir (Wang, Yu, & Zhang, 2016).

BWB geometrisine sahip bir uçağın farklı konseptlerde tasarlandığında verimliliklerini hesaplamış ve en verimli taşıma/sürüklenme oranına sahip uçak olarak BWB tasarımını belirlenmiştir (Panagiotou, Fotiadis-Karras, & Yakinthos, 2018). DBD PA aktif akış kontrol yöntemi kullanarak BWB tipinde bir uçağın deneysel davranışı incelenmiştir (Kaparos ve ark., 2018). NASA Langley Araştırma Merkezi'nde düşük hız ses altı rüzgâr tüneline gövde-kanat geometrisinin deneysel karakteristiklerini incelemiş ve HAD çözümleri ile desteklemişlerdir.

Omidvarnia ve Sarhadi (2024) tarafından yürütülen çalışma, biyomimetik ilkelerin rüzgâr enerjisinde uygulanmasını araştırmış ve bu tasarımların rüzgâr türbini performansını artırma potansiyelini ortaya koymuştur. Bu çalışma, biyomimetik yapıların aerodinamik performansını artırarak sürdürülebilir rüzgâr enerjisi çözümlerine katkı sağlamaktadır.

2.7 Literatür Özeti ve Tez Çalışmasının Katkıları

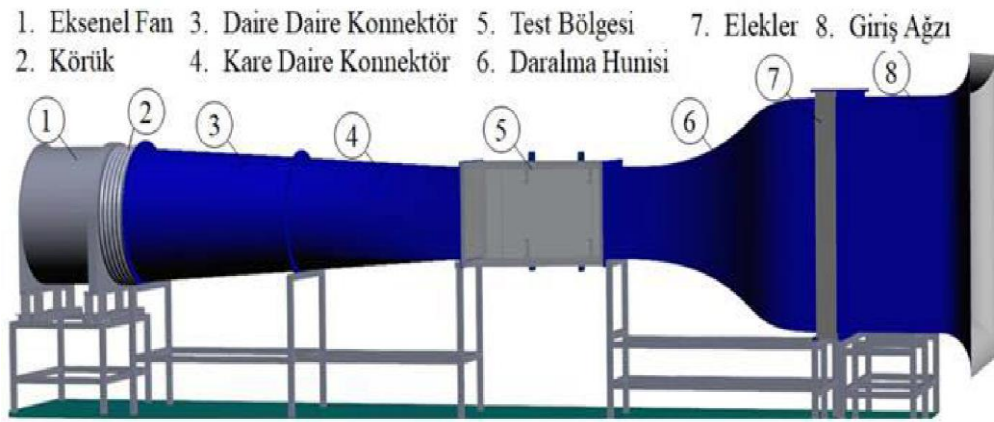
Bu literatür taraması, biyomimetik ve bütünleşik kanat tasarımlarının insansız hava araçları ve diğer mühendislik uygulamalarında sağladığı faydaları ve performans iyileştirmelerini kapsamlı bir şekilde ele almıştır. Mevcut çalışmalar, biyomimetik tasarımların aerodinamik performansı artırma potansiyelini ve bu alandaki yenilikçi çözümleri ortaya koymaktadır. Ancak, hayalet vatozdan esinlenen kanat tasarımlarının havadaki performansını inceleyen çalışmalar sınırlıdır. Bu tez çalışması, bu eksikliği gidermeyi ve bütünleşik kanat tasarımının aerodinamik performansını deneysel olarak analiz ederek literatüre ve tasarımcılara katkı sağlamayı hedeflemektedir. Bu bağlamda, tez çalışması bilimsel önemi, orijinal ve yenilikçi yaklaşımı ile mevcut literatürdeki boşluğu doldurmak ve bu alandaki sorunlara çözüm sunma potansiyeline dayanmaktadır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu araştırma kapsamında, hayalet vatoz balığının anatomisinden esinlenilerek tasarlanmış bütünleşik kanatlı bir modelin aerodinamik özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Araştırmanın odak noktası, bu modelin taşıma ve sürüklenme özelliklerinin anlaşılması ve değerlendirilmesidir.

3.1. Deney Dış Ortamı Seçimi ve Özellikleri

Aerodinamik analizler emmeli tip rüzgâr tüneli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Söz konusu tünel, aksenal fan, köruk, konnektörler, test bölgesi, daralma hunisi ve giriş ağzından oluşan bir yapıya sahiptir. Rüzgâr tüneli şeması ve ekipmanları Şekil 1 ve 2’de görüldüğü gibidir. Yüzey yağ ve duman tel akış görüntüleme yöntemleri, yüzey basınç ve kuvvet ölçümleri deneyleri rüzgâr tüneli altyapısı gereğince uygundur. Deneyler, bu rüzgâr tünelinin imkanlarından faydalanarak yüzey yağ deneyleri görselleri ve kuvvet ölçümleri olarak gerçekleştirilmiş olup, bütünleşik kanatlı modelin performansını değerlendirmede temel verileri elde etmede kullanılmıştır.



Şekil 1. Emmeli tip rüzgâr tünelinin 3D şematik hali (Seyhan ark. 2021)

Kuvvet ölçüm senserü; F_x, y 32 N; F_z 100 N; ve T_x, y ve z 2,5 N/m ölçüm aralıklarına sahip altı bileşenli bir ATI Gamma SI-32-2,5 model yük hücresi kullanılmıştır. National Instruments (NI) PCIe-6320 veri toplama (DAQ) kartı ile 20 saniye boyunca yirmi bin kuvvet verisi toplanmıştır. Ölçüm yapılan Reynolds sayıları Carmichael (1981) ve Lissaman (1983)’nın çalışmalarında belirtmiş oldukları kritik Reynolds sayılarına göre belirlenmiştir. Carmichael (1981), $3.0 \times 10^4 - 2.0 \times 10^5$ aralığında yer alan 3.0×10^4 , 5.0×10^4 , 7.0×10^4 ve 2.0×10^5 Reynolds sayıları, uçak kanadı etrafındaki akış için laminar ayrılma

kabarcığının oluşması ve yapısı bakımından kritik Reynolds sayıları olarak belirtmiştir. Diğer yandan Lissaman (1993) kritik Reynolds sayılarının 5.0×10^4 , 7.0×10^4 ve 1.0×10^5 olduğunu ifade edilmiştir. Buna göre 5.0×10^4 , 7.0×10^4 ve 1.0×10^5 Reynolds sayıları uçak kanadı modelleri için geçiş akış yapılarını içeren kritik Reynolds sayısı aralıkları olduğu için bu bölgelerdeki değişimleri ortaya koyabilmek Seyhan (2022)'de incelemiştir. Bu tez projesi çalışmasında Reynolds sayısının $Re=50.000$, 70000 ve 150.000 değerlerindeki değişimleri incelenmiştir.



Şekil 2. Necmettin Erbakan Üniversitesi emmeli tip rüzgâr tüneli görselleri

Çizelge 1'de Karadeniz Teknik üniversitesindeki Rüzgâr Tünelinin teknik özellikleri belirtilmiştir.

Çizelge 1. Rüzgâr tüneli genel özellikleri (Seyhan ark., 2021b)

Açıklama	Boyutlar
Test bölgesi kesiti	57x57x120 cm
Türbülans şiddeti	0,5%
Genişleme açısı	0,3°
Maksimum Hız	50 m/s
Daralma oranı	6,1
Toplam uzunluk	10,6 m

3.2. Model Tasarım ve Üretimi

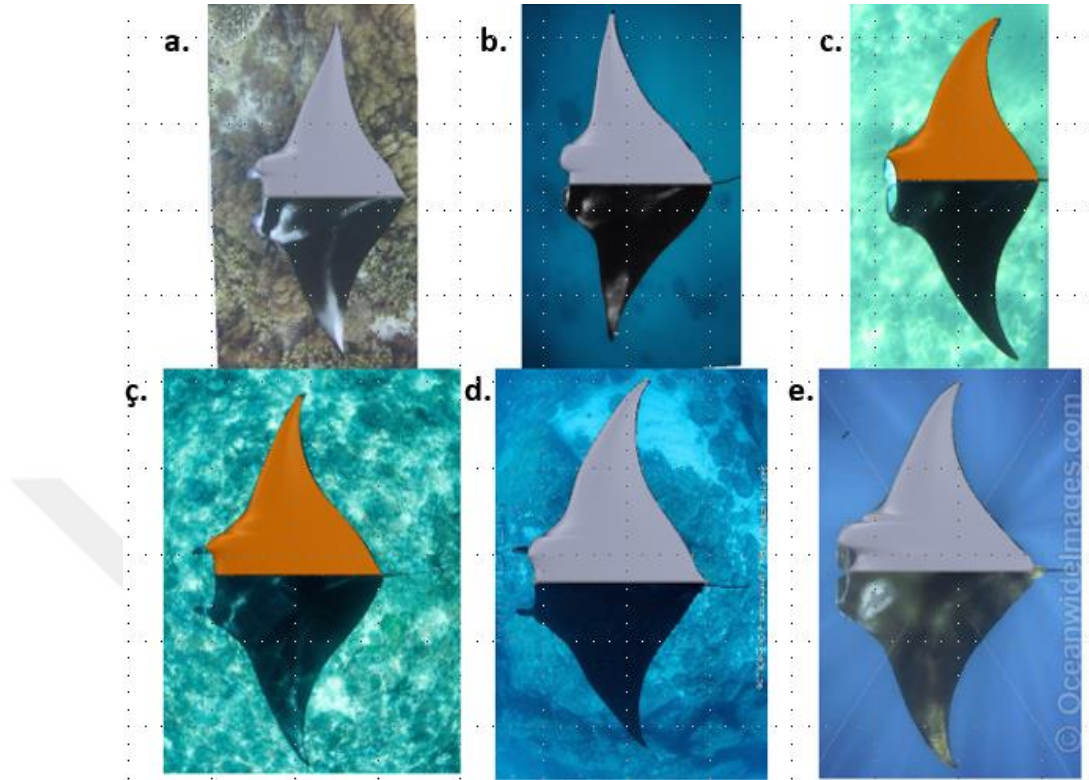
Kanat modelleri, Şekil 3’de CCH teknoloji marka MY Z35 üç boyutlu yazıcı kullanılarak üretilmiştir.



Şekil 3. MY Z35 model 3D yazıcı (Seyhan ve ark., 2021b)

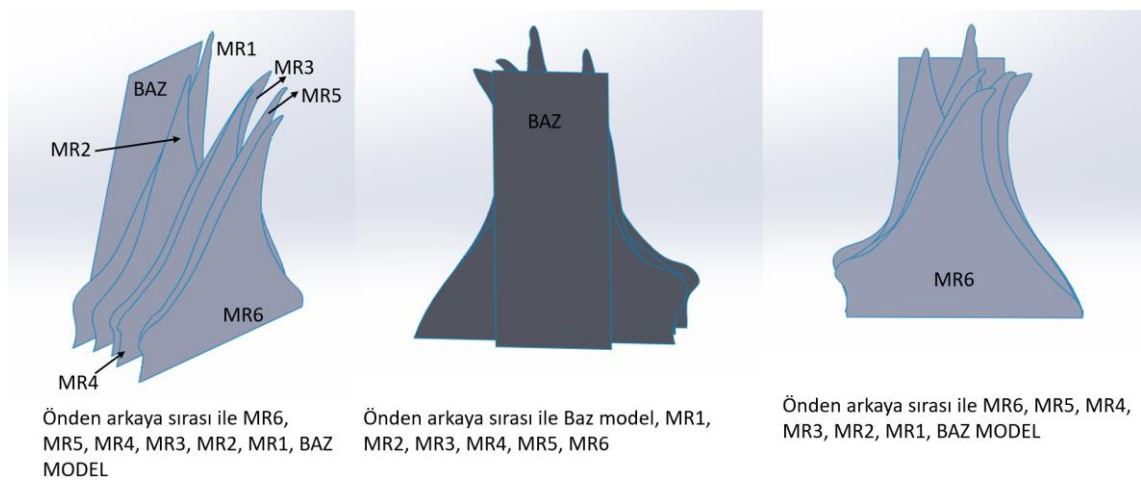
Yazıcı baskı hacmi 20 cm x 20 cm x 35 cm aralığındadır. Solidworks programı kullanılarak tasarlanan modeller, “Simplify dilimleme” programı aracılığıyla gerekli üretim dosyalarına dönüştürülmüştür. PLA filamentleri kullanılarak model baskıları gerçekleştirilmiş ve bu basılmış parçalar daha sonra ahşap tamir macunu ile düzeltilip zımparalanarak yüzey düzgünlüğü sağlanmıştır. Yüzey düzgünlüğü sağlandıktan sonra yüzey yağ akış görüntüleme yöntemi ile daha iyi görüntü elde etmek amacıyla kanatlar sprej boya ile mat siyaha boyanmıştır.

Tezde kullanılan hayalet vatoz görsellerinin üstten görünümü ve görünüme uygun model tasarımları Şekil 4’de verilmiştir.



Şekil 4. Tezde kullanılan hayalet vatoz görsellerinin üstten görünümü ve görünüme uygun model tasarımları

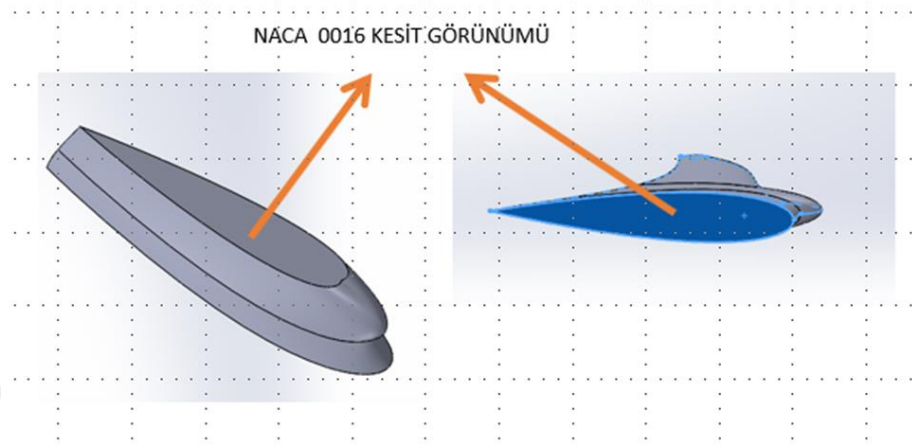
Şekil 5’de ise tasarlanan ve imaları yapılan baz model (NACA0016) ve altı farklı hayalet vatoz balığının yarı geometri olarak tasarlanan modelleri gösterilmiştir.



Şekil 5. Kanat modellerinin farklılıklarını belirten 2D görselleri

Tezde kullanılan hayalet vatozlarının üstten görüntüsü referans alınarak 6 farklı kanat modeli tasarlanmıştır. Şekil 4’te tasarlanan farklı kanat modellerini göstermektedir.

Tasarlanan modellerde Şekil 6'te gösterildiği gibi NACA 0016 modeli tercih edilip kanadın dikey ekseninde alınan her kesitinde NACA 0016 kanat geometrisinin oluşturulması planlanmış buna göre model çizimi yapılmıştır. Rüzgâr tüneli yapısı gereği ölçümler için modeller yapım model olarak üretilerek testlerde kullanılmıştır.



Şekil 6. Solidworks Programında çizilen kanat modellerinin ara kesitlerinin görünümü

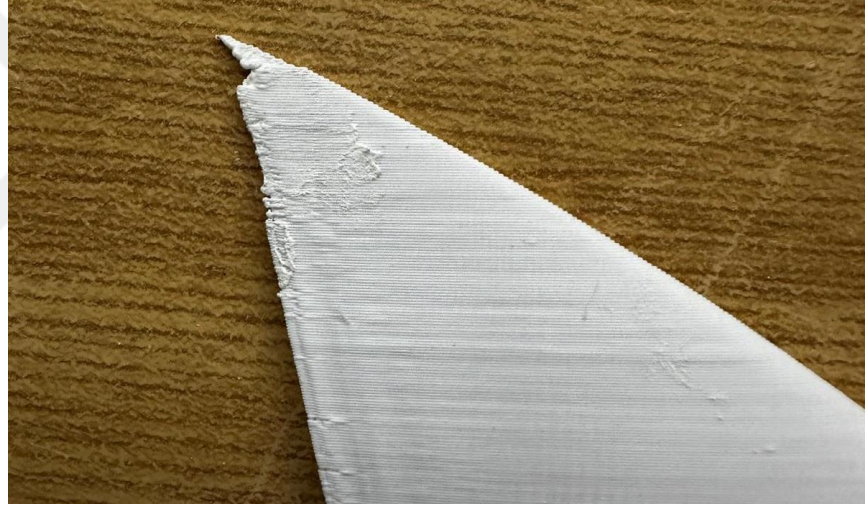
Şekil 7'de iki parça halinde üretilen kanat modeli gösterilmektedir. Üretilen bu modeller bir pim yardımı ile birleşmektedir. Şekil 8'de pim yuvaları gösterilmiştir.



Şekil 7. MY Z35 üç boyutlu yazıcı ile üretilen PLA baskı kanat modeli

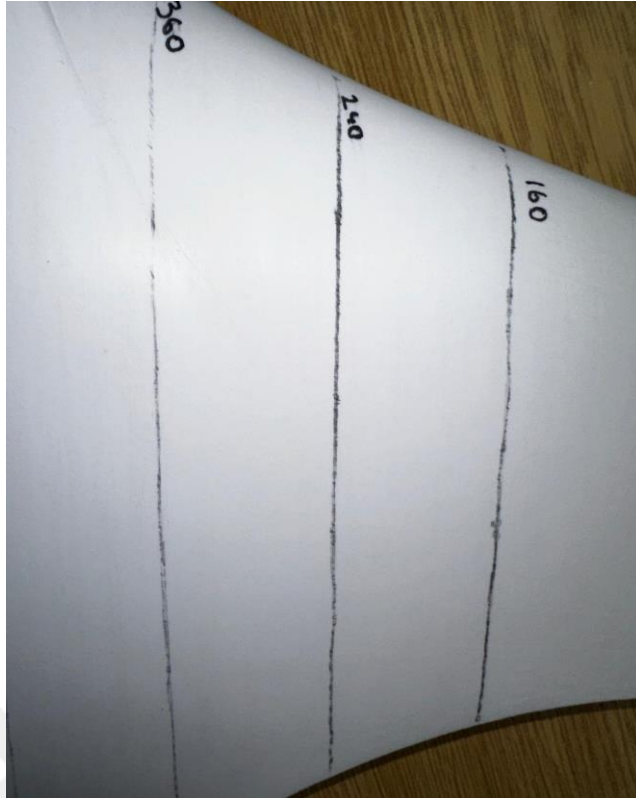


Şekil 8. İki parça olarak üretilen kanat modellerinin birleştiği bölgenin yapısının görseli.



Şekil 9. Deforme olmuş bölgenin macun ile kaplandıktan sonra kurumaya bırakılmasının görseli

Baskıdan çıkan kanat modellerinin uç kısımları inceliği ve sivriliği bakımından yazıcının lüle ucunun kalınlığının yetersizliğinden ötürü deforme olmuş veya istenilen formda üretilmemiştir. İstenilen hassasiyette üretilmeyen bölgeler şekil 9'de gösterilmiştir. Deforme olan bölgeler macun ile kaplanmış ve kurumaya bırakılmıştır. Macun kurduktan sonra kanat modellerinin tamamı kademeli olarak zımparalanmıştır. Şekil 10'da zımparaların katmanları gösterilmiştir.

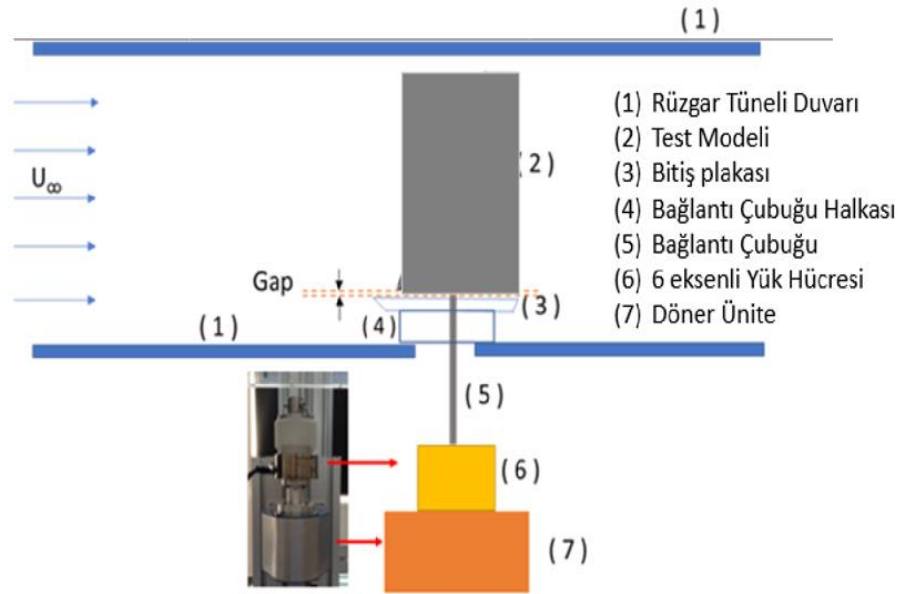


Şekil 10. Kurumuş macun sonrası vurulan zımpara numaraları ve aşamaları.

Sonuç olarak, bu araştırma bütünleşik kanatlı modelin aerodinamik özelliklerini derinlemesine incelemeyi amaçlamaktadır. Yapılacak deneyler ve analizler, havacılık ve mühendislik alanlarında benzer tasarımların geliştirilmesine yönelik önemli veriler sunabilir.

3.3. Kuvvet Ölçümü Deneyi Yapılışı ve Parametreleri

Kuvvet ölçümleri, deney düzeneğinde yer alan 6 eksenli yük hücresi ve veri toplama kartı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler, taşıma ve sürüklenme kuvveti değerlerini elde etmek ve bunun sonucunda taşıma (C_L) ve sürüklenme (C_D) katsayılarını hesaplamak amacıyla kullanılacaktır. Kuvvet ölçüm deney düzeneği görseli Şekil 11a'da şeması Şekil 11b'de gösterilmiştir. Kuvvet ölçüm sistemi yük hücresi ölçüm sistemi, hücum açısı ayarlama ünitesi, deney modeli ve bağlantı çubuklarından meydana gelmektedir. Yük hücresi ölçüm sistemi ise yük hücresi, veri toplama kartı ve yükselticilerden oluşmaktadır. Hücum açısının belirlenmesinde bilgisayar destekli yüksek hassasiyetli döndürme sistemi kullanılmıştır.



Şekil 11. (a) Emmeli tip rüzgâr tüneli test bölgesi ve kuvvet ölçüm sistemi ve (b) kuvvet ölçüm Deney düzeneğinin şematik gösterimi

Taşıma katsayısı, bir kanat profili veya başka herhangi bir aerodinamik gövde tarafından üretilen taşıma kuvvetini ölçen boyutsuz bir katsayıdır. Aerodinamikte çok önemli bir parametredir ve taşıma kuvvetinin, akışkanın dinamik basıncının, akışkanın yoğunluğunun ve kanat profilinin referans alanının çarpımına oranı olarak tanımlanır (Healey & Wang, 2021). Taşıma katsayısı, hücum açısı, kanat profili şekli ve uçak hızı gibi çeşitli faktörlerden etkilenebilir. Parçacık deformasyonunun olmadığı durumlarda taşıma katsayısı, deformasyon etkileri için bir modifikasyon faktörü ile çarpılarak değiştirilebilir (Essa, 2012).

Öte yandan sürüklenme katsayısı, bir sıvı içinde hareket eden bir nesnenin yaşadığı sürüklenmeyi veya direnci karakterize eden başka bir boyutsuz niceliktir. Sürüklenme kuvvetinin akışkan hızından oluşan dinamik basınç ve nesnenin referans alanının çarpımına oranı olarak tanımlanır. Direnç katsayısı nesnenin şekli, yüzey pürüzlülüğü ve akış koşulları gibi faktörlerden etkilenir. Çalışmalar, akış alanının hem doğrusal hem de doğrusal olmayan katkıları dikkate alınarak, momentumun korunumu uygulanarak direnç katsayısının hesaplanabileceğini göstermiştir (Cantó, Raga, Esquivel, & Sánchez-Salcedo, 2011).

Taşıma kuvveti, bir sıvı içinde hareket eden bir nesnenin bağıl hareketine dik olarak etki eden aerodinamik kuvveti temsil eder. Nesnenin üstündeki ve altındaki basınç farklılıklarının bir sonucu olarak oluşturulur ve Taşıma kuvveti oluşturulur. Taşıma kuvveti, uçağın uçuş özelliklerini ve kanat profillerinin performansını belirlemede çok

önemli bir bileşendir. Taşıma kuvveti, nesnenin şekli, hücum açısı, hava hızı ve hava yoğunluğu gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Bazı durumlarda taşıma kuvveti Reynolds sayılarından da etkilenebilir (Ghenaiet, 2012).

Tersine, sürüklenme kuvveti, bir sıvı içinde akış yönünde hareket eden bir nesnenin maruz kaldığı direnç kuvvetidir. Nesne ile akışkan molekülleri arasındaki etkileşimden kaynaklanır ve nesnenin şekli, yüzey pürüzlülüğü, akış koşulları gibi faktörlerden etkilenir. Sürtünme kuvveti, akışkan akışından kaynaklanan vücut kuvvetlerinin fiziksel tanımına dayalı olarak hesaplanabilir; sürüklenme kuvveti, serbest akış hızının karesi, akışkanın yoğunluğu ve sürüklenme katsayısı ile orantılıdır (Alexandersen, 2022).

Havanın yoğunluğu, havanın aerodinamik de dahil olmak üzere çeşitli uygulamalardaki davranışını etkileyen temel bir özelliğidir. Havanın yoğunluğu birim hacim başına hava kütlesi olarak tanımlanır ve sıcaklık, basınç ve nem gibi faktörlerden etkilenir. Aerodinamikte, hava yoğunluğunun önemli bir parametre olduğu taşıma ve sürüklenme kuvvetlerinin hesaplanmasına yönelik formüllerde görüldüğü gibi, bir nesneye etki eden aerodinamik kuvvetlerin belirlenmesinde havanın yoğunluğu önemli bir rol oynar (Alexandersen, 2022). Havanın yoğunluğunu hem taşıma hem de sürüklenme katsayılarının hesaplanması için gerekli olan sıvının dinamik basıncının belirlenmesinde çok önemlidir.

Bir kanat profilinin üst projeksiyon alanı, iki boyutlu bir projeksiyonda yukarıdan görülen kanat profili alanıdır. Bu alan, taşıma ve sürüklenme katsayılarının hesaplanmasında referans alanı olarak kullanıldığından aerodinamikte önemlidir. Kanat profilinin üst projeksiyon alanı, kanat profili etrafındaki basınç dağılımını ve akış özelliklerini etkilediğinden, kanat profiline etki eden aerodinamik kuvvetlerin belirlenmesinde önemli bir parametredir. Üst projeksiyon alanı, belirli bir akış alanında kanat profilinin maruz kaldığı taşıma ve sürüklenme kuvvetlerini hesaplamak için taşıma ve sürüklenme katsayıları ile kullanılır.

Serbest akış hızı, içinde hareket eden bir nesnenin çok ilerisindeki akışın hızıdır. Aerodinamikte serbest akış hızı, nesne etrafındaki akış koşullarını etkilediğinden ve nesnenin maruz kaldığı aerodinamik kuvvetleri etkilediğinden kritik bir parametredir. Serbest akış hızı, nesneye etki eden taşıma ve sürüklenme kuvvetlerinin belirlenmesi için gerekli olan sıvının dinamik basıncının hesaplanmasında kullanılır. Serbest akış hızı, nesne etrafındaki akış alanı için başlangıç koşullarını belirlediğinden ve nesnenin

aerodinamik performansını doğrudan etkilediğinden aerodinamik analizlerde önemli bir faktördür.

Sistemden ölçülen taşıma ve sürüklenme kuvvet değerleri kullanılarak ile aşağıda belirtilen formüller yardımıyla taşıma katsayısı (C_L) ve sürüklenme katsayısına (C_D) ulaşılmıştır.

$$C_L = \frac{2xF_L}{\rho AU^2} \quad (1)$$

$$C_D = \frac{2xF_D}{\rho AU^2} \quad (2)$$

Burada,

C_L : Taşıma katsayısı,

C_D : Sürüklenme katsayısı,

F_L : Taşıma kuvveti (N),

F_D : Sürüklenme kuvveti (N),

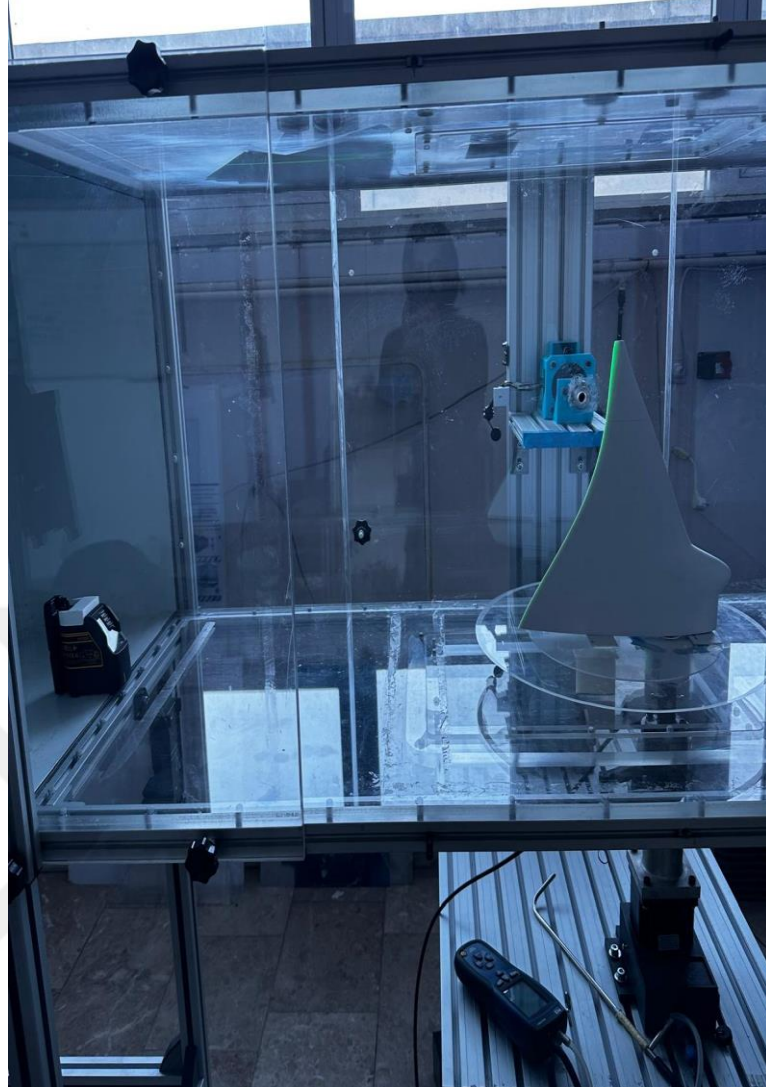
ρ : Havanın yoğunluğu (kg/m^3)

A: Kanat profilinin üst projeksiyon alanı (m^2)

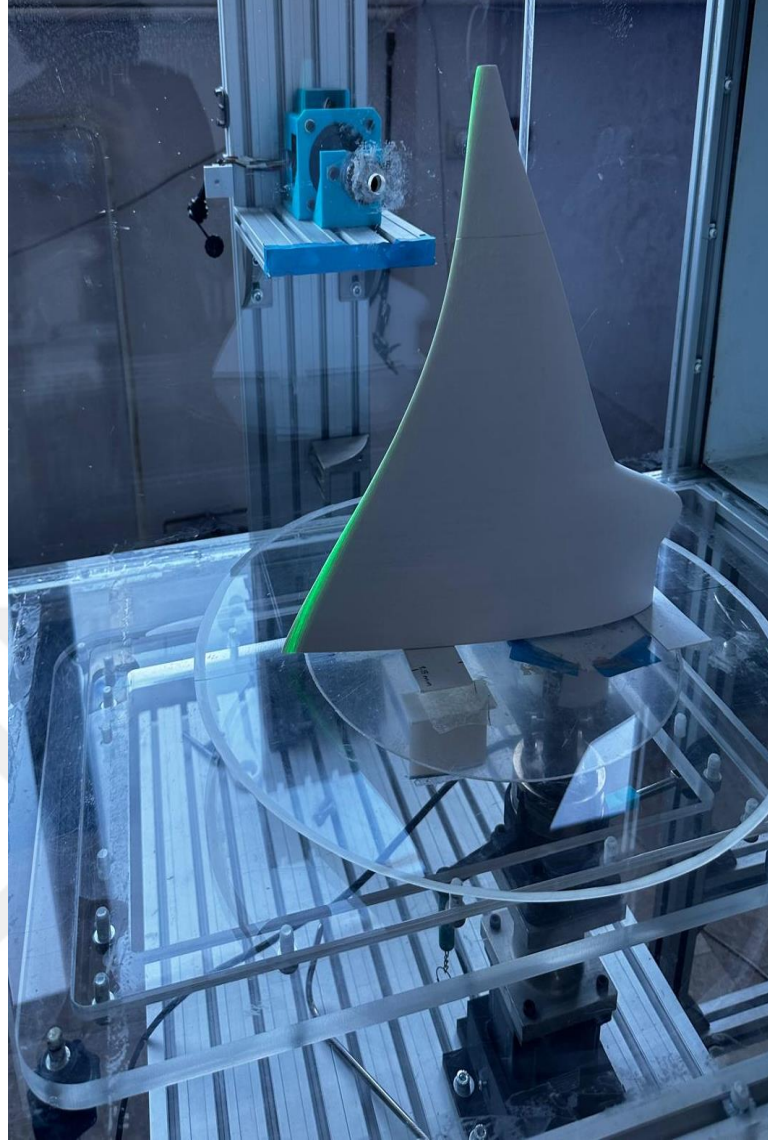
U: Serbest akım hızı (m/s)

Akış özelliklerinin değerlendirilmesinde kullanılan boyutsuz Reynolds sayısı (Re), Denklem (3)'te ifade edilen formülasyon temelinde hesaplanmıştır. Bu hesaplamada, karakteristik boyut olarak ortalama veter uzunluğu (c) referans alınarak oluşturulmuştur.

$$Re = \frac{\rho Uc}{\mu} \quad (3)$$



Şekil 12. Taşıma ve sürüklenme kuvvetleri ölçüm anı ve ölçüm doğruluğunun lazer hizalama destekli ölçüm cihazı yardımı ile gösterilmesi anı



Şekil 13. Kanat modelinin Rüzgâr tüneline görünümü

Şekil 11 ve Şekil 12’de görüldüğü üzere, lazer çizgi hizalama yardımı ile model dik ve simetrik bir pozisyona getirilip, yük hücreğine mil yardımı ile sabitlenmiş ve kuvvet ölçüm deneyine hazır hale getirilmiştir.

Ayrıca, yüzey yağ akış görüntülemesi yöntemi ile akış yapısının görselleştirilmesi sağlanmıştır. Bu deneyler, aerodinamik akış özelliklerini daha detaylı bir şekilde incelemek ve modelin performansını görsel olarak değerlendirmek amacıyla önemlidir.

Yapılan deneyler Reynolds sayısının $Re=70.000$ ve $Re=150.000$ değerlerinde Çizelge 2 ve 3’de verilen şartlar altı farklı model MR1-MR6 için iki kez (Grup 1 ve Grup 2) tekrar edilerek zaman ortalama değerleri belirlenmiştir.

Çizelge 2. Grup 1 Deney Parametreleri Çizelgesi

Grup 1		MR1	MR2	MR3	MR4	MR5	MR6
Re = 70.000	T (°C)	20	20,1	21,8	22,3	19	18
	U (m/s)	7,494	7,459	7,53	7,324	7,562	7,137
	ρ (kg/m ³)	1,19	1,2	1,193	1,191	1,202	1,209
	μ (kg/m.s)	$1,83 \times 10^{-5}$	$1,83 \times 10^{-5}$	$1,83 \times 10^{-5}$	$1,83 \times 10^{-5}$	$1,83 \times 10^{-5}$	$1,83 \times 10^{-5}$
	Fan Hızı f (Hz)	12,9	12,8	12,9	12,8	12,8	12,3
Re = 150.000	T (°C)	21	21	20,7	22,2	18,7	18
	U (m/s)	16,06	16,06	16,03	15,68	16,18	15,29
	ρ (kg/m ³)	1,196	1,196	1,197	1,191	1,206	1,209
	μ (kg/m.s)	$1,83 \times 10^{-5}$	$0,1,83 \times 10^{-5}$	$1,83 \times 10^{-5}$	$1,83 \times 10^{-5}$	$1,83 \times 10^{-5}$	$1,83 \times 10^{-5}$
	Fan Hızı f (Hz)	25,9	26	26	25,6	25,6	24,5

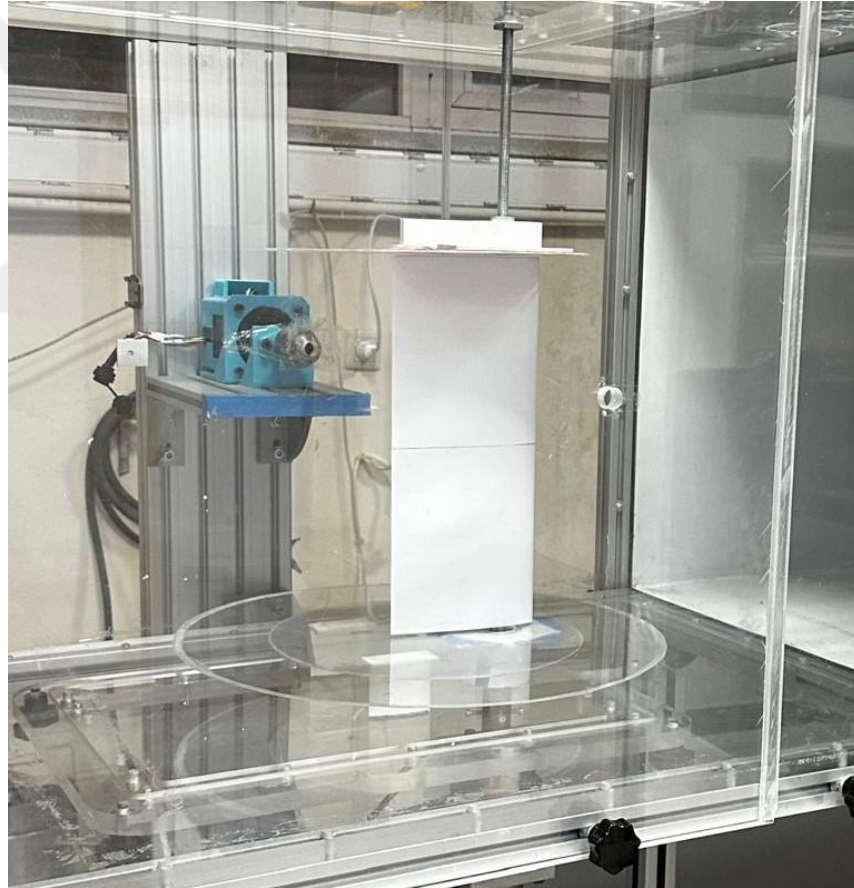
Çizelge 3. Grup 2 Deney Parametreleri Çizelgesi

Grup 2		MR1	MR2	MR3	MR4	MR5	MR6
Re = 70.000	T (°C)	17,9	17,9	19	20,1	18,8	19,5
	U (m/s)	7,356	7,356	7,409	7,228	7,553	7,202
	ρ (kg/m ³)	1,209	1,209	1,204	1,2	1,205	1,202
	μ (kg/m.s)	$1,83 \times 10^{-5}$	$1,83 \times 10^{-5}$	$1,83 \times 10^{-5}$	$1,83 \times 10^{-5}$	$1,83 \times 10^{-5}$	$1,83 \times 10^{-5}$
	Fan Hızı f (Hz)	12,6	12,6	12,7	12,5	12,8	12,2
Re = 150.000	T (°C)	17,8	17,9	19,5	20,1	18,3	19,6
	U (m/s)	15,75	15,76	15,92	15,49	16,14	15,44
	ρ (kg/m ³)	1,209	1,209	1,202	1,2	1,207	1,202
	μ (kg/m.s)	$1,83 \times 10^{-5}$	$1,83 \times 10^{-5}$	$1,83 \times 10^{-5}$	$1,83 \times 10^{-5}$	$1,83 \times 10^{-5}$	$1,83 \times 10^{-5}$
	Fan Hızı f (Hz)	25,1	25,1	25,5	25,1	25,7	24,8

Şekil 14'te verilen baz model için Re=70.000 ve Re=150.000 değerlerinde Çizelge 4'te verilen şartlarda farklı iki kez deney yapılmıştır, zaman ortalama değerleri (30 saniye) belirlenmiş ve sonuçları biyomimetik bütünleşik kanat sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4. Baz modeli Deneysel Parametreleri Çizelgesi

Baz model		Deneysel 1	Deneysel 2
Re = 70.000	T (°C)	18,5	18,4
	U (m/s)	7,383	7,378
	ρ (kg/m ³)	1,207	1,207
	μ (kg/m.s)	$1,83 \times 10^{-5}$	$1,83 \times 10^{-5}$
	Fan Hızı f (Hz)	12,6	12,7
Re = 150.000	T (°C)	18,2	18,8
	U (m/s)	15,79	15,85
	ρ (kg/m ³)	1,208	1,205
	μ (kg/m.s)	0,00001817	0,0000182
	Fan Hızı f (Hz)	25,3	25,5



Şekil 14. Rüzgâr Tüneli içerisinde deneye hazır Baz modeli

3.4. Belirsizlik Analizi

Belirsizlik analizi, deneysel ve hesaplamalı çalışmalarda ölçüm sonuçlarının doğruluğunu ve güvenilirliğini değerlendirmek için kullanılanlar. Ölçüm veya modelleme sürecinde kuvvetten, yoğunluktan serbest akım hızından ve model yüzey alanından kaynaklanan belirsizlikler neticesinde taşıma kuvveti katsayısı değerinin belirsizliği hesaplanmıştır.

$$w_{C_{L,D}} = \pm \frac{\left[\left(\frac{\partial C_{L,D}}{\partial F_{L,D}} \cdot w_{F_{L,D}} \right)^2 + \left(\frac{\partial C_{L,D}}{\partial \rho} \cdot w_{\rho} \right)^2 + \left(\frac{\partial C_{L,D}}{\partial U_{\infty}} \cdot w_{U_{\infty}} \right)^2 + \left(\frac{\partial C_{L,D}}{\partial c} \cdot w_c \right)^2 + \left(\frac{\partial C_{L,D}}{\partial s} \cdot w_s \right)^2 \right]^{1/2}}{C_{L,D}} \cdot 100. \quad (4)$$

Burada, $w_{F_{L,D}}$ ve $w_{U_{\infty}}$ sırasıyla yük hücresi ve hız ölçer pitot tübünün doğruluğudur. Yoğunluk sıcaklığa bağlı bir parametre olduğundan, w_{ρ} sıcaklık ölçüm ekipmanının doğruluğunu gösterir. w_c ve w_s sırasıyla kanat profilinin veter uzunluğu ve kanat açıklığı için boyut doğruluğunu gösterir. Kuvvet, yoğunluk, hız, kordon uzunluğu ve kanat açıklığı uzunluğu için ölçüm parametrelerinin doğruluk değerleri sırasıyla %0,001, %0,02, %0,01, %0,02, ve %0,04 olarak alınmıştır. Hem C_L hem de C_D 'deki belirsizlik $\% \pm 7,19$ olarak tahmin edilmiştir. Detaylı bilgiye Seyhan (2022) ekler kısmından ulaşılabilir.

Çizelge 5. Kullanılan ölçü aletlerinin doğruluk değerleri

W_{C_L}	Hesaplanacak taşıma katsayısı
W_F	$\pm 0,001$
W_{ρ}	$\pm 0,01$
W_u	$\pm 0,02$
W_c	$\pm 0,02$
W_s	$\pm 0,04$

Eşitlik (4) de değerler yerine konup hesaplama yapılmıştır.

$$\frac{w_{c_l}}{c_l} = \% \pm 7,19 \quad (5)$$

3.5. Yüzey Yağ Akış Görüntüleme Yöntemi, Deneyi Yapılışı ve Parametreleri

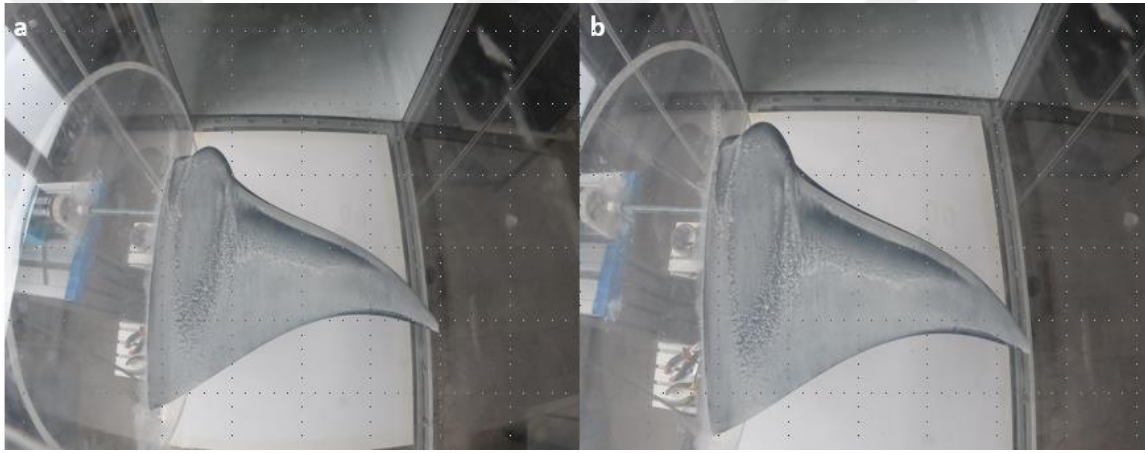
Yüzey yağ akış görüntüleme deneyleri, Reynolds sayısı (Re) değerinin 7×10^4 , $1,5 \times 10^5$ ve 2×10^5 olarak belirlendiği koşullarda gerçekleştirilmiştir. Deneylerin için, SAE 20 motor yağı, titanyum dioksit (TiO₂) ve oleik asitin 5:7:1 oranındaki karışımı kullanılmıştır. Bu oranlar, gerektiğinde değiştirilmiştir. Şekil 15'te karışımda kullanılan kimyasalların görseli paylaşılmıştır. Akış görüntülemeleri, Gopro Hero7 Black kamera aracılığıyla kaydedilmiştir. Detaylı bilgiye Seyhan (2022)'de ulaşılabilir.



Şekil 15. Yüzey yağ akış görüntülemesinde kullanılan malzemeler ve yüzey yağ akış görüntülemesi örneği (Seyhan, 2022)

Çizelge 6. Yağ ile Akış Görüntüleme Deney Parametreleri ve Modeller

Yağ Akış görselleştirme		MR2	MR3	MR6
Re = 150.000	T (°C)	18	19,2	18,1
	U (m/s)	15,77	15,89	15,29
	ρ (kg/m ³)	1,209	1,204	1,209
	μ (kg/m.s)	0,00001816	0,00001821	0,00001816
	Fan Hızı f (Hz)	25,3	25,5	24,5
Re = 200.000	T (°C)	21,4	19,6	18
	U (m/s)	21,46	21,23	20,39
	ρ (kg/m ³)	1,204	1,202	1,209
	μ (kg/m.s)	0,00001821	0,00001813	0,00001816
	Fan Hızı f (Hz)	34,1	33,6	32,2

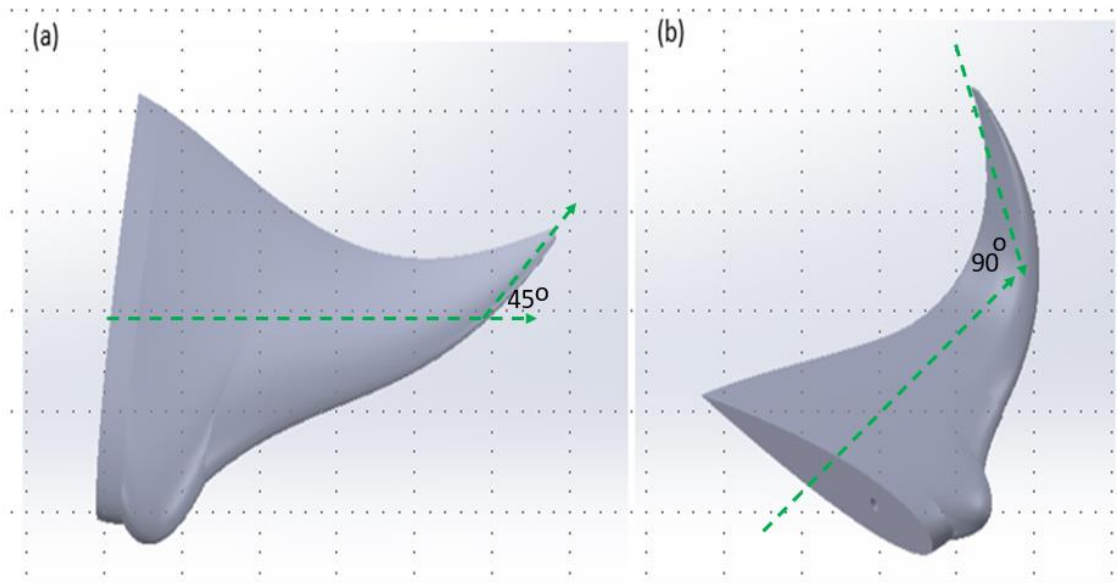


Şekil 16. Yüzeğe yağ uygulaması ile akış görüntüleme MR3-Modeli ve Re=150.000 için deney sonuçları

Şekil 16’te görülen 150.000 Reynolds değerinde MR3 modelinin değişmiş hali görülmektedir. Bu şekilde yüzey üzerindeki yağların kanat üzerindeki akışın etkilerine göre dağılımı görülmektedir.

Hayalet vatoz balığının morfolojisinden esinlenilerek tasarlanmış doğadan esinlenen bütünleşik kanatlı modelin, gövde yapısı ve kanat uçlarının kıvrık olması durumunun etkilerinin inceleneceği bir araştırmada, ilgili modelin şematik temsili Şekil 6’da sunulmuştur. Şekil 8’de görüldüğü üzere üretilecek modeller katı cisimler olacağı için, bu modellerin en az altı farklı üstten görünümü geometrik formda tasarlanarak üretilmiştir. Kanatlar esnek yapıya sahip olmayacaklarından, bu yaklaşımın kullanılmasıyla çeşitli geometrilerdeki modellerin üretilmiştir.

Biyomimetik modeller aşağıda (Şekil 16) gösterildiği gibi Solidworks Programında çizilerek oluşturulmuştur. Solidworks yazılımı kullanılarak hazırlanan kıvrık kanat modelleri, Şekil 8 ve Şekil 9'da detaylı olarak gösterilmektedir. Bu modeller, kanatların, kanatçık (winglet) benzeri bir şekilde kıvrılarak kanat ucu kıvrıklık derecesinin (Yatay yüze ile yaptığı açı) (45° , 60° , 90°) aerodinamik etkilerini analiz etmek için tasarlanmıştır. Tasarlanan modeller üretildikten sonra kıvrık kanatların hava akışı üzerindeki etkisini ve bu etkilerin taşıma/sürüklenme katsayılarına olan etkileri araştırılmıştır.

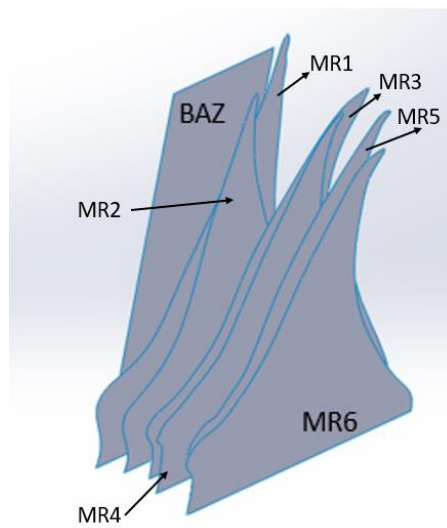
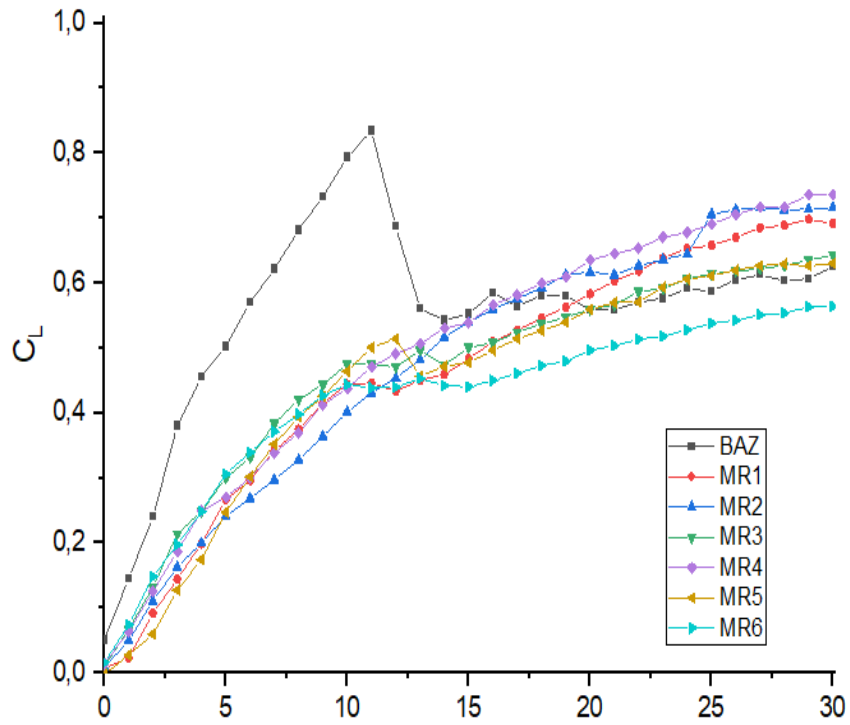


Şekil 17. Hayalet vatoz kanat modellerinin SolidWorks programında çizilmiş kıvrık model görselleri

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Taşıma / Sürüklenme Deneyi Sonuçları

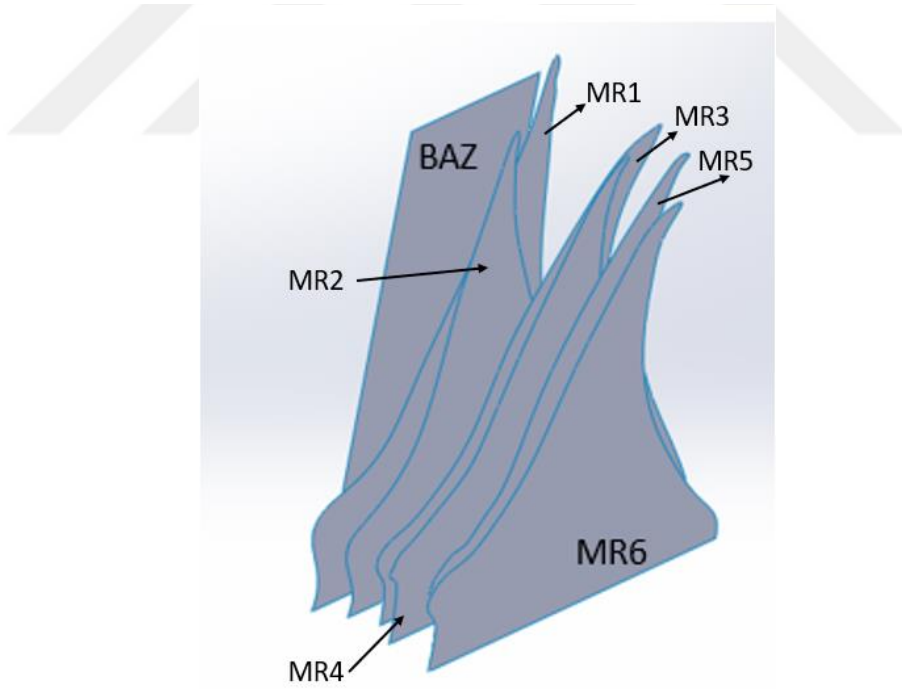
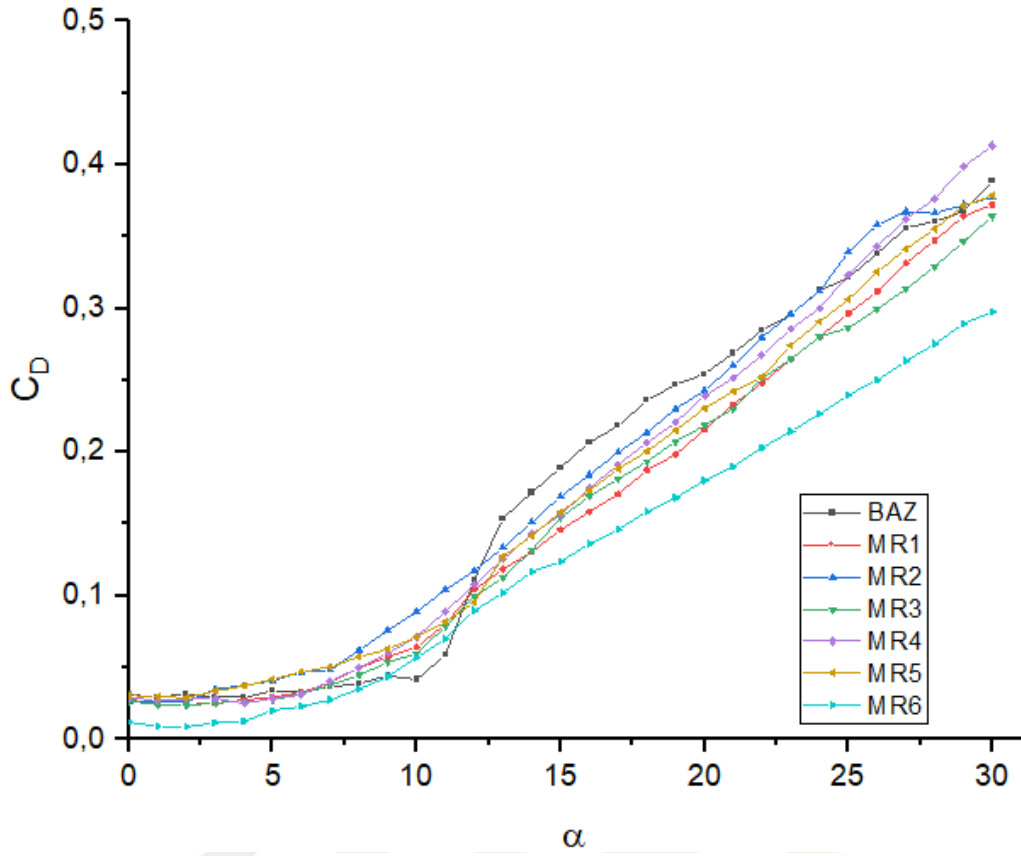
Rüzgâr tüneline tasarlanıp üretimi yapılan 7 farklı modelin $Re=70.000$ ve $Re=150.000$ için elde edilen sonuçları bu bölümde sunulmuştur. Taşıma (C_L) ve sürüklenme (C_D) katsayılarının modellere göre değişimi $Re=70.000$ için Şekil 18 ve 19'da karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 18. $Re=70.000$ için taşıma katsayılarının modellere göre hücum açısı ile değişimi

Hücum açısı $\alpha=13^\circ$ noktasında, MR1'den MR6'ya kadar olan tüm eğrilerde belirgin bir değişiklik veya kırılma gözlemlenebilir. Bu durum, stol noktasına ulaşıldığını ve taşıma katsayısının (C_L) artık artmadığını veya azalmaya başladığını gösterebilir. Stol noktasında, akış ayrılması nedeniyle taşıma katsayısında bir düşüş veya durağanlık görülebilir. MR1'den MR6'ya kadar olan eğrilerde, $\alpha =13^\circ$ hücum açısına kadar taşıma katsayısında bir artış görülebilir. Ancak, $\alpha=13^\circ$ hücum açısında Stol meydana geldiğinde, bu eğrilerde bir düşüş veya sabit bir değer gözlemlenebilir. MR1-MR6 eğrilerinin her biri farklı koşulları veya modifikasyonları temsil ettiğinden, Stol noktası sonrası davranışları da farklılık gösterebilir. "Re=70.000 C_L temel (baz model) ort" ve "Re=70.000 C_L temel (baz model) açık" eğrileri, temel referans eğrileri olarak kabul edilirse, bu eğrilerde de $\alpha=13^\circ$ hücum açısında stol noktası görülebilir. Bu eğriler, diğer MR1-MR6 eğrileriyle kıyaslandığında, stol sonrası davranışlarının karşılaştırılması için referans olarak kullanılabilir. Örneğin, temel eğrilerdeki stol noktası ve sonrasında görülen düşüş veya sabit kalma, modifikasyonların etkisini değerlendirmek için kullanılabilir. $\alpha=13^\circ$ kadar olan bölümde, tüm eğrilerde taşıma katsayısının arttığı ve stol noktasına yaklaştığı gözlemlenir. Hücum açısı $\alpha=13^\circ$ den sonra, MR1-MR6 eğrilerinde stol nedeniyle taşıma katsayısında bir düşüş veya sabit kalma beklenir. Bu noktada akış ayrılması meydana gelir ve aerodinamik performans azalır. "Re=70.000 C_L temel (baz model) ort" ve "Re=70.000 C_L temel (baz model) açık" eğrilerinde de benzer bir düşüş veya durağanlık görülebilir, bu da modifikasyonların stol sonrası performans üzerindeki etkilerini değerlendirmek için kullanılır. Grafikteki eğrilerin stol noktası sonrası davranışlarını daha iyi analiz edebilmek için, stol öncesi ve sonrası taşıma katsayısı değerleri arasındaki farkları ve modifikasyonların bu farklar üzerindeki etkilerini incelemek yararlı olacaktır.

Şekil 19'da Re=70.000 için Şekil 20'de ise Re=150.000 için sürüklenme direnç katsayılarının modellere göre hücum açısı ile değişimi ve yorumlamaları aşağıda verilmiştir.

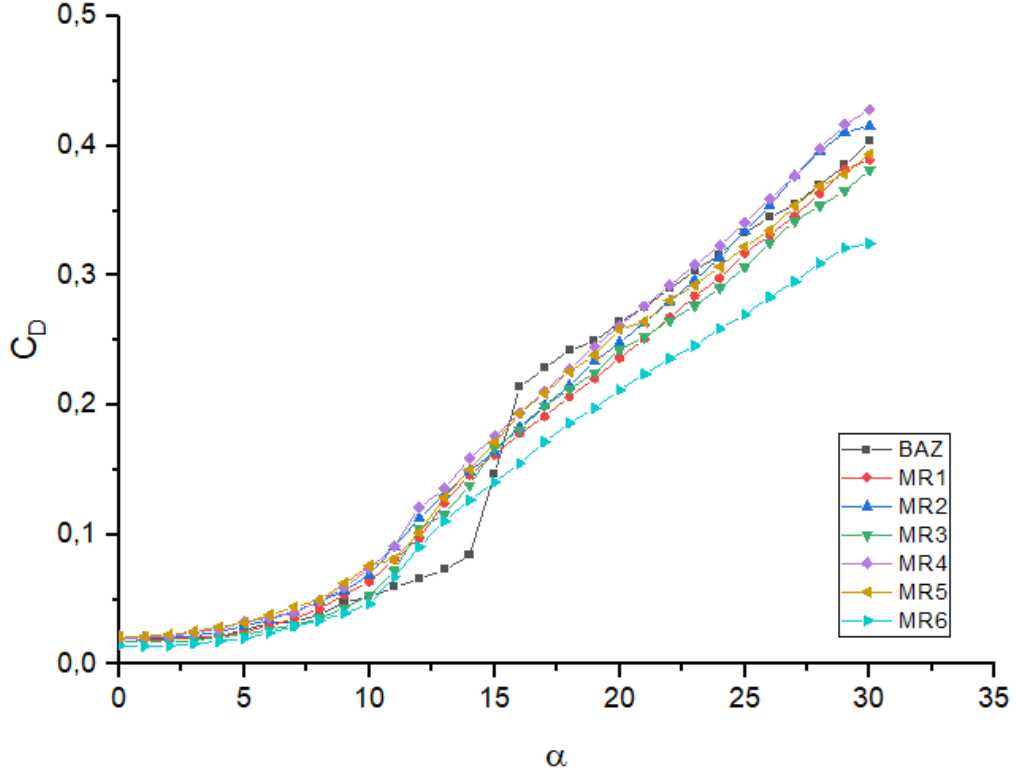


Şekil 19. $Re=70.000$ için sürüklenme direnç katsayılarının modellere göre hücum açısı ile değişimi

Stol Öncesi: Şekil 19’da gösterilen düşük sürüklenme katsayısına sahip modeller (özellikle MR6 ORT), daha düşük hücum açılarında yüksek aerodinamik performans sağlar. Bu, uçuş sırasında enerji verimliliğini artırır.

Stol Sonrası: Stol sonrası düşük sürüklenme artışı gösteren modeller (özellikle MR6 ORT), akış ayrılması sonrasında daha iyi performans sağlar. Bu durum, yüksek hücum açılarında uçuş performansını artırabilir.

Bu değerlendirmeler, farklı kanat modellerinin aerodinamik performanslarını karşılaştırmak ve hangi modellerin belirli uçuş koşulları için daha uygun olduğunu belirlemek için kullanılabilir.

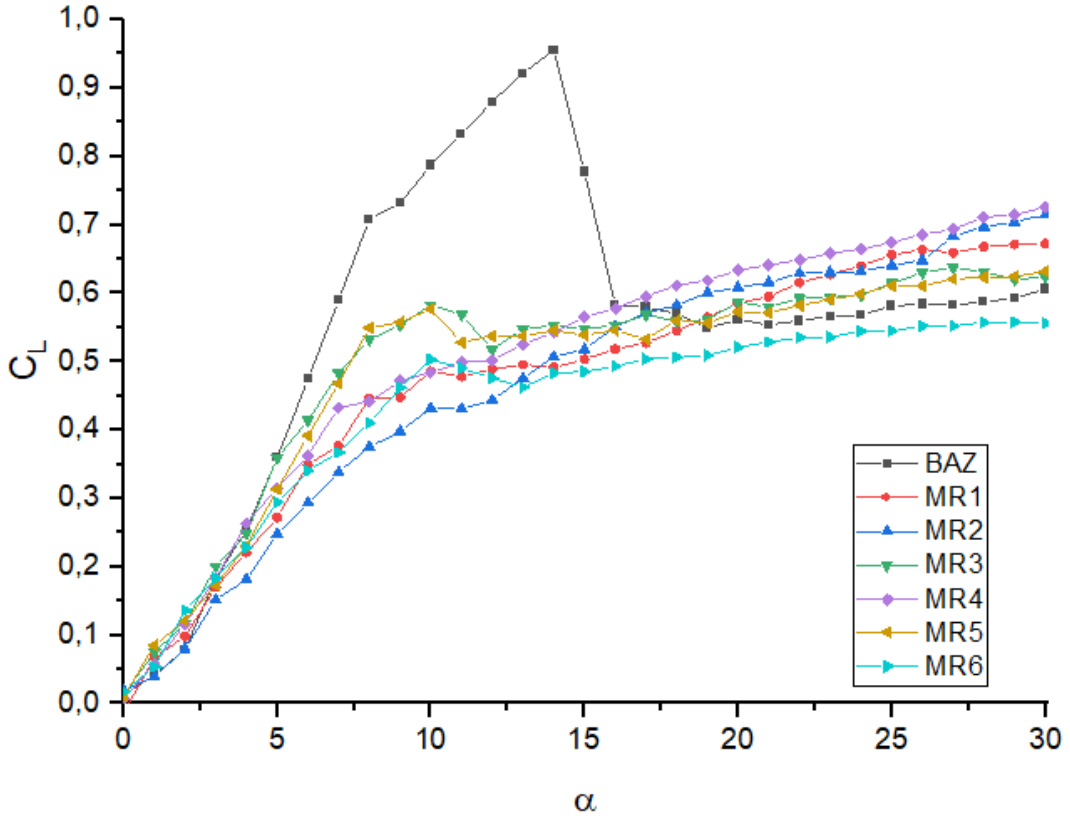


Şekil 20. $Re=150.000$ için sürüklenme direnç katsayılarının modellere göre hücum açısı ile değişimi

Stol Öncesi: Düşük sürüklenme katsayısına sahip modeller (örneğin MR6 ORT), daha düşük hücum açılarında yüksek aerodinamik performans sağlar. Bu, uçuş sırasında enerji verimliliğini artırır.

Stol Sonrası: Stol sonrası düşük sürüklenme artışı gösteren modeller (özellikle MR6 ORT), akış ayrılması sonrasında daha iyi performans sağlar. Bu durum, yüksek hücum açılarında uçuş performansını artırabilir.

Şekil 21'de ise $Re=150.000$ için taşıma katsayılarının modellere göre hücum açısı ile değişimi verilmiştir. Bu değerlendirmeler, farklı kanat modellerinin aerodinamik performanslarını karşılaştırmak ve hangi modellerin belirli uçuş koşulları için daha uygun olduğunu belirlemek için kullanılabilir.



Şekil 21. $Re=150.000$ için taşıma katsayılarının modellere göre hücum açısı ile değişimi

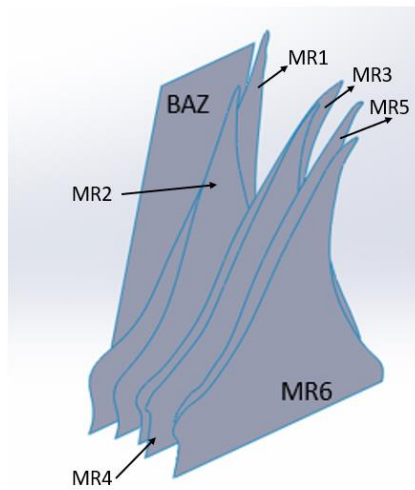
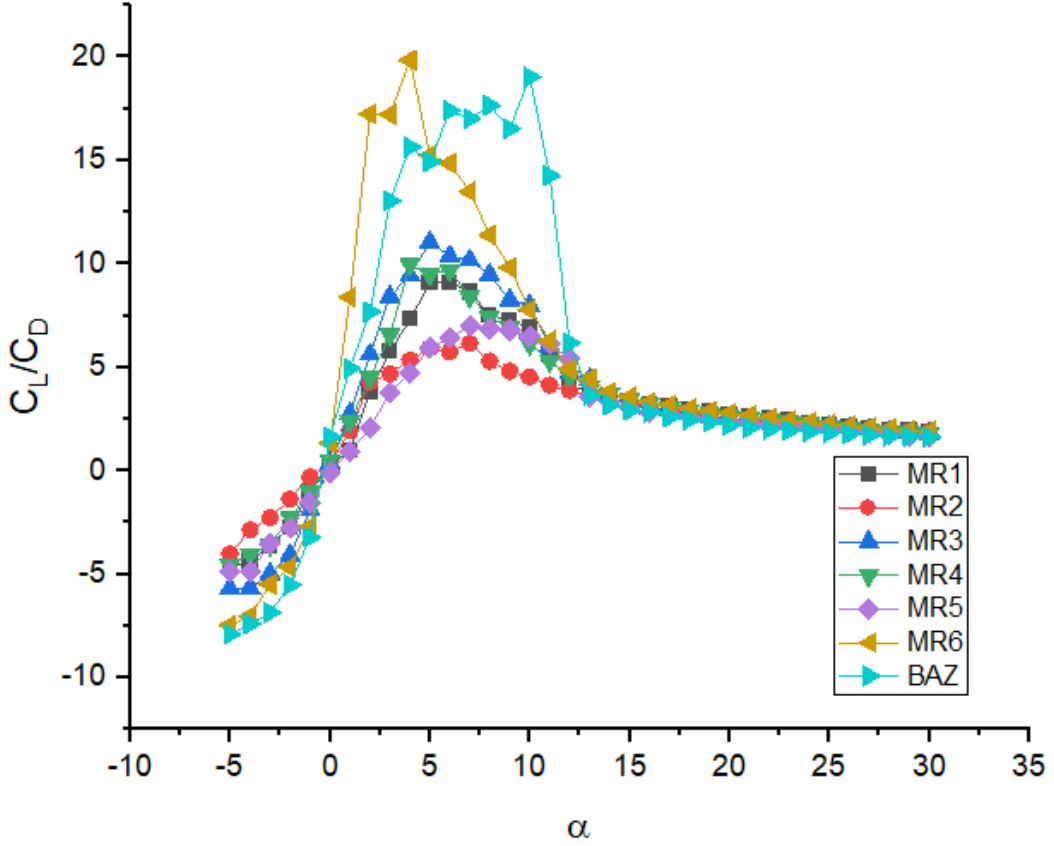
Stol Öncesi ($0 < \alpha < 14^\circ$): Stol öncesinde MR6 ORT modeli, en yüksek taşıma katsayısı (C_L) değerlerine sahip olup, özellikle düşük ve orta hücum açılarında üstün performans sergiler. Diğer modellere göre daha yüksek C_L değerleri, bu modelin aerodinamik verimliliğini artırır. Ort ve temel (baz model) açık modelleri de yüksek performans göstermekte olup, $\alpha=14^\circ$ ye kadar stabil ve yüksek taşıma sağlarlar.

Stol Sonrası ($\alpha > 14^\circ$): Stol sonrası MR6 ORT ve MR5 ORT modelleri, C_L değerlerinde nispeten daha az düşüş gösterir ve bu da akış ayrılması sonrası daha iyi performans sağlar. Baz model ort ve temel (baz model) açık modelleri ise Stol sonrası daha belirgin bir performans kaybı yaşar.

Sürüklenme direnç katsayısı (C_D) değerleri: Stol öncesinde MR6 ORT modeli düşük C_D değerleri ile en avantajlı modeldir. Stol sonrasında da düşük C_D artışı ile performansını korur. MR5 ORT da benzer şekilde düşük C_D değerleri ile avantaj sağlar. Diğer modeller, özellikle temel (baz model) ort ve temel (baz model) açık, stol sonrasında C_D değerlerinde daha belirgin artış gösterir ve bu da performans düşüşüne neden olur.

Sonuç olarak, MR6 ORT modeli, hem stol öncesi yüksek taşıma katsayısı hem de düşük sürüklenme direnç katsayısı (C_D) ile en avantajlı model olarak öne çıkmaktadır.

Şekil 22’de $Re=70.000$ için Şekil 23’de ise $Re=150.000$ için taşıma/sürüklenme direnç katsayıları oranlarını hücum açısı ile değişimi ve yorumlamaları aşağıda verilmiştir.



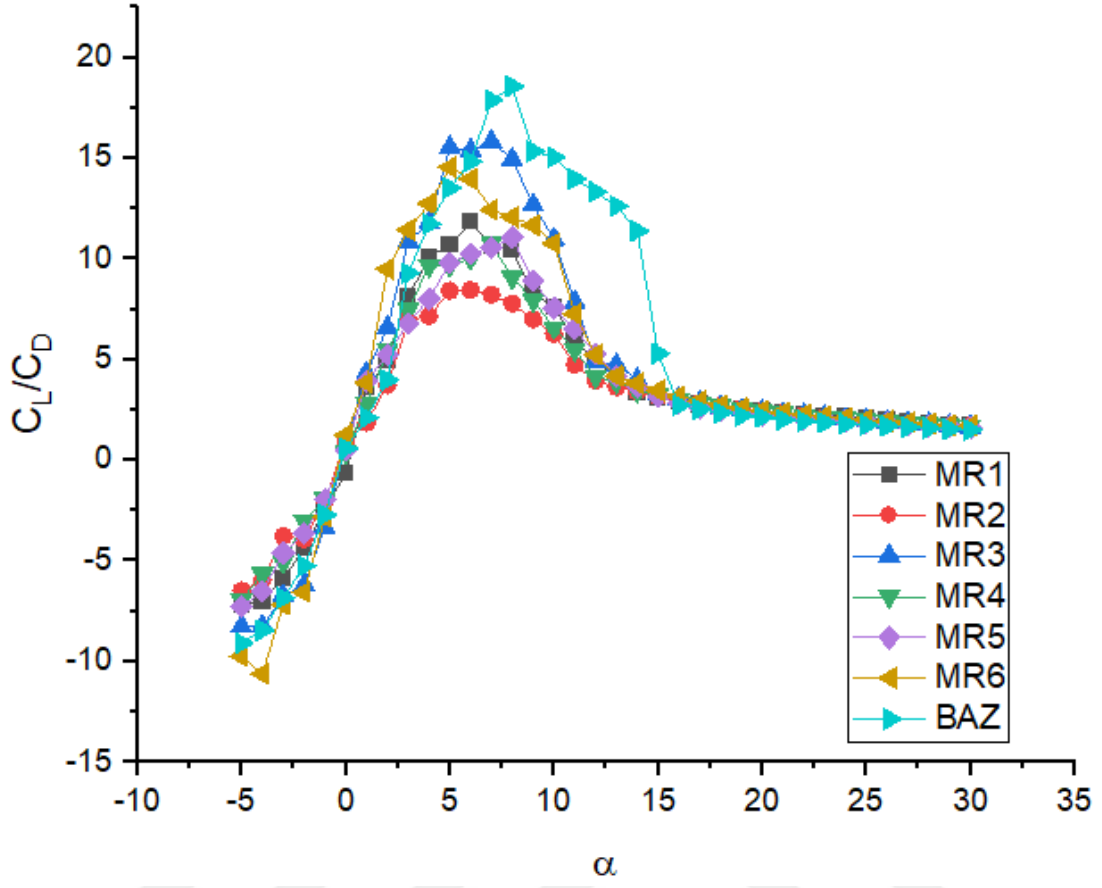
Şekil 22. $Re=70.000$ değerinde taşıma/sürüklenme direnç katsayıları oranı hücum açısı ile değişimi

MR1: Avantajlar: Orta hücum açılarında yüksek ve dengeli taşıma/sürüklenme direnç katsayıları oranı, aerodinamik verimlilik sağlar. **Dezavantajlar:** Yüksek hücum

açılarında performans düşüşü ve stabilite sorunları olabilir. **MR2: Avantajlar:** Düşük ve orta hücum açılarındaki nispeten yüksek taşıma/sürüklenme direnç katsayıları oranı sunar. **Dezavantajlar:** Diğer modellere göre yüksek hücum açılarındaki daha hızlı performans düşürmektedir. **MR3: Avantajlar:** Geniş bir hücum aralığında dengeli taşıma/sürüklenme direnç katsayısı oranına sahiptir. **Dezavantajlar:** Maksimum taşıma/sürüklenme direnç katsayıları oranı bazı diğer modeller kadar yüksek değildir. **MR4: Avantajlar:** Orta ve yüksek hücum açılarındaki dengeli performans sunabilir. **Dezavantajlar:** Stol noktasında ani performans düşüşüdür. **MR5: Avantajlar:** Orta hücum açılarındaki yüksek taşıma/sürüklenme direnç katsayıları oranıdır. **Dezavantajlar:** Yüksek hücum açılarındaki ani performans düşüşü ve stabilite sorunları oluşturur. **MR6: Avantajlar:** Düşük ve orta hücum açılarındaki en yüksek taşıma/sürüklenme direnç katsayıları oranı, bu da enerji verimliliği sağlar. **Dezavantajlar:** Yüksek hücum açılarındaki ani performans kaybı oluşur.

Temel (baz model) modeline göre karşılaştırma **Avantajlar:** MR6, düşük ve orta hücum açılarındaki temel (baz model) modeline göre belirgin şekilde daha yüksek taşıma/sürüklenme direnç katsayıları oranı sunar, bu da enerji verimliliği ve daha iyi performans anlamına gelir. MR1 ve MR4, özellikle orta hücum açılarındaki temel (baz model) modeline kıyasla daha dengeli ve yüksek performans sağlar. MR5, orta hücum açılarındaki yüksek taşıma/sürüklenme direnç katsayıları oranı ile avantaj sunar. **Dezavantajlar:** MR2, yüksek hücum açılarındaki temel (baz model) modeline göre daha hızlı performans düşüşü yaşar. MR3, geniş bir hücum açısı aralığında dengeli olsa da maksimum taşıma/sürüklenme direnç katsayıları oranı bazı modeller kadar yüksek değildir. MR6 ve MR5, yüksek hücum açılarındaki ani performans kaybı ve stabilite sorunları yaşayabilir.

Genel olarak, MR6 modeli düşük ve orta hücum açılarındaki en iyi performansı sunarken, MR1 ve MR4 modelleri de yüksek performans ve stabilite sağlar. Ancak, yüksek hücum açılarındaki performans ve stabilite sorunları göz önünde bulundurulmalıdır. Temel (baz model) model, bu modellere kıyasla genel olarak daha düşük performans sunar, ancak yüksek hücum açılarındaki daha stabil bir performans gösterir.

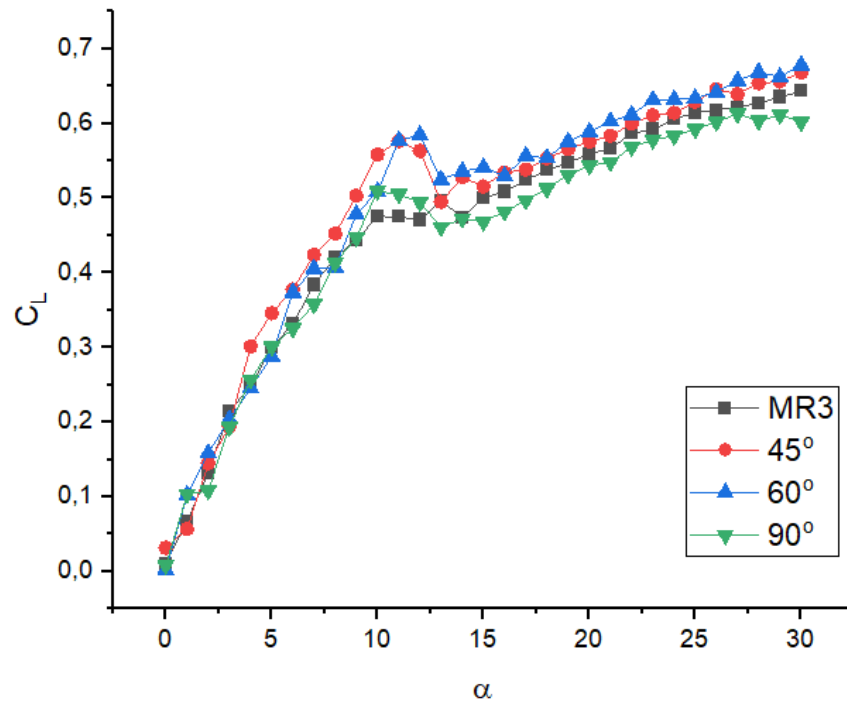


Şekil 23. $Re=150.000$ değerinde taşıma/sürüklenme direnç katsayıları oranı hücum açısı ile değişimi

Grafikte $Re=150.000$ değerinde çeşitli kanat modellerinin taşıma/sürüklenme direnç katsayıları oranları hücum açısı ile ilişkilendirilmiştir. Genel olarak, MR3 ve MR6 modelleri, özellikle düşük ve orta hücum açılarında temel (baz model) modele kıyasla daha yüksek taşıma/sürüklenme direnç katsayıları oranı sunarak daha iyi performans sağlar. MR1 ve MR4 modelleri, dengeli performans ve yüksek taşıma/sürüklenme direnç katsayıları oranları ile dikkat çekerken, MR2 ve MR5 modelleri daha az belirgin avantajlar sunar. Temel (baz model) modele kıyasla, MR6 modeli düşük ve orta hücum açılarında belirgin şekilde daha iyi performans gösterirken, yüksek hücum açılarında ani bir performans düşüşü yaşar. MR3 modeli ise geniş bir hücum açısı aralığında yüksek performans sağlar. Genel olarak, MR6 ve MR3 modelleri, temel (baz model) modele göre aerodinamik verimlilik açısından en avantajlı modellerdir.

4.2. Kıvrık Kanat Taşıma/Sürüklenme Katsayısı Deneyi Sonuçları

Kıvrık kanat uçları (değişebilen winglet açıları), havacılık mühendisliğinde aerodinamik verimliliği artırma amacıyla kullanılan yenilikçi tasarım unsurlarıdır. Bu yapıların temel amacı, kanat uçlarında oluşan girdapları azaltarak indüklenmiş sürüklenmeyi minimize etmektir. Kıvrık kanat uçları, özellikle yüksek hızlarda ve yüksek hücum açılarında kanat performansını artırır, indüklenmiş sürüklenme kuvvetini azaltır böylece yakıt tasarrufu sağlar ve uçuş menziline uzatır. Ek olarak, bu yapı, akış ayrılmasının geciktirilmesine yardımcı olur, bu da uçağın daha verimli bir şekilde performans göstermesini mümkün kılar. Farklı açılara sahip kıvrık kanat modellerinin (örneğin 45°, 60° ve 90°) aerodinamik performansa etkisi, genellikle kanadın hücum açısı, sürüklenme katsayısı ve taşıma katsayısı gibi parametreler üzerinden incelenmiştir. Bu modeller, aerodinamik verimlilik açısından geleneksel düz kanat modelleriyle kıyaslandığında önemli avantajlar sunar.

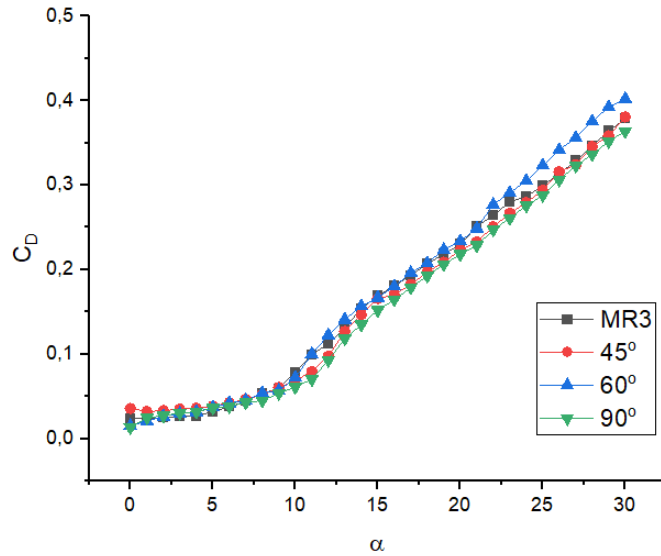


Şekil 24. Re=70.000 değerinde kıvrık kanat ucu uygulamasının taşıma katsayısı (C_L) grafiği hücum açısı ile değişimi

Şekil 24’de verilen grafikte, $Re=70.000$ değerinde, taşıma katsayısının (C_L) hücum açısına (α) göre değişimi gösterilmiştir. MR3 modeli ile 45° , 60° , ve 90° kıvrık kanat uçları karşılaştırılmıştır. Kıvrık kanat modelleri, 0° ile yaklaşık 10° hücum açısı aralığında oldukça benzer performans göstermektedir. Bu aralıkta taşıma katsayısında (C_L) kademeli bir artış gözlenir.

Hücum açısı 10° 'nin üzerinde olduğunda, C_L değerlerinde bir düşüş ve stabilizasyon görülür. Ancak bu noktada 45° ve 60° kıvrık kanat uçları, MR3 ve 90° modeline göre biraz daha yüksek taşıma katsayısına sahiptir. Bu durum Stol iyileştirilmesi olarak kabul edilebilir. Kanat ucundaki 60° kıvrık kanat modeli, genel olarak en yüksek C_L değerlerini sağlar. Bu açının aerodinamik performansı iyileştirme açısından avantajlı olduğunu göstermektedir. Kanat ucundaki 45° kıvrık kanat modeli, 60° modeline çok yakın performans gösterse de bazı bölgelerde C_L 'de daha küçük dalgalanmalar sergileyerek stabilite açısından dikkat çeker. Kanat ucundaki 90° kıvrık kanat modeli, taşıma katsayısında diğer modellerin biraz gerisinde kalmakta ve daha düşük hücum açılarında özellikle C_L ’de daha düşük bir performans sergilemektedir. MR3 modeli, kıvrık kanat modellerine göre biraz daha düşük C_L değerlerine sahiptir, ancak kanat ucundaki 90° modeline yakın bir performans sergiler.

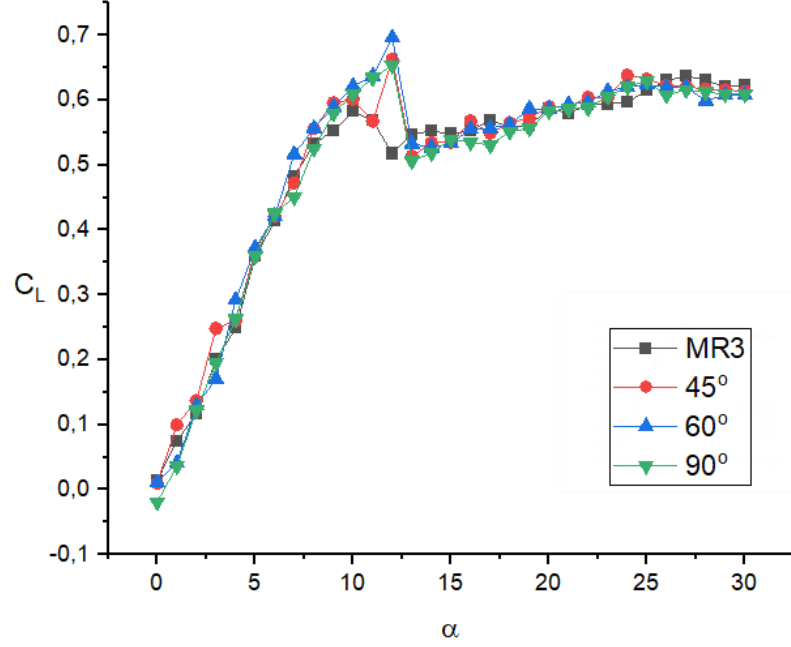
Bu sonuçlar, kanat ucundaki 45° ve 60° kıvrık kanat uçlarının, taşıma katsayısı açısından en avantajlı modeller olduğunu göstermektedir. Özellikle kanat ucundaki 60° modelinin yüksek hücum açılarında dahi üstün performans sergilediği görülmektedir. Buna karşılık, 90° modeli, yüksek hücum açılarında aerodinamik verimlilik açısından diğer modellere kıyasla daha zayıf kalmaktadır. Bu durum, yüksek hücum açılarında akışın daha erken ayrılmasına neden olabilir.



Şekil 25. $Re=70.000$ değerinde kıvrık kanat ucu eklentisinin sürüklenme katsayısı (C_D) nin hücum açısı ile değişimi

Şekil 25'de verilen grafikte, kıvrık kanat ucu etkisi $Re=70.000$ için sürüklenme katsayısının (C_D) hücum açısına (α) göre değişimi gösterilmektedir. MR3 modeli ile 45° , 60° , ve 90° kıvrık kanat uçları karşılaştırılmıştır. Tüm modeller, 0° ile 10° hücum açısı aralığında oldukça düşük ve benzer sürüklenme katsayıları göstermektedir. Bu, bu açılar arasında kanatların aerodinamik sürtünme açısından etkili performans sunduğunu göstermektedir. Hücum açısı 10° 'den sonra, sürüklenme katsayısında belirgin bir artış gözlemlenmeye başlanmaktadır. Bu artış, akışın daha düzensiz hale geldiği ve vorteks oluşumunun arttığı anlamına gelebilir. Kanat ucundaki 60° kıvrık kanat modeli, genel olarak en yüksek sürüklenme katsayısını üretmektedir. Kanat ucundaki 45° kıvrık kanat modeli, 60° modeline göre daha düşük C_D değerlerine sahiptir ve sürüklenme açısından daha avantajlıdır. Kanat ucundaki 90° kıvrık kanat modeli, yüksek hücum açılarında (20° 'den sonra) daha düşük sürüklenme katsayıları göstermektedir, bu da aerodinamik performansın bu açıda biraz daha verimli olduğunu göstermektedir. MR3 modeli, genel olarak kıvrık kanat modellerine benzer bir C_D profiline sahiptir, ancak kanat ucundaki 60° modeline göre daha düşük sürüklenme değerleri göstermektedir. Bu da MR3'ün düşük sürüklenme gerektiren uçuş profilleri için uygun olabileceğini gösterir. Bu grafiğe dayanarak, sürüklenme açısından 45° ve 90° kıvrık kanat uçları, özellikle yüksek hücum açılarında daha avantajlı gözükmektedir. Ancak, kanat ucundaki 60° kıvrık modelinin yüksek sürüklenme değerleri, bu tasarımın belirli uçuş koşullarında daha az verimli olabileceğini düşündürmektedir. Sürüklenme katsayısı, özellikle yakıt tüketimi ve menzil

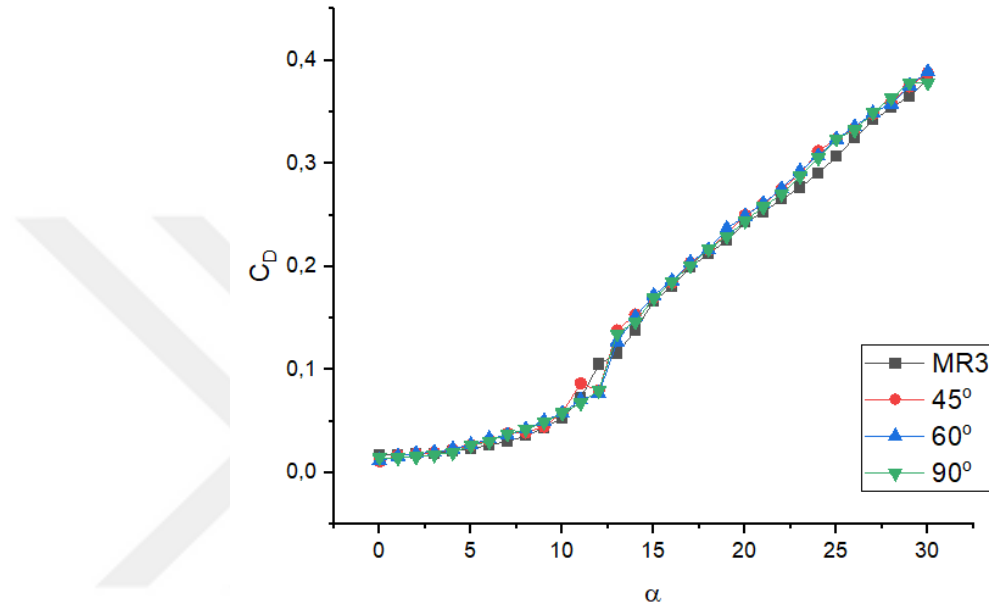
üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğundan, bu farklılıklar uçuş profilinin ve tasarım gereksinimlerinin dikkatlice değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.



Şekil 26. Re=150.000 kıvrık kanat ucu taşıma katsayısı (C_L)'nin hücum açısı ile değişimi

Şekil 26'de sunulan grafikte, Re=150.000 için taşıma katsayısının (C_L) hücum açısına (α) göre değişimi gösterilmiştir. MR3 modeli ile 45°, 60°, ve 90° kıvrık kanat uçları karşılaştırılmaktadır. Hücum açısının 0° ile 10° arası periyodunda, tüm modeller benzer performans sergileyerek C_L değerlerinin düzenli bir artış gösterdiği görülmektedir. Hücum açısı 10° ile 15° arası hücum açılarında, kıvrık kanat modellerinin C_L değerlerinde bir zirve ve sonrasında bir düşüş gözlemlenmektedir. Bu durum, özellikle 60° modelinde belirgin bir şekilde kendini göstermektedir. Bu aralıkta, MR3 modeli diğer modellerle benzer davranış sergilese de bazı modellerin zirve sonrası davranışı dikkat çekicidir. 60° kıvrık kanat modeli, 10°'den sonra en yüksek taşıma katsayısına sahip olup, akış ayrılmasının yaşandığı noktada ani bir dalgalanma gösterse de genel olarak diğer modellere kıyasla üstün performans sergilemektedir. Kanat ucundaki 45° ve 90° kıvrık kanat modelleri, C_L değerleri bakımından daha dengeli bir artış ve stabilizasyon göstermekte olup, yüksek hücum açılarında daha güvenilir sonuçlar sunmaktadır. MR3 modeli, genel olarak tüm kıvrık kanat modellerine yakın bir performans sergilemekte ve C_L değerleri açısından orta seviyede stabil bir eğilim göstermektedir. Sonuç olarak,

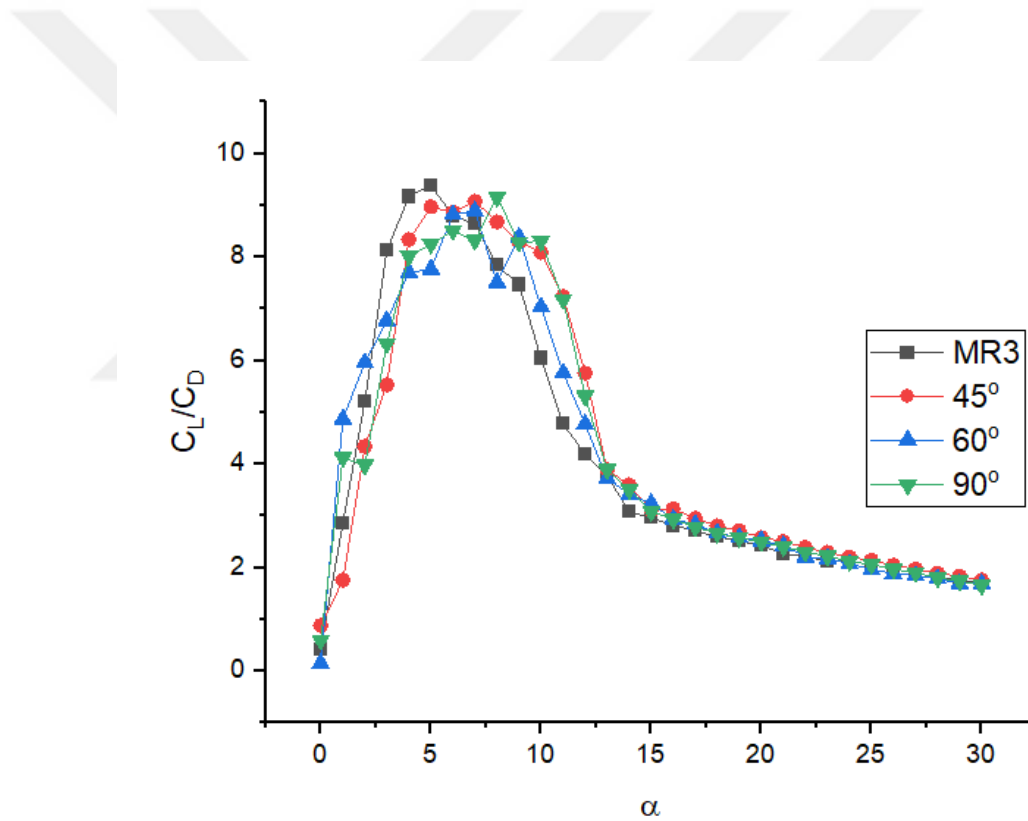
Re=150.000 koşulunda, özellikle 60° kıvrık kanat modeli, yüksek taşıma katsayısı ile öne çıkmakta ve belirli açılarda en avantajlı performansı sağlamaktadır. Ancak, bu modelin zirve noktası sonrası yaşadığı ani dalgalanmalar, daha dengeli sonuçlar sunan 45° ve 90° kıvrık kanat modelleri ile karşılaştırıldığında dikkat çekmektedir. Bu farklılıklar, kıvrık kanat uçlarının farklı uçuş rejimlerinde nasıl performans gösterdiğinin değerlendirilmesi açısından önemli bilgiler sunmaktadır.



Şekil 27. Re=150.000 değerinde kıvrık kanat ucu sürüklenme katsayısı (C_D) nin hücum açısı ile değişimi

Şekil 27'de verilen grafikte, Re=150.000 koşulunda sürüklenme katsayısının (C_D) hücum açısına (α) göre değişimi gösterilmektedir. MR3 modeli ile 45°, 60°, ve 90° kıvrık kanat uçları karşılaştırılmaktadır. Verilen 0° ile 10° hücum açısı aralığında, tüm modeller oldukça düşük sürüklenme katsayılarına sahiptir ve performansları birbirine çok yakındır. Bu aralıkta sürüklenme katsayısı açısından modeller arasında fark göze çarpmamaktadır. Hücum açısı 10°'den sonra, sürüklenme katsayıları tüm modellerde artmaya başlamaktadır. Kanat ucu kıvrıklık değeri 60° modeli bu artışın biraz daha yüksek olduğu bir eğri izlemektedir, diğer modeller (MR3, 45°, ve 90°) benzer ve daha düşük sürüklenme değerlerine sahip görünmektedir. Hücum açısı 15° iken özellikle 45° modelinin diğer modellere göre biraz daha düşük C_D değerine sahip olduğu dikkat çekmektedir, bu da bu hücum açısında daha verimli bir aerodinamik performansa işaret etmektedir. Yüksek hücum açılarında (20° ve sonrası), sürüklenme katsayısı artışı devam etmekte ve tüm modeller arasında çok küçük farklılıklar gözlenmektedir. Kanat ucu

kıvrıklık değeri 60° modeli genel olarak en yüksek C_D değerine sahiptir. MR3 ve 90° modelleri, sürüklenme katsayısında 20° sonrası en düşük değerleri sunmakta olup, bu modeller yüksek hücum açılarında daha iyi bir sürüklenme performansı göstermektedir. Sonuç olarak, $Re=150.000$ koşulunda sürüklenme katsayısı açısından 45° kıvrık kanat modeli düşük ve orta hücum açılarında avantajlı görünmektedir. Kanat ucu kıvrıklık değeri 60° modeli ise yüksek sürüklenme katsayısı ile, özellikle yüksek hücum açılarında diğer modellere kıyasla daha fazla direnç oluşturmaktadır. MR3 ve 90° modelleri, yüksek hücum açılarında sürüklenme katsayısı açısından daha iyi sonuçlar sunmaktadır, bu da bu modellerin yüksek açılardaki uçuş profilleri için daha uygun olabileceğini göstermektedir.

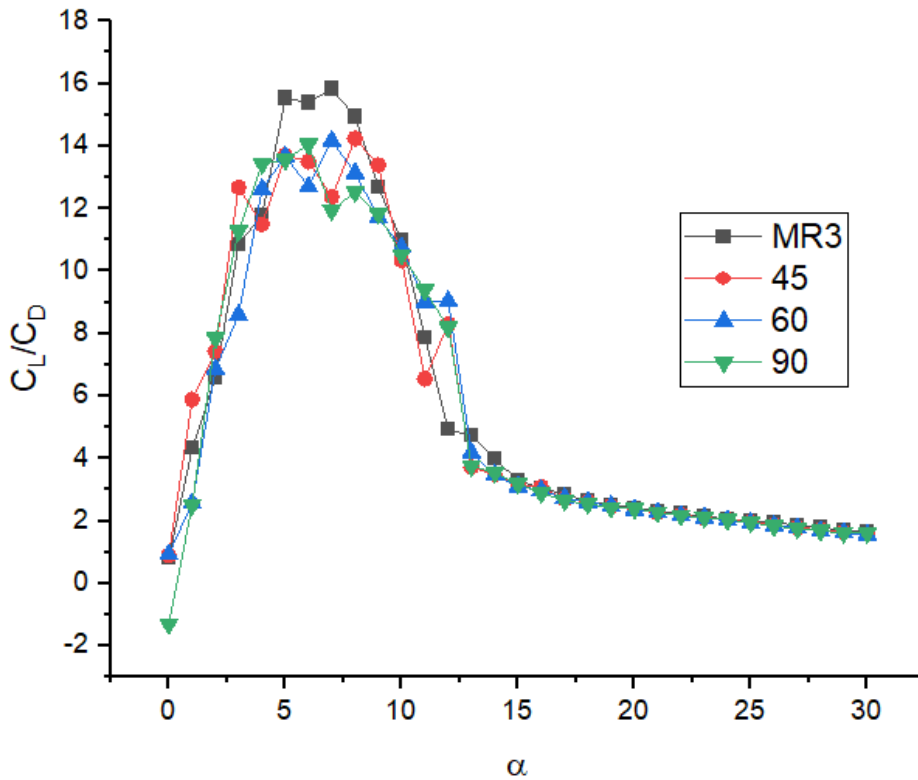


Şekil 28. $Re=70.000$ değerinde kıvrık kanat ucu C_L/C_D oranının hücum açısı ile değişimi

Şekil 28'de verilen grafikte, $Re=70.000$ koşulunda taşıma/sürüklenme oranı (C_L/C_D) hücum açısına (α) göre gösterilmiştir. MR3 modeli ile 45° , 60° , ve 90° kıvrık kanat uçları karşılaştırılmaktadır. 0° ile 5° hücum açısı aralığında, tüm modellerde C_L/C_D oranı hızlı bir şekilde artmakta ve maksimum noktaya ulaşmaktadır. Bu aralıkta özellikle 60° kıvrık kanat modeli en yüksek C_L/C_D oranına sahip olup, en yüksek aerodinamik

verimliliği göstermektedir. 5° ile 10° hücum açısı aralığında, C_L/C_D oranında bir düşüş gözlemlenmektedir. Bu düşüş tüm modellerde benzer bir eğilim sergilerken, 45° ve 90° modelleri, 60° modeline göre biraz daha düşük oranlar sunmaktadır. Maksimum C_L/C_D oranı, genellikle 5° civarındaki hücum açılarında elde edilmektedir. Bu noktada, 60° kıvrık kanat modeli en yüksek performansı sağlamaktadır. 45° model ise bu açı aralığında 60° modeline yakın bir performans sunmaktadır. 10° 'den sonra, tüm modellerde C_L/C_D oranı önemli bir düşüş yaşamaktadır. Bu, daha yüksek hücum açılarında sürüklenmenin taşıma kuvvetine göre daha fazla arttığını ve aerodinamik verimliliğin azaldığını göstermektedir. MR3 modeli, genellikle kıvrık kanat modelleriyle benzer bir C_L/C_D eğrisi izlese de yüksek hücum açılarında biraz daha düşük verimlilik göstermektedir.

Şekil 28'de gösterilen grafik, özellikle 60° kıvrık kanat modelinin, düşük ve orta hücum açılarında en yüksek aerodinamik verimliliği sağladığını göstermektedir. Kanat ucundaki 45° kıvrık kanat modeli de verimli bir performans sergilerken, 90° modeli ise daha düşük C_L/C_D oranları ile diğer modellere göre daha az aerodinamik verimlilik sunmaktadır. Bu farklar, kıvrık kanat modellerinin uçuş profiline göre hangi hücum açıları için en verimli olduğunu belirlemek açısından önemlidir.



Şekil 29. $Re=150.000$ değerinde kıvrık kanat ucu C_L/C_D oranının hücum açısı ile değişimi

Şekil 29’da verilen grafikte, $Re=150.000$ koşulunda taşıma/sürüklenme oranı (C_L/C_D) hücum açısına (α) göre gösterilmiştir. MR3 modeli ile 45° , 60° , ve 90° kıvrık kanat uçları karşılaştırılmaktadır. Verilen 0° ile 5° hücum açısı aralığında tüm modellerde C_L/C_D oranı hızla artmakta ve bu aralıkta MR3 modeli diğer modellere kıyasla en yüksek C_L/C_D oranını sağlamaktadır. Bu da MR3 modelinin düşük hücum açılarında yüksek aerodinamik verimlilik sunduğunu göstermektedir. Hücum açısı 5° ile 10° aralığında, 45° , 60° , ve 90° modelleri arasında benzer eğilimler gözlemlenirken, MR3 modeli bu aralıkta diğer modellerden daha yüksek C_L/C_D oranı göstermektedir. Ancak tüm modellerde zirve noktalarına ulaşıldıktan sonra bir düşüş yaşanmaktadır. Maksimum C_L/C_D oranı genellikle $\alpha=5^\circ$ civarındaki hücum açısında elde edilmektedir. Bu aralıkta, MR3 modeli diğer tüm modellerden daha yüksek bir aerodinamik verimlilik sunmaktadır. Hücum açısı $\alpha=10^\circ$ sonrası, C_L/C_D oranı tüm modellerde önemli bir düşüş göstermektedir. Bu düşüş özellikle 90° kıvrık kanat modelinde daha belirgin olup, bu model daha düşük aerodinamik verimlilik sergilemektedir. Hücum açısı $\alpha=15^\circ$ ve sonrası, tüm modellerde C_L/C_D oranı çok düşük seviyelere inmekte ve modeller arasında farklar kaybolmaktadır. Sonuç olarak, $Re=150.000$ koşulunda MR3 modeli, düşük ve orta hücum açılarında kıvrık kanat modellerine kıyasla daha yüksek bir aerodinamik verimlilik sunmaktadır. Kanat ucundaki 45° ve 60° kıvrık kanat modelleri ise bu açı aralıklarında birbirine yakın performans sergilerken, 90° kıvrık kanat modeli daha düşük verimlilik göstermektedir. Şekil 28’de gösterilen değişim, özellikle düşük hücum açılarında MR3 modelinin en iyi performansı sunduğunu ve yüksek hücum açılarında ise verimliliğin tüm modellerde düştüğünü ortaya koymaktadır.

Bu çalışma, farklı kıvrık kanat uçlarına sahip modellerin aerodinamik performansını karşılaştırarak taşıma katsayısı, sürüklenme katsayısı ve taşıma/sürüklenme oranı gibi kritik parametreler üzerinden değerlendirilmiştir. Farklı hücum açıları ve Reynolds sayılarındaki değişimlerle elde edilen veriler, kıvrık kanat uçlarının uçuş performansı üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, kıvrık kanat uçlarının optimize edilmesi yoluyla hava araçlarının verimliliğini artırmada önemli bir rol oynayabileceğini göstermektedir.

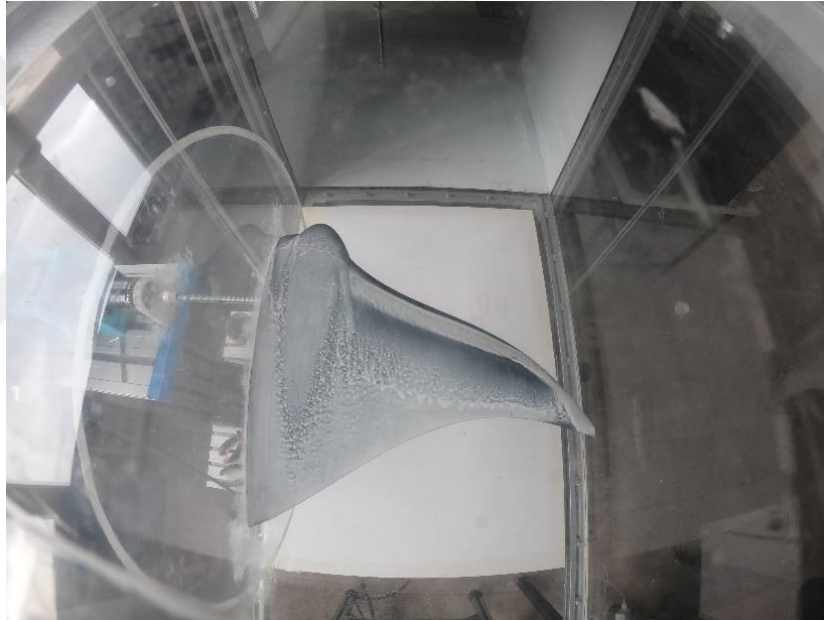
Kıvrık kanat uçlarının performans değerlendirmesinde, 45° ve 60° modelleri düşük ve orta hücum açılarında yüksek aerodinamik verimlilik sunmuştur. Özellikle 60° modeli, en yüksek taşıma katsayısına ulaşırken, 90° modeli daha düşük performans sergilemiştir. Yüksek hücum açılarında tüm modellerde taşıma katsayısında azalma ve

sürüklenme katsayısında artış gözlenmiştir. MR3 modeli, düşük açılarda en iyi C_L/C_D oranını sağlamıştır.

Sonuç olarak, 45° ve 60° kıvrık kanat modelleri, farklı uçuş profilleri için optimize edilmiş tasarım arayışında en verimli seçeneklerdir.

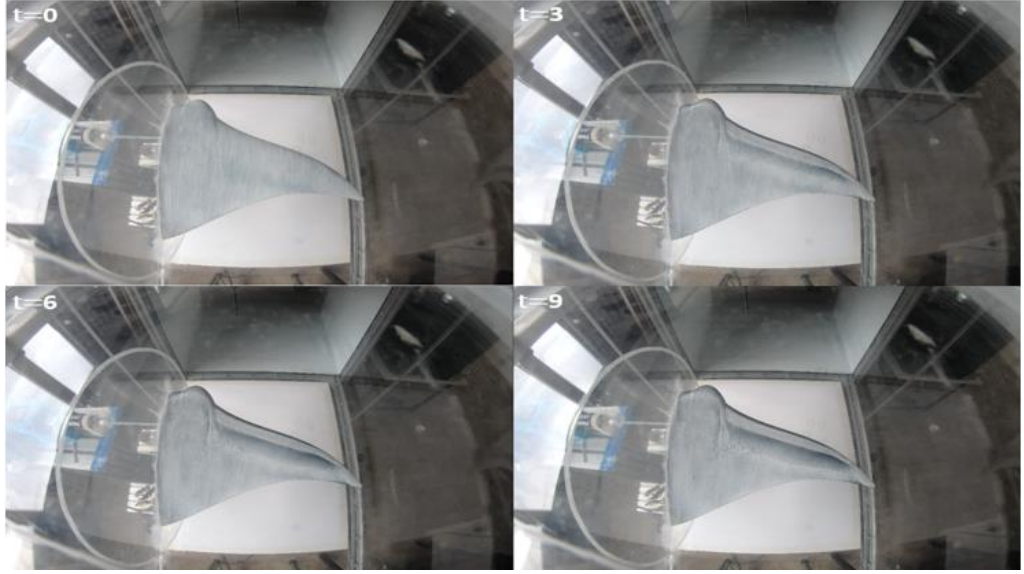
4.3. Yüzey Yağ Akış Görselleştirme Deney Sonuçları

Bu çalışmada, yüzey yağ akışı görselleştirme yöntemi kullanılarak girdap yapıları, akış ayrılması, akışın yüzeye yeniden bağlanması gibi akış özelliklerini görünür hale getirmeye katkı sağlamaktadır. Şekil 30-33'de gösterilen yağ görselleri akış yapısını zamanla değişimi örnek görsellerle gösterilmiştir. MR3 modeli için hücum açısı $\alpha=9^\circ$ ve $Re=150.000$ değerinde akış görselleştirme sonucu Şekil 30'da görülmektedir.

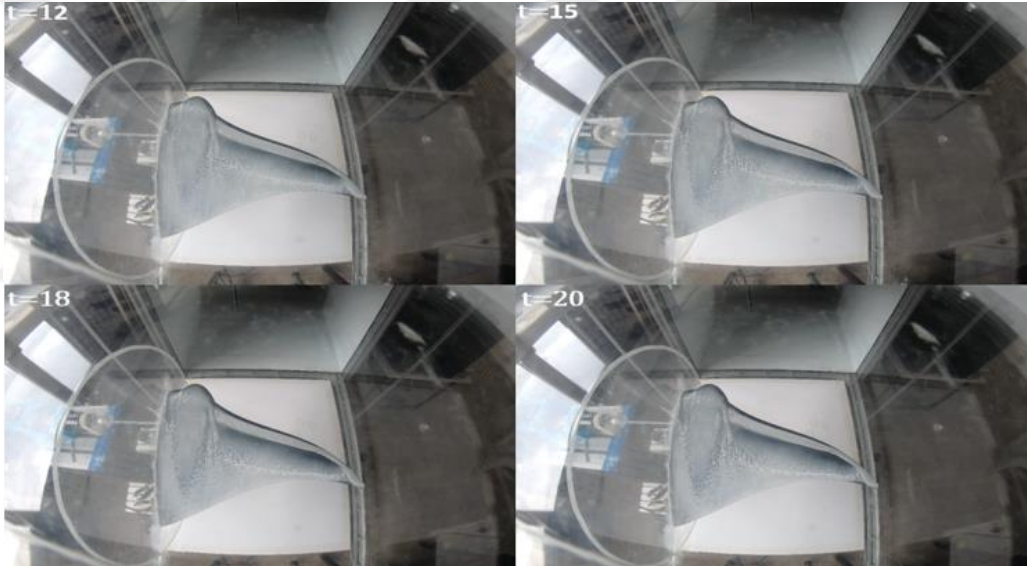


Şekil 30. MR3 modeli için hücum açısı $\alpha=9^\circ$ ve $Re=150.000$ değerinde akış görselleştirme sonucu

Bu çalışma, NACA 0016 kesit ölçülerinde ve hayalet vatoz (vatoz) biyomimetik tasarımına dayanan bir kanat modelinin aerodinamik özelliklerini incelemektedir. Kanat modeli, $Re=150.000$ için $\alpha=9^\circ$ hücum açısında ve yaklaşık 16 m/s serbest akım hızında test edilmiştir. Kanadın şekli, tasarımın özgünlüğünü oluşturarak aerodinamik performansını doğrudan etkilemektedir. Bu kanat modelinin aerodinamik performansı farklı akış bölgelerinde gözlemlenen farklı akış yapıları üzerinden değerlendirilmiştir.



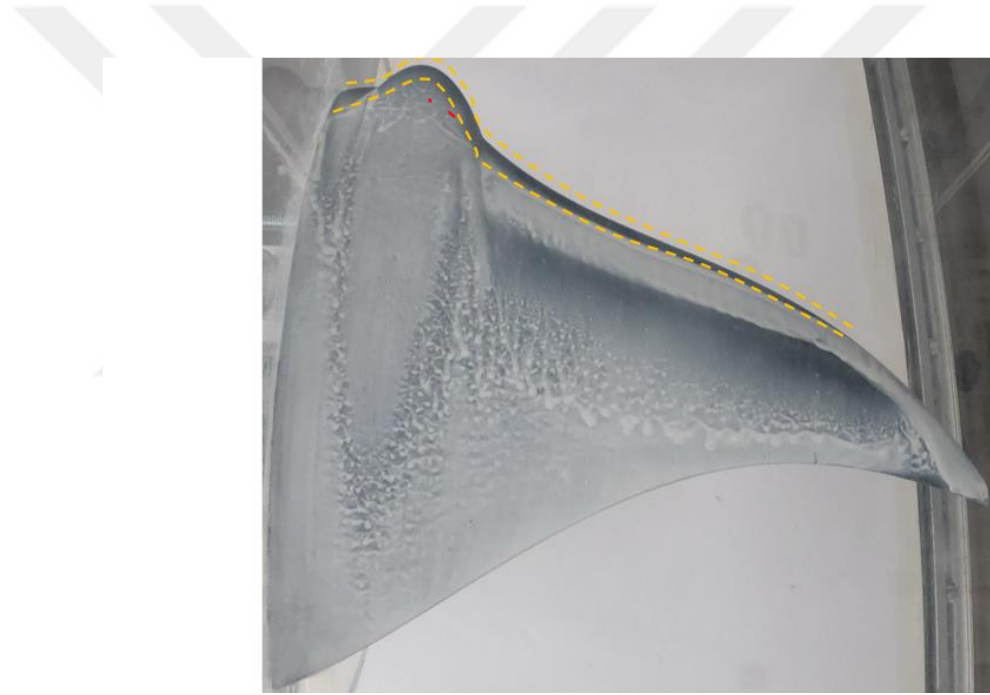
Şekil 31. Yüzey yağ akış deney videosunun her 3 dakikada bir alınan görsel kesitleri (t =0 ile t=9s)



Şekil 32. Yüzey yağ akış deney videosunun her 3 dakikada bir alınan görsel kesitleri (t =12s ile t=20s)

4.3.1. Akışın Başlangıcı ve Geçiş Bölgeleri

Serbest akım, Şekil 33’de gösterilen MR3 kanat modeline karşıdan gelir ve başlangıçta laminer olarak ilerler. Laminer akış, kanat yüzeyine yapışık halde, düzgün ve katmanlı bir şekilde devam eder. Bazı model deneylerinden kanadın hücum kenarında $\alpha=0^\circ$ için durma noktaları oluşmakta ve gelen akışın uyguladığı momentumla kanatın alt ve üst yüzeyin düzgün bir akış yapısı oluştuğu yağ deney sonuçlarında görülmektedir. Biyomimetik kanatın hücum kenarının kanat genişliği boyunca eğriselliği değiştiği için düzgün akış yapısının bozulduğu yağ görselleri ile gösterilmiştir. Bununla birlikte, akış başlangıçta laminer karakterde hareket etmekte ve kanat ucuna doğru bu bölgenin uzunluğunun azaldığı görülmüştür.

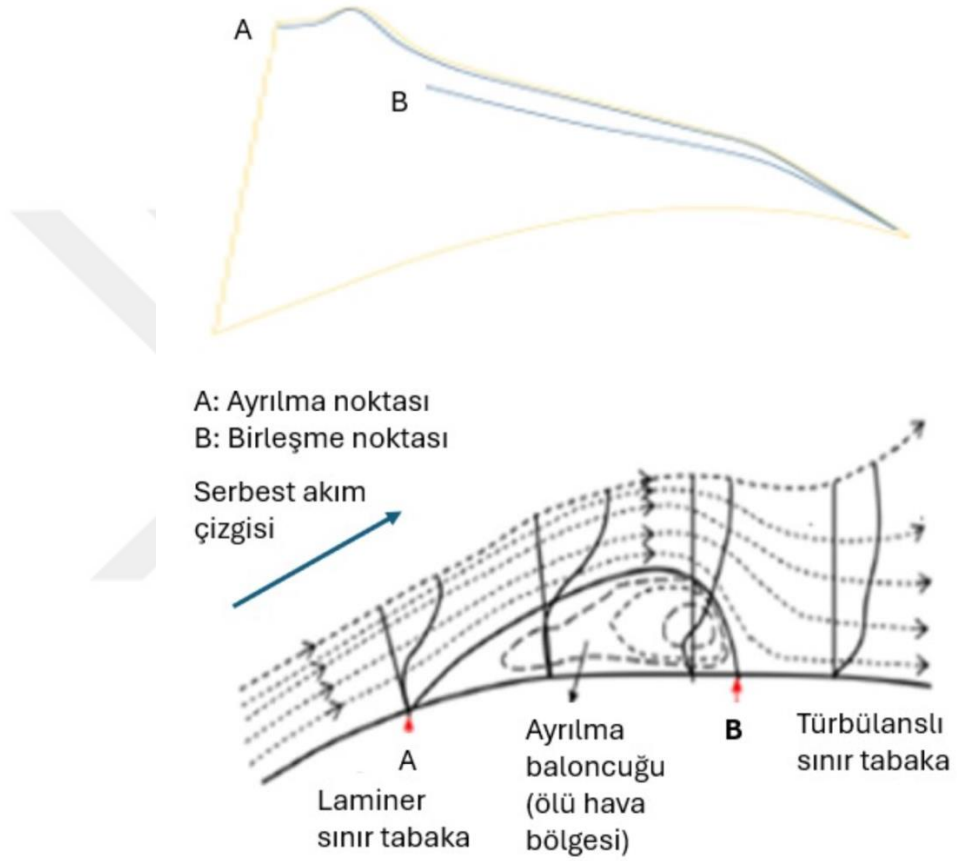


Şekil 33. MR3 modelinin ön bölgesinde oluşan laminer akış ayrılma kabarcığı

4.3.2. Akış Ayrılması ve Ayrılma Kabarcığı Bölgesi

Kanat yüzeyinde gözlemlenen yağ birikimi, akış ayrılması ve dönümlü akışın kabarcık bölgesi olarak adlandırılan bir bölgenin oluşumu Şekil 34’de gösterilmiştir. Bu bölgede, akış yüzeyden kısmen ayrılmakta, kabarcık içerisindeki basınç çevredeki basınçtan düşük olduğu için ayrılmış bölgedeki ayrılma baloncuğuna uygulanan ile akışkan momentum transferiyle ilerlerken yeniden yüzeye yapışmaktadır. Bu tür geçici ayrılma bölgeleri, düşük Reynolds sayılarında da ve artan hücum açıları altında sıkça

görülür ve akışın enerjisini yeniden kazanarak yüzeye yapışık halde ilerlemeye devam etmesini sağlar. Bu durum, kanat profilinin üzerinde geçici bir kabarcık ayrılma bölgesi oluşturarak akışın davranışını önemli ölçüde etkiler. Kabarcık ayrılmasının olduğu bölgede sınır tabaka içerisinde durgun akış bölgesinde basıncın bir miktar artarak yaklaşık sabit kaldığı bilinmektedir. Laminer kabarcık ayrılması bölgesinin yağ görseli yağın yüzeyden ayrılmamasına neden olan biriktirme oluşturma görüntüsü ile Şekil 35’de verilmiştir.



Şekil 34.Laminer ayrılma kabarcığı şeması ölü hava bölgesi (durgun akış bölgesi)



Şekil 35. Laminer kabarcık ayrılması bölgesi (A: Ayrılma Noktası – B: Birleşme Noktası)

4.3.3. Akış Yeniden Tutunması

Şekil 36'da akışın yüzeyden ayrılması ve tekrar yüzeye birleşmesi yağ görseli sunulmuştur. Kabarcık ayrılması bölgesinin ardından, akış yüzeye yeniden yapışarak bir süre daha yüzey boyunca ilerlerken Reynolds sayısına göre laminar yapısını korumaya çalışır. Ancak, kanat boyunca ilerledikçe hem kanadın yüzey yapısı hem de hücum açısının yüzeyde oluşturduğu akım boyunca akış kontrol yüzeyinin genişlemesiyle akış karakteri küçük bölgelere ayrılmış vaziyette türbülansa dönüşmektedir. Türbülanslı bölgeler, akış hızındaki dalgalanmalar ve karışık yapısı nedeniyle sürtünme direnç kuvvetini arttıran düzensiz akış alanlarıdır. Bu karışık dönümlü akış bölgelerinde, yağın yüzeyde düzensiz dağılımı veya birikimi gözlemlenebilir, bu da sürüklenmenin ve enerji kayıplarının da artmasına neden olmaktadır.



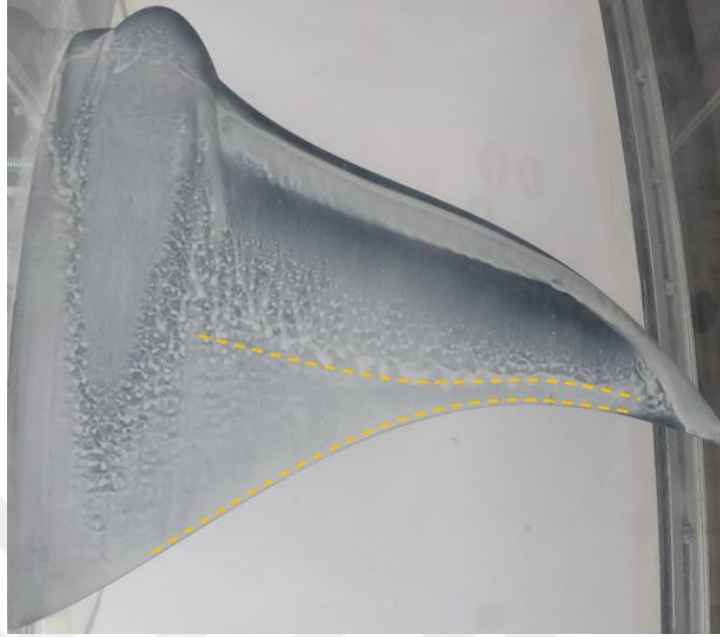
Şekil 36. Geçiş ve akışın tekrar yüzeye bağlandığı bölge

4.3.4. Tam Ayrılma ve Arka Kısımda Oluşan Ters Akış Bölgeleri

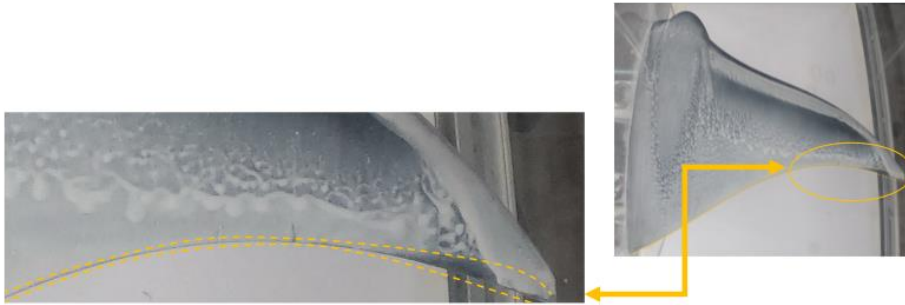
Tam akış ayrılmasının olduğu ters akış bölgeleri Şekil 37 ve 38’de gösterilmiştir. Kanat modelinin arka kısmında, akış tamamen yüzeyden ayrılmış durumdadır. Bu tam ayrılma, akışın yüzeye yapışık kalamaması (tutunamaması) ve serbestçe hareket etmesi anlamına gelir. Kanat profillerinin arka kenarlarında veya yüksek eğimli bölgelerde sıkça görülen bu ayrılma, aerodinamik sürüklenmenin önemli ölçüde artmasına ve kanat verimliliğinin azalmasına neden olur.

Ayrıca, kanadın arka kısımlarında ve uç bölgelerinde ters akış bölgeleri oluşur. Bu ters akış bölgeleri, akışın yüzeyden ayrıldıktan sonra geriye doğru hareket ettiği ve genellikle düşük hızlı ve serbest akım basıncına yakın alanlar oluşturduğu bölgelerdir. Ters akış, kanat yüzeyinde türbülanslı bir bölge oluşturur ve bu durum, akışın kanat üzerinden düzgün bir şekilde geçmesini engeller. Akışın maruz kaldığı direnç kesit alanının artmasına ve bu da aerodinamik performans kaybına ve sürüklenme kuvvetinin daha da artmasına kaynağını oluşturur. Özellikle kanat uçlarında ve firar kenarına yakın bölgelerde görülen bu tür ters akışlar, hız gradyanlarının artması ile girdapların şiddetinin

artmasına ve kanat ucu girdaplarının belirginleşmesine neden olur, bu da kanadın genel aerodinamik etkinliğini olumsuz etkilemektedir.



Şekil 37. Tam akış ayrılmasının olduğu ters akış bölgeleri (1) ($Re=150.000$ ve $\alpha=9^\circ$)



Şekil 38. Tam akış ayrılmasının olduğu ters akış bölgeleri (2) ($Re=150.000$ ve $\alpha=9^\circ$)

4.3.5. Bombeli Bölgede Akış Özellikleri

Kanat modelinin ön kısmındaki bombeli biyomimetik çıkıntı, akış özelliklerini değiştiren önemli bir faktördür. Şekil 39’da modelin bombeli kısmında oluşan türbülanslı akış yapısı görseli verilmiştir. Bu bölgede şişkinliğin varlığı, kanat yüzeyinin sağ ve sol yanlarında akışın ayrılmasına ve türbülanslı akış yapısının oluşumuna yol açmıştır. Bombeli biyomimetik çıkıntı de bölgenin üst kısmında kabarcık ayrılması gözlemlenmemiştir; bu, akışın bu bölgede türbülansa geçtiğini ve yüzeye yeniden yapışmadığını gösterir. Bombeli bölgedeki yan akışlar, kanat üzerindeki basınç dağılımını ve taşıma kuvvetini etkileyebilecektir.



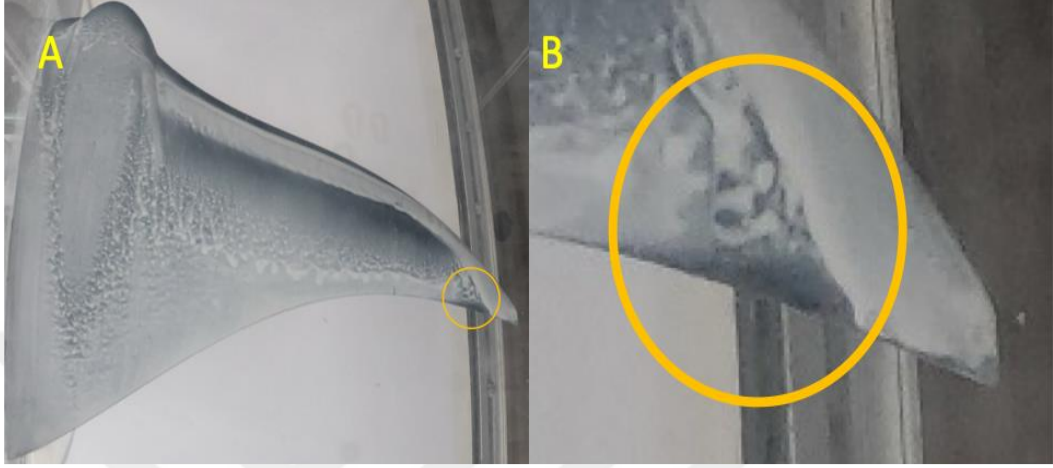
Şekil 39. Bombeli bölge türbülans akış yapısı

4.3.6. Kanat Ucu Girdapları

Şekil 40’da gösterilen kanat uçlarında belirgin şekilde kanat ucu girdapları oluşmuştur. Bu girdaplar, kanat ucu boyunca yüksek basınçlı alt yüzeyden düşük basınçlı üst yüzeye doğru olan akış farklılıklarından kaynaklanmaktadır. Kanat ucu girdapları, indüklenmiş sürüklenmeyi artırarak aerodinamik verimliliği azaltır. Şekil 40’de verilen görselde, bu girdaplar dönen yağ desenleri şeklinde açıkça gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, bu kanat modeli, çeşitli aerodinamik fenomenlerin detaylı bir şekilde incelenmesine imkân tanımaktadır. Geçiş bölgeleri, akış ayrılmaları, türbülanslı

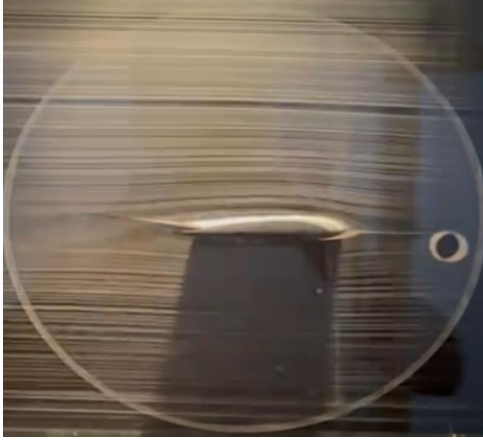
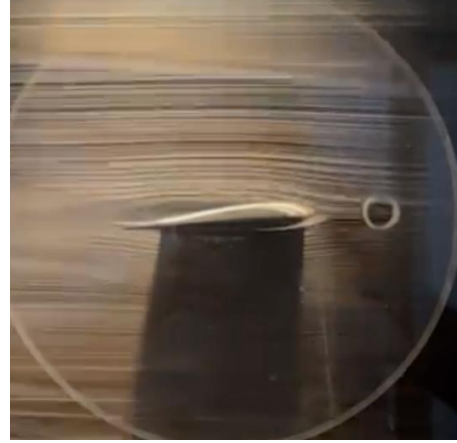
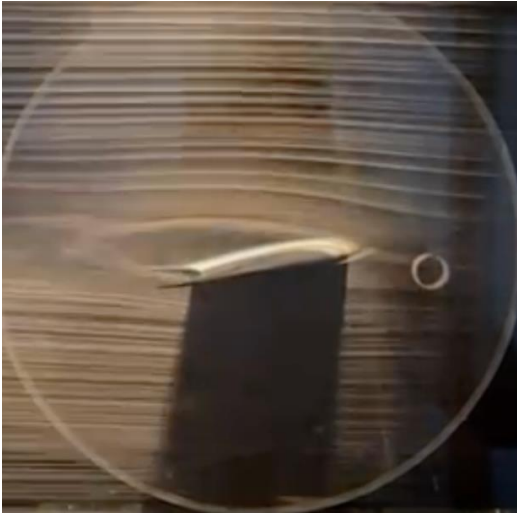
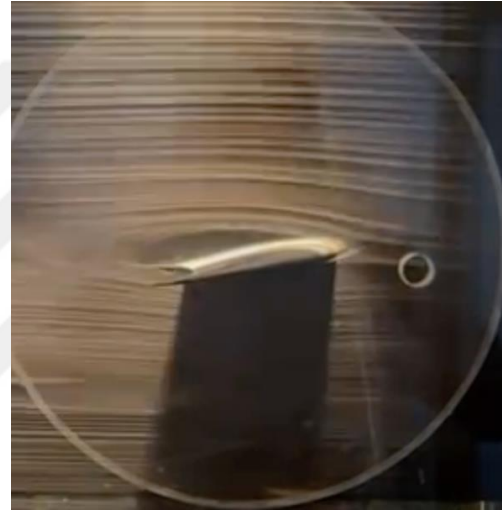
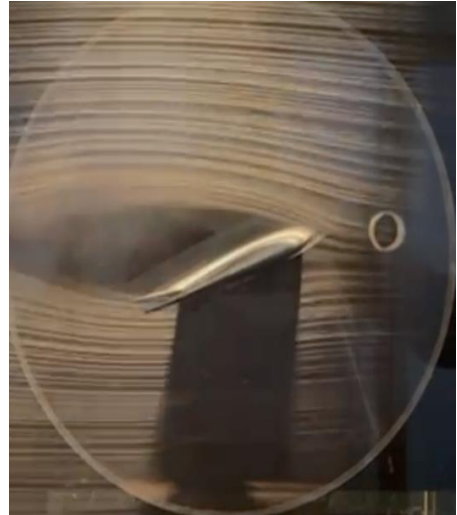
bölgeler ve yan akışlar gibi aerodinamik olaylar, modelin farklı bölümlerinde gözlemlenmiş ve kanadın genel aerodinamik performansını etkilemektedir. Kanadın ön kısmındaki bombeli yapılar ve kanat uçlarındaki girdap oluşumları, modelin aerodinamik davranışını anlamak ve optimize etmek için kritik yapılar oluşturmaktadır.



Şekil 40. Kanat ucu girdap oluşumu

4.4 Duman Deneyi Sonuçları

Model kanatlar etrafındaki iki boyutlu akış yapısını görselleştirmek için duman-teli akış görselleştirme yöntemi gerçekleştirilmiştir. MR3 modeline ait duman teli deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu deney, Şekil 41’de sonuçları verilen 0° , 4° , 8° , 12° , 16° ve 20° hücum açıları için yapılmıştır. Deney sonucunda elde edilen görseller, yağ akış analizi ve kuvvet ölçüm deneylerinden elde edilen verilerle karşılaştırılmış ve tüm deney sonuçlarının birbiriyle uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

a) Hücüm açısı $\alpha=0^\circ$ MR3 modelib) 4 Hücüm açısı $\alpha=4^\circ$ MR3 modelic) Hücüm açısı $\alpha=8^\circ$ MR3 modelid) Hücüm açısı $\alpha=12^\circ$ MR3 modelie) Hücüm açısı $\alpha=16^\circ$ MR3 modelif) Hücüm açısı $\alpha=20^\circ$ MR3 modeliŞekil 41. MR3 modeli için farklı hücüm açılarında duman akış görselleri görüntüleri ($Re=50.000$)

Şekil 41a) da görüldüğü üzere, $\alpha=0^\circ$ hücum açısında akış, kanat yüzeyinden kopmamış ve tamamen laminar bir şekilde ilerlemiştir. Şekil 41b) de $\alpha=4^\circ$ hücum açısında ise akış, kanadın arka bölgelerine doğru laminarlık özelliğini kısmen kaybetmiştir. Şekil 41c)'de $\alpha=8^\circ$ hücum açısından itibaren, modelin stol (tutunamama) bölgesine girdiği ve bu noktada maksimum taşıma kuvveti (lift) değerine ulaştığı daha önceden belirlenmiştir. Bu açıdan sonra, Şekil 41d-f)de akışın kanadın yalnızca ön kısmında tutunduğu, eğimin sona erdiği bölgeden itibaren ise akışın yüzeyden ayrıldığı ve tekrar yüzeye tutunamadığı gözlemlenmiştir. Bu durum, kuvvet ölçüm deneyleri ve yağ akış deneyleri ile uyum göstermiştir. Ancak duman deneyi görsel alımı amaçlı $Re=50.000$ için yapılmıştır.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, doğadan ilham alınarak tasarlanan bütünleşik kanatlı hava aracının aerodinamik özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Araştırma, biyomimetik bir uygulama olup, İHA'ların aerodinamik verimliliğini artırmayı hedeflemiştir. Hayalet vatozun kıvrık kanat yapısı ve akrobatik manevralarından esinlenen modeller, SolidWorks yazılımı ile tasarlanmış ve 3D yazıcı kullanılarak üretilmiştir. Simetrik olan bu modeller, farklı hücum açıları ve giriş hızlarında rüzgâr tüneline test edilmiştir. Testler, kuvvet ölçümleri ve yüzeydeki akış dağılımlarını ve etkilerini incelemek amacıyla yağ deneyleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bütünleşik Kanat (BK) tasarımının aerodinamik özellikleri, yağ deneyleri ile elde edilen görsel akış sonuçları aracılığıyla yorumlanmıştır. Altı eksenli kuvvet ölçüm sensörü ile yapılan ölçümlerde, sürüklenme ve taşıma kuvvetlerinin zamanla değişimi incelenmiş ve bu değişimlerin hem hücum açısına hem de geometrik veter uzunluğuna bağlı olarak tarif edilen Reynolds sayısında ses altı akış koşullarında nasıl değiştiği araştırılmıştır. Rüzgâr tüneline deneyleri, farklı hücum açıları (0° - 25°) ve Reynolds sayılarında ($Re=70.000$ ve $Re=150.000$) akış karakteristikleri, taşıma kuvveti, sürüklenme direnci katsayısı, C_L/C_D oranları ve frekans değerleri üzerinden yapılmış ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. $Re=70.000$ ve $Re=150.000$ değerlerinde yapılan analizlerde, taşıma/sürüklenme direnci katsayısı oranının en yüksek değerinin 7° - 8° aralığında olduğu görülmüştür.

Analiz sonuçlarına göre, 45° ve 60° kıvrık kanat modellerinin düşük ve orta hücum açılarında en yüksek aerodinamik verimliliği sağladığı tespit edilmiştir. Özellikle 60° kıvrık kanat modeli, taşıma katsayısı (C_L) açısından avantaj sağlarken, 90° kıvrık kanat modeli daha düşük performans göstermiştir. Bu bulgular, kıvrık kanat uçlarının optimize edilmiş tasarımının uçuş performansı üzerinde olumlu etkileri olduğunu doğrulamaktadır.

Yağ ve duman deneyi akış görselleştirme deneyleri birbirini doğrulamakta ve kuvvet katsayılarındaki değişimdeki akış fiziğini açıklamaktadır. Duman deneylerinde hücum kenarından akışın yük hücum açısında ayrılması olayı net olarak gözlemlenmiştir.

Biyomimetik yüzeyden yüksek hücum açılarında ($\alpha=3-10^{\circ}$) sınır tabakadan ayrılan akış, viskoz kuvvetlerinde etkisi ile ters (pozitif) basınç gradyanı oluşturmaya devam eder. Türbülanslı kayma tabakalı akış ayrıldıktan sonra hala yeterli enerjisi olduğundan, türbülanslı sınır tabakada tekrar yüzeye birleşir. Tekrar birleşme noktası ile

ayrılan akış bölgesi arasında yüzeyle sınırlandırılan bir ayrılma baloncuğu oluşur. Biyomimetik model yapısı akış yönündeki oluşan girdaplar sınır tabakanın momentumunun değişmesine, akış yüzeye bağlantısının genişlemesine ve maksimum taşıma kuvvetinin artmasına, tutunamama olayının geciktirilmesine neden olduğu yapılan nicel ve nitel deney sonuçlarıyla gösterilmiştir.

Sonuçlar, İHA performansını artırmaya yönelik biyomimetik ve geleneksel kanat tasarım yaklaşımlarına ışık tutmakta olup, bütünleşik kanat tasarımının yeni uygulama sonuçlarını sunmaya katkıda bulunabilir. Ayrıca, literatürdeki veri eksikliğinin giderilmesine yardımcı olabilir ve açık kodlu ya da ticari HAD programlarıyla yapılan analizlerin doğrulanmasında kullanılabilir. Bu şekilde, gerçek hava taşıtlarının tasarım ve üretim aşamalarında da fayda sağlayabilir. Önerilen ve incelenen geometrik model formlarının İHA'ların aerodinamik performansını artırabileceği de gösterilmiştir.

5.2 Öneriler

Rüzgâr tüneline yapılan ölçümlerde akış görselleşme nicel ölçümlerle örneğin Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçme (PIV) yöntemi ile yapılması faydalı olacaktır. Akış ayrılması, türbülanslı bölgeler ve girdap oluşumlarını daha net bir şekilde belirlemek amacıyla gelişmiş akış görselleştirme tekniklerinin (PIV) kullanılması tavsiye edilir. Bu, mevcut yağ akış testlerine ek olarak, kanat üzerindeki ayrıntılı akış yapılarının ve ayrılma bölgelerinin daha doğru bir şekilde tespit edilmesini sağlayacaktır.

Yapılan deneysel çalışmalar farklı türbülans modelleri kullanılarak Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği analiz sonuçlarının öncelikle doğrulanması amaçlı kullanılabilir. Ayrıca, Rüzgâr tüneli deneyleri düşük hızlarda sınırlı olduğu için tam sağlanmayan dinamik benzerlik analizin sağlanması için yüksek hızlarda HAD analizleri yapılması faydalı olabilir.

Kullanılan katı biyomimetik kanat yapısı gerçekte esnek, uzayıp kısalabilir, bükülebilir, aerodinamik/hidrodinamik performansı artırmayı hedeflemektedir. Bu çalışmadan elde edilen veriler kullanılarak kıvrık modeller üretilerek deneysel çalışmalar yapılabilir ve HAD analizleri ile karşılaştırılabilir.

Bu çalışmada sadece pasif bir akış kontrol yöntemi kullanılmıştır. Model üzerine emme, üfleme, hareketli kıvrık hareket mekanizmaları ile aktif akış kontrol yöntemleri de kullanılabilir.

Elde edilen sonuçlar Yapay Sinir Ağları, Yapay Zekâ gibi uygulamalarına veri girdisi olarak kullanılarak bilimsel çıktılar zenginleştirilebilir.

Kanat kalınlığı, eğim oranı ve profil şekli gibi farklı tasarım parametrelerinin aerodinamik performans üzerindeki etkilerinin incelenmesi önerilir. Bu tür parametrik çalışmalar, stol açısını geciktirme, belirginleştirme ve aerodinamik verimliliği artırma potansiyeli taşıyan tasarım değişikliklerini belirlemek için yararlı olabilir.

Deneyler sırasında farklı Reynolds sayıları ve akış hızları kullanarak, kanat tasarımlarının sıkıştırılabilir uçuş koşulları altındaki performanslarının değerlendirilmesi önerilir.

Stol açısının geciktirilmesi için mevcut kanat modellerinin ön ve arka kenarlarında geometrik değişiklikler yapılması denenebilir. Örneğin, kanat ön kenarına yönelik küçük eğim değişiklikleri veya çıkıntılar, akışın yüzeyde daha uzun süre kalmasını sağlayarak erken akış ayrılmalarını önleyebilir. Ayrıca, kanat yüzeyinin farklı kısımlarında mikro yapılar (örneğin, girdap üreticiler) eklenerek, laminar-türbülans geçiş bölgesinin yönetimi ve akış kontrolü iyileştirilebilir.

Stol açısının geciktirilmesi için mevcut kanat modellerinin ön ve arka kenarlarında geometrik değişikler yapılması denenebilir. Örneğin, kanat ön kenarına yönelik küçük eğim değişiklikleri veya çıkıntılar, akışın yüzeyde daha uzun süre kalmasını sağlayarak erken akış ayrılmalarını önleyebilir.

Ayrıca, kanat yüzeyinin farklı kısımlarında mikro yapılar (örneğin, girdap üreticiler) eklenerek, laminer-türbülans geçiş bölgesinin yönetimi ve akış kontrolü iyileştirilebilir. Bu tür modifikasyonlar, stol sonrası aerodinamik verimliliği de artırabilir.

Sonuç olarak, önerilen bu çalışmalar, kanat tasarımının aerodinamik performansını iyileştirmek, stol açısını geciktirmek ve genel aerodinamik verimliliği artırmak için yol gösterici niteliktedir. Bu tür araştırmalar, havacılık ve diğer ilgili mühendislik alanlarında yenilikçi tasarım çözümleri ve performans optimizasyonları sağlamak için kritik bir rol oynayacaktır.

6. KAYNAKLAR

- Ahmed, M., Abdelrahman, M., El-Bayoumi, G., & Elnomrossy, M. (2011). Optimal wing twist distribution for roll control of mavs. *The Aeronautical Journal*, 115(1172), 641-649. <https://doi.org/10.1017/s0001924000006333>
- Alexandersen, J. (2022). A detailed introduction to density-based topology optimisation of fluid flow problems with implementation in matlab.. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2207.13695>
- Anderson, K., & Gaston, K. J. (2013). Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11(3), 138-146.
- Biçer, M. (2021). Analysis of c-shaped compact microstrip antennas using deep neural networks optimized by manta ray foraging optimization with lévy-flight mechanism. *Sakarya University Journal of Computer and Information Sciences*, 4(2), 166-180. <https://doi.org/10.35377/saucis.04.02.903208>
- Cantó, J., Raga, A., Esquivel, A., & Sánchez-Salcedo, F. (2011). Gravitational drag on a point mass in hypersonic motion through a gaseous medium. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 418(2), 1238-1245. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.19574.x>
- Carmichael, B. H., (1981) *Low Reynolds number airfoil survey*, volume 1, California.
- Chen, Z., Um, T., & Bart-Smith, H. (2012). Bio-inspired robotic manta ray powered by ionic polymer–metal composite artificial muscles. *International Journal of Smart and Nano Materials*, 3(4), 296-308. <https://doi.org/10.1080/19475411.2012.686458>
- Dimitriou, S., Kapsalis, S., Dimopoulos, T., Mitridis, D., Pouchias, K., Panagiotou, P., & Yakinthos, K. (2022). Preliminary design of a BWB UAV for highway traffic monitoring. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1226, No. 1, p. 012010). IOP Publishing.
- Esmaeili, A. (2023). Combined passive and active flow control for fixed-wing micro air vehicles. *International Journal of Micro Air Vehicles*, 15. <https://doi.org/10.1177/17568293231197127>
- Essa, A. A. E. A. (2012). *Coupled Lagrange-Euler model for simulation of bubbly flow in vertical pipes considering turbulent 3D random walks models and bubbles interaction effects* (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).

- Farnsworth, J. A., Vaccaro, J. C., & Amitay, M. (2008). Active flow control at low angles of attack: stingray unmanned aerial vehicle. *AIAA journal*, 46(10), 2530-2544.
- Gad-el-Hak, M., & Blackwelder, R. F. (1985). The discrete vortices from a delta wing. *AIAA journal*, 23(6), 961-962.
- Gad-El-Hak, M., & Blackwelder, R. F. (1987). Control of the discrete vortices from a delta wing. *AIAA journal*, 25(8), 1042-1049.
- Geyman, M., Altman, A., & Parker, G. (2014). Wing/wall aerodynamic interactions in free flying, maneuvering mavs. *International Journal of Micro Air Vehicles*, 6(2), 89-103. <https://doi.org/10.1260/1756-8293.6.2.89>
- Ghenaiet, A. (2012, June). Effects of solid particle ingestion through an HP turbine. In *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air* (Vol. 44748, pp. 1583-1595). American Society of Mechanical Engineers.
- Healey, G. and Wang, L. (2021). Combining radar, weather, and optical measurements to model the dependence of baseball lift on spin and surface roughness. *Ieee Access*, 9, 132468-132479. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3114372>
- Ismail, N., Tasin, M., Sharudin, H., Basri, M., Mat, S., Yusoff, H., ve Nasir, R. (2022). Computational aerodynamic investigations on wash out twist morphing mav wings. *Evergreen*, 9(4), 1090-1102. <https://doi.org/10.5109/6625721>
- Jenkins, L. N., Yao, C. S., & Bartram, S. M. (2019). Flow-field measurements in a wing-fuselage junction using an embedded particle image velocimetry system. In *AIAA Scitech 2019 Forum* (p. 0078).
- Kaparos, P., Koltsakidis, S., Panagiotou, P., & Yakinthos, K. (2018). Experimental investigation of DBD plasma actuators on a BWB aerial vehicle model. In *2018 Flow Control Conference* (p. 4028).
- Kashitani, M., Suganuma, Y., Date, H., Nakao, S., Takita, Y., & Yamaguchi, Y. (2015). Experimental study on aerodynamic characteristics of blended-wing-body by a wake integration method. In *53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting* (p. 1228).
- Körbahtı, B. (2010). Sesalti akış etkisindeki delta kanatın deneysel olarak incelenmesi. *İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1(1).
- Lee, S. and Park, H. (2006). Modeling of an ipmc actuator-driven zero-net-mass-flux pump for flow control. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 17(6), 533-541. <https://doi.org/10.1177/1045389x06058879>

- Li, C., Wang, P., Dong, H., & Wang, X. (2018). A simplified shape optimization strategy for blended-wing-body underwater gliders. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 58, 2189-2202.
- Li, Z., Tan, C., Tio, W., Ang, J., & Sun, D. (2018). Manta ray gill inspired radially distributed nanofibrous membrane for efficient and continuous oil–water separation. *Environmental Science Nano*, 5(6), 1466-1472. <https://doi.org/10.1039/c8en00258d>
- Lissaman, P. B. S., (1983) Low-Reynolds-Number Airfoils, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 15,1 223–39.
- Liu, S., Qiao, L., Lu, N., & Jiang, B. (2014). Real-time estimation of cruise duration for electric-powered micro-uavs.. <https://doi.org/10.1109/ccdc.2014.6853091>
- Lowson, M. V., & Riley, A. J. (1995). Vortex breakdown control by delta wing geometry. *Journal of Aircraft*, 32(4), 832-838.
- Luo, Y., Pan, G., Huang, Q., Shi, Y., & Lai, H. (2019). Parametric geometric model and shape optimization of airfoils of a biomimetic manta ray underwater vehicle. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 24, 402-408.
- Menzer, A., Gong, Y., Fish, F., & Dong, H. (2022). Bio-inspired propulsion: towards understanding the role of pectoral fin kinematics in manta-like swimming. *Biomimetics*, 7(2), 45. <https://doi.org/10.3390/biomimetics7020045>
- Omidvarnia, F., & Sarhadi, A. (2024). Nature-Inspired Designs in Wind Energy: A Review. *Biomimetics*, 9(2), 90.
- Özğören, M., Sahin, B. & Rockwell, D. (2002). Vortex breakdown from a pitching delta wing incident upon a plate: Flow structure as the origin of buffet loading. *Journal of fluids and structures*, 16(3), 295-316.
- Pan, G., Huang, Q., Shi, Y., & Lai, H. (2019). Parametric geometric model and shape optimization of airfoils of a biomimetic manta ray underwater vehicle. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 24(3), 402-408. <https://doi.org/10.1007/s12204-019-2076-4>
- Panagiotou, P., Fotiadis-Karras, S., & Yakinthos, K. (2018). Conceptual design of a blended wing body MALE UAV. *Aerospace Science and Technology*, 73, 32-47.
- Payne F. M., T. Ng, Nelson R. C., Schiff L. B. . (1988) Visualization and wake surveys of vortical flow over a delta wing, Vol. 26, NO. 2, p.137-143.

- Qin, N., Vavalle, A., Le Moigne, A., Laban, M., Hackett, K., & Weinerfelt, P. (2004). Aerodynamic considerations of blended wing body aircraft. *Progress in Aerospace Sciences*, 40(6), 321-343.
- Raja, V., Murugesan, R., Kumar, S., Arputharaj, B., Rajendran, P., AL-bonsrulah, H., ... & Ketema, A. (2023). Design, computational aerodynamic, aerostructural, and control stability investigations of vtol-configured hybrid blended wing body-based unmanned aerial vehicle for intruder inspections. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2023, 1-31. <https://doi.org/10.1155/2023/9699908>
- Ravi H, L., , S., Kolomenskiy, D., & Tanaka, H. (2016). Biomechanics and biomimetics in insect-inspired flight systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences*, 371(1704), 20150390. <https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0390>
- Saha, S., & Majumdar, B. (2012). Flow visualization and CFD simulation on 65 delta wing at subsonic condition. *Procedia engineering*, 38, 3086-3096.
- Seyhan M. , Akbıyık H., Sarioglu M. ve Kececioglu, (2022) The effect of leading-edge tubercle on a tapered swept-back SD7032 airfoil at a low Reynolds number, *Ocean Engineering* , vol.266, Part 2, 112794.
- Seyhan M. And H. Akbıyık, (2024). An experimental investigation on the flow control of the partially stepped NACA0012 airfoil at low Reynolds numbers, *Ocean Engineering* , vol.306, 2024
- Seyhan, M., Sarioglu, M., ve Akansu, Y. E., (2021) Influence of Leading-Edge Tubercle with Amplitude Modulation on NACA 0015 Airfoil, *AIAA Journal*, 59,10, 3965– 3978.
- Seyhan, Mehmet, *Genlik modülasyonlu dalgalı geometriye sahip uçak kanadının aerodinamik performansının deneysel incelenmesi* Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, 2022.
- Shakouchi, T. (2020). Passive flow control of jets. *Mechanical Engineering Reviews*, 7(1), 19-00386-19-00386. <https://doi.org/10.1299/mer.19-00386>
- Spurny, V., Pritzl, V., Walter, V., Petrlik, M., Baca, T., Stepan, P., ... & Saska, M. (2021). Autonomous firefighting inside buildings by an unmanned aerial vehicle. *Ieee Access*, 9, 15872-15890.
- Su, W. and Cesnik, C. (2010). Nonlinear aeroelasticity of a very flexible blended-wing-body aircraft. *Journal of Aircraft*, 47(5), 1539-1553. <https://doi.org/10.2514/1.47317>

- Sudhakar, S., Chandankumar, A., & Venkatakrishnan, L. (2016). Influence of propeller slipstream on vortex flow field over a typical micro air vehicle. *The Aeronautical Journal*, 121(1235), 95-113. <https://doi.org/10.1017/aer.2016.114>
- Taheri, A. (2021). Hydrodynamic analysis of bionic chimerical wing planforms inspired by manta ray eidonomy. *Indonesian Journal of Engineering and Science*, 2(3), 011-029. <https://doi.org/10.51630/ijes.v2i3.25>
- Turgut, O. (2020). A novel chaotic manta-ray foraging optimization algorithm for thermo-economic design optimization of an air-fin cooler. *Sn Applied Sciences*, 3(1). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-04013-1>
- Valencia, E., Alulema, V., & Hidalgo, V. (2018). Weight assessment for a blended wing body-unmanned aerial vehicle implementing boundary layer ingestion. *Iop Conference Series Materials Science and Engineering*, 383, 012068. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/383/1/012068>
- Wang, S., Olejnik, D., Wagter, C., Oudheusden, B., Croon, G., & Hamaza, S. (2022). Battle the wind: improving flight stability of a flapping wing micro air vehicle under wind disturbance with onboard thermistor-based airflow sensing. *Ieee Robotics and Automation Letters*, 7(4), 9605-9612. <https://doi.org/10.1109/lra.2022.3190609>
- Wang, Z., Yu, J., & Zhang, A. (2016). Hydrodynamic performance analysis of a biomimetic manta ray underwater glider.. <https://doi.org/10.1109/robio.2016.7866561>
- Yanıktepe, B., Özalp, C., & Canpolat, C. (2016). Aerodynamics and flow characteristics of X-45 delta wing planform. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(1), 1-10.
- Zhang, D., Pan, G., Cao, Y., Huang, Q., & Cao, Y. (2022). A novel integrated gliding and flapping propulsion biomimetic manta-ray robot. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(7), 924.
- Zhao, W., Zhang, Z., & Wang, L. (2020). Manta ray foraging optimization: an effective bio-inspired optimizer for engineering applications. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 87, 103300. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.103300>
- Zhao, X., Yang, Y., & Ma, X. (2021). Kriging aerodynamic modeling and multi-objective control allocation for flying wing uavs with morphing trailing-edge. *Ieee Access*, 9, 62394-62404. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3073592>