

**ŞEKİL DEĞİŞTİREN KANAT YAPISI KULLANIMININ İNSANSIZ HAVA
ARACI PERFORMANSINA ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK
İNCELENMESİ**

Emre ÖZBEK

Doktora Tezi

Uçak Gövde Motor Bakım Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ

(İkinci Danışman: Doç. Dr. Selçuk EKİCİ)

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ocak 2023

Bu tez çalışması BAP Komisyonu tarafından kabul edilen 21DRP049 no.lu proje kapsamında desteklenmiştir.

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Emre ÖZBEK'in ŞEKİL DEĞİŞTİREN KANAT YAPISI KULLANIMININ İNSANSIZ HAVA ARACI PERFORMANSINA ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ başlıklı çalışması 19/01/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Uçak Gövde Motor Bakım Ana Bilim Dalında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvan Adı Soyadı

İmza

Üye	: Prof. Dr. Melih Cemal KUŞHAN
Üye	: Doç. Dr. Işıl YAZAR
Üye	: Doç. Dr. Özge YETİK
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi İlkay ORHAN
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Elif KORUYUCU

Prof. Dr. Murat TANIŞLI

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Uçak Gövde Motor Bakım Anabilim Dalı ğrencisi Emre ÖZBEK'in şEKİL DEğİşTİREN KANAT YAPISI KULLANIMININ İNSANSIZ HAVA ARACI PERFORMANSINA ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımca incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.



Tez Danişmanı

Prof. Dr. Tahir Hikmet KARAKOÇ

ÖZET

ŞEKİL DEĞİŞTİREN KANAT YAPISI KULLANIMININ İNSANSIZ HAVA ARACI PERFORMANSINA ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Emre ÖZBEK

Uçak Gövde Motor Bakım Ana Bilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ocak 2023

Danışman: Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ

(İkinci Danışman: Doç. Dr. Selçuk EKİCİ)

Şekil değiştiren kanatlar en az havacılığın kendisi kadar eski bir konudur. Akıllara yakın tarihlerde incelenmeye başlanan bir teknoloji olduğu düşüncesini getirirse de Wright kardeşlerin uçağı aslında şekil değiştiren kanadı sayesinde yatış manevralarını gerçekleştirmiştir. Bu teknoloji, özellikle Soğuk Savaş döneminde kullanılmış, üzerine araştırmalar gerçekleştirilmiş ve daha sonra bazı ön yargılar sebebiyle insanlı havacılık tarafında hava araçlarına entegrasyonu tamamlanamamış bir konudur. Elektromekanik ünitelerin teknolojik gelişimi ve insansız hava araçlarının yaygınlaşması, şekil değiştiren kanatların araştırılması konusunda ikinci bir bahar yaratmıştır. Bu tez çalışmasında, şekil değiştiren kanat kullanımının örnekleri ve mevcut literatürü incelenmiştir. Literatürde tespit edilen eksikliklerin adreslendiği bir süreç akışı ortaya koyulmuştur. Bu süreç akışında çalışma kapsamında özgün ve yenilikçi bir İHA olan Vatoz tasarlanmıştır. Vatoz İHA için balık kılığı benzetimli şekil değiştiren kanat tasarımı gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, özgün bir artikülasyon metodu geliştirilerek patent başvurusu gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan şekil değiştiren kanadın analizleri, üretimi, rüzgâr tüneli testleri ve uçuş testleri gerçekleştirilerek konvansiyonel kanatla doğrudan kıyaslaması yapılmıştır. Ağırlık, maliyet, komplekslik gibi ön yargılar ekseninde sonuçlar değerlendirilmiştir.

Anahtar Sözcükler: İHA, Şekil değiştiren kanat, Kamburluk değişimi, Doğabenzetimi, Hava aracı tasarımı

ABSTRACT

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF MORPHING WING APPLICATIONS ON UNMANNED AIRCRAFT PERFORMANCE

Emre ÖZBEK

Department of Airframe and Powerplant Maintenance

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, January 2023

Supervisor: Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ

(Co-Supervisor: Assoc. Prof. Dr Selçuk EKİCİ)

Morphing wings are as old a topic as aviation itself. Although it brings to mind the idea that it is a technology that has started to be studied recently, the Wright brothers' plane actually performed roll maneuvers thanks to its morphing wing. This technology was used especially during the Cold War era, research was carried out on it, and later on, due to some prejudices, its integration into aircraft on the manned aviation side could not be completed. The technological development of electromechanical units and the boom of unmanned aerial vehicles have created a second spring in the search for morphing wings. In this thesis, examples of the use of morphing wings and the existing literature were examined. A process flow has been presented in which the deficiencies identified in the literature are addressed. In this process flow, an original and innovative UAV, the Vatoz (Stingray), was designed within the scope of the study. A fishbone-articulated morphing wing design was realized for the Stingray UAV. A unique articulation method has been developed and a patent application has been made. The designed morphing wing was directly compared with the conventional wing by performing analyses, production, wind tunnel tests and flight tests. The results were evaluated on the axis of prejudices such as weight, cost and complexity

Keywords: UAV, Morphing wing, Variable camber, Bio-inspired design, Aircraft design

TEŞEKKÜR

Lisansüstü akademik kariyerime başlamamı sağlayan ve bu yolculukta tecrübesi, bilgisi ve kabiliyetleri ile beni her zaman en iyi şekilde yönlendiren değerli hocam ve danışmanım Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ’a teşekkürlerimi sunarım. Kendisinin ifadesi ile “tezgâhından geçmiş olmak” bana çok şey kattı.

Çalışmalarımın tüm süreçlerinde emeği ve katkısını görebildiğim, bana sürekli motivasyon sağlayan, yoğun çalışmaları arasında bana zaman ayırmak konusunda hiç tereddüt göstermeyen değerli hocam, ikinci danışmanım Doç. Dr. Selçuk EKİCİ’ye teşekkür ederim.

Bu çalışmada tasarlanıp üretilen Vatoz İHA da dahil olmak üzere, tasarladığım İHA’ların tamamının pilotu; tecrübesi ve geri bildirimleri ile başarılarımızın baş mimarlarından biri, tez çalışmasında gerçekleştirilen son uçuşa ayak bileği alçıda olmasına rağmen büyük bir fedakârlık göstererek katılan Öğr. Gör. Dr. Yavuz DAL’a teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında stresimi paylaşan, bana tüm süreçlerimde bir aile ferdi seviyesinde destek olan, ilk Vatoz prototipini birlikte inşa ettiğimiz kadim dostum Semih DABAN’a teşekkür ederim.

Tez kapsamında gerçekleştirilen atölye çalışmaları sırasında ve uçuş testlerinde bana destek olan Mustafa AZER, Doğukan ÇİÇEK, Fethi Cem GÜRSU, Evren Yılmaz YAKIN, Burak TARHAN, Büşra BOĞA, Hüseyin ÇETİNER ve Sevim Sude BOZTAŞ başta olmak üzere tüm Anatolia Aero Design ekibindeki öğrencilerim ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Doktora eğitimim süresince bana verdikleri destek ve bana olan sarsılmaz güvenleri için sevgili Özbeklere: Anneme, Babama ve Ablama teşekkür ederim.

Son olarak bu tezin yazılabilmesinde büyük katkısı olan “kahvenin anonim mucidine” ve kahvenin ikinci mucidi, değerli dostum Alper TAŞÇI’ya teşekkürü borç bilirim.

Emre ÖZBEK

19/01/2023

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Emre ÖZBEK

İÇİNDEKİLER

SAYFA

BAŞLIK SAYFASI	I
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	II
DANIŞMAN ONAYI	III
ÖZET	IV
ABSTRACT.....	V
TEŞEKKÜR	VI
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	VII
İÇİNDEKİLER.....	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	XI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XII
GÖRSELLER DİZİNİ	XIII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XVII
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	8
2.1. İnsanlı Havacılık Endüstrisinde Şekil Değiştiren Yapıların Yeri.....	8
2.2. İnsansız Hava Araçlarında Şekil Değiştiren Kanatlar	13
2.2.1. Planform Odaklı Şekil Değiştiren Kanat Uygulamaları.....	14
2.2.1.1. Kanat Açıklığı Değişen Uygulamalar	14
2.2.1.2. Kanat Veteri Değişen Uygulamalar	19
2.2.1.3. Ok Açısı Değişen Uygulamalar	20
2.2.2. Planform Dışı Şekil Değiştiren Kanat Uygulamaları	22
2.2.2.1. Twist Açısı Değişen Uygulamalar	22
2.2.2.2. Dihedral Açısı Değişen Uygulamalar	24
2.2.2.3. Kanat Boyunca Bükülme Uygulamaları.....	27
2.2.3. Kanat Profili Odaklı Şekil Değiştiren Kanat Uygulamaları.....	27
2.2.3.1. Kanat Profili Kalınlığı Değişen Uygulamalar	28
2.2.3.2. Kanat Profili Kamburluğu Değişen Uygulamalar.....	28

2.3. Balık Kılçığı Benzetimli Şekil Değiştiren Kanat Çalışmaları	33
2.4. Balık Kılçığı Benzetimli Şekil Değiştiren Kanat Hakkında Bulgular	41
3. MOTİVASYON VE METODOLOJİ	46
3.1. Tezin Motivasyonu	46
3.2. Araştırma Soruları.....	47
3.3. Benimsenen Araştırma Metodolojisi	49
3.4. Tezin Yapısı, Özgün Değeri ve Önemi	49
4. VATOZ İHA TEST PLATFORMUNUN TASARIMI VE ÜRETİMİ	52
4.1. Vatoz İHA Tasarım Süreci.....	52
4.2. Vatoz İHA Prototip Üretim Süreci.....	65
4.3. Vatoz İHA Prototip Uçuş Testleri	68
5. ŞEKİL DEĞİŞTİREN KANAT TASARIMI VE PROTOTİP ÜRETİMLERİ .71	
5.1. Vatoz İHA Balık Kılçığı Benzetimli Şekil Değiştiren Kanat Tasarımı	71
5.2. Vatoz İHA Balık Kılçığı Benzetimli Şekil Değiştiren Kanat Üretimi.....	77
5.3. Vatoz İHA Balık Kılçığı Benzetimli Şekil Değiştiren Kanat Mekanizma Testleri.....	79
6. BALIK KILÇIĞI BENZETİMLİ ŞEKİL DEĞİŞTİREN KANADIN HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ ANALİZLERİ	81
6.1. Türbülans Modelinin Belirlenmesi.....	81
6.2. Çözüm Ağı.....	82
6.3. Kontrol Yüzeyi Boşluklarının HAD Analizi	84
6.4. Şekil Değiştiren Kanadın Konvansiyonel Flap ile Karşılaştırılması	88
6.5. HAD Analizlerinin Yorumlanması.....	91
7. BALIK KILÇIĞI BENZETİMLİ ŞEKİL DEĞİŞTİREN KANADIN RÜZGÂR TÜNELİ TESTLERİ	92
7.1. Test Düzenekinin Oluşturulması	92
7.2. Test Süreci ve Sonuçlar	95
7.3. Rüzgâr Tüneli Testlerinin Değerlendirilmesi.....	98
8. ŞEKİL DEĞİŞTİREN KANAT İLE UÇUŞ TESTİ GERÇEKLEŞTİRİLMESİ	100
8.1. Uçuş Öncesi Hazırlıklar.....	100
8.2. Uçuş Testi ve Değerlendirmeler	101

9. SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR	104
9.1. Tez Çalışmasının Sonuçları.....	104
9.2. Gelecek Çalışmalar	107
KAYNAKÇA.....	109
ÖZGEÇMİŞ	



TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1. Fishbac kanatların ortak özellikleri.....	42
Tablo 4.1. Vatoz İHA teknik özellikleri.....	57
Tablo 4.2. QF 2611 elektrik motorunun teknik özellikleri	58
Tablo 6.1. Model 1 için $0^{\circ} - 10^{\circ}$ hücum açısı sonuçları	87
Tablo 6.2. Model 2 için $0^{\circ} - 10^{\circ}$ hücum açısı sonuçları	87
Tablo 6.3. Model 3 için $0^{\circ} - 10^{\circ}$ hücum açısı sonuçları	90
Tablo 6.4. Model 4 için $0^{\circ} - 10^{\circ}$ hücum açısı sonuçları	90
Tablo 7.1. Rüzgâr tüneli test sonuçları: 8 durum	98
Tablo 7.2. Rüzgâr tüneli test sonuçları-had analizleri karşılaştırması	99

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Uçuşun fazları ve uçağın durumu.....	2
Şekil 1.2. Seyir uçuşunda kuvvetler dengesi	2
Şekil 1.3. Kuş kanadı ve konvansiyonel sabit kanatlı uçak kanadı	4
Şekil 1.4. Kuş kanadının iki farklı konfigürasyon arasındaki değişimi.....	5
Şekil 2.1. Literatür taramasında kullanılan sınıflandırma yaklaşımı.....	14
Şekil 2.2. Balık kılçığı benzetimli şekil değiştiren kanat tasarımlarının gelişimi	44
Şekil 3.1. Tez araştırmasında kullanılan özgün metodoloji.....	50
Şekil 4.1. PW-51 kanat profilinin geometrisi ve refleks fırr kenarı	56
Şekil 4.2. Vatoz İHA kanat profili taşıma katsayısı-hücum açısı grafiği	59
Şekil 4.3. Vatoz İHA kanat profili sürüklenme katsayısı-hücum açısı grafiği.....	59
Şekil 4.4. Vatoz İHA kanat profili taşıma katsayısı-sürüklenme katsayısı grafiği.....	60
Şekil 4.5. Vatoz İHA kanat profili yunuslama momenti katsayısı-hücum açısı grafiği.....	60
Şekil 4.6. Vatoz İHA 3B yunuslama momenti katsayısı-hücum açısı grafiği.....	62
Şekil 4.7. Vatoz İHA 3B taşıma katsayısı-hücum açısı grafiği	62
Şekil 4.8. Vatoz İHA 3B süzölme oranı – hücum açısı grafiği	63
Şekil 5.1. Balık kılçığı benzetimli şekil değiştiren kanat tasarım akışı.....	72
Şekil 6.1. Çözüm ağları	83
Şekil 6.2. Yakınlaştırılmış çözüm ağları	83
Şekil 6.3. Sürüklenme katsayısı çözüm ağı analizi	84
Şekil 6.4. Sürüklenme katsayısı çözüm ağı hata oranı	84

GÖRSELLER DİZİNİ

Sayfa

Görsel 2.1. Doğan kuşunun uçuş sırasında bacak konumu.....	9
Görsel 2.2. Tu-144 uçağının şekil değiştiren gövde uygulaması.....	9
Görsel 2.3. F-14 Tomcat uçağının şekil değiştiren ok açısı uygulaması	10
Görsel 2.4. Boeing 777X uçağının şekil değiştiren kanat ucu uygulaması.....	11
Görsel 2.5. Harrier uçağının itki vektörü kontrolü uygulaması	11
Görsel 2.6. V-22 Osprey tiltrotor uygulaması.....	12
Görsel 2.7. Pnömatik kanat açıklığı değiştiren kanatların kapalı ve açık versiyonu	15
Görsel 2.8. Çalışmanın test platformu olarak kullanılan Olhaparo İHA.....	16
Görsel 2.9. Üç farklı kanat açıklığı durumu.....	16
Görsel 2.10. GNAT spar tasarımının kanat açıklık değişimi	17
Görsel 2.11. The Transformer Aircraft uçağının rüzgâr tüneli testleri ve uçuş testi	18
Görsel 2.12. ASAPP adlı tasarımın kanat açıklığı değiştirme mekanizma çizimleri.....	18
Görsel 2.13. Kanat uzunluğu değişiminin rüzgâr tüneli testleri.....	19
Görsel 2.14. Kanat veterini artıran kızaklı rib tasarımı.....	20
Görsel 2.15. Kanat veter değişikliği kabiliyetli helikopter rotor palı	20
Görsel 2.16. Ok açısı değişen kanat ile tünelerle iniş gerçekleştirilmesi	21
Görsel 2.17. 30 ve 60 derece ok açısında kanadın durumu.....	22
Görsel 2.18. Tork çubuğu ve asimetrik kanat burulması	23
Görsel 2.19. Matamorpt-2 insansız hava aracı.....	24
Görsel 2.20. Tel demetli twist açısı değişen kanat tasarımı	24
Görsel 2.21. Martı kanadı benzetimli dihedral açısı değişimleri	25
Görsel 2.22. Pnömatik yapay kas ile kanat artikülasyonu	26
Görsel 2.23. Güneş enerjili İHA'nın N kanat dihedral değişimi.....	26
Görsel 2.24. HECS kanat tasarımı ve şekil hafızalı tel kompartımanı.....	27
Görsel 2.25. Şişirilebilir kanatların profil değişikliği mekanizması	30
Görsel 2.26. Birbirine bağlı rijit dilimler yöntemi ile kamburluğu değişen kanatlar.....	30
Görsel 2.27. Şekil hafızalı alaşımlar kullanılarak kamburluğu değişen kanatlar.....	31
Görsel 2.28. Boşluklu rib tasarımı kullanılarak kamburluğu değişen kanatlar.....	31
Görsel 2.29. Oluklu paneller ile kamburluğu değişen kanatlar.....	32
Görsel 2.30. Dilimli esnek rib yapısı ile kamburluğu değişen kanatlar	33
Görsel 2.31. İlk FishBAC kanat konsepti	34

Görsel 2.32. İlk FishBAC prototipinin hareket kabiliyeti.....	35
Görsel 2.33. Oluklu kompozit paneller içeren FishBAC konsepti.....	35
Görsel 2.34. 2. Jenerasyon FishBAC konsepti.....	36
Görsel 2.35. 2. Jenerasyon FishBAC prototipi	36
Görsel 2.36. Rüzgâr tüneli test parçaları: FishBAC solda, konvansiyonel flaplı sağda	37
Görsel 2.37. Modüler FishBAC kanat tasarımı.....	38
Görsel 2.38. Scopelliti ve ark. tarafından geliştirilen şekil değiştiren kanat tasarımı.....	39
Görsel 2.39. FishBAC kanatlar için spiral kasnak negatif sertlik mekanizması.....	39
Görsel 2.40. Rüzgâr tüneli testi uygulanan FishBAC kanat	40
Görsel 2.41. Arthur Wong tarafından tasarlanan FishBAC kanat	40
Görsel 2.42. Riviero ve ark., tarafından tasarlanan modüler FishBAC kanat.....	41
Görsel 4.1. Vatoz balığının üstten görüntüsü.....	53
Görsel 4.2. Boeing firmasının BWB – BLI konsepti.....	54
Görsel 4.3. Airbus firmasının Zero-e konsepti.....	54
Görsel 4.4. Vatoz İHA katı model görüntüsü	55
Görsel 4.5. Vatoz İHA EDF yerleşimi	57
Görsel 4.6. Vatoz İHA gövde istasyonlarının katı modeli	61
Görsel 4.7. Vatoz İHA analiz modeli	61
Görsel 4.8. Vatoz İHA VLM2 Analiz Görselleştirmesi.....	63
Görsel 4.9. Vatoz İHA dikey stabilize katı modeli	64
Görsel 4.10. Vatoz İHA gövde parçaları.....	65
Görsel 4.11. Vatoz İHA gövde bağlantı noktaları.....	66
Görsel 4.12. Gövde kapak boşlukları.....	66
Görsel 4.13. Vatoz İHA Gövde montajı.....	67
Görsel 4.14. Vatoz İHA prototipi.....	67
Görsel 4.15. Vatoz İHA araştırmacı tarafından elden atılışı.....	68
Görsel 4.16. Vatoz İHA ilk uçuş testi-1	69
Görsel 4.17. Vatoz İHA ilk uçuş testi-2.....	69
Görsel 5.1. Balık kılçığı benzetimli rib tasarım iterasyonları	73
Görsel 5.2. Balık kılçığı benzetimli rib prototip üretimleri	74
Görsel 5.3. Balık kılçığı benzetimli kanadın üç boyutlu modeli.....	74

Görsel 5.4. Balık kılçığı benzetimli değişken kanadın yukarı yönlü deformasyonu	75
Görsel 5.5. Balık kılçığı benzetimli değişken kanadın aşağı yönlü deformasyonu	75
Görsel 5.6. Birinci prototipin yukarı yönlü hareketi	76
Görsel 5.7. Birinci prototipin aşağı yönlü hareketi	76
Görsel 5.8. Şekil değiştiren kanat 2. prototip malzemeleri	77
Görsel 5.9. Şekil değiştiren kanat ve konvansiyonel kanat görsel incelemesi	78
Görsel 5.10. Şekil değiştiren kanat ve masaüstü test düzeneği	78
Görsel 5.11. Şekil değiştiren kanadın masa üstü testleri	79
Görsel 5.12. Mekanizma testi sola yatış hareketi	79
Görsel 5.13. Mekanizma testi sağa yatış hareketi	80
Görsel 5.14. Mekanizma testi burun aşağı hareketi	80
Görsel 5.15. Mekanizma testi burun yukarı hareketi	80
Görsel 6.1. Kontrol yüzey boşluklu model 1	85
Görsel 6.2. Kontrol yüzey boşluksuz, şekil değiştiren kanat model 2	85
Görsel 6.3. Kontrol yüzey boşluklu model 1 – 10°	86
Görsel 6.4. Kontrol yüzey boşluksuz, şekil değiştiren kanat model 2 – 10°	86
Görsel 6.5. Model 3 hız gradyanları	89
Görsel 6.6. Model 4 hız gradyanları	89
Görsel 7.1. RC benchmark test düzeneğinin kurulumu	92
Görsel 7.2. Test düzeneğinin kalibrasyonu	93
Görsel 7.3. Test düzeneği-kanat montaj parçası	93
Görsel 7.4. Kapalı test odası-test düzeneği bağlantısı	94
Görsel 7.5. Test parçasının rüzgâr tüneli test odasında yerleşimi	95
Görsel 7.6. Test parçasının hücum açısı kontrol uygulaması	95
Görsel 7.7. Test parçası 1 rüzgâr tüneli testleri	96
Görsel 7.8. Test parçası 2 rüzgâr tüneli testleri	97
Görsel 7.9. Rüzgâr tüneli testleri veri dosyasından ekran görüntüsü	97
Görsel 8.1. Vatoz İHA elden atış düzeneği	101
Görsel 8.2. Vatoz İHA havalanma anı	102
Görsel 8.3. Şekil değiştiren kanat ile uçuştan bir fotoğraf	102
Görsel 8.4. Son yaklaşma sürecinde kanadın görünümü	103
Görsel 8.5. Gövde üzerine başarıyla gerçekleştirilen iniş	103
Görsel 9.1. Konvansiyonel kanat ağırlığı	105

Görsel 9.2. Şekil değiştiren kanat ağırlığı	105
Görsel 9.3. Şekil değiştiren kanadın konvansiyonelin servomotoru ile ağırlığı	106



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

3B	: Üç Boyutlu
ABS	: Akrilonitril Bütadien Stiren
Alpha	: Hücüm Açısı
AR	: Açıklık Oranı
ASAPP	: Aktif Yayılma Dönüşümü Pasif Yunuslama (Active Span Morphing Passive Pitching)
B	: Kanat Açıklığı
BLI	: Sınır Tabaka Yutulması (Boundary Layer Ingestion)
BWB	: Harmanlanmış Kanat Gövde (Blended Wing Body)
C	: Veter Uzunluğu
C.g	: Ağırlık Merkezi
C _d	: 2B Sürüklenme Katsayısı
C _D	: 3B Sürüklenme Katsayısı
C _l	: 2B Taşıma Katsayısı
C _L	: 3B Taşıma Katsayısı
C _m	: 2B Yunuslama Momenti Katsayısı
C _M	: 3B Yunuslama Momenti Katsayısı
CSV	: Virgül ile Ayrılmış Değerler (Comma-separated values)
D	: Sürüklenme Kuvveti
EDF	: Kanallı Elektrik Fan (Electric Ducted Fan)
ESC	: Elektronik Hız Kontrol Devresi (Electronic Speed Controller)
FishBAC	: Balık Kılçığı Mafsallı Kanat Bombesi (Fish Bone Articulated Wing Camber)
GNAT	: Dişli Tahrikli Otonom İkili Kiriş (Gear Driven Autonomous Twin Spar)

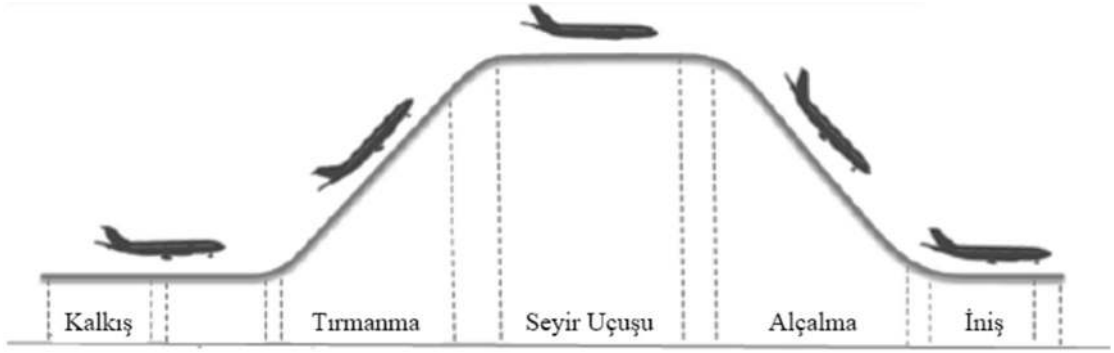
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HECS	: Hiperelliptik Bombeli Açıklık (Hyperelliptical Cambered Span)
İHA	: İnsansız Hava Aracı
L	: Taşıma Kuvveti
LiPo	: Lityum Polimer
M	: Moment
N	: Newton
NACA	: Ulusal Havacılık Danışma Komitesi (National Advisory Committee for Aeronautics)
PLA	: Poliaktik Asit
S_{ref}	: Referans Kanat Alanı
T	: İtke Kuvveti
TRL	: Teknolojik Hazırlık Düzeyi (Technological Readiness Level)
UAM	: Kentsel Hava Hareketliliği (Urban Air Mobility)
UAV	: İnsansız Hava Aracı (Unmanned Aerial Vehicle)
V	: Hız
VLM	: Girdap Kafes Yöntemi (Vortex Lattice Method)
VTOL	: Dikey İniş Kalkış Özelliği (Vertical Take-off and Landing)
W	: Ağırlık
P	: Yoğunluk

1. GİRİŞ

Havacılık tarihinden bahsedilirken insanların kuşların uçuşuna öykündüğü ve ilk çalışmaların bu şekilde başladığı konu edilir [1]. Günümüzde havadan ağır insanlı veya insansız hava araçlarını sabit kanatlı, döner kanatlı ve hibrit araçlar olarak kategorize etmekteyiz [2]. Bu sınıflandırmada sözü geçen sabit kanat kavramı, kanatların uçuş boyunca herhangi bir şekilsel değişikliğe uğramaması durumunu anlatır. Doğada yer alan uçucular olan kuşlar, yarasalar ve böceklerin ise kanat geometrilerinin uçuş süresince değişkenliğe uğradığı bilinmektedir. Kuşların, kanat iskeletleri ve tüylerinin şekillerini değiştirerek kanatlarının oluşturduğu aerodinamik kuvvetleri nasıl yönettiği konusunda çalışmalar mevcuttur [3]. Uçan memeliler olarak tanımlanan yarasalar da kanatları arasındaki membranları kullanarak kanatlarında şekilsel değişiklikler yaratabilmektedir [4]. Daha küçük boyutlu uçucular olan kanatlı böceklerde de benzer bir membran şekil değişikliği söz konusudur [5].

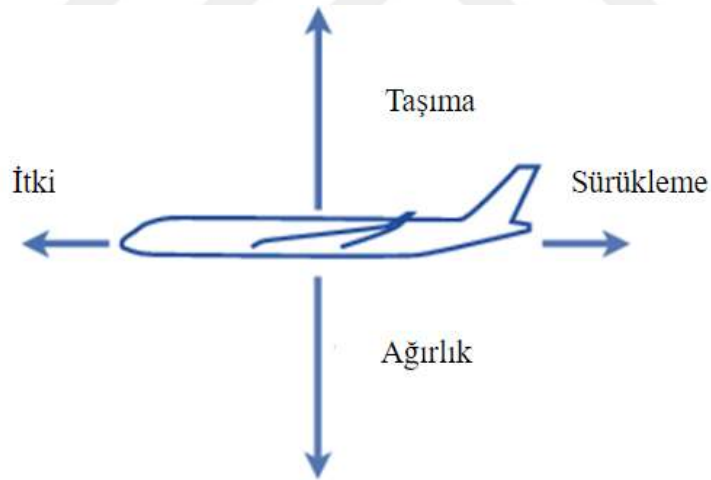
İnsanlık olarak geliştirdiğimiz uçaklarda ise şekil değiştiren kanat teknolojisi yaygın veya genel geçer bir teknolojiye dönüşmemiştir. Bunun nedenlerine tezin devamında değinilmiştir. Bir hava aracında uçuş sırasında kontrolün sağlanması için yüzeylerde farklı aerodinamik kuvvetler elde edilmelidir. Örneğin; uçakların kanatlarında bulunan aileronlar yani kanatçıklar birbirine zıt olarak çalışırlar. Bir kanattaki aileron aşağı doğru hareket ederken, diğeri yukarı doğru hareket eder ve böylelikle uçağın bir kanadındaki taşıma kuvveti artırılırken diğesindeki azaltılmış olur. Bu durum uçağı yatış hareketine sokar. Aileron (kanatçık), rudder (yalpa dümeni) ve elevator (irtifa dümeni) bir hava aracının üç eksenlerdeki kontrolünü sağlamasına imkân veren standart kontrol yüzeyleridir [6]. Bu yapıların yanı sıra, bazı uçak konfigürasyonlarında ruddervator veya elevon gibi kombine kontrol yüzeyleri bulunur [7-8]. Standart kontrol yüzeylerine ek olarak günümüz yolcu uçaklarının kanatlarında flap, slat/slot ve spoiler adı verilen üç ek yapı ile sıklıkla karşılaşılır. Bu yapıların amacı da uçağın kalkış ve iniş performansını kanatlar üzerindeki akışı manipüle ederek iyileştirmektir.

Bir hava aracının uçuş döngüsü kalkış, tırmanış, seyir uçuşu, alçalma ve iniş şeklinde beş faz ile özetlenebilir [9]. Bu fazlar sırasında uçağın durumu Şekil 1.1’de gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Uçuşun fazları ve uçağın durumu

Uçuşun en uzun safhası, görevin yapıldığı irtifada gerçekleşen seyir uçuşudur [10]. Havada kalma süresinin uzunluğu ve yüksek menzil hemen hemen tüm uçaklar ve görev tipleri için önemli bir performans ölçütüdür [11]. Bu yüzden, insanlı ve insansız hava araçlarının tasarımlarında seyir uçuşu adı verilen bu uzun safhayı en verimli şekilde uçabilecek tasarımları gerçekleştirmek çok önemlidir [12]. Uçağın üzerindeki kuvvetlerin seyir uçuşundaki durumu Şekil 1.2’de gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Seyir uçuşunda kuvvetler dengesi

Seyir uçuşunun sağlanabilmesi için gerekli koşullar hava aracına etkiyen dört kuvvetin birbirine eşit olması ve ağırlık merkezi etrafındaki toplam momentin sıfıra eşit olmasıdır. Bu durumlar aşağıdaki denklemlerle gösterilir.

$$L = W \quad (1.1)$$

$$D = T \quad (1.2)$$

$$\sum M_{c.g} = 0 \quad (1.3)$$

Hava araçlarının uçuşu operasyonları sırasında gerçekleşen kalkış ve tırmanış gibi fazlar ile manevralar, uçağın bu kuvvetler ve momentler eşitliğinden çıkartılması ile elde edilir. Kanatların ürettiği taşıma kuvvetini bir fonksiyon olarak değerlendirirsek: objeye, harekete ve akışkana bağlı olan bir akışkanlar dinamiği olayı olduğunu görürüz. Uçak kanadının ürettiği taşıma kuvveti:

- Kanadın şekil ve boyutuna,
- Hareketin hızına ve bağlı akışkan yönüne,
- Akışkanın viskozitesi ve sıkıştırılabilirlik özelliklerine bağlıdır.

Kanadın ürettiği taşıma kuvveti, bu bilgilerden hareketle aşağıdaki denklem ile gösterilebilir:

$$L = 0,5 \cdot \rho \cdot V_{\infty}^2 \cdot S_{ref} \cdot C_L \quad (1.4)$$

Bu denklemin kullanımı, bir hava aracının belirli bir açı ve hızla yaklaşan/veya içerisinde ilerlediği akışkanın kanat üzerinde üreteceği taşıma kuvvetinin hesaplanmasına olanak tanımaktadır [13]. Burada yer alan C_L ifadesi, üç boyutlu taşıma katsayısı olarak ifade edilen boyutsuz bir sayıdır. Bu değer, büyüklüğü hücum açısı değeri ile değişen bir değişkendir. Airfoillerin (hava profillerinin) her biri için, uçuşun gerçekleştirileceği hücum açıları aralığında bu değerın akış çözümleri ile hesaplanması veya ampirik yollarla ölçülmesi gerekmektedir [14, 15].

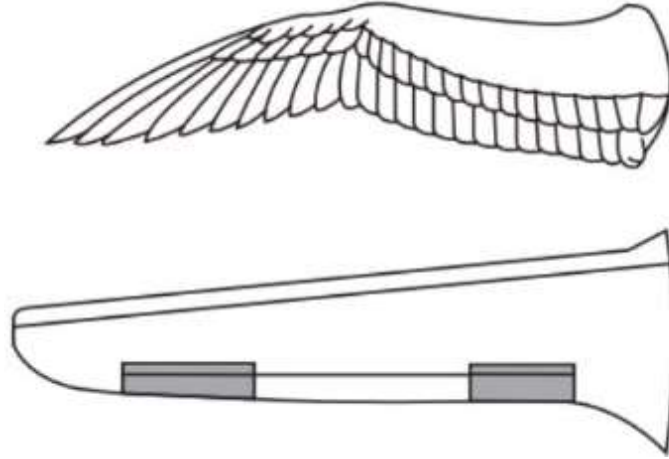
Bir hava aracının uçuşu sırasında, Denklem 1.4'te yer verilen değişkenler arasında yoğunluk dışında etki edilebilecek üç faktör bulunmaktadır. Hava aracı kanatlarının referans alanı, kanatların profili ve aracın hızı üzerinde değişiklikler yapılarak aynı eşitlik kurulabilir. Flaplar iki kanadın da iç bölümünde yer alarak eş yönlü olarak çalışırlar ve lokal kamburluğu artırarak kanadın sahip olduğu taşıma katsayısı değerini artırırılar. Uçakların kalkışları sırasında, kanat kamburluğunu artıran modern boşluklu flaplar devreye sokularak taşıma katsayısı değeri artırılır [16]. Böylece daha düşük bir hızda uçağın taşıma-ağırlık dengesini kurabilmesi ve havalanması sağlanır. Flapların varlığı uçakların pistte daha kısa bir süre ivmelenerek veya “koşarak” kalkış yapmasını sağlar. Dolayısıyla kalkış ve iniş esnasında kullanılarak uçakların daha kısa pistlere uçuş operasyonu gerçekleştirebilmesine imkân verir [17].

Çalışma prensipleri ve kullanım nedenlerine değinilen standart kontrol yüzeyleri ve yüksek taşıma tertibatları, uçağın boyutuna göre değişen, uçak yapılarına menteşelenmiş, hidromekanik veya elektromekanik aktüatörler ile hareket ettirilen hareketli yüzeylerdir. Bu yüzeyler çalışmanın geri kalanında konvansiyonel kontrol yüzeyleri olarak

adlandırılacaktır. Konvansiyonel kontrol yüzeyi kavramı, şekil değiştiren kanat yapılarından ayırmak için genel geçer veya alışlagelmiş kontrol yüzeyini ifade etmek için kullanılmaktadır [18].

Doğadaki uçucuların kanat yapıları ve uçuş sırasındaki kanat değişimleri incelendiğinde, sabit kanatlı hava araçlarımızın aksine büyük şekil değişiklikleri gözlemlenebilmektedir [19]. Kuşlar kanat geometrilerinin iki ve üç boyutlu özelliklerini uçuş boyunca değiştirerek büyük performans avantajları sağlamaktadır [20]. İki boyutlu değişiklikler, kanat profilinin özellikleri olan kalınlık ve kamburluk gibi değişkenleri kapsamaktadır. Üç boyutlu değişiklikler ise kanat uzunluğu, kanat veteri, kanat dihedral açısı ve kanat ok açısı gibi kanadın sonlu ve üç boyutlu yapısında yer alan değişkenlikleri ifade etmektedir [21].

Kuşların uçuş performansını yükseltebilen iki ve üç boyutlu kanat değişikliklerine karşın, günümüzdeki konvansiyonel hava aracı tasarımlarında seyir uçuşu safhasına göre optimizasyonu yapılmış bir tasarım ve bu tasarımın kabiliyetlerini bazı uçuş fazlarında artıracak menteşeli konvansiyonel eklentiler bulunmaktadır. Dolayısıyla uçak tasarımlarımıza bakıldığında, Şekil 1.3'te görüldüğü gibi kuşların sahip olduğu kanatlarla kıyaslandığında çok daha basit yapılar modellediğimiz ve kullandığımız anlaşılmaktadır.



Şekil 1.3. Kuş kanadı ve konvansiyonel sabit kanatlı uçak kanadı [22]

Söz konusu durum modern konvansiyonel uçakların performanslarında doğaya öykünme metodunun kullanılması ile geliştirilebilecek bir performans eksikliği olduğunu bizlere anlatmaktadır. Ayrıca birçok rolü üstlenebilecek uçakların tasarlanabilmesi için daha geniş bir performans aralığında çalışabilecek uçakların tasarlanması verimlilik için

önemlidir. Örneğin kanat kamburluğu değiştirilerek hem düşük faydalı yük hem de yüksek faydalı yük durumlarında görevi gerçekleştirebilecek çok rollü bir uçak tasarımı yapılabilir. Bu durum modern konvansiyonel uçakların kargo uçağı ve keşif uçağı gibi farklı rollerde üretilmesinin de bir verimlilik problemi olduğunu bizlere hatırlatmalıdır. Birçok rolü gerçekleştirebilecek yüksek performanslı uçaklara sahip olmak; bakım, üretim, yakıt sarfıyatı ve uçuş eğitimi gibi maliyetli kalemlerde verimlilik avantajı sunacaktır. Havacılıkta maliyetlerin düşürülmesi her sektörde olduğu gibi önemlidir ve çok rollü araçlar bunu sağlayabilir [23]. Şekil değiştiren kanat teknolojileri bu kapsamda değerlendirildiğinde, modern hava araçlarına çok rollülük konusunda avantajlar sağlayabilecek kilit bir teknolojidir [24]. Şekil 1.4, iki farklı uçak konfigürasyonu arasındaki geçişin kuşların sahip olduğu şekil değiştiren kanatlar ile nasıl gerçekleştirildiğini göstermektedir.



Şekil 1.4. Kuş kanadının iki farklı konfigürasyon arasındaki değişimi

İnsanlık olarak 1903 yılında Wright kardeşlerin ilk fonksiyonel uçağı, Wright Flyer'ı üretmesi ve geliştirmesi sonucu uçuşa hayalini gerçeğe çevirdik [26]. Havacılığın ilk yüzyılı, çoğunlukla uçakları havada tutmaya çalışmak ve emniyetli uçuşlar sağlayacak uçakları üretebilmek ile geçti. Bu yüzyılda I ve II. Dünya Savaşları sürecinde havacılığın önemi ülkeler tarafından anlaşıldı ve havacılık teknolojilerinde büyük gelişmeler yaşandı [27]. Savaşın bitişi ile birlikte bu süreçte elde edilen teknolojik birikim, sivil yolcu taşımacılığı konusuna yoğunlaştırıldı [28]. İlk yüzyılın sonlarına doğru ise, havacılık sektörünün sorunlarını fosil yakıtlara olan bağıllık, bakım ve operasyon maliyetlerinin düşürülmesi ve çevreye verilen zararlar temelinde çeşitli konular oluşturmaya başladı [29,30,31].

İçerisinde olduğumuz ikinci havacılık yüzyılı ise verimliliğin artırılması ve yeni teknolojilerin adaptasyonu ile çevreye verilen hasarın en aza indirilmesini amaçlayan sürdürülebilir bir havacılık endüstrisi oluşturmaya yönelmiştir. Fosil yakıt kullanımının azalması, bölgesel krizlerde ortaya çıkan tedarik problemleri ve maliyet artışlarının havacılık endüstrisine verdiği zararı azaltmayı amaçlamaktadır. Ancak aynı zamanda sera gazı emisyonlarını azaltma ve maliyetleri düşürme konusunda da avantajlar sağlayacaktır. Dolayısıyla sürdürülebilir havacılık odaklı çalışma başlıklarında bir sorun üzerinde çalışıldığında, genellikle diğer sorunlar da hedef alınmış olur. Uçakların performansında verimlilik artışı genellikle yapısal hafifleme sağlanması ve yakıt sarfiyatını azaltacak daha verimli motorların geliştirilmesi ile olmuştur. Ancak, son 20 yılda bu teknolojilerdeki ilerlemeler yavaşlamaya başlamıştır. [32]. Bu nedenle, diğer alanlarda iyileştirmeler yapılmadan, havacılıktaki büyümeden kaynaklanan ek çevresel etki ve maliyetlerin dengelenmesi mümkün olmayacaktır. Sürdürülebilir havacılık araştırmalarının diğer konu başlıklarından olan alternatif yakıtların, daha elektrikli ve tüm elektrikli uçakların, uçuş planlarının ve havalimanı operasyonlarının optimize edilmesinde ve aerodinamik verimliliği artırmak için yeni teknolojilerin kullanılmasında daha fazla gelişmeye ihtiyaç vardır [33].

Şekil değiştiren kanat teknolojileri, aerodinamik verimliliği artırmak konusunda avantajlar sağlayabilen bir alan olarak, ihtiyaç duyulan gelişmelere kapı aralayabilecek önemli bir aday olarak değerlendirilmelidir [34,35]. Konvansiyonel uçak yapılarından farklı ve alışlagelmişin dışında olduğu için şekil değiştiren kanat teknolojisinin yeni bir teknoloji olduğu düşüncesi yaygındır. Ancak ilk fonksiyonel uçak olan Wright Flyer uçağının yatış kontrolü için kanadın uç kısmına bağlanmış teller ile kanat burulması sağlandığı, yani bir şekil değiştiren kanat uygulaması yapıldığını not etmek gerekir [36, 37]. Özetle, şekil değiştiren kanat teknolojileri uçakların kendisi kadar eskidir. Bu teknolojilerin yolcu uçaklarına adaptasyonu sağlanabilecek bazı uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Bunlardan en önemlisi, Boeing 777X uçağına entegre edilen katlanabilir kanat ucu tasarımıdır [38]. Uçağın kalkışı ve inişi sırasında yatay pozisyona gelerek kanat alanını artıran bu yapı, uçağın seyir uçuşu sırasında düşey pozisyona gelerek kanat ucundaki basınç kaçaklarını ve buna bağlı verimsizlikleri azaltan bir kanat ucu tertibatı olarak çalışmaktadır.

İnsansız hava araçları disruptive (yıkıcı) teknolojilerin uygulanması için düşük maliyetli test platformları olarak ön plana çıkmaktadır. Yakıt hücreleri, güneş panelleri,

hibrit enerji yönetim sistemleri ve şekil değiştiren kanat teknolojileri gibi araştırma konuları bu araçlar üzerinde düşük risk ve maliyetlerle uygulanabilmektedir [39, 40, 41]. Bununla beraber, bu araştırmaların genel havacılık uçakları veya yolcu uçaklarına ölçeklenebilir uygulamalardan oluşması beklentisi de bulunmamaktadır. İnsansız hava aracı sektörü askeri ve sivil anlamda birçok görevde maliyet etkin çözümler sunan ve hızla büyüyen bir sektördür [42]. Bu nedenlerle çalışmanın odağı insansız hava araçlarında şekil değiştiren kanat yapısı uygulamaları olarak belirlenmiştir.



2. LİTERATÜR TARAMASI

Bir araştırma konusu seçildiğinde o araştırma konusunun arka planının iyi analiz edilmesi ve anlaşılması önemlidir. Literatürdeki yayınlar ve kronolojik süreçler incelendiğinde her araştırma konusunda olduğu gibi birçok örüntü ile karşılaşılabilir. Bu örüntüler alınan sonuçlarda tutarlılık, gerçekleştirilen değerlendirmelerde benzerlikler ve gelecek çalışmalar konusunda ortaya koyulan fikirlerde benzerlikler içerebilir. Böylece çalışma alanının geçmişi ve trendleri konusunda araştırmacı bilgi sahibi olmuş olur. Bu çalışmanın literatür taraması bölümünde şekil değiştiren yapılar hakkında genel bir açıklama yapıldıktan sonra şekil değiştiren kanatlar konusunda detaylı bir literatür incelemesi yapılmıştır. Son olarak, tez çalışmasının odak yöntemi olan balık kılçığı benzetimli şekil değiştiren kanatlar konusundaki gelişmelere değinilmiştir.

2.1. İnsanlı Havacılık Endüstrisinde Şekil Değiştiren Yapıların Yeri

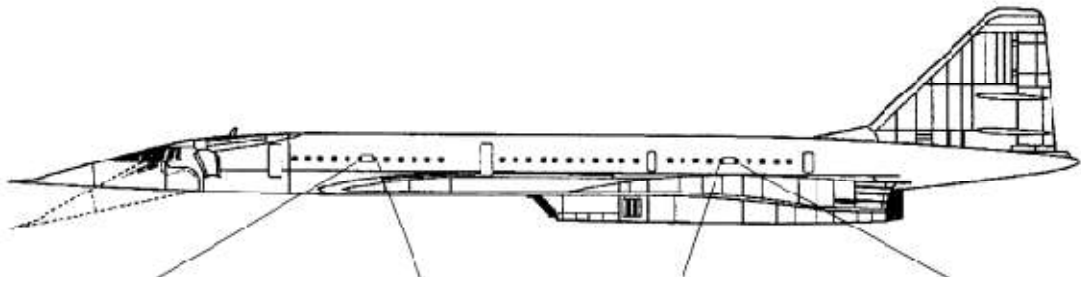
Şekil değiştiren hava aracı yapıları literatürde “morphing” yapılar olarak geçmektedir. Morphing kelimesi “morph” kelime kökünden gelmektedir [43]. Bu kelime şekil değişikliği anlamına gelir. Bu köken düşünüldüğünde, esasında hava araçlarında dışarıdan bir gözlemci tarafından bakıldığında görülen büyük şekil değişikliklerinin tamamının “morphing” yapılar olarak adlandırılabilceği anlaşılmaktadır.

Havacılıkta bu tip şekil değişiklikleri uzun bir süredir kullanılmaktadır. Bu uygulamalara verilebilecek örneklerden en alışlagelmiş toplanabilir iniş takımlarıdır. İniş takımlarının gövde içerisine veya kanat altında çekilebilecek şekilde tasarlanması ve yaygın olarak kullanılması II. Dünya Savaşı dönemlerinde yaşanan havacılık gelişmelerinden biridir [44]. Tıpkı diğer şekil değiştirme uygulamaları gibi bu da uçağın sadece kalkış ve iniş fazında kullanılacak olan bu yapıyı uçuşun geri kalanında bir sürüklenme kaynağı olarak dışarıda tutmamayı amaçlamaktadır. Böylece uçağın sürüklenme katsayısı düşer ve aerodinamik verimliliği artar [45]. Görsel 2.1, doğanın en hızlı kuş türleri arasında gösterilen bir doğan kuşunun Ron Dudley tarafından çekilmiş fotoğrafını göstermektedir [46]. Bu görsel, şekil değiştirme uygulamaları arasında sayılabilecek olan iniş takımını gövde içerisine çekme hareketinin doğada da karşılığı olan bir başka verimlilik artırıcı uygulama olduğunu bizlere göstermektedir.



Görsel 2.1. Doğan kuşunun uçuş sırasında bacak konumu [46]

Şekil değiştirme uygulamalarının bir diğeri ise bir süpersonik yolcu uçağı olan Concorde uçağına uygulanmış olan kokpitteki açı değişimi uygulamasıdır [47]. Tasarımsal olarak delta kanat konfigürasyonuna sahip olan bu uçak modelinde, yüksek hücum açılarında kalkış ve iniş gerçekleştirildiği için kokpitteki pilotların pisti görme konusunda sorunlar yaşaması bu tasarımın gerçekleştirilmesinde rol oynamıştır. Rus Tupolev firmasının geliştirdiği benzer uçak olan Tu-144 uçağında da bu uygulama aynı şekilde devam ettirilmiştir. “Droop nose” yani sarkık burun olarak tanımlanan bu tasarımlar, Görsel 2.2’de örneğine yer verilen gövde şekil değişimleridir.



Görsel 2.2. Tu-144 uçağının şekil değiştiren gövde uygulaması [48]

Tezin odak noktasında yer alan şekil değiştiren kanatlara sahip uçaklar ise NASA tarafından geliştirilen XB-5 uçağı ile uygulanmaya başlanmıştır [49]. Bu uçakta görülen şekil değiştirme uygulaması günümüzde hala en sık görülen uygulama olan kanat ok açısı değişikliğidir. Ses altı ve ses üstü hızlarda verimli bir şekil de uçuş gerçekleştirme

amacıyla yapılan bu uygulama daha sonra geliştirilen F-111 ve F-14 uçaklarında da karşımıza çıkmaktadır. F-14 Tomcat uçaklarının ok açısı değiştirilebilir kanatları Görsel 2.3'te gösterilmiştir.



Görsel 2.3. F-14 Tomcat uçağının şekil değiştiren ok açısı uygulaması (<http-1>)

1960'larda ve 1970'lerde şekil değiştiren kanatlı yarım düzineden fazla büyük askeri uçak ortaya çıkmıştır. Ancak kanatları hareket ettiren büyük metal dişli kutusu o kadar karmaşık ve ağırdı ki bu durum bakım gereksinimlerini arttırdı ve yakıt performansını düşürdü [50]. 1980'lere kadar birçok uçağa eklenen bu şekil değiştiren kanat uygulaması daha sonra yeni tasarımlara entegre edilmemiştir.

Şekil değiştiren kanat uygulamasına bir başka örnek giriş bölümünde de konu edilen Boeing 777X uçağının katlanır kanat ucudur. Değişken ok açısı trendlerine kıyasla daha güncel olan bu uygulamanın tezin yazıldığı dönem itibariyle, yakın zamanda yolcu taşımacılığı yapan uçaklara uygulanması söz konusudur. Görsel 2.4 Boeing'in 1995 yılında patentini aldığı ve uygulamasını başlattığı katlanabilir kanat ucu tasarımını göstermektedir.



Görsel 2.4. Boeing 777X uçağının şekil değiştiren kanat ucu uygulaması (<http-2>)

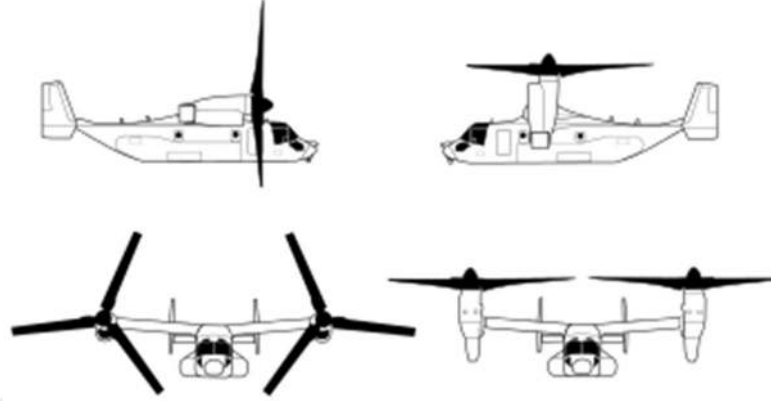
Şekil değiştiren yapılar arasında değerlendirilmesi uygun olan bir başka yapı ise itme vektör kontrolü veya itiş vektörlemesi olarak Türkçeleştirilebilecek olan “Vectored Thrust” uygulamalarıdır [51]. Bu uygulama ile dikey kalkış ve iniş yani VTOL özelliğine sahip uçaklarda karşılaşılmaktadır. Genellikle motorların nozzle yani egzoz lülelerinin yön değiştirmesi ile itiş vektörlemesi uygulanan bu uçaklara örnek olarak Görsel 2.5.’de gövde altından egzoz kapakları açılmış şekliyle görülen AV-8B Harrier II modeli ile envanterlerde yerini almaya başlayan F-35B uçakları gösterilebilir.



Görsel 2.5. Harrier uçağının itki vektörü kontrolü uygulaması (<http-3>)

Bu uygulamaların yanı sıra tiltrotor ve tiltwing adı verilen, hibrit VTOL konfigürasyonlar da değişken yapı uygulamaları olarak karşımıza çıkmaktadır. Bell ve

Boeing tarafından geliştirilen V-22 Osprey, tiltrotor sınıfında bir hibrit hava aracıdır. Görsel 2.6.'da bu hava aracının uçuş modları gösterilmiştir.



Görsel 2.6. V-22 Osprey tiltrotor uygulaması (<http-4>)

Tezin yazıldığı dönemde güncel olarak üzerinde çalışılan bir başka konsept de eVTOL konseptidir. Tamamen elektrikli ve VTOL özelliğe sahip olacak şekilde geliştirilen bu araçların şehir içinde otonom biçimde önceden belirlenen alanlarda yolcu taşınması planlanmaktadır [52]. Bu araçların geliştirme ve sertifikasyon süreçleri tezin yazıldığı dönem itibarıyla sürmektedir. Geliştirme sürecindeki eVTOL araçlara iyi bir örnek teşkil eden Lilium Jet, elektrik motorlarının kanallı fanlar içerisine yerleştirilmesi ile gürültü konusunda avantajlar elde edilebilmiştir [53].

Kanat, uçuş performansı açısından bir uçağın en dominant yapısıdır. Şekilleri ve boyutları, uçağın belirli bir göreve uygunluğunu belirler. Bu nedenle, kanatlarda yapılabilecek şekil değiştiren yapı tasarımlarına uçak tasarımcıları tarafından büyük ilgi duyulmuştur.

İnsanlı havacılıkta uygulanan ve uygulanması denenmiş olan şekil değiştiren yapıların gelişim süreçleri incelendiğinde bazı problemler göz önüne serilmektedir. İnsanlı havacılık endüstrisi çok sıkı denetimlere tabiidir ve otoritelerin sertifikasyon süreçleri oldukça zorludur [54]. Otoritelerin havacılık konusundaki emniyet tedbirlerini sıkı tutması, yeni uygulamalara karşı zaman zaman muhafazakâr davrandığı eleştirisini de beraberinde getirmektedir [55]. Bu durum, insansız hava araçlarının yeni teknolojilerin uygulama sahası olma konusundaki potansiyelini daha da güçlendirmektedir.

2.2. İnsansız Hava Araçlarında Şekil Değiştiren Kanatlar

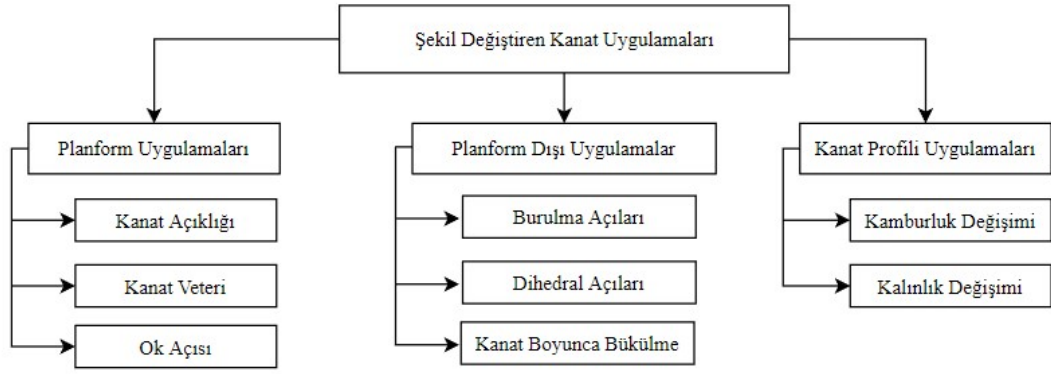
İnsansız hava araçları, insanlı havacılık endüstrisinden farklı olarak özellikle araştırma ve geliştirme amaçlı projelerde sertifikasyon anlamında zorlayıcı beklentilerle karşılaşmamaktadır. Bu durum birçok yeni teknolojinin insansız hava araçları üzerinde test platformu olarak uygulanmasının önünü açan etmenlerden biridir. Diğer avantajlar ise maliyetlerin düşüklüğü ve ulaşılabilirliktir. Özellikle 2000’li yıllardan sonra mikro-elektromekanik üniteler, bataryalar, elektrik motorları ve üç boyutlu baskı teknikleri gibi birçok alanda gerçekleşen ilerlemeler ile birlikte insansız hava araçları sektöründe bir büyüme yaşanmaya başlamıştır.

2000’li yıllar öncesinde genel olarak askeri amaçlarla üretilen insansız hava araçlarında günümüzdeki duruma bakıldığında sivil amaçlı kullanılan insansız hava araçlarının artık sektörün baskın türü haline geldiği görülebilmektedir [56]. İnsansız hava araçları film sektöründe, tarımda, araştırma geliştirmede, trafik incelemelerinde, hava kalitesi incelemelerinde, madencilikte ve bu alanlara benzer yaklaşık 100 alanda aktif olarak kullanılmaktadır [57, 58, 59].

İnsansız hava araçlarında bu tür projeleri gerçekleştirmek maliyetlerin yanı sıra boyutsal anlamda da kolaylaştırıcı bir faktör olmaktadır. Doğa benzetimli yapılar tasarlanırken kuşlardan öykünerek yapılan tasarımlarda kuşlarla benzer boyutta araçların tercih edilmesi tasarım anlamında kolaylıklar sağlamaktadır.

İnsansız hava araçlarında şekil değiştiren kanat çalışmaları da tıpkı insansız hava araçlarının sivil kullanımı konusunda olduğu gibi hızlı bir nicelik artışı yaşamıştır. Tasarımların görece düşük maliyetlerle uygulanabilmesi bu yolun taşlarını döşemiştir. İnsanlı havacılık endüstrisinde karşılaşılan şekil değiştiren yapıların çok daha fazlası insansız hava araçlarına kısa bir zaman aralığında entegre edilmiştir. Bu nedenle insansız hava araçları konusundaki literatür incelenirken, odağın korunması adına sadece şekil değiştiren kanat yapılarına sahip tasarımlar değerlendirilmiştir.

İnsansız hava araçlarında şekil değiştiren kanat uygulamalarının değerlendirilmesi ve literatürün incelemesi için uygulamaların hedeflerine göre kategorize edildiği bir sınıflandırma metodolojisi uygulanmıştır. Literatürdeki şekil değiştiren insansız hava aracı kanatları, planform değişikliğini hedefleyenler, planform dışı parametrelerde değişikliği hedefleyenler ve kanat profili parametrelerini hedefleyenler olarak üçe ayrılarak incelenmiştir [60]. Şekil 2.1. bu kategorizasyonu özetlemektedir.



Şekil 2.1. Literatür taramasında kullanılan sınıflandırma yaklaşımı

2.2.1. Planform Odaklı Şekil Değiştiren Kanat Uygulamaları

Planform uygulamaları kanadın düzlemsel olarak boyutunu ve konumunu etkileyen uygulamalar olarak açıklanabilir. Üç boyutlu parametreler olarak da ifade edilebilirler. Bu şekil değiştirme uygulamaları: kanat açıklığı değişen kanatlar, kanat veteri değişen kanatlar ve ok açısı değişen kanatlar olarak üç alt gruba ayrılarak incelenmiştir.

2.2.1.1. Kanat Açıklığı Değişen Uygulamalar

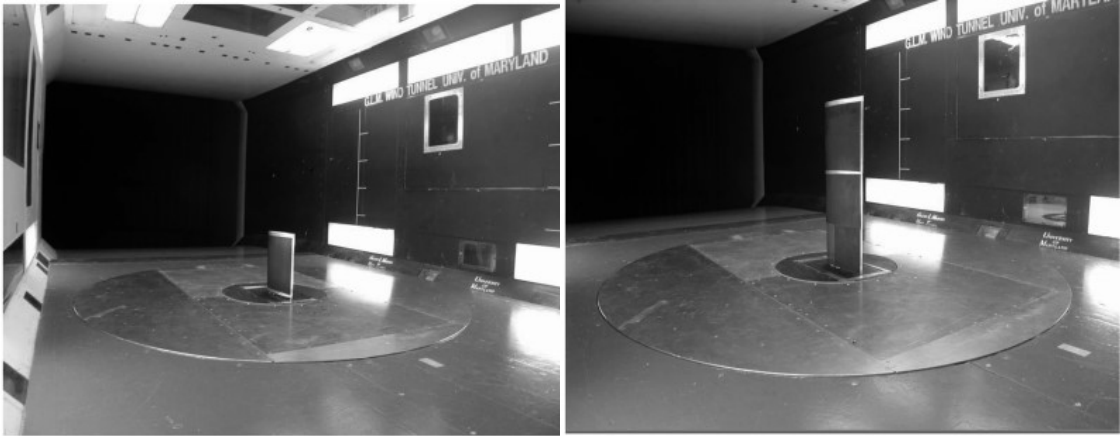
Kanat açıklık oranı, kanat açıklığı ve kanat veteri arasındaki oranı ifade eder. Dikdörtgen kanatlar için bu değer Denklem 2.1'deki gibi hesaplanır.

$$AR = b/c \quad (2.1)$$

Denklem 2.1'de yer alan AR ifadesi açıklık oranını, b ifadesi kanat açıklığını ve c ifadesi de kanat veterini ifade etmektedir. Kanat açıklığının artışı, uçağın kanat ucu kayıplarını azaltır. Daha yüksek kanat açıklık oranına sahip uçaklar aerodinamik anlamda verimli, süzülme katsayısı yüksek uçaklardır. Örneğin planörler yüksek açıklık oranına sahip olacak şekilde tasarlanırlar [61]. Buna karşın, bu tip uçaklarda kanatların atalet gövdenin dışına doğru ötelendiği için uçağın yatış hareketine sokulması güçleşir. Kanat açıklık oranı daha düşük olan uçaklar ise kısa ve geniş kanatlara sahiptir. Bu uçakların manevra kabiliyetleri atalet faktörü sebebiyle daha yüksektir [62]. Uçuş akrobasi gösterisi yapan uçaklarda bu sebeple daha düşük açıklık oranlarına rastlanır. Bu nedenle uçakların kanat açıklık oranlarını değiştirebilecek şekil değiştirme çalışmalarına önem verilmektedir. Bu çalışmalara çok rollü uçaklar tasarlanabilmesinin önünü açmaya çalışan bir çaba olarak bakılabilir. Kanat açıklık oranının artışı kanat ucu kayıplarını azaltarak indüklenmiş sürüklemenin de düşürülmesine olanak sağlar.

Kanat uzunluğunun artışı aynı zamanda kanat alanının arttırılması ile sonuçlanıyorsa, uçağın kanatlarının ürettiği taşıma kuvvetinin de uçuşun belirli fazlarında artırılması mümkün olacaktır. Bu da performans geliştirme bağlamında, şekil değiştiren kanat teknolojisinin uçuşun farklı fazlarında performans yükseltme motivasyonlarıyla uyumludur.

Samuel ve Pines, [63] gerçekleştirdikleri çalışmada teleskopik kanat tasarlayarak kanat açıklığını artırmışlardır. Üç farklı konfigürasyon test edilmiş ve deneysel sonuçlar sonlu kanat teorisi ile karşılaştırılmıştır. Sabit kanatlı bir muadili üzerinde de aynı yöntemle analiz sonuçları elde edilmiştir. Kanatların pnömatik kuvvet kullanılarak şekil değiştirme gerçekleştirme yapacağı ifade edilmiştir. Çalışmada Görsel 2.7’de yer aldığı gibi gerçekleştirilen rüzgâr testleri sonucunda şekil değiştiren kanat açıklığına sahip teleskopik kanat için ön aerodinamik sonuçların olumlu olduğu belirtilmiştir. Maksimum açılmadaki teleskopik kanadın, sabit kanatlı muadili ile karşılaştırıldığında daha yüksek bir sürüklenme katsayısına ve daha düşük bir taşıma-sürüklenme oranına sahip olduğu görülmüştür [63].



Görsel 2.7. Pnömatik kanat açıklığı değiştiren kanatların kapalı ve açık versiyonu [63]

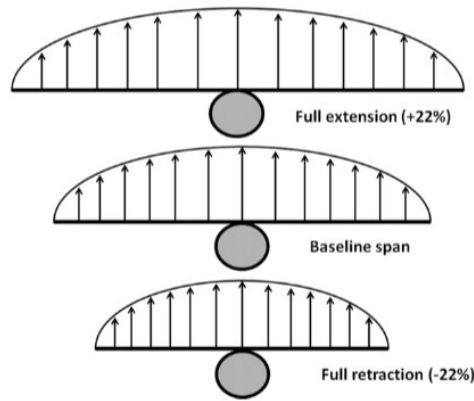
Mestrinho ve ark., [64] tarafından gerçekleştirilen çalışmada Görsel 2.8’de yer verilen Olharapo adlı bir sabit kanatlı insansız hava aracının 11 m/s ve 40 m/s hız aralığında en verimli şekilde uçabilmesi için bir şekil değiştiren kanat yönetimi algoritması oluşturulmuştur. Çalışmada kanat açıklığı değişiklikleri yapılarak 35 m/s hızdayken %22 değerinde sürüklenme katsayısı azalışı gerçekleştirilebileceği ortaya konulmuştur. Aynı zamanda yatış hareketi modellenerek, uçağın kanatları arasında

asimetrik şekil değişikliği yapılarak konvansiyonel aileronlara denk bir kontrol hareketi yaratılabileceği hesaplanmıştır [64].



Görsel 2.8. Çalışmanın test platformu olarak kullanılan Olhaparo İHA [64]

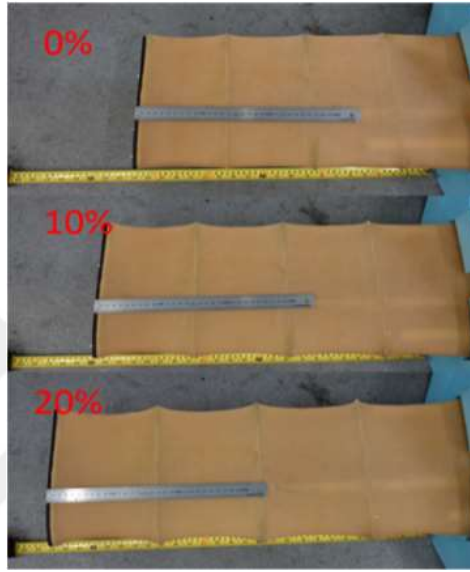
Ajaj ve ark., [65] Zigzag Box olarak isimlendirilen bir projede kanatların açıklığının %44 değiştirilmesini hedeflemiştir. Görsel 2.9’da gösterilen %22 artış ve %22 azalış durumlarını sağlayabilecek bir şekil değiştiren kanat tasarımı yapılmıştır. Bir MALE, yani orta irtifa yüksek havada kalma süresi sınıfındaki insansız hava aracı için tasarlanan bu kanadın konvansiyonel kanatlara göre daha ağır olduğu not edilmiştir. Çalışmanın sonuçlarında %5,5 havada kalma süresi artışı sağlayabileceği, ancak ağırlık artışı ile birlikte bu oranın azalacağı ifade edilmiştir [65].



Görsel 2.9. Üç farklı kanat açıklığı durumu [65]

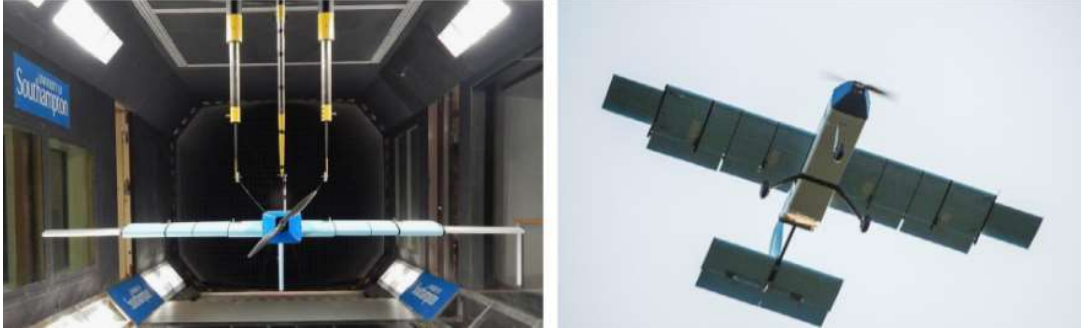
Ajaj ve ark., [66] kanat açıklığını artırmaya yönelik şekil değiştiren kanat uygulamalarından biri olan GNAT Spar çalışmasını gerçekleştirmiştir. GNAT Spar ismi

Gear Driven Autonomous Twin Spar, ‘yani dişli tarafından sürülen otonom ikili kanat kirişi’ şeklinde Türkçeleştirilebilir. Bu çalışmada, Görsel 2.10’da yer alan, %20 kanat açıklığı artırabilen, bir dişli ve ray mekanizmasından oluşan bir kanat tasarlanıp üretilmiştir. Çalışmada rüzgâr tüneli testi yapılarak indüklenmiş sürüklemeye azalma ve aerodinamik verimlilikte artış gözlemlenmiştir. Kanadın kaplaması lateks malzemeden yapılmıştır. Gereken aktüasyon kuvveti ise 55 N olarak ifade edilmiştir [66].



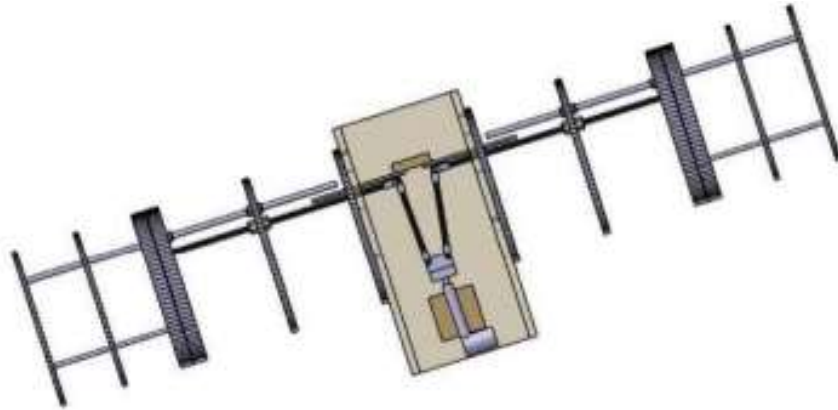
Görsel 2.10. GNAT spar tasarımının kanat açıklık değişimi [66]

Ajaj ve Jankee [67], simetrik ve asimetrik olarak kanat açıklığını değiştirebilen bir insansız hava aracı tasarlamıştır. Tasarıma “the transformer aircraft” adı verilmiştir. Bir kremayer ve pinyon mekanizması kullanılarak %50’ye kadar kanat açıklığını artırabilen, teleskopik tasarıma sahip şekil değiştiren kanat mekanizması oluşturulmuştur. Rüzgâr tüneli testleri ve uçuş testleri Görsel 2.11’de görüldüğü gibi gerçekleştirilen çalışmanın sonucunda uçağın havada kalma süresinin %39,1 ve uçuş menzilinın sabit taşıma katsayısı için %9,1 arttığı ifade edilmiştir. Asimetrik kontrol için ise yatış kontrolü için tek başına yeterli olamayacağı ancak konvansiyonel aileronlar ile kullanılarak uçağın yatış kontrolünün artırılacağı belirtilmiştir [67].



Görsel 2.11. The Transformer Aircraft uçağının rüzgâr tüneli testleri ve uçuş testi [67]

Ajajs ve ark., [68] gerçekleştirdikleri çalışmada ASAPP (Active Span Morphing and Passive Pitching) olarak adlandırdıkları, kanat açıklığı ve kanadın pitch açısını değiştirebildikleri bir tasarım gerçekleştirmiştir. Üretilen prototip üzerinde farklı kanat yapıları içeren konfigürasyonlar için analizler uygulanmıştır. Çalışmanın sonucunda kanat açıklığının %25 artırıldığı ve kanadın $3,5^\circ$ burun aşağı yönlendirildiği durumda %13 sürüklenme kuvveti düşüşü elde edildiği ifade edilmiştir. Gerçekleştirilen tasarımda Görsel 2.12’de yer alan raylı bir sistem ve lineer aktüatör kullanılarak üst üste binen spar bölümlerinin dışarıya doğru açılması ile şekil değiştirme hareketi gerçekleştirilmiştir [68].



Görsel 2.12. ASAPP adlı tasarımın kanat açıklığı değiştirme mekanizma çizimleri [68]

Jeong ve Bae, [69] gerçekleştirdikleri çalışmada %30 oranında artırılabilen kanat açıklığına sahip bir şekil değiştiren kanat tasarlamıştır. Gerçekleştirdikleri tasarımda kanat içerisinden dışarıya uzanan teleskopik bir yapı tercih edilmiştir. Bu yapı ve uygulanan rüzgâr tüneli testinde gerçekleştirilen şekil değişimi Görsel 2.13’te

görülebilmektedir. Çalışma kapsamında uygulanan rüzgâr tüneli testleri sonucunda şekil değiştiren kanat açıklığı uygulaması ile kanat açıklığını artırdıklarında, kanadın ürettiği taşıma kuvveti ve taşıma katsayısının sürüklenme katsayısına oranında artış olduğu ifade edilmiştir [69].



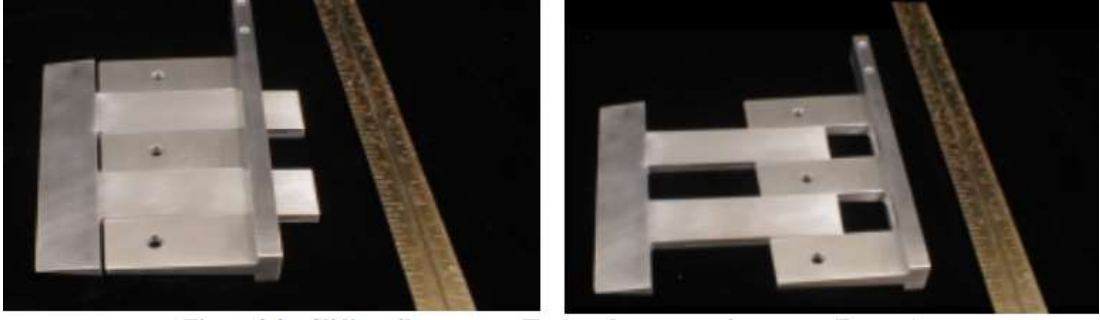
Görsel 2.13. Kanat uzunluğu değişiminin rüzgâr tüneli testleri [69]

2.2.1.2. Kanat Veteri Değişen Uygulamalar

Konvansiyonel kontrol yüzeylerine sahip sabit kanatlı uçaklarda, kanatlarda veter değişimi Fowler Flap adı verilen flap tipi ile gerçekleştirilir. Fowler flaplar kanadın kamburluğunu ve referans alanını bölgesel olarak artırır [70]. Böylece taşıma denkleminde çarpan olarak yer alan taşıma katsayısı ve referans alan değerleri yükselir, iniş ve kalkışın daha düşük hızlarda gerçekleştirilebilmesi sağlanır. Veteri değiştiren kanatlar da uçuş sırasında kanat alanını artırma amacı ile yapılan tasarımlardır.

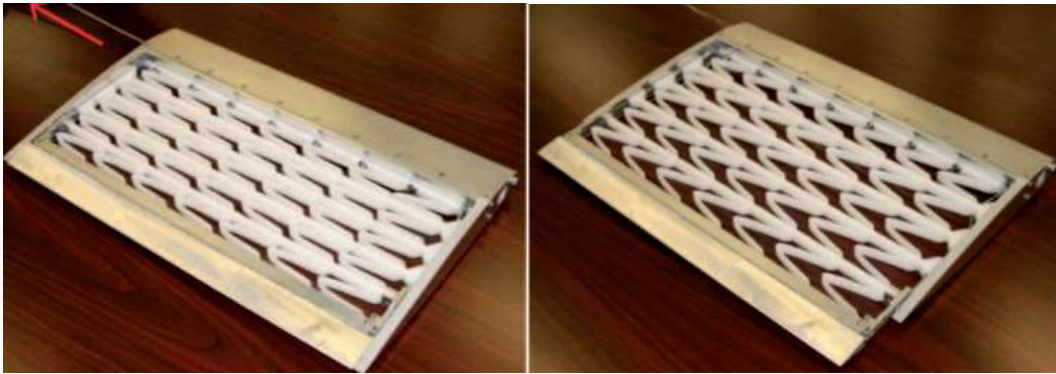
Veter değiştirme uygulamaları, kalkış ve inişlerde kullanılan konvansiyonel flap sistemlerine bir alternatif oluşturmakla beraber, uçuşun diğer fazları için anlamlı bir katkı sunamamaktadır. Bu nedenle sabit kanatlı uçaklar için şekil değiştiren yapı tasarımlarında yaygın bir odak noktası değildir. Ancak, döner kanatlı araçların palleri için yapılan çalışmalar bulunmaktadır.

Perkins ve ark., [71] gerçekleştirdikleri tasarımda kızaklı bir yapı ve birbirinin yanından kayan riblere yer vermiştir. Görsel 2.14'te bu tasarımın prototip uygulaması görülmektedir. Bu çalışmada aynı amaç için teleskobik rib kullanımı da değerlendirilmiştir. Havada loiter uçuşu yapan hava araçları hedef alınarak tasarlanmıştır. Loiter, iniş öncesi havada turlama veya bazı görevlerde belirli bir alanın üzerinde turlama gibi uçuşları ifade eden isimlendirmedir. Çalışmada, kanattaki taşıma dağılımı eliptik olarak gerçekleştiği için kanat kökündeki veter artışlarının taşıma kuvvetinin artırılmasında daha büyük etkiye sahip olacağı ifade edilmiştir [71].



Görsel 2.14. Kanat veterini artıran kızaklı rib tasarımı [71]

Barbarino ve ark., [72] bir helikopter ana rotor pali için konsept kanat veteri değişken tasarım gerçekleştirmiştir. NACA 0012 kanat profili tercih edilen tasarımda, %30'a kadar kanat veterini artıracak bir tasarım ortaya koyulmuştur. Yapılan tasarımın prototipine ve çalışma şekline Görsel 2.15'de yer verilmiştir. Bir akordeon bal peteği yapı ve alüminyum parçalar kullanılarak veter uzunluğuna göre %40 deformasyon sağlanmış ve %30'luk veter artışı sağlanmıştır. Petekteki elastik bağlar, düşük yerel gerilmelere karşı koyabilirken, büyük küresel deformasyonları sürdürmek için uygun şekilde tasarlanmıştır. Çalışmanın sonunda helikopterlerin bu uygulama ile daha yüksek irtifalarda görev yapabilecekleri ve rotor pali stall durumu konusunda avantajlar sağlanabileceği ifade edilmiştir [72].



Görsel 2.15. Kanat veter değişikliği kabiliyetli helikopter rotor pali [72]

2.2.1.3. Ok Açısı Değişen Uygulamalar

Ok açısı, veter çizgisinin %25'lik mesafesinden kök veterine dik çizilen çizgi ile kanat eksenindeki açıdır. Ok açısına yer verilen uçaklar genellikle trans-sonik uçuş adı verilen, ses hızına yakın hızlarda veya süpersonik hızlarda uçan uçaklardır. Bağlı hava iki komponente ayrılır ve kanadın hücum kenarına gelen akışın hızı, normal hava hızına

göre daha yavaş kalır. Bu durum sıkıştırılabilirlik etkilerinin azaltılmasını sağlar. Ancak ses altı hızlarda da taşıma kaybına yol açar. Optimum ok açısı için yapılan araştırmalarda 40-45 derece ok açısı aralığında en iyi taşıma-sürükleme oranlarının elde edildiği görülmüştür [73].

Ok açısı aynı zamanda uçağın kararlılık ve kontrol niteliklerini de etkiler. Kanatların ok açısının değiştirilmesi, aerodinamik merkezin ve ağırlık merkezinin konumlarını değiştirerek uzunlamasına kararlılığı etkiler. Özellikle savaş uçaklarında ses altı ve ses üstü rejimlerde verimli uçuşlar yapılması amacıyla bu teknoloji uygulanmıştır. 1960 ve 1970’li yıllarda yaygın olarak araştırılan bu alanda özellikle hava aracı uçuş kararlılığına etkileri konusunda çok sayıda çalışma yapılmıştır [74, 75].

İnsansız hava araçları kullanıldıkları görevler ve boyutları itibariyle genellikle ses altı hava hızlarında uçmak için tasarlanırlar [76]. Hedef insansız hava araçları bunun bir istisnası olarak ifade edilebilir.

Greatwood ve ark., [77] gerçekleştirdikleri çalışmada ticari bir insansız hava aracı modeli üzerinde modifikasyon gerçekleştirerek ok açısını değiştirebilecek bir mekanizma eklentisi gerçekleştirmiştir. Uçuşta daha düşük ok açısı değişimleri gerekse de 30 dereceye kadar ok açısı değiştirebilecek bir tasarım ortaya koyulmuştur. Çalışmada, uçağın tıpkı kuşlar gibi çok düşük hızlara inip, adeta tüneyerek iniş yapması hedeflenmiştir. Stall hızı 9 m/s olan uçakta, söz konusu modifikasyon ile uçuş testlerinde iniş sırasında burun yukarı hareket verilerek 3 m/s hızda iniş Görsel 2.16’daki gibi gerçekleştirilebilmiştir [77].



Görsel 2.16. Ok açısı değişen kanat ile tüneyerek iniş gerçekleştirilmesi [77]

Yang vd., [78] gerçekleştirdikleri çalışmada bir insansız hava aracı için hem düşük hem de yüksek hızlarda verimlilik elde etmek amacıyla bir ok açısı değişen kanat tasarımı gerçekleştirmiştir. Gerçekleştirilen tasarımda tek bir özgürlük derecesine sahip paralelogram mekanizması kullanılmıştır. Şekil değiştiren kanadın kaplaması kevlar ve karbon fiberler içeren bir hibrit kompozit malzemeden üretilmiştir. Kompozit kaplama kanadın iskeletine dikilmiştir. Kanadın bir prototipi Görsel 2.17.'daki gibi üretilerek mekanizmanın doğrulaması yapılmıştır. Mekanizmanın çalışması süresince 20,30, 38,7, 50 ve 60° için açıklık oranı, kanat alanı, trapez oranı ve kanat bağıl kalınlığının değişimi incelenmiştir [78].



Görsel 2.17. 30 ve 60 derece ok açısında kanadın durumu [78]

2.2.2. Planform Dışı Şekil Değiştiren Kanat Uygulamaları

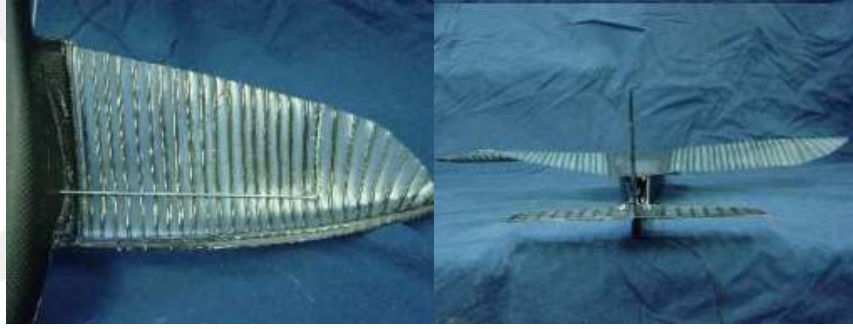
Planform dışı şekil değiştiren kanat uygulamaları, uçağın kanat ölçülerinde belirgin şekil değişiklikleri yaratmayan, kanat düzlemini koruyan uygulamalardır. Bu uygulamaların örnekleri: burulma açısı değişimi, dihedral açısı değişimi ve kanat boyunca bükülme sağlayan uygulamalardır.

2.2.2.1. Twist Açısı Değişen Uygulamalar

Twist açısı burulma veya bükülme olarak Türkçeleştirilen bir kavramdır. Kanatlarda elde edilen taşıma ve sürüklenme kuvveti kanat veterinin akışkanın izafi hızı ile olan açısına, yani hücum açısına göre değer alır. Twist uygulaması, kanat üzerinde stall ve spin durumlarına olan yatkınlığı azaltmak ve yönetmek amacıyla uygulanır. Bir kanatta geometrik veya aerodinamik twist uygulanabilir. Aerodinamik twist kanat boyunca kanat profilinin değiştirilmesi ile gerçekleştirilir. Geometrik twist ise kanat boyunca oturma açısının değiştirilmesi ile elde edilir. Örneğin kanat kökü +3° değerdayken kanat ucu -2° oturma açısı değerine getirilebilir. Böylece kanat kökünün daha önce taşıma kaybına uğraması sağlanır. Pilota taşıma kaybına tepki vermek için daha

fazla süre kalır. Kanat ucunda aileronlar bulunduğu için buradaki akışın önce kopması istenmeyen bir durumdur. Uçaklarda taşıma kaybının kanadın kök kısmında başlaması tercih edilir [79].

Garcia vd, [80] gerçekleştirdikleri tasarımda mikro sınıfı bir insansız hava aracının kontrol yeteneklerini artırabilmek için bir şekil değiştiren kanat tasarımı gerçekleştirmiştir. Çalışmada 24 inç kanat açıklığına sahip bir mikro insansız hava aracında kanat boyunca twist açısının değişimi gerçekleştirilmiştir. Mikro İHA'nın kanadındaki kaplama, ince yarı saydam plastikten bir zar formunda üretilmiştir. Kanat içerisindeki çıtalar hava yüklerini desteklemek için gereken gücü sağlarken, membran aerodinamik yüzeyi oluşturmuştur. Her iki kanada da birer tork çubuğu eklenerek burulma hareketi Görsel 2.18'deki gibi uygulama gerçekleştirilmiştir [80].



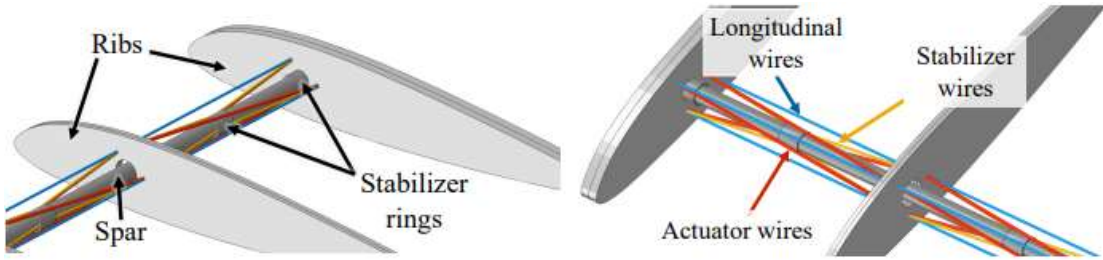
Görsel 2.18. Tork çubuğu ve asimetrik kanat burulması [80]

Schlup ve ark., [81] Matamorph-2 adını verdikleri kanatlarında twist açısı değiştirilebilen ve yatay kuyruğunun kamburluğu değiştirilebilen insansız hava aracının tasarımını gerçekleştirmiştir. Çalışmada yer alan insansız hava aracı XM-2'nin kanat ve kuyruğunda yer verilen şekil değiştirme kabiliyetleri ile hiçbir kontrol yüzeyine ihtiyaç duymadığı belirtilmiştir. Balsa ahşap yapıya sahip ve kompozit kaplı kanatların, twist gerçekleştiren bölümlerinde poliüretan köpük ve esnek bir kaplama malzemesi kullanılmıştır. Bu haliyle İHA'nın kanatlarına $\pm 15^\circ$ twist özelliği kazandırılmıştır. Gövde içerisine yerleştirilen bir servo motor tahrikli dişli kutusu ile bu hareket gerçekleştirilmektedir. Görsel 2.19'da yer aldığı gibi kanatta gerekli twist değişimi gözlemlenmiştir. Çalışmanın uçuş testleri ile devam edeceği bilgisi verilmiştir [81].



Görsel 2.19. Matamorpt-2 insansız hava aracı [81]

Pham ve Hernandez, [82] gerçekleştirdikleri çalışmada Görsel 2.20’de görülen, kanat sparı etrafında burulma gerçekleştirecek bir tel demeti sistemi tasarımı ortaya koymuştur. Bu tasarımın konvansiyonel dişli sistemleri ile kıyaslandığında daha yüksek bir güç-ağırlık oranı içermeye potansiyeli olduğu ifade edilmiştir. Gerçekleştirilen tasarımın optimizasyonu yapılarak mekanizma ağırlığına karşı elde edilebilen twist açısı değerleri karşılaştırılmıştır. Tel çapları, sayıları, kanat spar kalınlığı ve materyal tipleri dahil edilerek yapılan çalışmada 1 kilogram ağırlık eklentisi için 10,85 derece twist açısı değişimi gerçekleştirilebileceği ve 19,5 derecelik açı değişimine herhangi bir malzeme hatasına rastlanmadan ulaşılabileceği ifade edilmiştir [82].



Görsel 2.20. Tel demetli twist açısı değişen kanat tasarımı [82]

2.2.2.2. Dihedral Açısı Değişen Uygulamalar

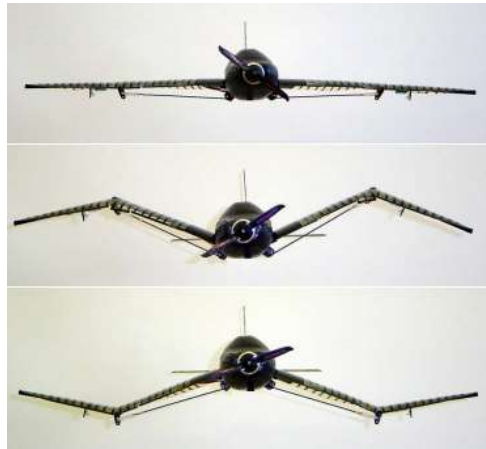
Dihedral, uçak taşıyıcı yüzeylerinin yatay düzleme yaptığı açıya denir. Uçak kanatlarında dihedral açılarının kullanımı yatış kararlılığı ve kontrolü ile ilişkilidir. Uçaklar bir kanadının üzerine yatarak dönüş hareketine girdiklerinde, altta kalan kanat ve üstte kalan kanat arasında izafi hava hızının yönüne bağlı olarak farklı miktarlarda kuvvet üretilir. Yatış kararlılığını uçağın kanadının gövdeye montajı konfigürasyonları olarak

adlandırılan üstten kanat, ortadan kanat, paraşol kanat gibi montaj konfigürasyonları da etkilidir. Alttan kanatlı uçaklarda yatış kararlılığını artırmak adına pozitif bir açı tercih edilebilir. Üstten kanatlı bazı uçaklarda ise yatış kontrolünü artırmak amacıyla bu açı negatif olarak verilebilir. Özellikle kargo uçaklarında karşılaşılabilen durumda bu açı anhedral olarak isimlendirilmektedir [83].

Kanat boyunca yatay düzleme olan açıların bölümler halinde değiştiği uygulamalar ise polyhedral olarak adlandırılmaktadır. Kanadın bazı bölümlerinde polihedral kullanılması, dihedralin beraberinde getirdiği taşıma kuvveti kaybını lokal olarak azaltan, aynı zamanda yatış kararlılığının da kanat ucu bölgesinde alınmasına imkân sağlayan bir orta yol çözümüdür [84].

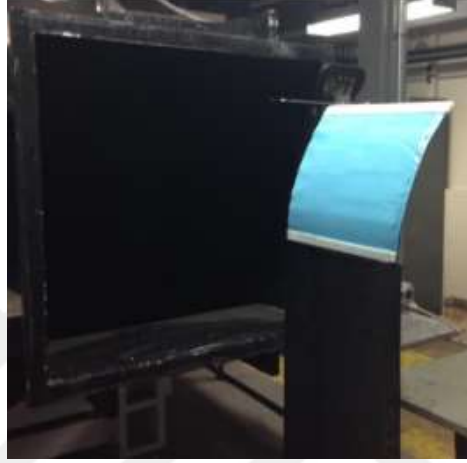
Uçuş sırasında dihedral ve anhedral arasında geçiş yapabilen kanatlar ile dinamik bir şekilde uçağın manevra kabiliyeti ve kararlılık karakteristiği yönetilebilir. Benzer şekilde, uçuş sırasında rüzgâr darbeleri gibi istenmeyen hava koşullarına karşı da emniyet sağlayacak mod değişimleri yapılabilir. İnsansız hava araçları atalet anlamında zayıf araçlar oldukları için rüzgâr darbelerine karşı kırılındır [85].

Abdulrahim ve Lind, [86] gerçekleştirdikleri çalışmada martı kanatlarından esinlenmiş bir insansız hava aracı kanat dihedrali değiştirme mekanizması ortaya koymuşlardır. İHA sensörler ve veri kayıt cihazları ile donatılarak uçuş testleri gerçekleştirilmiş, uçuş karakteristiği ve manevra kabiliyetleri hakkında veri elde edilmiştir. Bir lineer aktüatör yardımıyla kanadın iç kısmı ve dış kısmının gövdeye farklı açılar yapması sağlanmıştır. Görsel 2.21'deki gibi $\pm 40^\circ$ açı değişimi elde edilmiştir [86].



Görsel 2.21. Martı kanadı benzetimli dihedral açısı değişimleri [86]

Nigam ve ark, [87] gerçekleştirdikleri çalışmada pnömatik yapay kas adı verilen aktüatörleri kullanarak bir şekil değiştiren kanat ucu yapısı ortaya koymuştur. Bu aktüatör ile, dihedral açısı değişimi, ok açısı değişimi ve twist açısı değişimi deneysel olarak uygulanmıştır. Rüzgâr tüneline gerçekleştirilen testlerde farklı hava basınçları bu aktüatöre uygulanarak Görsel 2.22’de yer verilen dihedral ve anhedral açılarının değişimi kanat ucundaki mavi kaplı bölümde gözlenmiştir [87].



Görsel 2.22. Pnömatik yapay kas ile kanat artikülasyonu [87]

Değişken dihedral açılarının bir diğer kullanım alanı olarak güneş panelli insansız hava araçları ön plana çıkmaktadır. Uçuş boyunca değişen güneş ışınlarının geliş açısını en iyi şekilde toplamak için Z ve N şeklinde (Görsel 2.23) dihedral açısı değişebilen kanat tasarımları uygulanmıştır [88, 89]. Gerçekleştirilen uçuş testleri ve elde edilen verilerde daha uzun süre havada kalma süresi elde edilebileceği ve bu kanat açısı değişiminin kontrol yüzeyleri ile tolere edilebileceği ve daha geniş bir enlem aralığında güneş enerjili uçuşların verimli bir şekilde gerçekleştirilebileceği ortaya koyulmuştur [88].



Görsel 2.23. Güneş enerjili İHA’nın N kanat dihedral değişimi [88]

2.2.2.3. Kanat Boyunca Bükülme Uygulamaları

Kanat boyunca bükülerek şekil değiştirmenin amacı, uçuş sırasında kanatlarını enine yön boyunca sürekli olarak bükerek kanatlarını 'sarma' yeteneğine sahip kuş türlerinin uçuş mekaniği davranışını taklit etmektir. Bu hareket ile indüklenmiş sürüklemenin azaltılmasına ve taşıma-sürükleme oranında artış hedeflenmektedir. Bu tip tasarımlara hyperelliptical cambered span (HECS) kanat adı verilmektedir [90]. Uçuş boyunca sürekli olarak değişkenlik gösteren eğimli kanat ucu yapıları olarak ifade edilebilirler.

Manzo ve Garcia, [91] gerçekleştirdikleri tasarımda uçuş boyunca şekil değiştirebilen bir HECS kanat tasarımı ortaya koymuştur. Şekil hafızalı alaşımlardan yapılmış tellere yer verilen tasarım ile bu şekil değiştirme hareketinin gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Şekil değiştiren HECS kanat tasarımında oluşan boşlukların kapatılabilmesi için lateks malzeme kullanılmıştır. Görsel 2.24’de kanadın açıklık boyunca bükülmesi ve şekil hafızalı alaşımlardan yapılmış tellerin yer aldığı kompartıman görülmektedir. HECS kanat ve konvansiyonel eliptik kanat arasında gerçekleştirilen rüzgâr tüneli sonuç karşılaştırmasında 5° üzeri hücum açılarında %50’ye varan sürükleme katsayısı düşüşü görülmüştür [91].



Görsel 2.24. HECS kanat tasarımı ve şekil hafızalı tel kompartımanı [91]

2.2.3. Kanat Profili Odaklı Şekil Değiştiren Kanat Uygulamaları

Şekil değiştiren kanat uygulamaları arasında en sık çalışılan başlıklar kanat profili odaklı şekil değiştirme uygulamalarıdır. Özellikle kamburluk değişimi alt başlığı en büyük ilgiyi çeken konulardan biri olma özelliğini gösterir. Kamburluk değişiminin yanı sıra, kanadın profilini etkileyen iki boyutlu şekil değiştirmelerden bir diğeri de profil kalınlığını değiştiren uygulamalardır. Bu tez çalışmasının odak noktası olması nedeniyle

literatürde yer alan kanat profili kamburluğu değişen uygulamalara en son ve detaylı olarak yer ayrılmıştır.

2.2.3.1. Kanat Profili Kalınlığı Değişen Uygulamalar

Kanat profilleri ince profiller ve kalın profiller olarak iki farklı aile gibi incelendiğinde: ince profillerin taşıma kaybı konusunda kalın profillere karşı dezavantajlı olduğu, ancak sürükleme katsayısı konusunda ise avantajlara sahip olduğu ve yüksek hızlarda tercih edildiği ifade edilebilir [92]. Dolayısıyla uçuş sırasında kanat profilinin kalınlığının değiştirilmesi farklı hız rejimleri ve manevralara uçağın adaptasyonunu artıracak bir şekil değiştirme uygulaması olarak ifade edilebilir.

Secanell ve ark., [93] gerçekleştirdikleri çalışmada hafif bir insansız hava aracının tüm uçuş fazları boyunca optimum şekilde performans göstermesi için gerekli kanat profili parametrelerini belirlemiştir. Gerçekleştirdikleri analizlerde kamburluk ve hücum kenarı kalınlığını değiştirebilen bir şekil değiştirme mekanizması ile tüm fazlarda optimal performans gösteren bir kanat profili oluşturulabileceği ortaya koyulmuştur. İnsansız hava aracının kanat profilinde tüm uçuş fazları için değişiklik yapılabildiğinde uçuşun güç gereksiniminin azaldığı ve operasyonel esneklik elde edilebildiği ifade edilmiştir [93].

Kanat profil kalınlığı değişen uygulamalarda aynı zamanda kanat kamburluk dağılımının da değiştiğini söylemek mümkündür. Kamburluk üzerinde etkileşim olmaksızın kanat profil kalınlığını değiştirmeyi odaklayan bir uygulamaya açık literatürde rastlanmamıştır.

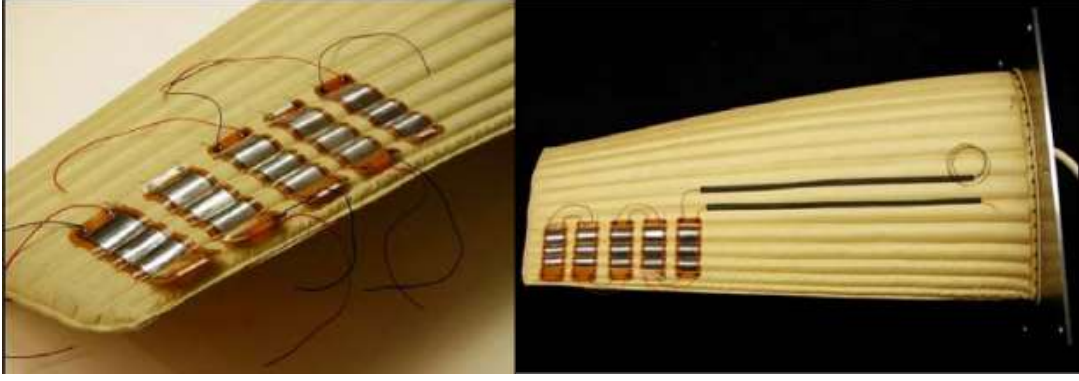
2.2.3.2. Kanat Profili Kamburluğu Değişen Uygulamalar

Kanat profilleri, belirli bir hız rejiminde ve belirli bir göreve yönelik olarak seçilirler. Uçağın kanadına karakterini veren bu seçim sonucunda, kanadın üreteceği kuvvetler ve momentler belirlenmiş olur. Dolayısıyla uçağın karakteristiği üzerinde kanat profili seçimi ve seçilen kanat profilinin kamburluğu doğrudan etkilidir. Uçakların çok rollü olarak tasarlanabilmesinin şekil değiştiren kanat uygulamalarının motivasyonlarından biri olduğu düşünüldüğünde, kanat profilinin uçuş sürecinde değiştirilebilmesinin önemi ortaya çıkmaktadır. Kanatta yer alan kontrol yüzeyleri olan aileronlar ve yüksek taşıma tertibatlarından biri olarak ifade edilen flaplar kamburluk değişimi sağlayan menteşeli yapılardır [94]. Flapların konumlandırılması için genellikle firar kenarları tercih edilse de hücum kenarı flapları olarak adlandırılan uygulamalar da mevcuttur [95, 96].

Geleneksel flap türleri menteşeli ve ayırık yapılardır. Flapların kanatlara montajı sırasında hava boşlukları oluşmaktadır. Geçmişte flapların hava boşluklarının performansı azaltacağı düşünülerek bu boşlukların kapatılmasının etkilerini anlamaya yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiş ancak gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, bu boşlukların kapatılmasının maksimum taşıma katsayısını düşürdüğü ve stall hızını artırdığı gözlemlenmiştir [97, 98]. Bu durum günümüz havacılığında yolcu uçaklarında kalkış ve inişlerde boşluklu flap kullanılmasının önemini göstermiştir.

İnsansız hava araçlarında ise genellikle basitliğinden dolayı plain flap adı verilen boşluksuz yapı tercih edilmektedir [99]. Flapların ve aileronların kanadın sabit kısmı ile birleştiği menteşe bölgelerindeki boşluklar, kalkış ve iniş süresince insansız hava aracının performansına olumlu katkı yapsa da seyir uçuşu durumunda sürüklemeyi artırarak verimsizlik yaratmaktadır [100]. Flap ve kontrol yüzeyi boşlukları aynı zamanda bir gürültü kaynağıdır [101]. Hava araçlarının gürültü emisyonlarının azaltılması hem yolcu uçakları hem de insansız hava araçları için önemli bir hedeftir. Dolayısıyla konvansiyonel aileronların ve flapların yerini alabilecek sürekli yapıların geliştirilmesi uçak tasarımcıları için önemli bir hedef oluşturmaktadır. İnsansız hava araçları üzerinde maliyetlerin düşüklüğü ve boyutlarının küçüklüğü nedeniyle birçok farklı yaklaşım ve yöntem kullanılarak değişken kamburluk yeteneğine sahip kanatlar tasarlanmıştır. Şişebilen kanatlar, şekil değiştiren oluklu yapılar, şekil hafızalı alaşımların kullanıldığı yapılar, rijit-birbirine bağlı dilimli yapılar, boşluklu yapılar ve balık kılçığı benzetimli kanatlar bunlardan bazılarıdır.

Cadogan ve ark., [102] Piezoelektrik aktüatörler tarafından harekete geçirilen şişirilebilir kanatlar üreterek kanat ağırlığını azaltmaya ve kamburluk hattının uçuş sırasında değiştirilmesi ile üç farklı kanat profili arasında geçiş yaparak kanadın taşıma ve sürüklenme katsayılarının değiştirilmesini amaçlamıştır. Çalışmada Görsel 2.25'te yer alan kanatlar üretilerek test edilmiştir. Şişirilebilen kanatlarda şekil değiştirme sağlanarak kanattan elde edilen taşıma kuvvetinin arttığı ifade edilmiştir [102].



Görsel 2.25. Şişirilebilir kanatların profil değişikliği mekanizması [102]

Zhao ve ark., [103] gerçekleştirdikleri çalışmada bir rijit birbirine bağlı dilimli kanat ribi yapısı kullanarak kanat kamburluğunu değiştirebilen tasarım ortaya koymuştur. Talon UAV adlı ticari insansız hava aracı için üretilen kanat ile uçuş testleri gerçekleştirilmiştir. Konvansiyonel kanada sahip Talon UAV ile kıyaslandığında %14,1 uçuş verimliliği elde edildiği ifade edilmiştir. Çalışmada üretilen kanadın ağırlığında aktüatör farkından dolayı 40 gram ve yapıştırıcı ağırlığından dolayı 4 gram farklılık olduğu bilgisi verilmiştir. Kanatlar Görsel 2.26’da yer aldığı şekilde yapısal malzeme olarak balsa ağacından ve aktüatör ünitesi olarak elektromekanik üniteler olan servomotorlar kullanılarak üretilmiştir [103].



Görsel 2.26. Birbirine bağlı rijit dilimler yöntemi ile kamburluğu değişen kanatlar [103]

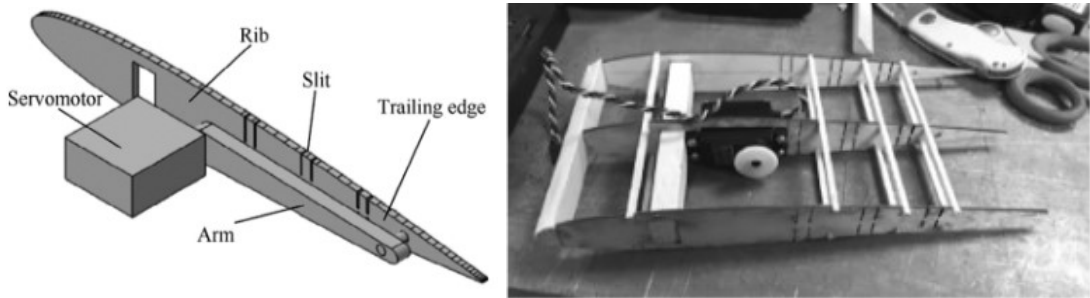
Abdullah ve ark., [104] gerçekleştirdikleri çalışmada SMA – Şekil Hafızalı Alaşımları kullanarak kamburluğu değişen bir kanat geliştirmiştir. Tasarımın amaçları olarak performans verimlilik artışı ve yakıt sarfiyatı belirlenmiştir. Kanat kaplaması altına

yerleştirilen şekil hafızalı aktüatörler ısıtılarak şekil değişimi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada Görsel 2.27’de yer verilen rüzgâr tüneli test parçası oluşturulmuş ve kanadın başlangıç durumu ile şekil değiştirme durumu arasındaki kuvvet farklılıkları incelenmiştir. Şekil değiştiren kanadın aerodinamik veriminde artış olduğu ifade edilmiştir [104].



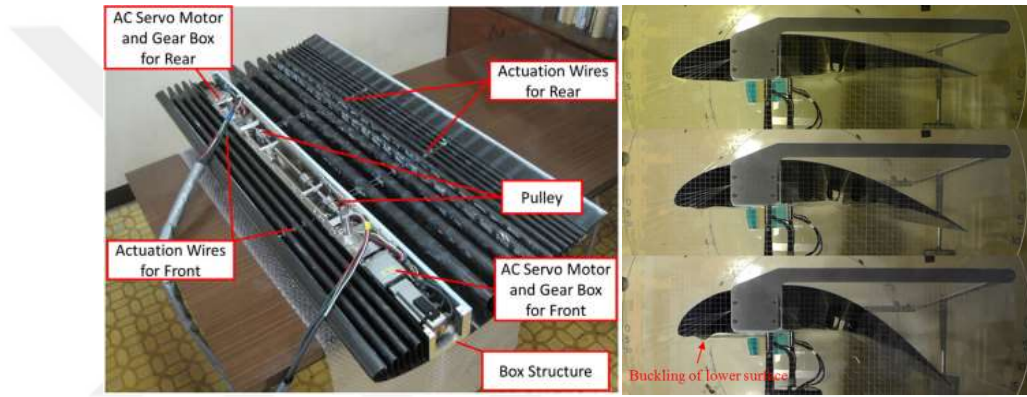
Görsel 2.27. Şekil hafızalı alaşımlar kullanılarak kamburluğu değişen kanatlar [104]

Communier ve ark., [105] gerçekleştirdikleri çalışmada boşluklu bir rib tasarımı ile kamburluğu değiştirilecek bir kanat tasarımı ortaya koymuştur. Çalışmada NACA 0012 kanat profili kullanılmıştır. Aktüatör olarak servomotor kullanılmış ve boşluklu tasarıma sahip kanat ribleri Görsel 2.28’de görülen kol vasıtasıyla deforme edilmiştir. Kanat riblerinde ahşap malzemeler kullanılmış, anizotropi sağlanabilmesi için damar yönlerine dikkat ederek inşa edilmiştir. Rüzgâr tüneli testleri gerçekleştirilen prototipin konvansiyonel aileronlar içeren kanatlara kıyasla daha yüksek aerodinamik verime ulaştığı ve bunun sürüklemedeki düşüş ile ilişkili olduğu ifade edilmiştir. Tasarlanan kanatların ağırlığı 725 g olarak belirtilmiş ve konvansiyonel kanatlara kıyasla ağırlık artışına sebep olmadığı çalışmanın sonuçları arasında yer almıştır [105].



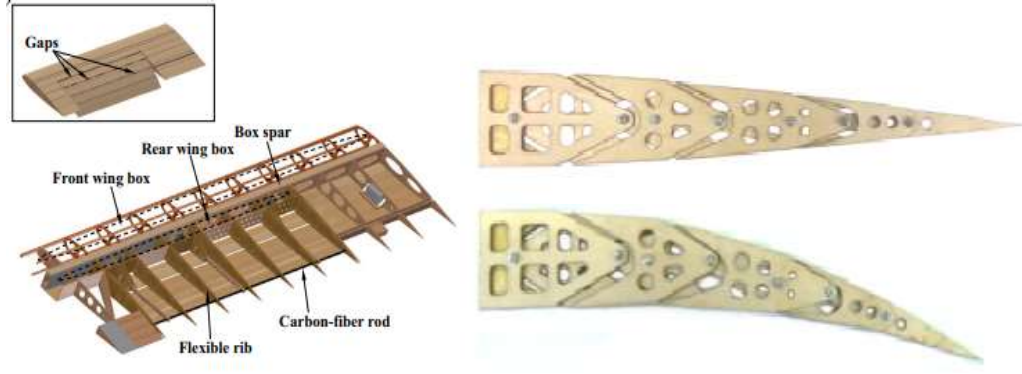
Görsel 2.28. Boşluklu rib tasarımı kullanılarak kamburluğu değişen kanatlar [105]

Takahashi ve ark., [106] gerçekleştirdikleri çalışmada oluklu kompozit panellerin anizotropik özelliklerini kullanarak kamburluk dağılımı değişen bir kanat tasarımı ortaya koymuştur. Taarında Wortmann FX 63-137 kanat profili kullanılmıştır. Kanadın üst yüzeyinde rijit bir kaplama, alt yüzeyinde ise esnek bir kaplama malzemesi tercih edilmiş ve bu kaplamalar oluklu yapıya yapıştırılmıştır. Kanat içerisine yerleştirilen servomotorlar ve teller ile gerilme yaratılarak kanadın şekil değiştirmesi sağlanmıştır. Gerçekleştirilen rüzgâr tüneli testlerinde alt yüzeyde yapısal bir sorun olan buckling oluşumu Görsel 2.29'daki gibi başlamıştır. Bu durum sürüklenme kuvvetini artırmıştır [106].



Görsel 2.29. Oluklu paneller ile kamburluğu değişen kanatlar [106]

Meguid ve ark., [107] gerçekleştirdikleri çalışmada lego benzeri şekilde birbirine geçebilen dilimli bir esnek rib yapısı tasarlamıştır. 10 kilogram ağırlığın altındaki insansız hava araçlarında kullanılabilmesi amaçlanan tasarımda NACA 0012 kanat profili temel yapı olarak kullanılmış ve bu profilden NACA 6412 kanat profiline geçiş amaçlanmıştır. Kanatta aileronlar konvansiyonel olarak dış kısımda tutulurken bir şekil değiştiren bölge oluşturulmuştur. Şekil değiştiren bölgenin hareketi servomotor-rocker mekanizması ile sağlanmıştır. Şekil değiştiren bölümün dışarısındaki kaplamada esnek bir malzeme kullanılmaması dolayısıyla boşluklar oluşmuştur (Görsel 2.30). Çalışmanın sonunda başarılı ve emniyetli bir şekilde, şekil değiştiren kanat ile uçuş yapıldığı ve böylece tasarım döngüsünün sonuçlandırıldığı ifade edilmiştir [107].

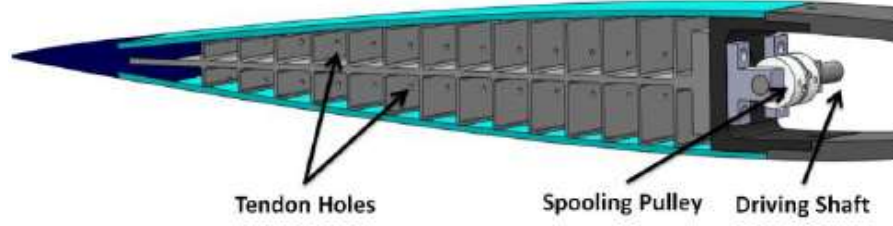


Görsel 2.30. Dilimli esnek rib yapısı ile kamburluğu değişen kanatlar [107]

2.3. Balık Kılçığı Benzetimli Şekil Değiştiren Kanat Çalışmaları

Balık kılçığı benzetimli şekil değişimi ile kamburluk dağılımı değiştirilebilen kanatlar tezin odak konusu olduğu için bu konudaki literatür ek bir bölüm olarak sunulmuştur. Bu uygulamalarda da amaç diğer fırar kenarı uygulamaları gibi kanat profiline kamburluğunu değiştirerek aerodinamik verimi artırmak, çok fonksiyonluluk sağlamak ve konvansiyonel kontrol yüzeylerine daha verimli alternatifler üretmektir.

Bu alandaki ilk çalışma Benjamin King Sutton Woods ve Michael Ian Friswell tarafından 2012’de yayınlanan bir konferans bildirisi. Çalışmada ilk kez “FishBAC” kısaltması kullanılmıştır. Bu kısaltma fish bone articulated wing camber yani balık kılçığı şeklinde hareket ettirilen kanat kamburluğu anlamına gelmektedir. Araştırmacılar bu çalışmada sürekli kamburluk değişimi sağlayabilecek doğa benzetimli bir yaklaşım olarak potansiyel vaat ettiklerini düşündükleri FishBAC konseptini tanıtmıştır. Görsel 2.31’de yer aldığı şekliyle, bir kaburga ve kılçıklardan oluşan tendonlar ve tendon boşluklarına sahip bir kanat ribi tasarımı tanıtılmıştır. Bu tendonlar önceden gerilmiş kanat kaplamasına yapıştırılmıştır. Bu konsept kanadın kaplaması olarak elastometrik matrisli kompozit kullanılmıştır. Rijit olan hücum kenarı D-kutusu içerisine yerleştirilen bir döner şaft ve riblerin her biri için birer makara konumlandırılarak fırar kenarının yukarı ve aşağı hareket kabiliyeti sağlanmıştır [108].



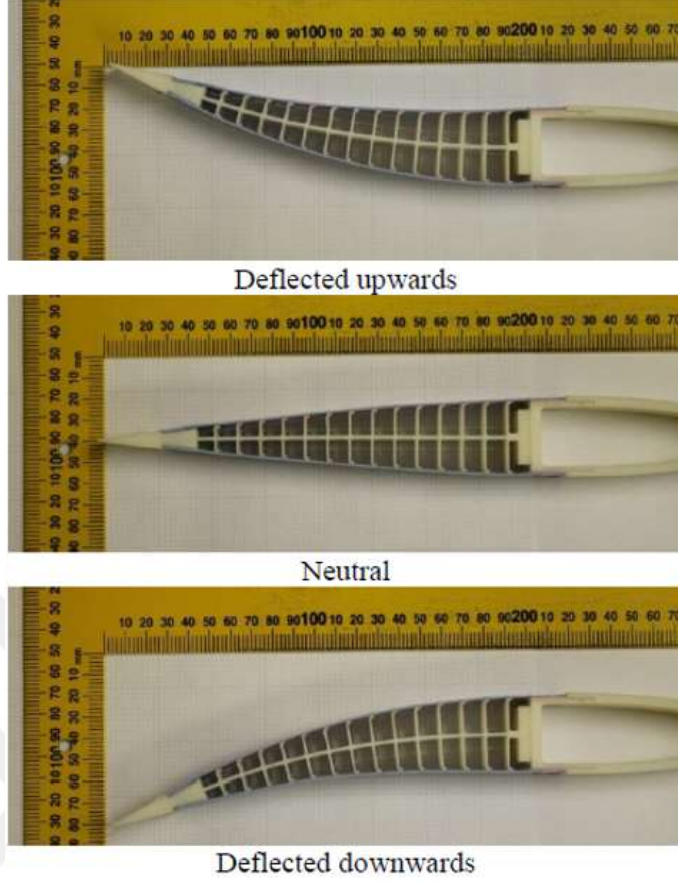
Görsel 2.31. İlk FishBAC kanat konsepti [108]

Çalışmada FishBAC yaklaşımının kullanımı için helikopter rotor pallerine odaklanılmıştır. Bu nedenle NACA 0012 simetrik kanat profili üzerinde uygulama yapılmıştır. XFOIL analizleri sabit ve şekil değiştirmiş durumlar arasında uygulanarak şekil değiştirme sonucunda ortaya çıkan geometrinin aerodinamik özellikleri değerlendirilmiştir. Araştırmacılar çalışmanın değerlendirmeler bölümünde bu konseptin daha da geliştirilmesi ve modifiye edilmesi ile birlikte insansız hava araçları, yolcu uçakları ve rüzgâr türbinleri gibi birçok alanda uygulanabileceğini belirtmiştir.

Konseptin geliştiricileri tarafından üç ana tasarım kriteri ortaya koyulmuştur:

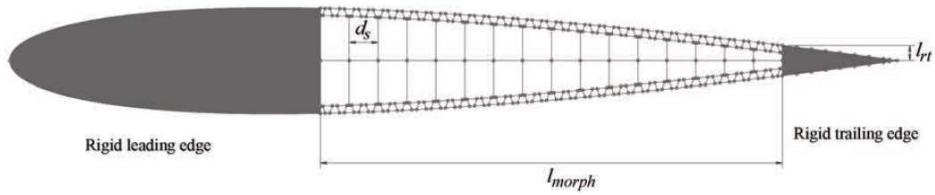
- Kontrol Otoritesi,
- Basitlik,
- Güvenilirlik.

Konsepte akıllı malzemeler, şekil hafızalı alaşımlar gibi yöntemler değerlendirme dışında tutulmuştur. Bunun sebebi olarak bakım prosedürleri, yorulma dayanımı ve bu malzemelerin maliyetleri gösterilmiştir. Gerçekleştirilen aerodinamik analizlere dayanarak taşıma katsayısında artış konusunda konseptin potansiyel barındırdığı ifade edilmiştir. Çalışma kapsamında üretilen prototip Görsel 2.32’de yer almaktadır. Oldukça düşük aktüasyon enerjisi ile büyük şekil değişiklikleri gerçekleştirilebildiği görülmüştür [108].



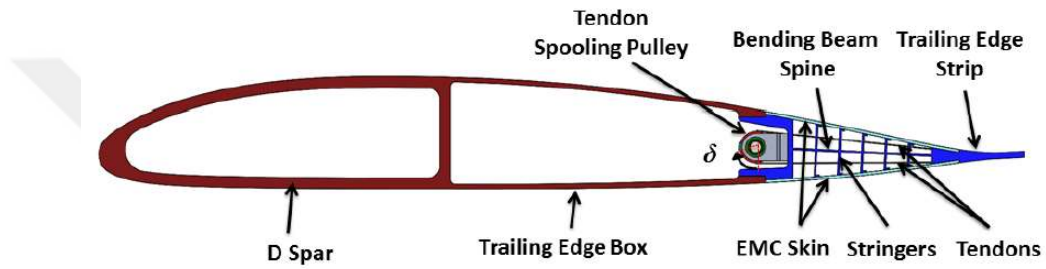
Görsel 2.32. İlk FishBAC prototipinin hareket kabiliyeti [108]

Dayyani ve ark., [109] FishBAC konusunda yen bir konsept geliştirerek dış yüzeyin kaplamasında Görsel 2.33'teki çizimde yer alan oluklu kompozit panellere yer vermiştir. Oluklu kompozit panellerin anizotropi özelliği ile FishBAC kanatlarda kullanılması değerlendirilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak çeşitli oluk yerleşimleri ve boyutları üzerine analizler yapılmış, en uygun oluk dağılımının trapezoidal oluklar olduğu sonucu bulunmuştur. Çalışmada prototip üretimi ve deneysel bir uygulama gerçekleştirilmemiştir [109].



Görsel 2.33. Oluklu kompozit paneller içeren FishBAC konsepti [109]

Woods ve Friswell, [110] gerçekleştirdikleri çalışmada 2012 yılında ortaya koydukları ilk FishBAC konseptine göre değişiklikler içeren yeni bir tasarım ortaya koymuştur. Yeni test modelinde OA212 kanat profili kullanılmıştır. Ayrıca en büyük farklılık olarak tendon şeklindeki bölge, Görsel 2.34’teki gibi firar kenarına doğru ötelenerek kanat veterinin %75-90’lık bölümüne taşınmıştır. Analitik sonuçları doğrulamak için bir dizi masaüstü testi ve lazer yer değiştirme sensörü taraması yapılmıştır. Önerilen mekanizma ve amaçlanan konsept ile birleşen tendon şeklindeki nüve, ilk kez deneysel olarak bu çalışmada doğrulanmıştır [110].



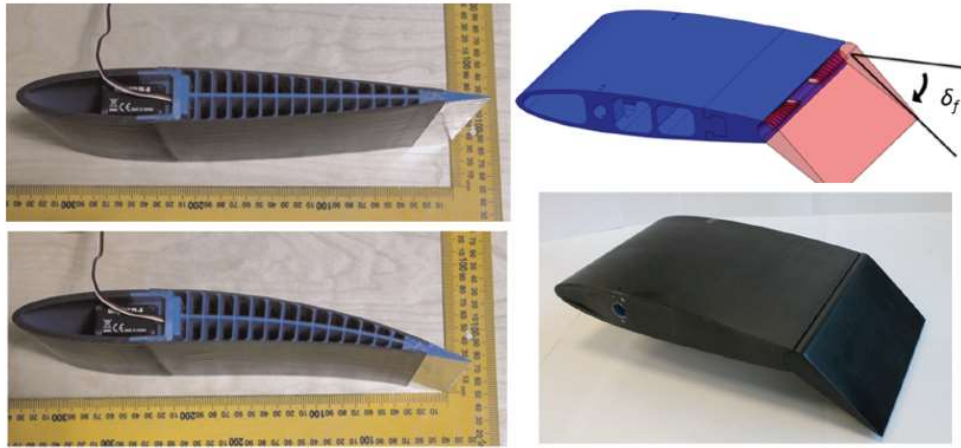
Görsel 2.34. 2. Jenerasyon FishBAC konsepti [110]

İkinci jenerasyon FishBAC prototipi için Görsel 2.35’de yer alan test parçası üretilmiştir. Rijit kısım, lazer sinterleme metodları kullanılarak naylon malzemeden üretilmiştir. Hareketli bölüm ise üç boyutlu baskı cihazında ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) malzeme kullanılarak üretilmiştir. Hareketli kısmın kaplanmasında silikon elastomer kullanılmıştır. Gerçekleştirilen testlerde gereken aktüasyon enerjisi ve şekil değiştirme miktarları ölçülmüştür. Çalışmanın sonunda elde edilen deneysel verilerin analizlerle uyduğu ifade edilmiştir [110].



Görsel 2.35. 2. Jenerasyon FishBAC prototipi [110]

Woods ve ark., [111] araştırmacı Onur Bilgen'in katılımıyla FishBAC konseptinin ilk kez rüzgâr tüneli testlerini gerçekleştirmiştir. Çalışmada, birinci jenerasyon NACA 0012 profiline sahip FishBAC kanat ve aynı kanat profiline sahip konvansiyonel flaplı bir kanadın rüzgâr tüneli test sonuçlarını doğrudan karşılaştırılmıştır. Rüzgâr tüneli testleri yapılan FishBAC kanatta artikülasyon gerçekleştirecek mekanizma eklenmemiştir. Dolayısıyla sadece aerodinamik özellikler karşılaştırılmıştır. Test parçası 150 mm kanat açıklığı ve 305 mm kanat veteri olacak şekilde tasarlanmıştır. Test parçasında şekil değiştirme kabiliyetine sahip bölge veterin %35'inde başlayıp %85'inde bitecek şekilde konumlandırılmıştır. Konvansiyonel flaplı kanat ise veter uzunluğunun %25'ine tekabül eden menteşeli plain flap sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Görsel 2.36'da test parçaları FishBAC ve konvansiyonel flaplı olarak yan yana sunulmuştur [111].

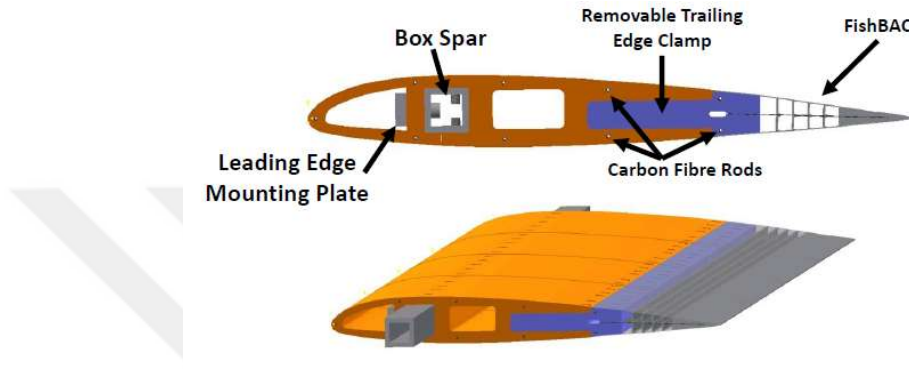


Görsel 2.36. Rüzgâr tüneli test parçaları: FishBAC solda, konvansiyonel flaplı sağda [111]

Gerçekleştirilen rüzgâr tüneli testlerinin sonucunda her iki test parçasının da benzer taşıma katsayısı artışları gösterdiği ifade edilmiştir. Ancak flapın aşağı doğru hareketi sonucunda konvansiyonel flaplı kanadın sürüklemesinin FishBAC kanattan daha yüksek olduğu ölçölmüştür. Bu durum FishBAC kanat konseptinin konvansiyonel flaplara karşı daha yüksek aerodinamik verime sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu oranın %20-25 aralığında olduğu ifade edilmiştir [111].

Riviero ve ark., [112] özgün bir FishBAC kanat tasarımı gerçekleştirmiştir. Daha önceki tasarımlarda izotropik polimerler kullanılmış ve malzemelerin anizotropik yapısından elde edilebilecek avantajlar kullanılmamıştır. Bu çalışmada, rüzgâr tüneli testi

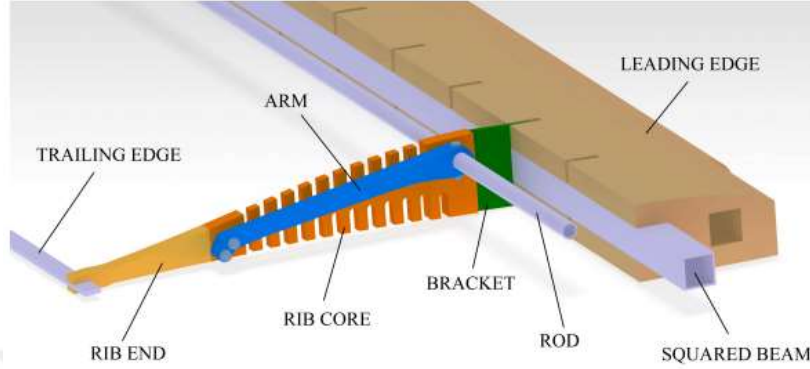
testi uygulanması için yenilikçi bir FishBAC kanat tasarımı ortaya koyulmuştur. FishBAC kanadın hareketli bölümü için kompozit omurga tasarlanmış ve üretilmiştir. Önceki çalışmalarda yer alan FishBAC mimarisi korunmuştur. Ancak kanadın hücum kenarı bölümünde modüler bir yapı tercih edilmiştir. Görsel 2.37’de yer verildiği gibi tasarlanan kanatta rijit ve hareketli bölüm birbirinden ayırılabilir şekilde tasarlanmıştır [112].



Görsel 2.37. Modüler FishBAC kanat tasarımı [112]

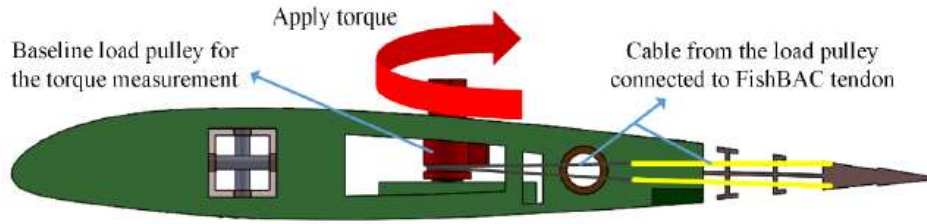
Scopelliti ve ark., [113] sundukları bir konferans tebliği ile FishBAC kanat tasarımına yeni bir yaklaşım katmışlardır. Çalışmada “şekil değiştiren kanat” anahtar sözcüğü kullanılmış ancak “FishBAC” adlandırmasına yer verilmemiştir. Ancak bu tasarım bu alandaki alanyazına dahil edilmek için gerekli karakteristik özellikleri barındırmaktadır. Bu çalışmada radyo kontrollü bir model uçak olan Precedent T240 uçağının kanadı üzerinde bir değişken kanada dönüştürme modifikasyonu amaçlanmıştır. Precedent T240 model uçağının kanatları menteşeli aileron yapıları içeren konvansiyonel bir sabit kanat şeklindedir ve ağırlıklı olarak balsa ağacı parçalar kullanılarak inşa edilmiştir. Bu kanatların yerini alacak kanat tasarımında, daha önceki FishBAC tasarımlardan farklı olarak omurga (spine) ve kılçık (stringer) bölümleri birleştirilmiştir. Böylece tendonlar tamamen entegre bir yapı haline getirilmiştir. Kanadın her bir rib (nervür)’ü için birer burma kolu ve bunların bağlı olduğu bir shaft eklentisi yapılmıştır. Kanat üretiminde malzeme seçimi sürecinde bir prensip olarak “herkesin kolayca edinebileceği ve model uçak sektöründe yaygın kullanılan malzemeleri seçmek” belirlenmiş ve üretim planlaması bu şekilde yapılmıştır. Kanat bölümlerinin inşasında balsa ağacı, alüminyum gibi düşük maliyetli malzemeler tercih edilmiş, hareketli bölümlerde ise PLA (Poliaktik Asit) ve ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) gibi üç

boyutlu baskı filamentleri kullanılmıştır. Çalışmanın devamında Görsel 2.38’de yer alan prototip kanat oluşturulmuş ve tarayıcı lazer doppler vibrometre kullanılarak kanat yapısının form değişimleri dinamik olarak incelenmiştir [113].



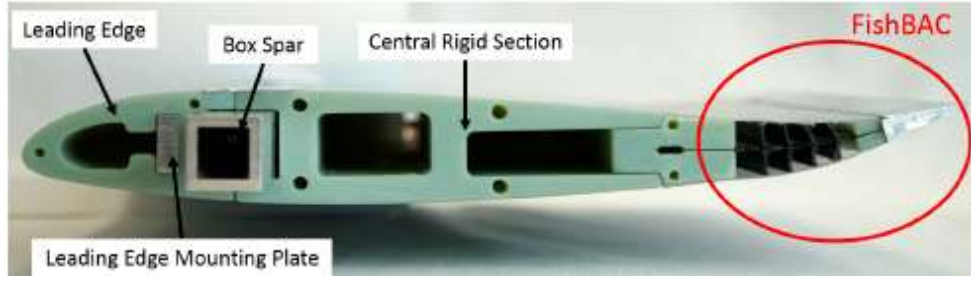
Görsel 2.38. Scopelliti ve ark. tarafından geliştirilen değişken kanat tasarımı [113]

Wang ve ark., [114] tarafından FishBAC kanatlarda önceki çalıştırma mekanizmalarında farklılık yaratacak bir değişiklik önerildi. Bu modifikasyon, bir spiral kasnak negatif sertlik mekanizmasının entegrasyonunu içermektedir. Motivasyon, artikülasyon enerjisi maliyetini azaltmaktır. Araştırma için NACA 23012 kanat profili seçilmiştir. Görsel 2.39’da önerilen mekanizmayı kullanan nihai tasarım gösterilmiştir.



Görsel 2.39. FishBAC kanatlar için spiral kasnak negatif sertlik mekanizması [114]

Riviero ve ark., [115] bir FishBAC kanadın rüzgâr tüneli testlerini gerçekleştirmiştir. Konvansiyonel flaplara sahip bir kanat ile bir FishBAC kanadı arasında bir rüzgar tüneli karşılaştırması gerçekleştirilmiştir. Rüzgâr tüneli test sonuçları ile FishBAC uygulaması sonucu en az %16 aerodinamik verimlilik artışı olduğu ifade edilmiştir. Bu sonuçlar önceki çalışmalarda yer alan rüzgâr tüneli test sonucu ile paralellik göstermiştir [111]. Oluşturulan rüzgâr tüneli test komponentine Görsel 2.40’da yer verilmiştir [115].



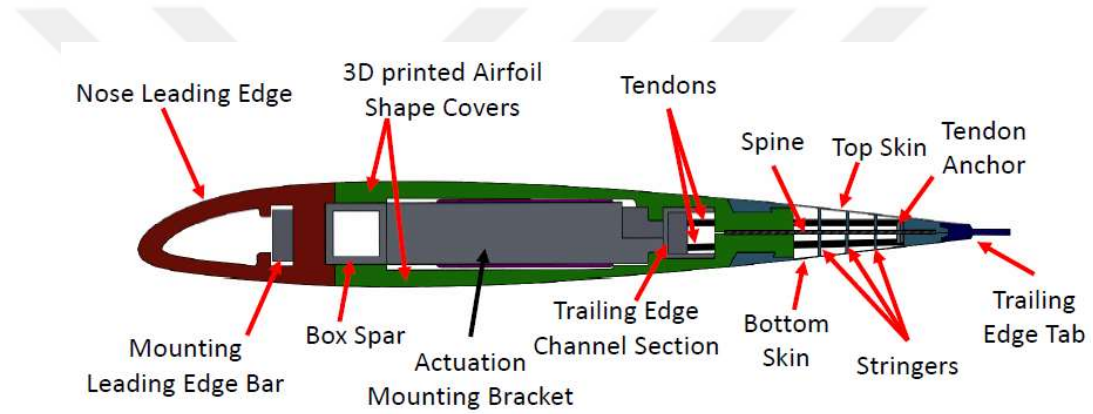
Görsel 2.40. Rüzgâr tüneli testi uygulanan FishBAC kanat [115]

Wong [116] tarafından yazılan yüksek lisans tezinde Precedent T240 radyo kontrollü uçağının kanadına FishBAC bir alternatif tasarlanmış ve testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil değiştiren kanat, kanat profilinin hassas karşılaştırmalarının yapılabilmesi için konvansiyonel muadili ile aynı geometriye sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Xfoil kodunu kullanan XFLR5 yazılımı, konvansiyonel kanatlı versiyonun ve FishBAC versiyonunun aerodinamik performansını değerlendirmek için kullanılmıştır. Ayrıca, MATLAB tabanlı bir akış çözücü olan TORNADO, kullanılmıştır. Görsel 2.41'de gösterildiği gibi, rüzgâr tüneli testi için bir FishBAC prototipi geliştirilmiştir. Önceki tasarımlarda olduğu gibi, bu tasarımda FMC kaplaması kullanılmıştır, ancak kanat kaplamasının alt tarafı için ince alüminyum levha tercih edilmiştir. Silikon, karbon fiber ile FMC konseptini kullanan uyumlu bir biçim değiştiren kaplama tasarlanmış, üretilmiş ve test edilmiştir. Bununla birlikte, birinci ve ikinci nesil FishBAC'lerden ayrı olarak, artikülasyonu gerçekleştirmek için bir burulma çubuğu kullanılmıştır. Sonuçlarda, aynı taşıma katsayısı göz önüne alındığında, FishBAC kanadın konvansiyonel T240 kanadından daha yüksek bir taşıma-sürükleme oranına sahip olduğu ifade edilmiştir [116].



Görsel 2.41. Arthur Wong tarafından tasarlanan FishBAC kanat [116]

Riviero ve ark., [117] üç boyutlu baskı cihazından üretilmiş bir kanat kaplaması kullanarak özgün bir FishBAC tasarım ortaya koymuştur. Bu kanat panelleri iki farklı termoplastik poliüretan kullanılarak üretilmiştir. Ek olarak, bu tasarımda Görsel 2.42’de görüldüğü gibi hareketli ve rijit bölümler arasında modüler bir yaklaşım kullanılmıştır. 1 metre açıklıklı, 0,27 m veterli ve %25 FishBAC hareketli bölüme sahip bir kanat parçası oluşturulmuş ve deneyler için kullanılmıştır. Tasarımın sağlamlığını sınamak için masaüstü yükleme testleri uygulanmıştır. Bu çalışmada taşıma katsayısında 0,55 civarında bir artış sağlanmıştır. Bu artışın yanı sıra yunuslama momentinde de ciddi değişiklikler elde edilmiştir. Böylece bu tasarımın aynı zamanda kontrol yüzeyi ikamesi olarak potansiyel ortaya koyduğu görülmüştür [117].



Görsel 2.42. Riviero ve ark., tarafından tasarlanan modüler FishBAC kanat [117]

2.4. Balık Kılçığı Benzetimli Şekil Değiştiren Kanat Hakkında Bulgular

FishBAC kanatlar üzerine gerçekleştirilen literatür incelemesi sonucunda elde edilen bulgular bu bölümde özetlenmiştir. Öncelikle FishBAC teknolojisinin kullanım alanlarının kamburluğun değiştirilmesi gerekebilecek alanlara odaklandığı söylenebilir. Mevcut FishBAC uygulamalarında, kanatların ve rotor kanatlarının firar kenarında artikülasyon sağlanmıştır. Ancak bu uygulamanın hücum kenarlarına uygulanmasının ileride yapılacak çalışmaların konusu olabileceği not düşülmelidir. Mevcut bilgiler kullanılarak bu tip tasarımları niteleyen özellikler bir araya getirilmiş ve Tablo 2.1’de yer alan “Balık Kılçığı Benzetimli Şekil Değiştiren Kanatların Temel Özellikleri” içerisinde derlenmiştir.

Tablo 2.1. *Fishbac Kanatların Temel Özellikleri*

Balık Kılçığı Benzetimli Şekil Değiştiren Kanatların Temel Özellikleri	
Amaç:	Uçuş sırasında sürekli kanat değişikliği ve kesintisiz kamburluk değişikliği sağlamak
Hedef:	Geleneksel kanatlara kıyasla taşıma-sürüklenme oranı artışı. Yatış kontrolünün yapılması ve konvansiyonel aileronların çıkartılması.
Faaliyet Alanı:	Helikopter rotor pallerinin firar kenarları. İHA kanatlarının firar kenarları.
Tekniğin Prensipleri:	Kontrol Otoritesi Basitlik Güvenilirlik
Mevcut Teknolojik Hazırlık Seviyesi:	TRL 4 – Laboratuvar Ortamında Onaylanmış

İncelenen FishBAC uygulamalarında, uygulama ve tasarım için farklı hareketli bölge yüzdeleri ve farklı materyaller seçilmiş olsa da, her FishBAC uygulamasının dört bölümden oluştuğunu görülmüştür. Bunlar rijit/sabit kısım, hareketli kısım, aktüasyon elemanı ve kanadın aerodinamik şeklini veren kaplamasıdır. Bu dört parçanın entegrasyonu, başarılı bir FishBAC kanat komponentini oluşturmaktadır. Sistem mühendisliği perspektifinden bakıldığında, tüm bu parçalar, komponentin tasarımı için kullanılan tasarım felsefesi kullanılarak tasarlanmalıdır. Yani FishBAC kanat komponentlerinin temel yaklaşımı olarak ifade edilen kontrol otoritesi, basitlik ve güvenilirlik prensipleri bu parçaların tasarımlarında ve malzeme seçimlerinde de uygulanmalıdır.

FishBAC kanatlar 4 ana parçadan oluşur:

- 1- Rijit Parça: Şekil değiştirme uygulanan bölümün kanat veterine olan yüzdesel uzunluğu bu bölümün boyutunu belirler. Genellikle kanat ön sparı da bu kısımdan yerleştirilir. Kanat bu şekilde gövdeye monte edilir. Uygulamada farklı veter uzunluk oranları gözlemlenmiştir. Bu parçanın hafif ve mukavemetli olarak tasarlanması ve üretilmesi beklenir.
- 2- Aktüasyon Elemanı: Önerilen çalıştırma elemanı, ilk FishBAC tasarımlarında bir servomotora bağlı kasnak düzeneğinden oluşmaktaydı. Bir diğer yaklaşım olarak kasnağın yerine tork çubukları ilavesi de yapılmıştır. Hareketli parça üzerindeki aerodinamik ve yapısal yüklerin hesaplanması ile gerekli servomotor tork değeri bulunmalıdır. Aktüasyon elemanı hafif ve dayanıklı parçalara sahip olmalıdır.

Bakım gereksinimi düşük olmalıdır. Verimlilik için, enerji maliyetleri düşük olmalıdır.

- 3- Hareketli Bölüm: Hareketli kısım bu konsepte FishBAC ismini veren tasarım özelliğidir. İlk FishBAC tasarımlarında omurga ve kirişler ayrı parçalar olarak farklı malzemelerden yapılmıştır. Daha sonraki tasarım yaklaşımlarında kirişler ve omurganın tek parça olarak birleştirildiği ve aynı malzemeden üretildiği görülmüştür. Hareketli bölüm yapısal olarak dayanıklı ve hafif olmalıdır. Bu bölüm elastik veya düşey yönlerde deforme olabilir olmalıdır. Ama aynı zamanda aerodinamik kuvvetlere de direnmelidir.
- 4- Kanat Kaplaması: FishBAC kanatlarda kaplama çok önemlidir. Kanat kaplaması rijit kısım ve hareketli kısım için farklı malzemelerden seçilebilir. Hareketli kısım üzerindeki kaplama, kendi üzerinde katman veya potluklar oluşturmada çalıştırmayı uygulamalıdır. Öngermeli elastometrik kompozit matris, oluklu kompozit paneller ve elastomerik kumaş gibi farklı malzemeler kaplama olarak uygulanmıştır.

Şekil değiştirme özelliğine sahip FishBAC tasarımları, konvansiyonel aileronlara ve flaplara doğrudan bir alternatif olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu nedenle, karşılanması gereken tek gereksinim aerodinamik verimlilik değildir. FishBAC tasarım projeleri, ağırlık, güvenilirlik ve maliyet açısından konvansiyonel kanatlarla rekabet edebilmelidir.

Bu bağlamda: (i) hafif malzeme seçimi, (ii) dayanıklı malzeme seçimi, (iii) uygun fiyatlı malzeme seçimi ve (iv) insan hatası ve bakım konularını azaltmak için tasarımdaki karmaşıklığın en aza indirilmesi, gelecek nesil FishBAC tasarımların dört ayağı olarak düşünülmelidir.

Mevcut uygulamaların sayısının azlığı ve araştırma gruplarının darlığı, bu alanda trendleri belirlemeyi ve takip etmeyi zorlaştırmaktadır. Ancak, Şekil 2.3'deki gibi mevcut tasarımlar sıralandığında bazı odak noktaları ortaya çıkmaktadır.

FishBAC Kanat Tasarımlarının Gelişimi

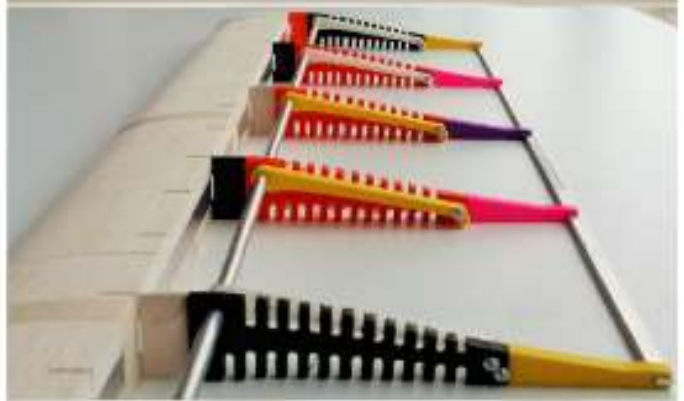
2012- Woods & Friswell [108]



2014 - Woods & Friswell [110]



2017 - Scopelliti vd. [113]



2020 - Riviera vd. [118]



2021 - Wong vd. [116]



Şekil 2.2. Balık kılçığı benzetimli şekil değiştiren kanat tasarımlarının gelişimi

Şekil 2.2'de yer alan tasarım yaklaşımları ve FishBAC uygulamaları incelendiğinde, son çalışmalarda üç boyutlu baskı tekniklerinin kullanımında bir artış olduğu görülmektedir. 3B yazıcılar, kullanıcıların son ürünleri yüksek kesinlikle yazdırmasına olanak tanıdıkları için prototipleme konusunda oldukça avantajlıdır. Ayrıca hızlı baskı yeteneği, bu cihazları tasarım süreçlerine entegre etmenin bir başka avantajı olarak ön plana çıkmaktadır. Geliştirilen termoplastikler ve katıksız filamentler ile ortaya çıkan geniş 3B baskı malzemeleri yelpazesi tasarımcılara avantajlar sağlamaktadır. Özellikle daha önce hareketli kısım olarak ifade edilen omurga (spine) ve kılçık (stringer) parçalarında, 3B yazdırılabilir termoplastiklerin elastik sınırlar içerisinde deforme olma özelliği, geleceğin FishBAC tasarımcıları tarafından daha fazla kullanılması gereken çok faydalı bir özellik olarak ön plana çıkmaktadır.

Bu konuyla ilgili gelecekteki araştırmalar, ilave ağırlık ve üretim maliyetleri ile ilgili farklı yaklaşımlar sunmalıdır. Konvansiyonel ve FishBAC tasarımları arasındaki aerodinamik ve yapısal karşılaştırmaların yanı sıra, okuyucuya bir fizibilite anlayışı sağlamak için raporlara ve makalelere ağırlık ve maliyet gibi veriler de eklenmelidir. Düşük çalıştırma enerjisi ihtiyacı hedeflenerek ve tasarlanan yapılarda hafiflik gözetilmesi önemli tasarım prensipleri olacaktır. Şekil değiştiren kanat tasarımlarına karşı ağırlık ve karmaşıklığa dayalı ön yargının üstesinden gelmek için ise FishBAC tasarımlarına fazladan mekanizma ve parça eklenmesinden de kaçınılmalıdır. Bu çalışmada yapılan tasarımda da bu prensipler gözetilmiştir.

3. MOTİVASYON VE METODOLOJİ

3.1. Tezin Motivasyonu

Tez kapsamında gerçekleştirilen araştırmalar dört motivasyon çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Şekil değiştiren kanat teknolojisi karşısındaki ön yargılarla mücadele edilmesi, doğadan esinlenme kullanılarak daha verimli teknolojiler geliştirilmesi, insansız hava araçlarında verimlilik artışı sağlayacak komponentlerin geliştirilmesi ve araştırmacının insansız hava aracı alanındaki tecrübesi bu dört temel motivasyon olarak ifade edilebilir.

Giriş bölümünde yer verildiği gibi şekil değiştiren kanat teknolojileri esasen ilk uçak ile başlamış, üzerinde çok fazla araştırma gerçekleştirilmiş bir teknolojidir. Ancak bu araştırmalar maliyetler ve ön yargılar sebebiyle zamanla terk edilerek yerlerini konvansiyonel teknolojilere bırakmıştır. Bu ön yargılar, değişken yapıların komplekslik, maliyet ve ek ağırlık getirerek sağladıkları verimlilikten daha büyük sorunlara neden olan yapılar olduğu düşüncesinin hava aracı tasarımında yaygın bir görüş olmasına sebebiyet vermiştir. Bu ön yargıların, her ön yargı gibi tasarımcıları bazı avantajlardan mahrum bırakabileceği ve mevcut hava aracı tasarımlarının geliştirilmesinde bir bariyer teşkil edebileceği düşüncesi, araştırmacının bu konuda motive olmasına yol açmıştır.

Doğadan esinlenme ve bunu gerçekleştirerek verimlilik artışı sağlamak önemli bir prensiptir. Doğadaki canlıların gelişiminin uzun yıllar sürdüğü ve bu yıllar boyunca da türlerin hayatta kalma becerilerini artıracak niteliklerinin geliştiği bilinmektedir. Bu kapsamda bakıldığında, bir hava aracının prototipleme sürecinde en fazla 10 farklı prototip üretildiği ancak doğadaki tasarımlarda bu prototip sayısının ve en iyileme sürecinin çok daha uzun olduğu anlaşılabilmektedir. Dolayısıyla karşılaşılan birçok tasarım probleminde olduğu gibi en iyi cevabın doğada bulunduğunu bilmek ve canlıların yapılarındaki bu bileşenleri en uygun şekilde tasarımlara taşımak, doğadan esinlenmenin önemli bir konu olduğunu gözler önüne sermektedir. Doğadan esinlenme: biyomimikri, doğa benzetimi veya doğadan öykünme gibi anahtar kelimelerle ifade edilen bir alan olarak, aslında bir tasarım yaklaşımı olarak da özümsemelidir. Sadece havacılıkta değil, deniz taşıtı tasarımında [119] veya yüksek hızlı trenlerin burun kısımlarının tasarımı [120] gibi hayatımıza sirayet eden başka önemli alanlarda da karşımıza çıkmaktadır. Araştırmacının doğa tasarımlarına olan ilgisi, anlama merakı ve kendi tasarımlarına nasıl entegre edebileceği konusundaki düşünceleri, bu araştırmanın motivasyon kaynaklarından biri olmuştur.

Hava araçlarında verimlilik artışı ve sürdürülebilirlik, hala başlarında sayılabileceğimiz yüzyılımızın şimdilik en önemli konusudur. Aerodinamik verimliliğin artırılması, sürdürülebilir havacılığın birçok alt başlığı ile aynı amaca hizmet eden bir efordur. Hava araçlarında kalkış ve iniş sırasında gürültü emisyonunun azaltılması, hava aracı üzerindeki basınç dağılımının daha iyi optimizasyonu ve motordan ihtiyaç duyulan itki kuvvetinin azaltılabilmesi ile mümkündür. Elektrifikasyon konusunda yaşanan en büyük sorunlar, yeterli enerji yoğunluğuna sahip batarya teknolojilerine tezin yazıldığı dönemde henüz sahip olunmamasıdır. Bu durum menzil konusunda sorunlara neden olmaktadır. Aerodinamik verim doğrudan menzil ile ilişkilidir ve yükseltilmesi durumunda bu alanda da gelişmeler ortaya koyulacaktır. Günümüzde aerodinamik verimin artışı sağlanmasına, mevcut uçak tasarımlarında büyük bir değişikliğin ortaya çıkartacağı altyapı, yedek parça, bakım personeli yetiştirilmesi ve sosyal kabul sorunları birer bariyer teşkil etmektedir. Dolayısıyla hava araçlarının mevcut konfigürasyonlarını koruyarak gerçekleştirilebilecek bazı modifikasyonların, bu bariyerleri daha kolay aşarak aerodinamik verimlilik artışı sağlayabileceği düşüncesi benimsenmiştir. Şekil değiştiren kanatların bu kapsamda değerlendirilebilir oluşu, tezin motivasyonlarından biri olmasını sağlamıştır.

Son olarak, araştırmacının insansız hava aracı tasarımı konusundaki tecrübeleri bu tezin motivasyonlarından birini oluşturmaktadır. Tezin yazıldığı dönem itibarıyla araştırmacı, uluslararası yarışmalarda dereceler elde etmiş 12 sabit kanat ve 3 döner kanatlı insansız hava aracı tasarımı gerçekleştirmiştir. Hidrojen yakıtlı İHA [121] ve güneş enerjili İHA [122] gibi alternatif yakıtlı araçların tasarımları üzerine çalışmalar yayınlamıştır. Eskişehir Teknik Üniversitesi'nin Anatolia Aero Design İHA araştırma ve geliştirme ekibinde ikinci akademik danışmanlık ve tasarım ekibi şefliğini sürdürmektedir. Havacılıkta sürdürülebilirlik konularında da çalışmalar gerçekleştiren araştırmacının, bu iki çalışma alanını bağdaştırma ve İHA tasarımı alanındaki tecrübelerini geliştirme arzusu, gerçekleştirilen çalışmanın temel motivasyonlarından birisi olmuştur.

3.2. Araştırma Soruları

Tez çalışmasının konusu ve motivasyonu belirlenip ilgili alanyazın incelendikten sonra, irdelenecek araştırmanın soruları belirlenmiştir. Araştırma sorularının belirlenmesi, araştırma metodolojisinin tanımlanması ve araştırma kapsamında

gerçekleştirilecek tasarımın isterleri açısından oldukça önemlidir. Belirlenen araştırma soruları aşağıdaki gibi sıralanmış ve açıklanmıştır:

1. Şekil değiştiren kanat teknolojisi konusundaki ön yargılar nelerdir, bu ön yargılara karşı durabilecek bir tasarım hangi özelliklere sahip olmalıdır?

Bu ön yargılar, Tezin Motivasyonu başlığı altında da ifade edildiği gibi maliyetler, komplekslik ve ek ağırlık beklentisi etrafında oluşmaktadır. Bu ön yargılara karşı durabilecek bir şekil değiştiren kanat tasarımının:

- Düşük maliyetli olması ve herkesin ulaşabileceği malzemeler ve parçalar kullanılarak imâl edilebilmesi gerekmektedir.
- Kompleks bir yapıya sahip olmaması, hareketli parça sayısının düşük olması ve çok sık bakım ihtiyacı duymaması gerekmektedir.
- Konvansiyonel kanat bileşenine kıyasla büyük bir ağırlık maliyeti getirmemesi gerekmektedir.

Tez kapsamında gerçekleştirilen araştırmada cevaplanmaya çalışılacak sorulardan ilki olarak bu soru belirlenmiştir. Ön yargıların ifade edilmesi ve gerçekleştirilen tasarımın hangi yönleriyle bu ön yargılara karşı duracağı konusunda tasarım isterlerinin oluşturulması bu sayede gerçekleştirilmiştir.

2. Mevcut balık kılçığı benzetimli şekil değiştiren kanat uygulamaları değerlendirildiğinde, bu tasarımlara kıyasla daha verimli bir yapı ve yaklaşım geliştirilebilir mi?

Balık kılçığı benzetimli şekil değiştiren kanat teknolojisinde mevcut çalışmalar oldukça dar bir araştırmacı grubu tarafından geliştirilmiştir. Bu nedenle, bu teknoloji daha fazla perspektife ihtiyaç duymaktadır. Gerçekleştirilen mevcut araştırmalarda aerodinamik verim konusunda artışların elde edildiği raporlanmıştır. Ancak bu sistemlerin daha yüksek teknolojik hazırlık düzeylerine geçmesi mümkün olmamıştır. Ayrıca ağırlık ve maliyet bakımından da bir konvansiyonel-değişken kıyaslamasına rastlanmamıştır. Dolayısıyla bu konseptin hala yeni bir konsept olduğu kabul edilmelidir. Araştırmacının bu konuya eğilimi ve yeni bir perspektifin bu alanda araştırma yapan araştırmacı envanterine katılımı ile bu tez sürecindeki araştırmalarda, daha verimli bir yapı ve yaklaşımın türetilmesi konusunda bir cevap aranmıştır.

3. Konvansiyonel bir insansız hava aracı kanadına ağırlık ve maliyetler ekseninde eş değer bir şekil değiştiren kanat tasarımı gerçekleştirilebilir mi?

Konvansiyonel bir insansız hava aracı kanadına, üzerinde oluşan aerodinamik kuvvetler konusunda üstün; ağırlık ve maliyet konusunda ise eş değer bir kanat üretmek, birinci araştırma sorusunda da yer alan ön yargılara karşı koyulabilmesi için önemlidir. Tezde belirlenen araştırma metodolojisinin seçiminde de bu araştırma sorusunun belirlenmesi önemli bir etken olmuştur.

3.3. Benimsenen Araştırma Metodolojisi

Tez çalışması kapsamında seçilen konu, motivasyon ve araştırma soruları değerlendirildiğinde, literatürdeki eksiklikleri ve ön yargıları adresleyecek bir tasarım gerçekleştirilmesi ilk adım olarak belirlenmiştir. Gerçekleştirilen tasarımın tipi, bir balık kılçığı benzetimli şekil değiştiren kanat olarak seçilmiştir.

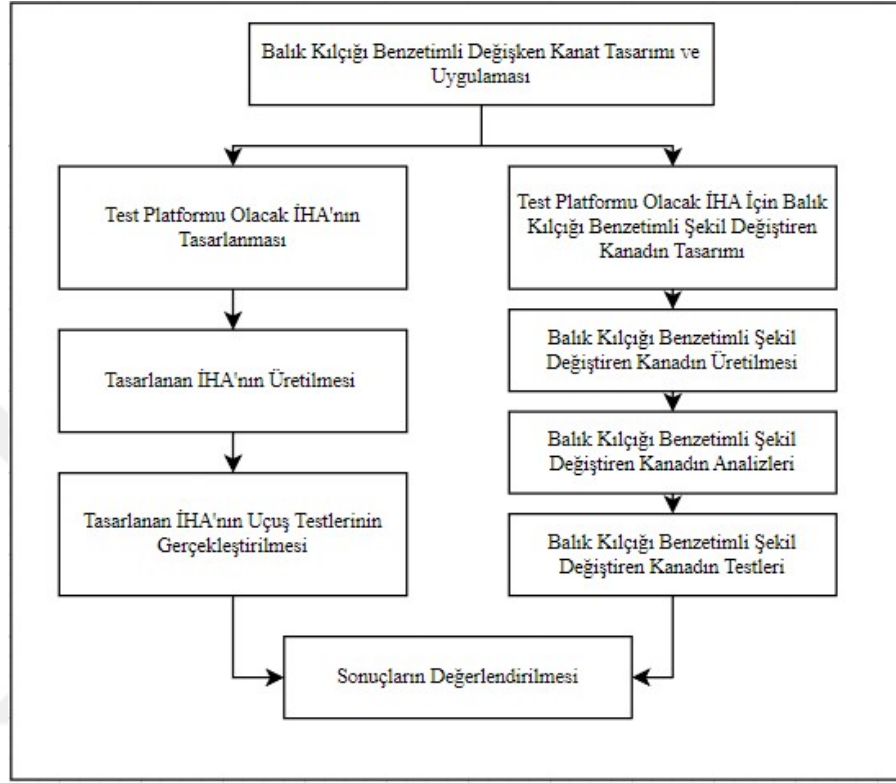
Kanatların konvansiyonel kanat çiftiyle eş değerliğinin sağlanması ve ölçülebilir niceliklerle ifade edilmesi araştırma sorularının yanıtlanabilmesi için önemlidir. Bu bağlamda daha önceli balık kılçığı benzetimli kanat tasarımlarında T240 uçağının konvansiyonel kanatlarına, şekil değiştiren kanatlı alternatifler tasarlandığı ve kıyaslamaların yapıldığı görülmüştür [116]. Ancak bu tez çalışmasında farklı bir yaklaşım izlenerek yeni bir insansız hava aracının tasarımı da tez kapsamına dahil edilmiştir. Böylece T240 gibi eğitim için kullanılan bir model uçak sınıfının yerine, İHA sektörünün beklentilerine daha uygun, modern bir konfigürasyon tipi üzerinde çalışma gerçekleştirme olanağı oluşturulmuştur.

Tez kapsamında tasarımı gerçekleştirilen İHA'nın konvansiyonel metotlarla imalatı ve uçuş testleri yapılmıştır. Daha sonra konvansiyonel kanat çiftini ikame edecek balık kılçığı benzetimli şekil değiştiren kanadın tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Şekil değiştiren kanat ve konvansiyonel kanadın rüzgâr tüneli testleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Şekil değiştiren kanatlı İHA uçuşu gerçekleştirilmiştir. Böylece performans, maliyet, ağırlık ve kompleksite konusunda iki kanadın verileri elde edilmiştir. Alanyazında bulunan birçok çalışmada eksikliği görülen bu karşılaştırmalara da bu tez çalışması kapsamında yer verilmiştir.

3.4. Tezin Yapısı, Özgün Değeri ve Önemi

Tez kapsamında gerçekleştirilen literatür incelemesinin ardından araştırma soruları belirlenmiş ve araştırmaya yönelik bir metoloji oluşturulmuştur. Metodolojide bir İHA tasarımı, İHA üretim süreçleri, balık kılçığı benzetimli şekil değiştiren kanat tasarımı, İHA konvansiyonel kanatlı uçuş testleri, üretilen şekil değiştiren kanat ile rüzgâr tüneli testleri, şekil değiştiren kanadın uçuş testleri ve iki kanat çiftinin karşılaştırılması gibi

süreçlere yer verilmiştir. Kullanılan metodoloji bu yönüyle özgündür. Şekil 3.1’de bir akış şeması şeklinde tez kapsamında uygulanan özgün metodoloji ve araştırma süreci özetlenmiştir.



Şekil 3.1. Tez araştırmasında kullanılan özgün metodoloji

Metodolojinin yanı sıra tezde tamamen özgün bir İHA modeli tasarlanacaktır. İHA modeli tezde tasarlanan balık kılçığı benzetimli şekil değiştiren kanat için de bir test platformu olarak kullanılmıştır. Özgün İHA modeli geliştirilmesi ile sadece kanadın modifikasyonu değil, İHA'nın gövdesi veya kuyruğu gibi diğer bileşenlerinin de tasarlanan yapıya entegrasyonu konusunda kabiliyet elde edilmiştir. Hazır satın alınabilen bir radyo kontrollü uçak üzerinde değişiklik yapıldığında, sadece kanat üzerinde değişiklik yapma esnekliği bulunmaktadır. Dolayısıyla yeni bir İHA tasarlanacak olması teze özgünlüğün yanı sıra araştırma ve uygulama konusunda kabiliyet eklemektedir. Tezin sonucunda ortaya çıkacak İHA için faydalı model tesciline başvurulması planlanmıştır.

Tezde gerçekleştirilen şekil değiştiren kanat tasarımında, balık kılçığı benzetimli şekil değiştiren yapı konsepti kullanılmıştır. Ancak burada yapılan tasarım ve uygulanan artikülasyon yöntemi özgün olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla patente konu, özgün bir

fikri mülkiyet ortaya çıkmıştır. Tezin sonucunda ortaya çıkan şekil değiştiren kanat uygulamasına fikri mülkiyet başvurusu gerçekleştirilmiştir.

Tezde bir başka özgünlük unsuru da karşılaştırması gerçekleştirilen kanat çiftinin sadece aerodinamik performans olarak değil, kompleksite, maliyet ve ağırlık gibi unsurlar bakımından da karşılaştırılmış olmasıdır.

Görece yeni olan bu alan hakkında detaylı bir literatür incelemesi sunması, birçok özgünlüğü bir araya getiren İHA ve şekil değiştiren kanat tasarımı gibi unsurları barındırması, bu tip çalışmalarda kullanılabilecek özgün bir metodoloji izlenmesi ve gelecekte başka çalışmalara temel hazırlayacak bir konseptin ortaya atılması ise tezin literatür için önemini ortaya koymaktadır.



4. VATOZ İHA TEST PLATFORMUNUN TASARIMI VE ÜRETİMİ

4.1. Vatoz İHA Tasarım Süreci

Tez çalışmasında gerçekleştirilen şekil değiştiren kanat tasarımının deneysel uygulamasının gerçekleştirilmesi aşamasında için bir İHA test platformuna ihtiyaç duyulmuştur. Bu konuda önceki çalışmalarda bir hazır model uçağın kanadına modifikasyon gerçekleştirme veya esasen herhangi bir İHA'ya ait olmayan kanat yapılarının bir İHA kanadı gibi incelenmesi gibi iki yaklaşım uygulanmıştır. Bu tez çalışmasında ise farklı bir yaklaşım kullanılmıştır. İnsansız hava aracı özgün olarak tasarlanarak bu İHA'nın hem sabit hem de şekil değiştiren kanatlı iki farklı varyantı üretilmiştir.

Bu kararın alınmasında iki önemli etken ortaya çıkmıştır. Birincil ve ana etken, hazır bir İHA modeli satın alınarak kanadında modifikasyon yapılması konusunda yaşanabilecek tasarım kısıtlarıdır. Hazır olarak alınmış bir araçta modifikasyonlar yapılması ve tasarlanan şekil değiştiren kanat yönteminin uygulanması noktasında sorunlarla karşılaşılacağı ön görülerek, sadece kanadında değil, diğer komponentlerinde de değişiklik yapılabilecek olan özgün bir model tasarlanmıştır. İkincil etken ise maliyetlerdir. Hazır insansız hava aracı satın alınması ve kanadının modifikasyonu sürecinde satın alma süreçleri yaşanacağı için hem zaman hem de finansal maliyetlerin artacağı gözetilmiştir. Uçuş testlerinde yaşanabilecek kısımlarda bu süreçlerin tekrarlanabileceği ve zaman kaybına neden olabileceği gerekçesiyle özgün bir araç tasarlanmıştır.

İnsansız hava araçları havacılıkta birçok yeni geliştirilen teknolojinin test platformu olarak kullanılmaktadır. İnsansız hava araçlarının düşük maliyetleri ve ulaşılabilirliği araştırmacıları bu konuda avantajlı kılmaktadır [123]. Bu avantajlardan ötürü bu çalışmada da bir insansız hava aracı test platformu olarak kullanılmıştır.

Vatoz İHA, adını Vatoz (Raja clavata) balığından almaktadır. Vatoz balıkları tıpkı köpek balıkları gibi kıkırdaklı balıklar sınıfındadır. Akvaryumlarda da yetiştiriciliği yapılan vatoz balıkları genellikle kelebek benzeri kanat yapıları ve ince yassı gövdeleri ile tanınır. Tez çalışmasında tasarımı gerçekleştirilen uçak bir uçan kanat olarak tasarlanmıştır ve vatozların Görsel 4.1'de yer alan ikonik görüntüsüne benzemesi sebebiyle bu isim verilmiştir. Aynı zamanda balık kılçığı benzetimli şekil değiştiren kanatların uygulanması için bu insansız hava aracının geliştirilmesi de gerçekleştirilen tasarımın bir balık türü ile adlandırılmasında etkili olmuştur.



Görsel 4.1. Vatoz balığının üstten görüntüsü (<http-5>)

Vatoz İHA'nın konfigürasyon seçimi uçan kanat tipi bir insansız hava aracı olarak gerçekleştirilmiştir. Sabit kanatlı insansız hava araçları kategorisinin bir alt konfigürasyonu olan bu araçlar, konvansiyonel bir sabit kanatlı hava aracına kıyasla daha düşük sürüklenme katsayısına sahiptir [124].

Vatoz İHA'nın kanat ve gövde tasarımı harmanlanmış kanat-gövde (Blended Wing Body- BWB) konseptine göre tasarlanmıştır. Bu tasarımlar daha düşük bir ıslak alan ile aynı taşıma kuvvetinin sağlanabilmesine olanak tanımaktadır. Birçok kaynak tarafından bu tasarımlar geleceğin yolcu uçaklarının tasarımları olabilecek şekilde verimli uçuşlar gerçekleştirebildiğine işaret etmektedir [125-126]. Vatoz İHA bu sebeplerle harmanlanmış kanat-gövde konseptine uygun olarak tasarlanmıştır.

Vatoz İHA'nın tahrikinde EDF (elektrikli kanallı fan) tipi motor kullanılmıştır. Bu elektrik motorları gaz türbinli motorlara benzer şekilde bir kanal içerisine yerleştirilmiş fan ve bu fanı döndüren elektrik motorundan oluşmaktadır. Günümüz insansız hava araçlarında, sivil uygulamalarda yaygın olarak elektrik motorları kullanılmaktadır [127]. Pervanelerin kanal içerisine yerleştirilmesi ile özellikle emniyet konusunda büyük gelişmeler sağlanmaktadır. İnsansız hava araçlarının uzun ve ince pervaneleri verimli olmalarının yanı sıra, çevredeki unsurlar için büyük tehlike arz etmektedir. Bu nedenle insansız hava aracı sektöründe özellikle UAM (Urban Air Mobility) gibi alt sektörlerde EDF tipi itki sistemlerinin kullanımı yaygınlaşmaktadır [128]. Gürültü azaltımı konusunda açık rotorlar ve EDF tipi itki sistemleri arasında, EDF tipi itki sistemlerinin

daha az gürültü emisyonuna sahip olduğunu ifade eden karşılaştırmalar da gerçekleştirilmiştir [129].

EDF itki sistemleri Harmanlanmış Kanat-Gövde tipi konfigürasyonlar ile birlikte kullanıldığında, gövdenin üzerinden geçen akışın fan içerisine çekilmesi sağlanmaktadır. Bu durum BLI- Boundary Layer Ingestion (Sınır Tabaka Yutulması) olarak adlandırılmaktadır [130]. Görsel 4.2.'de Boeing firmasının bu konudaki araştırmalarını yürüttüğü konsept tasarımı görülmektedir.



Görsel 4.2. Boeing firmasının BWB – BLI konsepti [131]

Bir başka havacılık devi olarak kabul gören Airbus firmasının da geleceğin uçağı olarak işaret ettiği konsept tasarım Airbus Zero-e, benzer bir konfigürasyona sahiptir. Harmanlanmış kanat gövde tasarımına ve gövdenin arka kısmında yer alan EDF motorlara sahip olan tasarım Görsel 4.3'de görülmektedir.

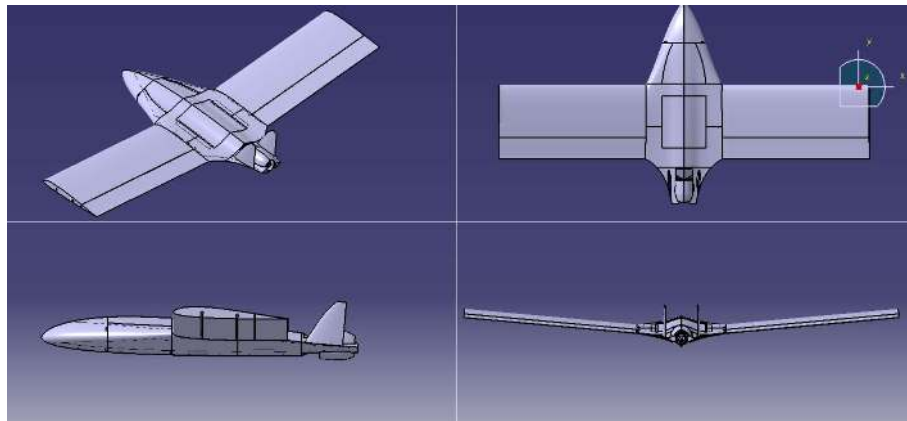


Görsel 4.3. Airbus firmasının Zero-e konsepti (<http-6>)

Vatoz İHA tasarımında iki yenilikçi konsept BWB ve BLI'a yer verilmiştir. Böylece konvansiyonel bir model uçak kanadına şekil değiştiren kanat uygulaması gerçekleştirmekten daha değerli ve daha inovatif bir uygulama yapılması amaçlanmıştır.

Bu yenilikçi özelliklerin yanı sıra, Vatoz İHA'nın üretiminde üç boyutlu baskı yöntemleri birincil metot olarak kullanılmıştır. Üç boyutlu baskı yöntemleri insansız hava aracı üretiminde yaygınlaşmaktadır [132-133]. Üç boyutlu baskı cihazları ile üretilen komponentlerde doğrudan son ürün üretilerek İHA'nın aerodinamik tasarımında yer alan burulma, oturma, dihedral gibi açılar hatasız bir şekilde tasarımdan üretime yansıtılabilmektedir. Üretim aşamasında da yeni nesil bir üç boyutlu baskı termoplastiği olan lightweight PLA maddesi kullanılmıştır. Böylece Vatoz İHA konvansiyonel PLA malzemesine oranla daha hafif parçalar üretilebilen bu sarf malzemenin de uygulandığı bir insansız hava aracı olmuştur. Bu durum insansız hava aracının üretiminde ihtiyaç duyulan işçilik sürelerini de kısaltmıştır.

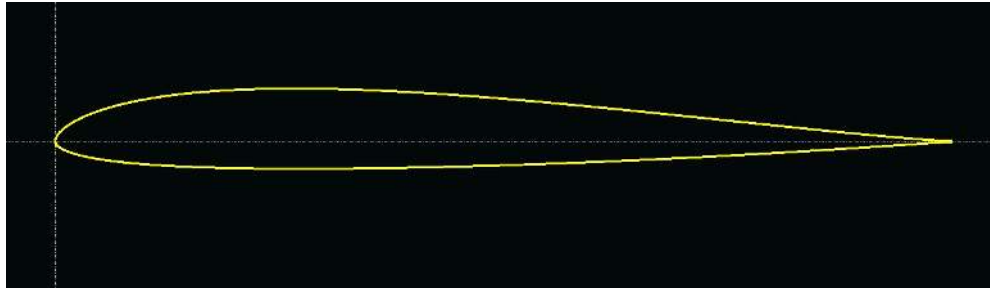
Katmanlı imalat metotlarının yegane dezavantajlarından olan işlem hacmi kısıtı, tasarımda dikkat edilen önemli unsurlardan biri olarak ortaya çıkmıştır. Üç boyutlu baskı cihazlarının en, boy ve yükseklik olarak belirli limitleri bulunmaktadır. Bu baskı hacmi aynı zamanda nominal çalışma bölgesi olarak da ifade edilebilir. Baskısı yapılacak herhangi bir parçanın bu hacim içerisine tek parça halinde sığabilmesi veya sığabilecek şekilde modüler olarak tasarlanması gerekmektedir. Bu da Vatoz İHA'nın tasarımı süresince dikkat edilmesi gereken bir unsur olmuş ve bazı boyutlandırmalara etki etmiştir. Vatoz İHA'nın CATIA v5 r20 yazılımında oluşturulan katı modeli Görsel 4.4'de yer almaktadır.



Görsel 4.4. Vatoz İHA katı model görüntüsü

Vatoz İHA'nın tasarımında Airbus ve Boeing firmalarının gerçekleştirdiği tasarımlardan farklı olarak kanatlarda bir ok açısına yer verilmemiştir. Kanatlardaki ok açısı, uçan kanat konfigürasyonu içeren tasarımlarda yunuslama momentinin dengelenmesi için oldukça önemlidir. Konvansiyonel uçak konfigürasyonunda kanadın ürettiği yunuslama momenti kuyruk takımında bulunan yatay stabilize tarafından dengelenir. Ancak uçan kanatlarda bu momentin dengelenebileceği bir kuyruk bulunmamaktadır. Bu yüzden bu tip tasarımlarda iki seçenek bulunmaktadır. Kanatların ok açısı ve burulma kullanılarak momentinin dengelendiği birinci durum ve refleks kanat profillerinin kullanıldığı ikinci durum [134].

Vatoz İHA'da refleks tipte kanat profili kullanılmıştır. Kullanılan kanat profili PW-51 olarak adlandırılmaktadır. Peter Wick tarafından geliştirilen bu kanat profili, "plank" sınıfı uçan kanatlar için kullanılmaktadır (<http-7>). Plank kelimesi kalas anlamına gelmektedir. Kanatların şekliyle kurulan analogi sebebiyle bu isim kullanılmaktadır. PW-51 profilinin geometrisine Şekil 4.1'de yer verilmiştir. Bu geometriden de görülebilen, kanat profilinin firar kenarındaki yukarı doğru esneme, bu tip profillere refleks denmesinin sebebidir. Vatoz İHA tasarımında plank veya refleks kanat profiline sahip uçan kanat konfigürasyonunun kullanılması sebebi şekil değiştiren kanat uygulamasının gerçekleştirilecek olmasıdır. Şekil değiştirecek kanatların tasarımında ok açısı kullanmanın tasarımı ve uygulamayı zorlaştırabileceği ön görülmüştür.

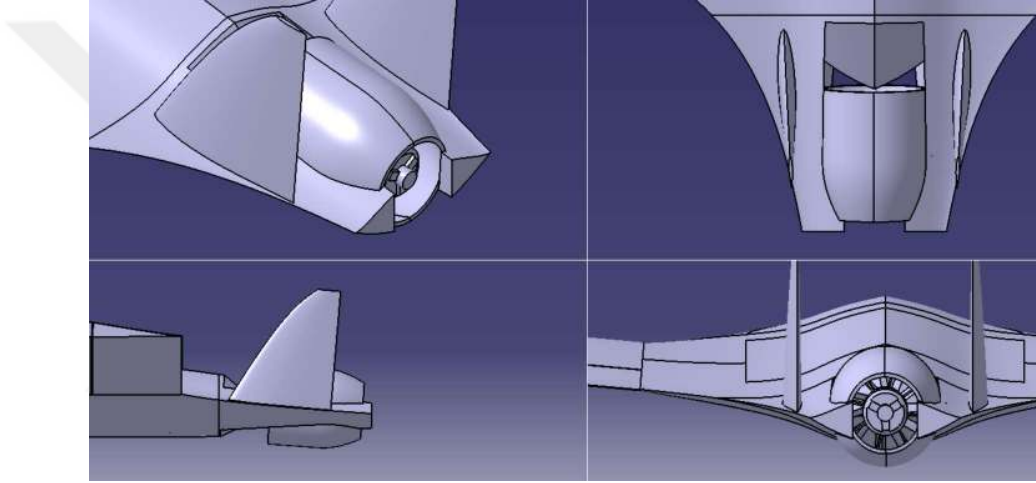


Şekil 4.1. PW-51 kanat profilinin geometrisi ve refleks firar kenarı

EDF'in yerleşimi konusunda da Airbus ve Boeing uygulamalarından farklı bir yol izlenmiştir. Bu iki uygulamada da motorların gövdenin üst yüzeyindeki havayı emecek şekilde yerleştirildiği Görsel 4.2'den ve 4.3'ten anlaşılabilmektedir. Vatoz İHA tasarımında ise EDF'in hava alışı, gövdenin hem altından hem de üstünden geçen akışı emecek şekilde yerleştirilmiştir.

Kanatlarda olduğu gibi gövdede de sınır tabakanın üst yüzeyinde akışın kopmasına yönelik önlem alınması önemlidir. Airbus ve Boeing'in gerçekleştirdiği tasarımlarda bir yolcu uçağına yönelik tasarım yapılmıştır ve dolayısıyla gövde üzerindeki akışın tamamen kopabileceği kadar yüksek hücum açılarında bir uçuş rejiminin planlanmadığı şeklinde fikir yürütülebilir.

Vatoz İHA tasarımında ise daha dik tırmanışlar yapılabileceği düşünülerek yüksek hücum açılarında motor stallı adı verilen durumun yaşanması önlenmek istenmiş, hava alığı gövdenin alt ve üst bölümlerinden beslenebilecek şekilde yerleştirilmiştir. Bu özel yerleşimin detayları Görsel 4.5'te yer alan katı modelde detaylı şekilde incelenebilir.



Görsel 4.5. Vatoz İHA EDF yerleşimi

Vatoz İHA'nın üretiminde Ultimaker 3S tipi üç boyutlu baskı cihazı kullanılmıştır. Bu baskı cihazının baskı bölgesi 23x19x20 cm'dir. Vatoz İHA'nın kanat riblerinin baskısının tek tek yapılacağı ön görülerek kanat veteri olarak köşegen uzunluğuna yerleştirilebilen en büyük veter uzunluğu, 260 mm belirlenmiştir. Kanat açıklığı 1,36 metre olan Vatoz İHA'nın kalkış ağırlığı ise 1,4 kilogram olarak belirlenmiştir. Vatoz İHA'nın diğer teknik özelliklerine Tablo 4.1'de yer verilmiştir.

Tablo 4.1. Vatoz İHA teknik özellikleri

Kanat Açıklığı:	1,36 m	Kalkış Ağırlığı:	1,4 kg
Kanat Veteri:	0,264 m	Kanat Yükleme:	3,256 kg/m ²
Kanat Alanı:	0,436 m ²	Kanat Profili:	PW-51
Kanat Dihedral Açısı:	5°	Açıklık Oranı:	4,291

İHA platformunun motoru için QX-Motor firmasının QF2611 modeli seçilmiştir. Bu elektrik motoruna dair bilgiler Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2. *QF 2611 elektrik motorunun teknik özellikleri (http-8)*

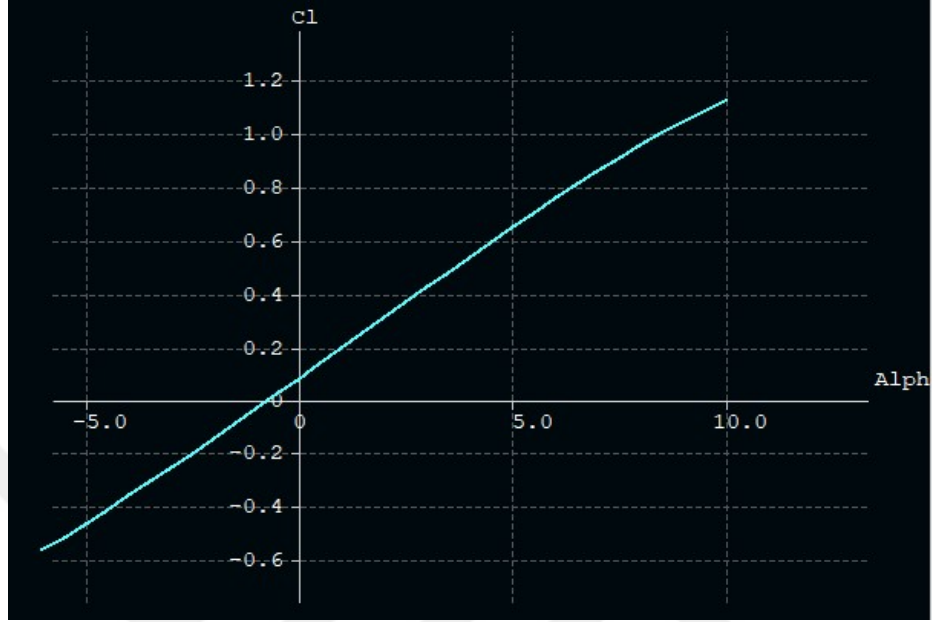
Kanal Çapı:	50 mm	Çalışma Voltajı:	3-4 S
Pal Sayısı:	12 adet	Maksimum Güç:	550 W
Motor Çapı:	25,8 mm	KV/RPM:	3300
Ağırlık:	76 g	Maksimum Akım:	45 A

Gerçekleştirilen statik itki testlerinde QF 2611 motoru ile %100 gaz kolunda 4S LiPo batarya kullanılarak 950 gram itki elde edilmiştir. Bu gaz kolunda düzeneğe bağlanan wattmetre kullanılarak akım değeri ise 32A olarak ölçülmüştür. Bu durum Vatoz İHA’nın 0,67 itki yoğunluğuna sahip olduğunu göstermektedir. İtki alt sisteminde ESC (Elektronik Hız Kontrol Devresi) olarak T-Motor 60 A ESC kullanılmıştır. Batarya ise 4 hücreli Lityum Polimer elektrokimyasına sahip bir batarya olarak belirlenmiştir. Kapasitesi 1550 mAh olarak seçilmiş ve bu batarya ile 15 dakikalık bir havada kalma süresi hedeflenmiştir. Vatoz İHA’nın stall(tutunma) sürati 8,16 m/s ve seyir sürati 15,63 m/s olarak hesaplanmıştır.

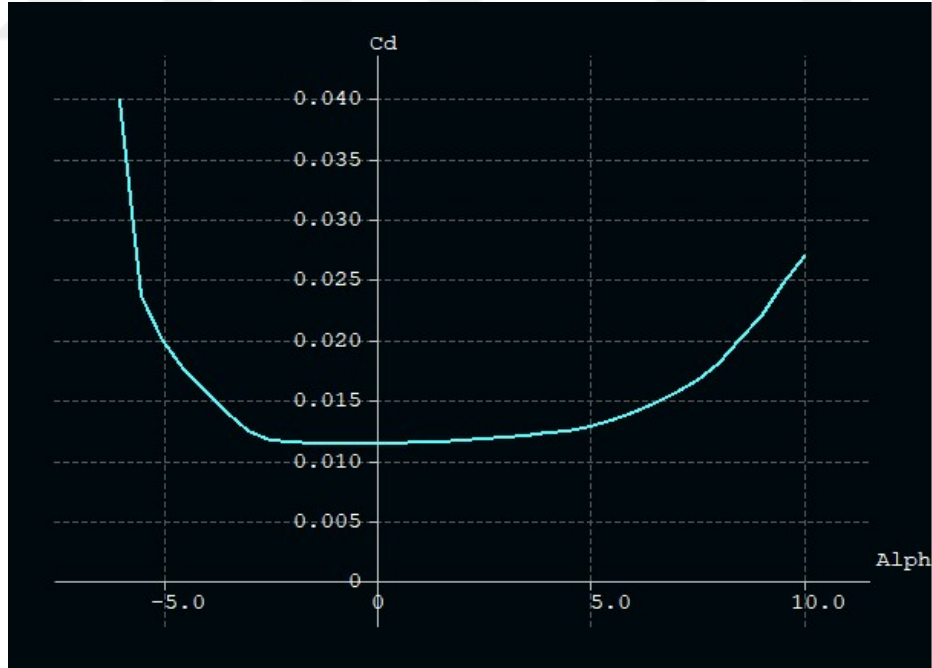
Vatoz İHA’nın tasarım süreçlerinde analizler için VLM (Vortex Lattice Method) yöntemi kullanılmıştır. VLM analizleri Xfoil kodunu içeren XFLR5 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (http-9). XFLR5 ve VLM’in analizleri uçak tasarım süreçlerinin başlangıç aşamalarında yaygın olarak kullanılan bir nümerik akış analizi metodudur [135]. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri (CFD/HAD) ve VLM sonuçları kıyaslandığında VLM metodunun düşük doğruluklu bir metot olduğu bilinmektedir. Ancak gerektirdiği işlemci gücünün düşüklüğünden faydalanmak ve zamandan tasarruf sağlamak amacıyla birçok uygulamada kullanılmaktadır [136].

Vatoz İHA’nın analiz süreçlerine PW-51 kanat profilinin analizleri gerçekleştirilerek başlanmıştır. Reynold sayısı 20.000 ve 3.500.000 arasındaki değerler için her analizde 10.000 artarak farklı Reynolds sayıları için tekil analizler gerçekleştirilmiştir. Hücüm açısı değerleri için VLM kodunun limitleri değerlendirilerek -6° ve 10° hücüm açısı aralığında 0,5° artışlarla tekil analizler koşturulmuştur. Seyir hızındaki yaklaşık Reynolds değeri olan 250.000’deki taşıma katsayısı-hücüm açısı, sürüklenme katsayısı-hücüm açısı, taşıma katsayısı-sürüklenme katsayısı ve yunuslama

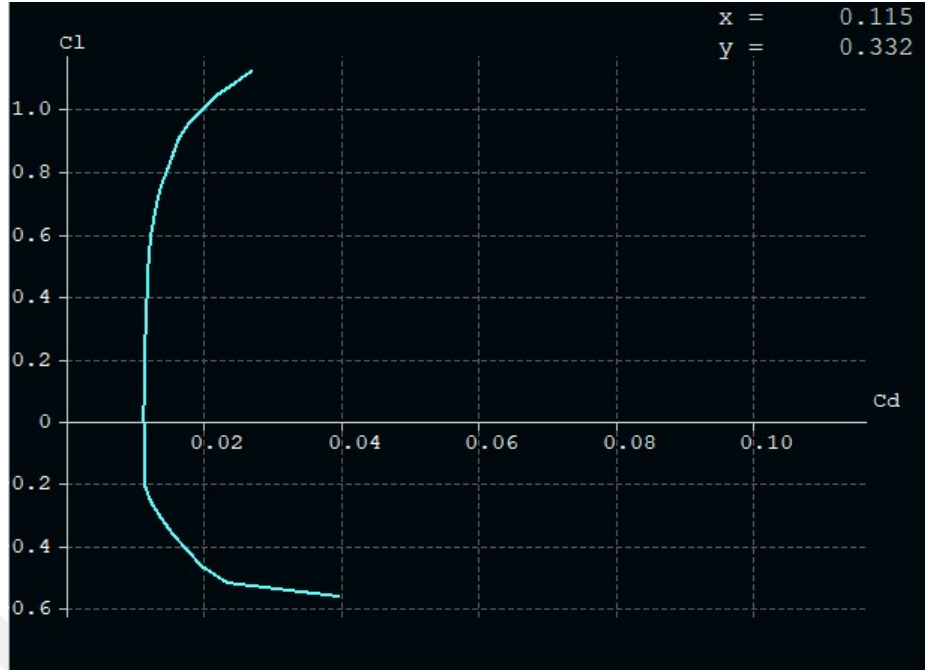
momenti-hücum açısı grafikleri Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'de sırasıyla verilmiştir.



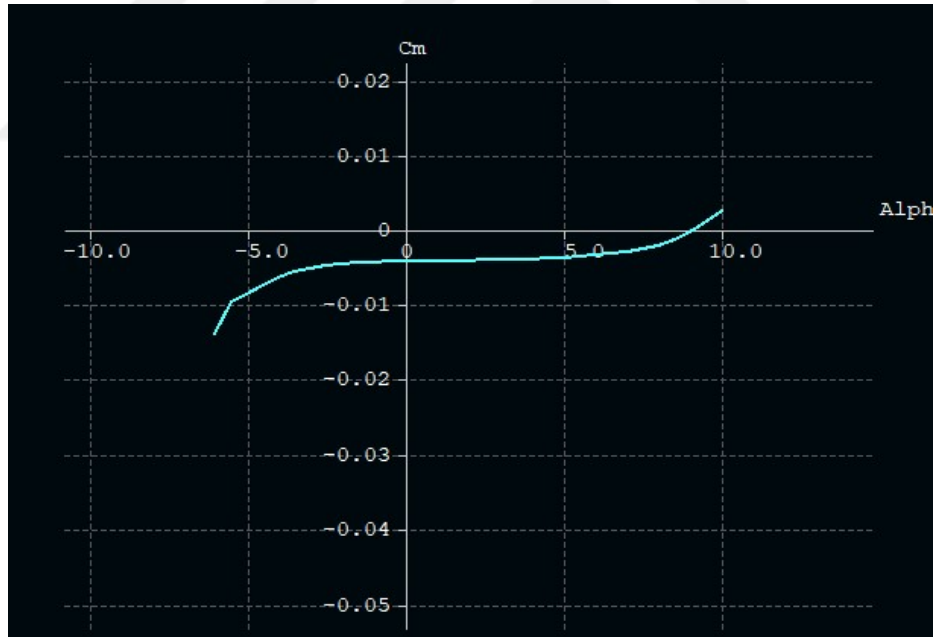
Şekil 4.1. Vatoz İHA kanat profili taşıma katsayısı-hücum açısı grafiği



Şekil 4.3. Vatoz İHA kanat profili sürüklenme katsayısı-hücum açısı grafiği

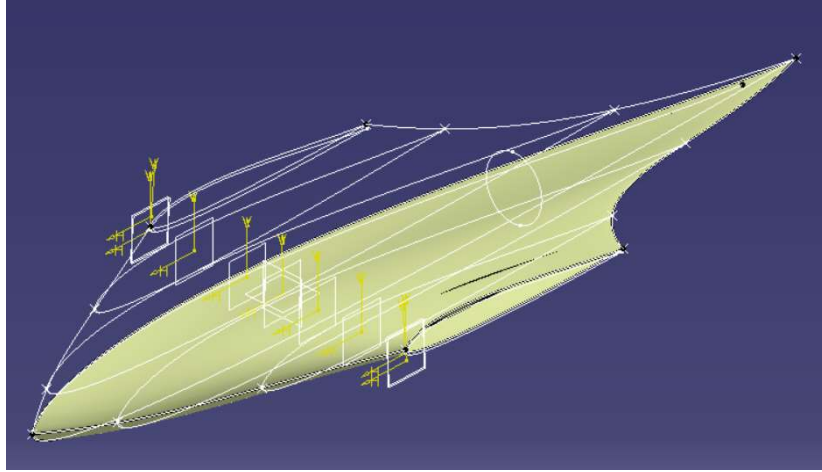


Şekil 4.1. Vatoz İHA kanat profili taşıma katsayısı-sürüklenme katsayısı grafiği



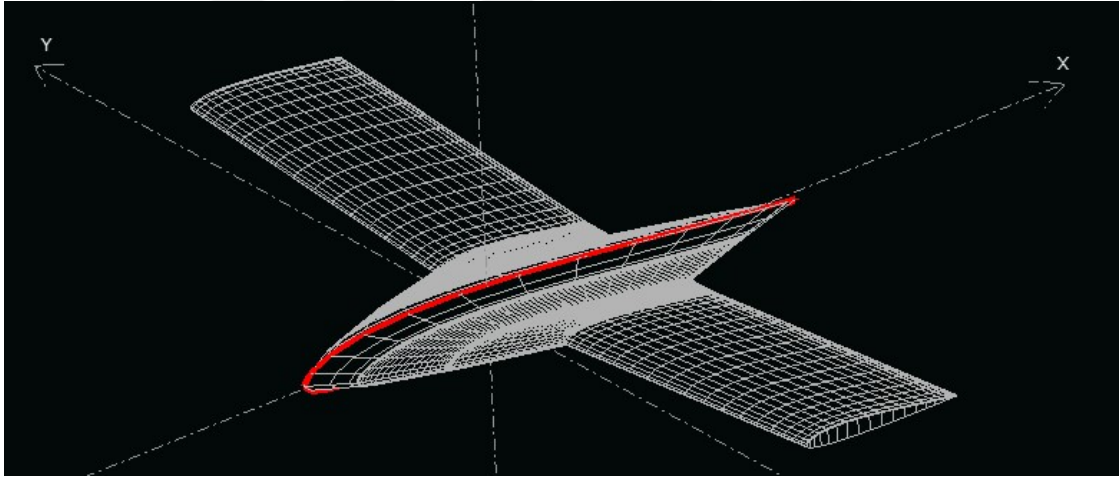
Şekil 4.1. Vatoz İHA kanat profili yunuslama momenti katsayısı-hücum açısı grafiği

Gerçekleştirilen analizlerle Vatoz İHA için seçilen kanat profilinin -6° ve 10° hücum açısı aralığında üreteceği kuvvetlerin iki boyutlu katsayıları edinilmiştir. Gövdeye ait katı model çizimi Görsel 4.6'da yer almaktadır.



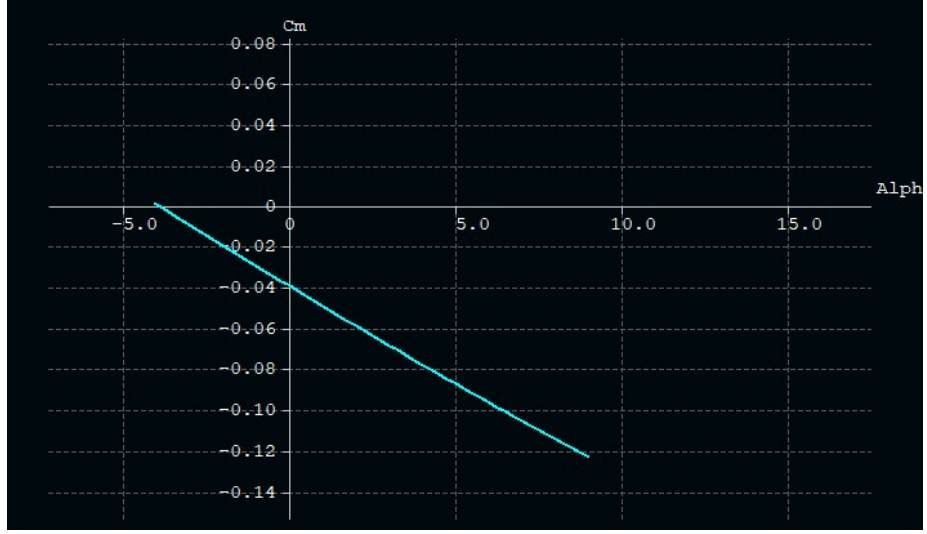
Görsel 4.6. Vatoz İHA gövde istasyonlarının katı modeli

Katı modelde oluşturulan yüzeyler burulma açıları, oturma açısı ve dihedral açısı dahil edilerek XFLR5 yazılımına aktarılmıştır. Görsel 4.7’de yer alan yüzeyler ve paneller oluşturulmuştur.



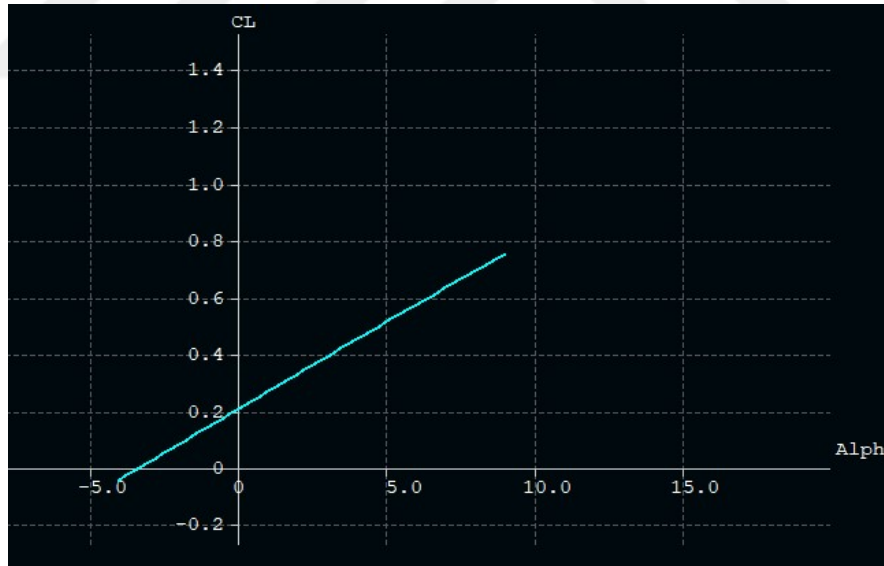
Görsel 4.7. Vatoz İHA analiz modeli

Modelin analiz yazılımına aktarılmasının ardından 16 m/s hız için sabit hızda VLM2 – Ring Vortex çözümü -4° ve 10° hücum açısı aralığında gerçekleştirilmiştir. Çözüm gerçekleştirilirken uçağın ağırlık merkezi olarak belirlenen burundan +x doğrultusunda 32. santimetreye 1,4 kilogram ağırlık konumlandırılmıştır. Analiz sonuçları incelendiğinde uçağın uzunlamasına statik kararlılığının pozitif olduğu görülmüştür. Şekil 4.6’da yer alan uçağın yunuslama momenti katsayısının hücum açısıyla değişimi grafiğinde görülen eğrinin eğimi ile bu durum doğrulanmıştır.



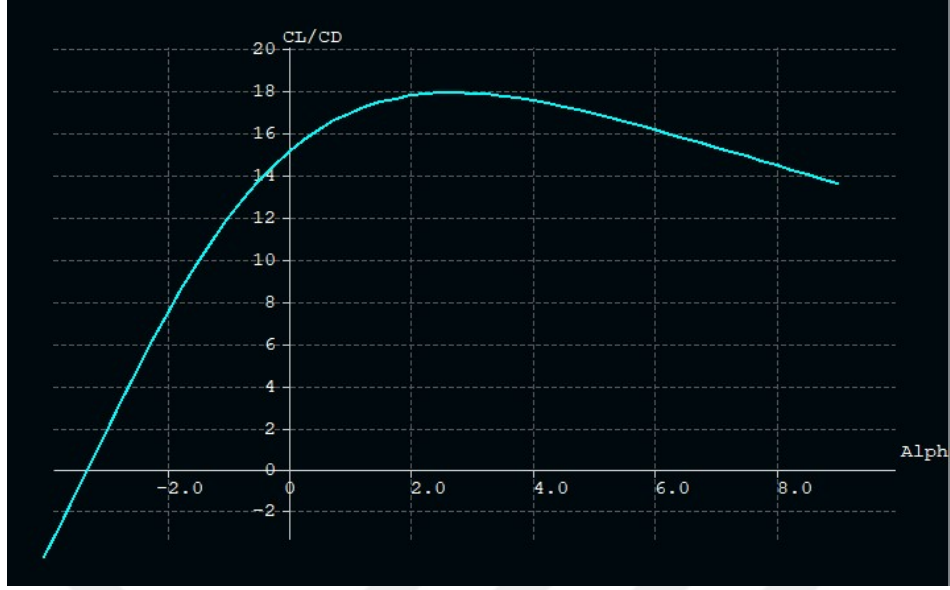
Şekil 4.1. Vatoz İHA 3B yunuslama momenti katsayısı-hücum açısı grafiği

Vatoz İHA'nın üç boyutlu taşıma katsayısı – hücum açısı grafiği ise Şekil 4.7'deki gibi elde edilmiştir. İHA'nın hücum açısı olmayan düz uçuşunda elde edilen C_L değeri 0,207 olarak hesaplanmıştır.



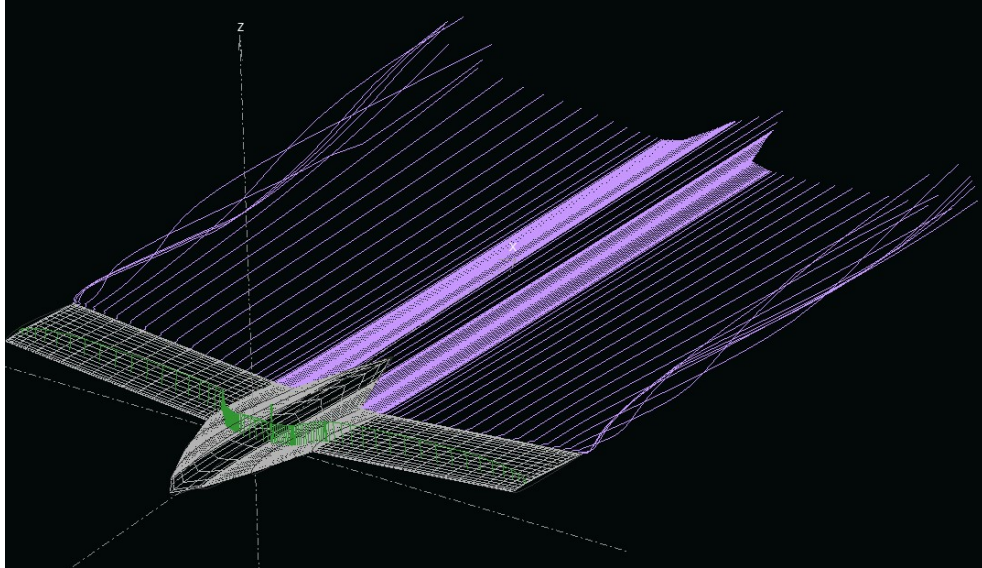
Şekil 4.1. Vatoz İHA 3B yunuslama taşıma katsayısı-hücum açısı grafiği

Vatoz İHA'nın süzülme katsayısı olan C_L/C_D 'nin hücum açısı ile değişimi ise 15,030 olarak hesaplanmıştır. En yüksek C_L/C_D değerine ise 2° hücum açısında erişilebildiği Şekil 4.8'deki gibi görülmüştür.



Şekil 4.1. Vatoz İHA 3B süzülme oranı – hücum açısı grafiği

Vatoz İHA'nın XFLR5 programında gerçekleştirilen analizinde, BLI sağlayacak EDF'in yerleştirilmesi yazılım kısıtları sebebiyle gerçekleştirilememiştir. Dolayısıyla sürüklenme katsayısında yaşanması muhtemel artış ön görülmüştür. Görsel 4.8'de Vatoz İHA'nın analiz edilen modeline ve akış izine yer verilmiştir.

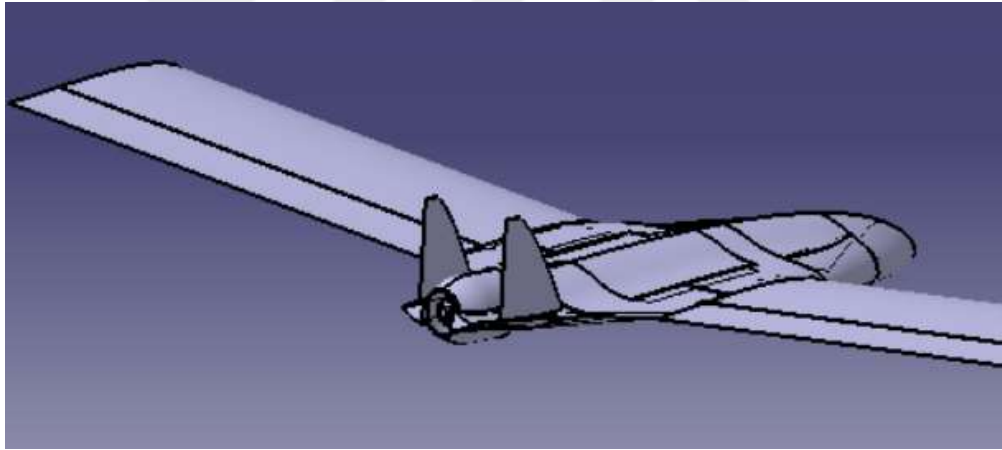


Görsel 4.8. Vatoz İHA VLM2 Analiz Görselleştirmesi

Görsel 4.8'de Vatoz İHA üzerinde yer alan yeşil alan lokal olarak üretilen taşımanın miktarını sembolize etmektedir. Harmanlanmış kanat-gövde konseptine göre tasarlanmış Vatoz'un gövdesinden elde edilebilen taşıma miktarının önemi bu şekilde

görselleştirilebilmektedir. Kanat uçlarında basınç kaçaklarından dolayı yaşanan taşıma düşüşü ve uçağın arkasında oluşan uç vorteksleri de gözlenmektedir. Dikdörtgen kanat yapısının bir sonucu olarak kanatta verim kaybı yaşanmaktadır. Tasarıma herhangi bir kanat ucu tertibatı eklenmediği için bu kayıplar ön görülmüş ve kabul edilmiştir. Esasen, uçan kanat tasarımlarında yaygın olarak kanat ucu tertibatları ve dikey stabilize yapıları çok fonksiyonlu olan bir ortak yapıda birleştirilmektedir. Ancak Vatoz İHA'da uygulanacak kanat şekil değiştirmesi konusunda engel teşkil etmemesi ve tasarımda esneklik sunması için bir kanat ucu tertibatı eklenmemiş ve bu kayıplar kabul edilmiştir.

Vatoz İHA'nın yönelim kararlılığını sağlamak için dikey stabilize yapıları EDF motorun her iki tarafında konumlandırılmıştır. Dikey stabilizelerin boyutlandırması hacim katsayısı yaklaşımı kullanılarak yapılmış ve 0,04 değeri kullanılmıştır [137]. Kuyruk konfigürasyonu olarak ise Görsel 4.9'da yer aldığı gibi iki dikey stabilize kullanılarak açıklık düşürülmüştür.



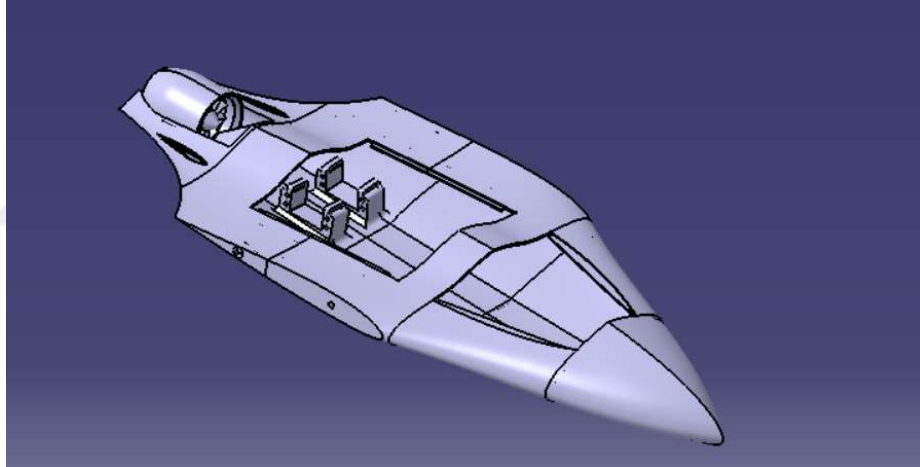
Görsel 4.9. Vatoz İHA dikey stabilize katı modeli

Son olarak Vatoz İHA'nın kontrol yüzeyi tasarımı gerçekleştirilmiştir. Vatoz İHA'nın sahip olduğu tek kontrol yüzeyi elevonlardan oluşmaktadır. Elevon, aileron ve elevator kavramlarının birleştirilmesiyle türetilmiş bir isimdir. Asimetrik çalışmaları ile aileron görevini gerçekleştiren, simetrik çalışmaları ile de elevator görevini gerçekleştiren yapılardır. Kanadın şekil değiştirmesi fırar kenarında ve kanat boyunca gerçekleştirileceği için konvansiyonel elevonlar da kanat açıklığı boyunca sürekli olacak şekilde tasarlanmıştır. Vetere olan oranı ise %28,4 olarak belirlenmiştir.

4.2. Vatoz İHA Prototip Üretim Süreci

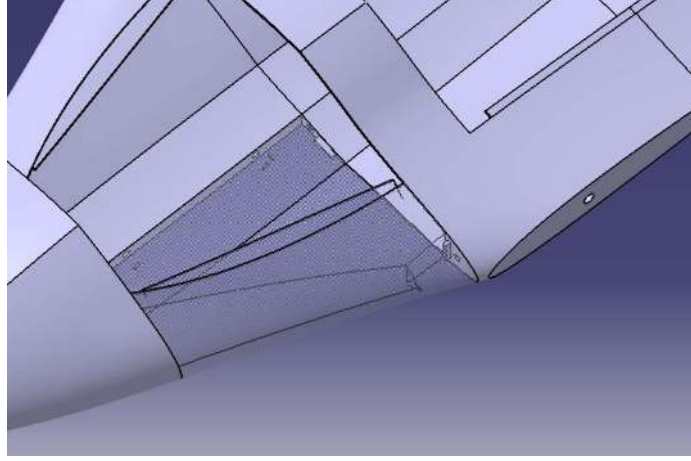
Vatoz İHA'nın üretim süreçlerinde ilk uçuş doğrulamasını sağlayacak sabit kanatlı bir varyant ve balık kılçığı benzetimli şekil değişimi gerçekleştirecek ikinci varyant olarak planlanmıştır. Kanat gövde bağlantıları modüler bir biçimde gerçekleştirilerek her iki kanadın da aynı gövde ile birleşebilmesi sağlanarak maliyetlerden tasarruf elde edilmiştir.

Gövde üretim yöntemi için üç boyutlu baskı yönteminden faydalanılmıştır. Lightweight PLA malzemesi kullanılarak gövde istasyonlarının 3B baskısı yapılmıştır. Gövde, üç boyutlu baskı cihazının baskı hacmi göz önünde bulundurularak istasyonlara ayrılmıştır. Uzunlamasına ekseninde simetrik olarak bölünen gövde parçaları daha sonra kendi içerisinde 5'er parçaya bölünmüştür. Bu şekilde Vatoz İHA gövdesi 10 parçadan oluşacak şekilde Görsel 4.10'daki gibi tasarlanmıştır.



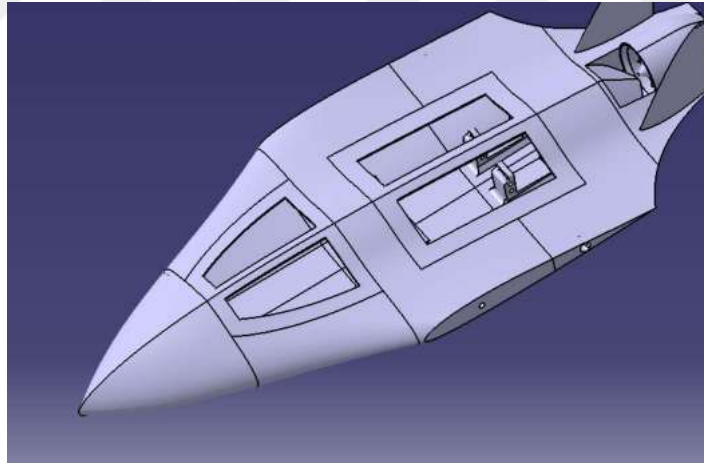
Görsel 4.10. Vatoz İHA gövde parçaları

Gövde parçalarının birbirlerine montajını kolaylaştırmak adına karbon çubukların kesilerek yerleştirilebileceği bağlantı noktaları her bir istasyon bağlantısı için Görsel 4.11'deki gibi oluşturulmuştur.



Görsel 4.11. Vatoz İHA gövde bağlantı noktaları

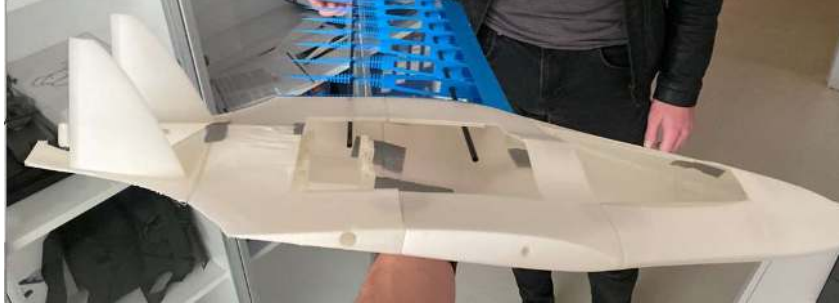
Gövdeye erişim sağlayacak bölgelerde oluşturulan kapakların ise iç bölgeleri boşaltılarak parazit ağırlıktan kaçınılmıştır. Görsel 4.12’de yer alan bu boşlukların imalat sırasında termoplastik film ile kaplanarak aerodinamik yüzeylerin oluşturulmasına karar verilmiştir.



Görsel 4.12. Gövde kapak boşlukları

Tasarımı tamamlanan gövdenin üretimi gerçekleştirilirken 3B baskı cihazı vazo modunda çalıştırılmıştır. Vase mode olarak bilinen bu baskı tipinde dış katmanların düşük yükseklikte olması ve iç dolgunun minimize edilmesi amaçlanmıştır. Gövdenin kabuk bölgesinde ise 2,25 ve 6 mm arasında değişen farklı duvar kalınlıkları oluşturulmuştur. Kanatların bağlanacağı noktalar, gövde üzerine iniş gerçekleştirildiğinde yer ile temas edecek bölge ve motorun bağlantısının gerçekleştiği yük yolları olarak ifade edilebilecek

bölgelerde 6 mm kalınlık değeri kullanılmıştır. Baskısı tamamlanan gövde parçaları Görsel 4.13'teki gibi birleştirilmiştir.



Görsel 4.13. Vatoz İHA Gövde montajı

Üretilen gövde parçalarının montajı gerçekteşirilirken aktivatorlü hızlı yapıştırıcı ve epoksi yapıştırıcısı kullanılmıştır. Birleştirmenin ardından gövde parçalarının arasında kalan boşluklar kırmızı elektrik bandı kullanılarak kapatılmıştır. Kanatların üretiminde, bilgisayar nümerik kontrollü sıcak tel kullanılarak 16 yoğunluk değeriinde beyaz yalıtım köpüğünden nüve bölümü üretilmiştir.

Üretilen nüvenin içerisinde ön spar ve arka spar destekleri karbon fiber borudan uygun ölçülerde kesilmiş ve epoksi yapıştırıcı ile yerleştirilmiştir. Konvansiyonel elevonlar 1 mm balsa ağacı ile üstten ve alttan desteklenerek kaplanmış ve kanada menteşelenmiştir.

Kanat termoplastik radyo kontrollü uçak kaplaması ile kaplanmıştir. Kaplama sürecinde kaplama ütüsü ve sıcak hava tabancası kullanılmıştır. Görsel 4.14. gövde ve kanatlarının montajı tamamlanmış Vatoz İHA'nın uçuşa hazır halini göstermektedir.



Görsel 4.14. Vatoz İHA prototipi

4.3. Vatoz İHA Prototip Uçuş Testleri

Vatoz İHA prototipinin ilk uçuş testi 7 Temmuz 2022 günü gerçekleştirilmiştir. Uçağın pilotajı Dr. Yavuz Dal tarafından gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen uçuş testinde elden atış ile uçuşa başlanmış, 30 metre irtifaya çıkıldıktan sonra, 300 metre uzunluk ve 100 metre genişlikte bir patternde uçuş yapılmıştır. Uçağa herhangi bir trim verilmemiş ve %45 gaz kolunda seyir uçuşu gerçekleştirilmiştir. Uçağın kontrol verilmediği durumda stabil bir şekilde uçuş gerçekleştirdiği ancak yunuslama kontrolü verildiğinde oldukça agresif olarak burun yukarı ve burun aşağı hareketler gerçekleştirdiği görülmüştür. Elevonların hareket deplasmanlarında kısıtlamaya gidilerek uçağın yunuslama hareketlerindeki bu agresiflik azaltılmıştır. Görsel 4.15, 4.16 ve 4.17’de uçağın araştırmacı tarafından elden atılışı ve uçuşundan kareler yer almaktadır.

Bunun dışında uçağın kanatlarında montaj kaynaklı istenmeyen bir yukarı burulma durumu gözlemlenmiştir. Yaklaşık 4 dakika 16 saniye süren test uçuşu, kanatların arasına yerleştirilen destek parçasının yerinden çıkması sonucunda kırım ile sonuçlanmıştır. Yaşanan kırım şans eseri bir kum tepesi üzerine düşme şeklinde gerçekleşmiş, Vatoz İHA prototipi tamamen kaybedilmemiştir.



Görsel 4.15. Vatoz İHA araştırmacı tarafından elden atılışı



Görsel 4.16. Vatoz İHA ilk uçuş testi-1



Görsel 4.17. Vatoz İHA ilk uçuş testi-2

İkinci uçuş testi, birinci uçuş testinde yaşanan kırımın ardından uçağın gövdesinde yapılan tamiratlar, üç boyutlu baskı cihazında yaşanan arızalar ve araştırmacının diğer yoğunlukları nedeniyle ancak 1 Ekim 2022 tarihinde, yine Dr. Yavuz Dal pilotajında gerçekleştirilmiştir. Birinci uçuş testinde yapılan elevon deplasman kısıtlamaları korunmuş ve yunuslama kararlılığının artırılması için ağırlık merkezi 4,6 santimetre burun yönüne ötelenmiştir. Birinci uçuşta olduğu gibi uçuş elden atış ile uçuşa başlanmış,

30 metre irtifaya çıkıldıktan sonra, 300 metre uzunluk ve 100 metre genişlikte bir patternde uçuş yapılarak 5 dakika 38 saniyelik bir uçuş gerçekleştirilmiştir.

İkinci uçuşta, ilk uçuşta yaşanan kontrol sorunlarının ortadan kalktığı ve uçağın pilotajının daha kolay bir hale geldiği gözlemlenmiştir. Bu uçuşun sonucunda, herhangi bir kırım yaşanmaksızın başarılı iniş gerçekleştirilmiştir. Uçuşun başarıyla tamamlanmasının ardından tasarımın doğrulanması ve geliştirme süreci nihayete erdirilmiştir. Yapılan geliştirmelerin sonucunda pilotun kontrol otoritesinin artırılması ile yakın geçişler gerçekleştirilebilmiştir.



5. ŞEKİL DEĞİŞTİREN KANAT TASARIMI VE PROTOTİP ÜRETİMLERİ

5.1. Vatoz İHA Balık Kılçığı Benzetimli Şekil Değiştiren Kanat Tasarımı

Vatoz İHA tasarımı, analizleri ve uçuş testleri gerçekleştirildikten sonra, Şekil 3.1'deki çalışma planı uyarınca balık kılçığı benzetimli şekil değiştiren kanat tasarımı aşamasına geçilmiştir. Balık kılçığı benzetimli kanat, konvansiyonel yöntemlerle üretilmiş kanat ile aynı ölçülere sahip olacak şekilde tasarlanmıştır.

Tasarım gerçekleştirilirken Tablo 2.1'de yer verilen hedeflere riayet edilmiştir. Tasarımın amacı uçuş sırasında kesintisiz kamburluk değişikliği sağlamak olarak belirlenmiştir. Geleneksel metotlara kıyasla daha yüksek bir taşıma/sürüklenme oranı hedeflenmiştir. Bu amaçlarla tasarım gerçekleştirilirken aynı zamanda kontrol otoritesi, basitlik ve güvenilirlik prensiplerine sadık kalınmıştır.

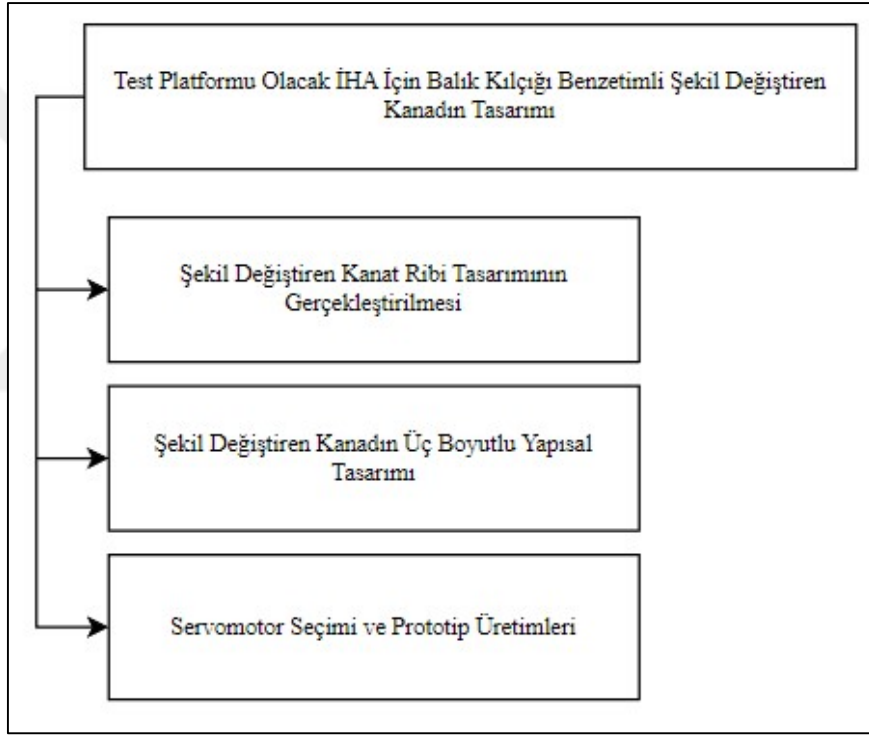
Tez kapsamında tasarımı gerçekleştirilen balık kılçığı benzetimli şekil değiştiren kanat tasarımında, ağırlık ve kompleksite noktasında da hedefler belirlenmiştir. Şekil değiştiren kanat teknolojisine yönelik ön yargıların cevaplanması için ağırlık artışının minimize edilmesi ve sistemin karmaşıklığını artırmamak hedeflenmiştir.

Önceki çalışmalarda şekil değiştiren kanatların aktivasyonu için servomotor adlı elektromekanik ünitelerin kullanıldığı ve yer yer bu sistemlere makara gibi makine elemanlarının da eklendiği görülmüştür. Bunun dışında şekil hafızalı kompozitler ve piezoelektrik materyaller gibi aktivasyon enerjisi sağlayacak yapılar da kullanılmıştır.

Bu çalışmada gerçekleştirilen tasarımın en özgün noktası, şekil değiştiren kanat artikülasyonunun arka spar adı verilen yapısal komponentin rotasyonu ile sağlanmasıdır. Vatoz insansız hava aracı kanadında kontrol yüzeylerinin hareketi kanatlara konumlandırılmış servomotorlar ile gerçekleştirilmiştir. Vatoz İHA'nın şekil değiştiren kanatlarında ise bu servolar gövde içerisine çekilerek arka sparı rotasyona sokacak şekilde yerleştirilmiştir. Böylece balık kılçığı formuna sahip kanat riblerinin bu arka spar etrafında rotasyonu sağlanacaktır.

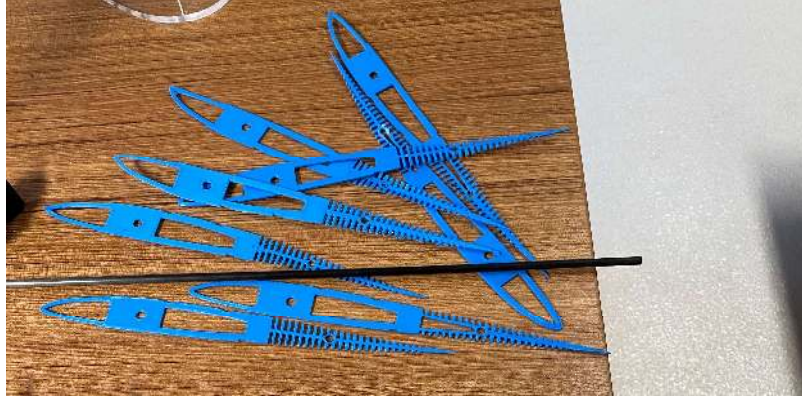
Yapısal bir parçanın aynı zamanda şekil değiştiren kanadın aktivasyonu olarak kullanılması ile “şekil değiştiren yapıların ağırlık katkısı” mitine yönelik yıkıcı bir hamle yapılmıştır. Kompleksite anlamında değerlendirildiğinde ise herhangi bir komponent eklentisi veya makine elemanı eklentisi olmadığı; sadece kanatta yer alan servomotorun gövde içerisine konumlandırıldığı düşünüldüğünde tekniğin kompleksiteyi artırmadığı ortaya çıkmaktadır.

Vatoz İHA değişken kanadının tasarımı gerçekleştirilirken kanat riblerinin tasarımı ilk adım olarak seçilmiştir. Tasarım sürecinin akış şeması Şekil 5.1’de sunulmuştur. Kanat riblerinin tasarımı yapılırken, benimsenen üretim tekniği olan üç boyutlu baskı önemli bir etken olmuştur. Vatoz İHA’nın gövdesi üretilirken üç boyutlu baskı prensibinin benimsenmesinde maliyet, bulunabilirlik ve üretim süresi ön plana çıkan kriterler olmuştur. Şekil değiştiren kanadın tasarımı ve üretimi sürecinde de bu kriterlerin yanı sıra, baskı materyali olarak kullanılan Lightweight PLA malzemesinin elastik şekil değiştirebilme kabiliyeti olumlu yönde değerlendirilen bir diğer etken olmuştur.



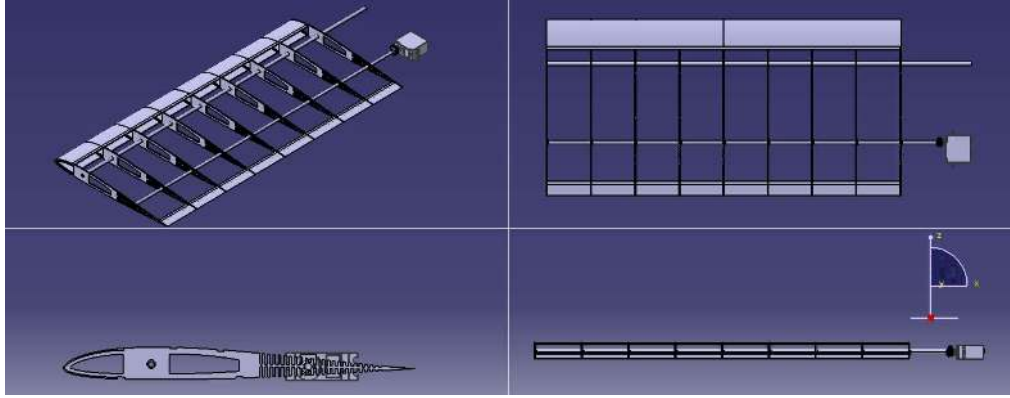
Şekil 5.1. Balık kılçığı benzetimli şekil değiştiren kanat tasarım akışı

Şekil 2.3’te özet halinde sunulan önceki teknik üzerinde servo motor ve arka spar artikülasyonu dışında bir başka modifikasyon gerçekleştirilerek, rijit parça ve hareketli bölüm arasında belirgin bir ayrım olmayacak şekilde tasarım gerçekleştirilmiştir. Tasarıma artikülasyon kabiliyeti; etrafında dönüş hareketi yapılacak bir birleşme noktası ile değil, tasarımda elastik şekil değiştirmenin odaklanacağı bir nokta olacak biçimde gerçekleştirilmiştir.



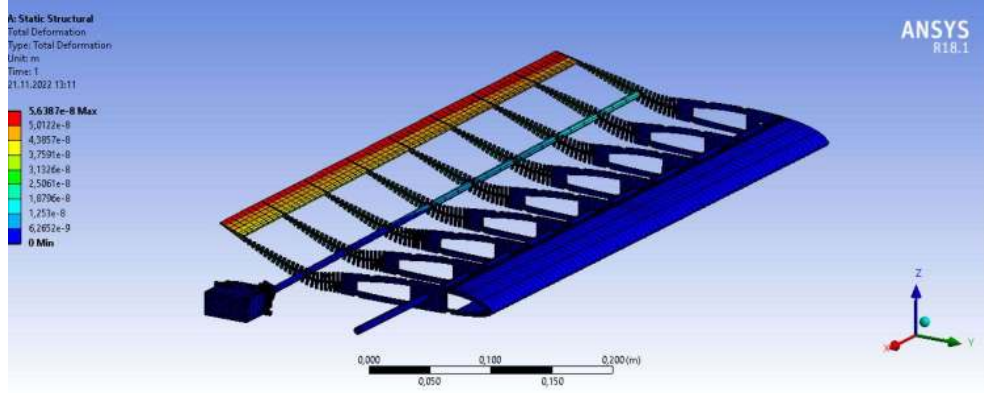
Görsel 5.2. Balık kılçığı benzetimli rib prototip üretimleri

Tasarımın dondurulduğu 11. Rib üzerinde konvansiyonel kanada eş bir biçimde aileron hareketleri elastik şekil değiştirme sınırları içerisinde gerçekleştirilebilmiştir. Rib kalınlığı için 1,618 mm seçilmiş ve bir yarım kanatta 9 adet rib olacak şekilde aralarında 66 mm boşluk bırakılmıştır. Rib tasarımının ardından kanadın üç boyutlu modellemesi Görsel 5.3’deki gibi gerçekleştirilmiştir. Kanadın hücum kenarına ve firar kenarına, seçilecek kaplamanın entegrasyonu için destek yüzeyleri çizilmiştir.

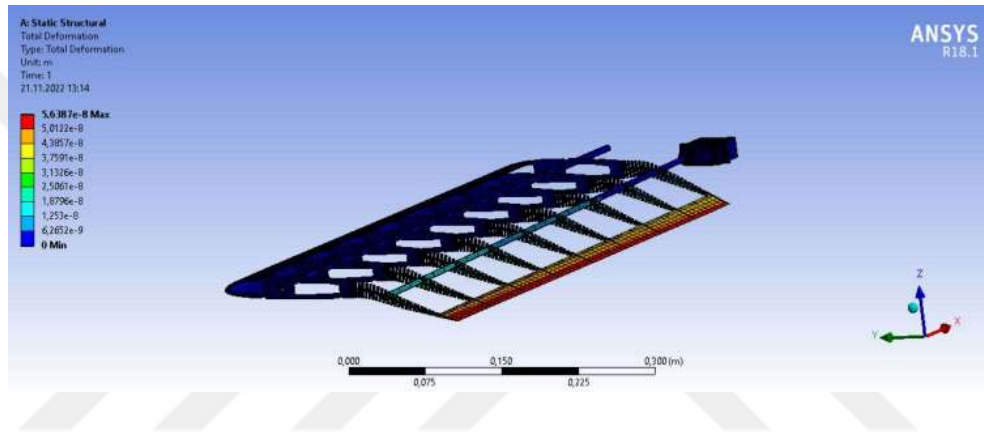


Görsel 5.3. Balık kılçığı benzetimli kanadın üç boyutlu modeli

Kanadın üç boyutlu modeli oluşturulduktan sonra gerekli servo torkunun hesaplanabilmesi ve sistemin fonksiyonelliğinin incelenebilmesi için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak statik analiz gerçekleştirilmiştir. Kanadın kaplamasız olduğu ve aerodinamik yüklerden yoksun olduğu hesaba katılarak analizlerde kullanılan servo momentleri değerlerine %15 tolerans eklenmiştir. Kanadın statik analizlerindeki yukarı ve aşağı yönlü deformasyon görsellerine Görsel 5.4 ve 5.5’te yer verilmiştir.



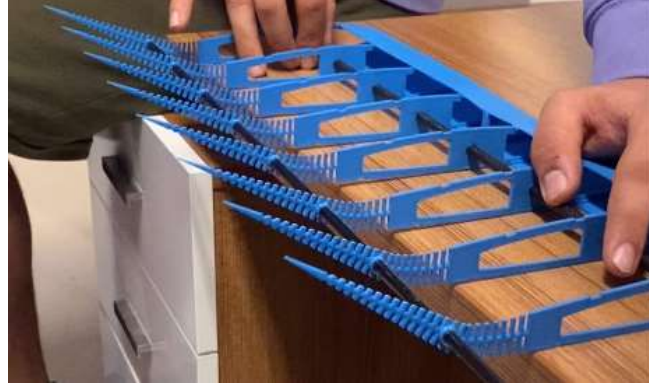
Görsel 5.4. Balık kılçığı benzetimli değişken kanadın yukarı yönlü deformasyonu



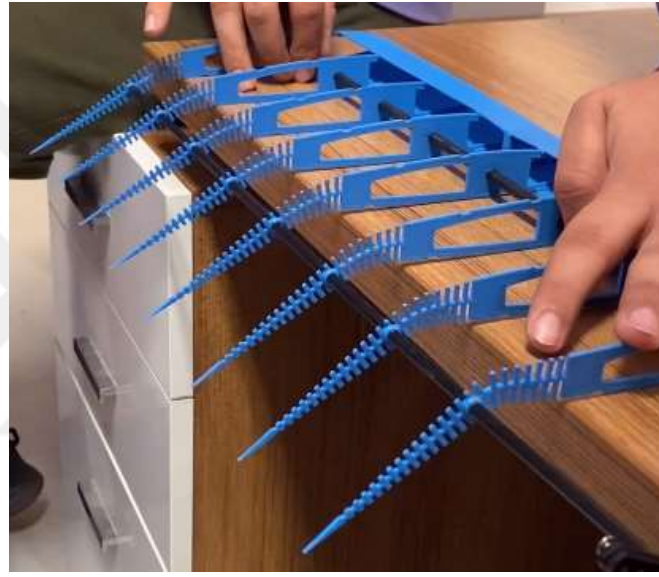
Görsel 5.5. Balık kılçığı benzetimli değişken kanadın aşağı yönlü deformasyonu

Kanadın deformasyonu incelendiğinde kaplama malzemesinin bütünlüğünden yoksun olduğu durumda ribler arasındaki deformasyon farkları gözlemlenebilmiştir. Ancak bunların kanadın kaplamasından sonra ortadan kalkacağı değerlendirilmiştir. Şekil değiştiren kanatta arka sparın artikülasyonunu sağlayacak elektromekanik ünite olarak 10,5 kg/cm tork değerine sahip Tower Pro mg946r metal dişli servo kullanılmıştır. Servo seçiminin tamamlanmasının ardından 1. prototip üretilerek sistemin fonksiyonelliği test edilmiştir.

Bir yarım kanatta yer alan dokuz adet kanat ribinin üç boyutlu baskısı tamamlandıktan sonra siyanoakrilat yapıştırıcı kullanılarak kanat ribleri ve sparları arasında yapıştırımlar gerçekleştirilmiştir. Daha sonra arka spar-servomotor bağlantısı da yapıştırma yöntemiyle sağlanmıştır. Görsel 5.6 ve 5.7 sırasıyla yukarı ve aşağı hareketin fonksiyon testini göstermektedir.



Görsel 5.6. Birinci prototipin yukarı yönlü hareketi



Görsel 5.7. Birinci prototipin aşağı yönlü hareketi

Fonksiyon testi sırasında gerçekleştirilen gözlemler aşağıdaki gibidir:

- Seçilen servonun torku, kaplamadan yoksun kanat için uygulanan tolerans değeri ile birlikte düşünüldüğünde, uygun miktarda seçilmiştir.
- Aşağı ve yukarı hareketlerde ve hareketler arası geçişte sürekli kontrol otoritesi sağlanabilmiştir.
- Sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen analizlerde gözlemlenen ribler arası farklılıklar bu fonksiyonellik testinde de gözlemlenebilmiştir. Kaplama eklentisi ile birlikte ribler arasındaki deformasyon farklılığının elimine edileceği ön görülmüştür.

Üretimi gerçekleştirilen birinci prototip üzerinden fonksiyonellik testinin gerçekleştirilmesi ve tasarımın doğrulanması üzerine kaplaması gerçekleştirilecek, test

edilebilir ve konvansiyonel kanat ile kıyaslanabilir bir balık kılçığı benzetimli şekil değiştiren kanadın ikinci prototip olarak üretim sürecine başlanmıştır.

5.2. Vatoz İHA Balık Kılçığı Benzetimli Şekil Değiştiren Kanat Üretimi

İkinci prototip üretiminde kullanılan malzemelerde birinci prototipe radikal bir değişiklik uygulanmamıştır. Kanat riblerinin baskısı için lightweight PLA malzeme, kanat sparları için karbon fiber malzeme, yapıştırma işlemleri için siyanoakrilat kullanılmıştır.

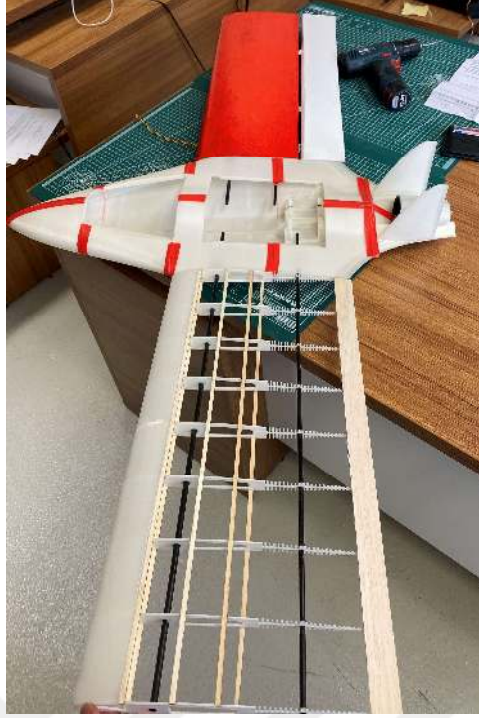
Birinci ve ikinci prototip arasındaki en önemli farklılığı ise kaplamanın mevcudiyeti oluşturmaktadır. İkinci prototipte, termoplastik oracover kaplama entegre edilmiştir. Ayrıca kaplamanın yapışabilmesi için lazer kesim yöntemiyle üretilmiş balsa ağacı uzunlamasına destekler kullanılmıştır. Kaplamada çöküntü olmaması ve kanattaki şekil değişiminin yanal ekseninde kesintisiz iletilmesi böylece sağlanmıştır.

Kanatın hücum kenarı için ise vazo modunda baskısı alınmış lightweight PLA malzemeden üretilmiş bir D-box parçası üretilmiştir. Görsel 5.8, 2. Prototip üretimi için kullanılan parçaları göstermektedir.



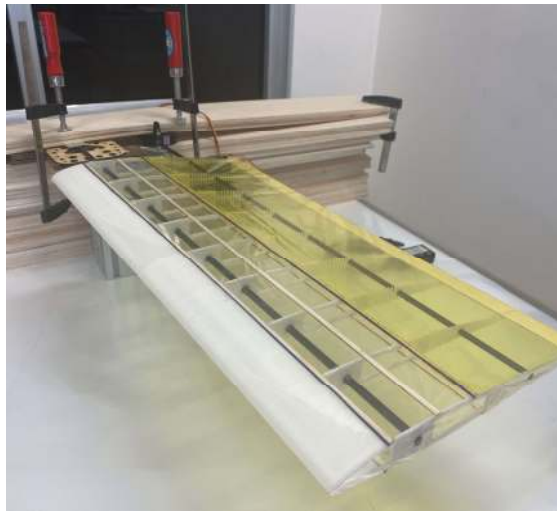
Görsel 5.8. Şekil değiştiren 2. Prototip malzemeleri

Şekil değiştiren kanadın montajı gerçekleştirildikten sonra konvansiyonel sağ yarım kanat ile aynı gövdeye takılarak kanatların boyut ve açısı kontrolleri gerçekleştirilmiştir. Böylece kanat iskeletinin doğru ölçülerde ve ribler arasında çarpıklık olmaksızın inşa edildiği Görsel 5.8'deki gibi doğrulanabilmektedir.



Görsel 5.9. Şekil değiştiren kanat ve konvansiyonel kanat görsel incelemesi

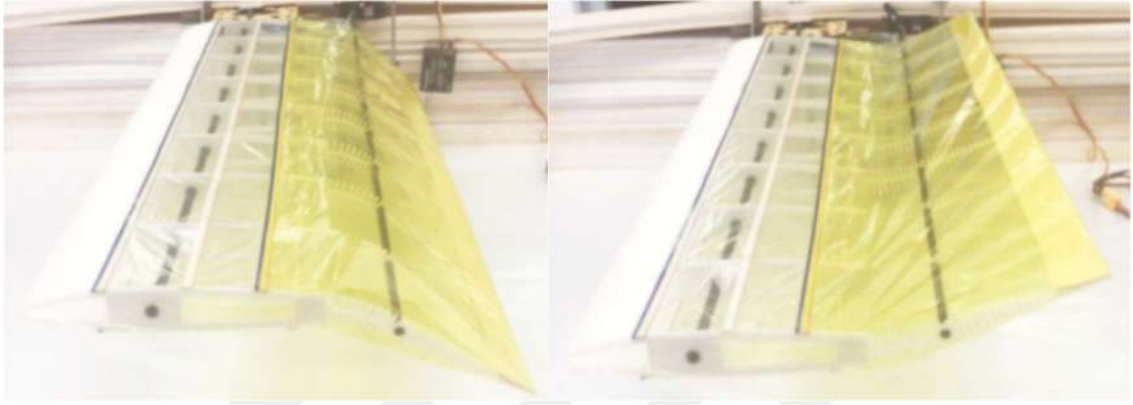
Kalite doğrulamaları gerçekleştirildikten sonra şekil değiştiren kanat 2. Prototipinin kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Kaplama sürecinde siyanoakrilat yapıştırıcı, kaplama ütüsü ve sıcak hava tabancası kullanılmıştır. Kaplama işlemi tamamlandıktan sonra Görsel 5.10’da yer verilen, doğaçlama bir masa üstü test düzeneği hazırlanmış ve kanadın şekil değiştirme kabiliyeti test edilmiştir.



Görsel 5.10. Şekil değiştiren kanat ve masaüstü test düzeneği

5.3. Vatoz İHA Balık Kılçığı Benzetimli Şekil Değiştiren Kanat Mekanizma Testleri

Gerçekleştirilen mekanizma testleri iki aşamalı olarak icra edilmiştir. İlk aşamada şekil değiştiren kanat 2. Prototipinin şekil değiştirme kapasitesi, Görsel 5.10’da görülen bir masa üstü test düzeneğinde incelenmiştir. Bu ilk aşamada, uygulanan yöntem ve sağlanan elektromekanik tork ile tasarımda amaçlanan aşağı ve yukarı yönde şekil değiştirme kabiliyetine ulaşıldığı Görsel 5.11’deki gibi gözlemlenmiştir.



Görsel 5.11. Şekil değiştiren kanadın masa üstü testleri

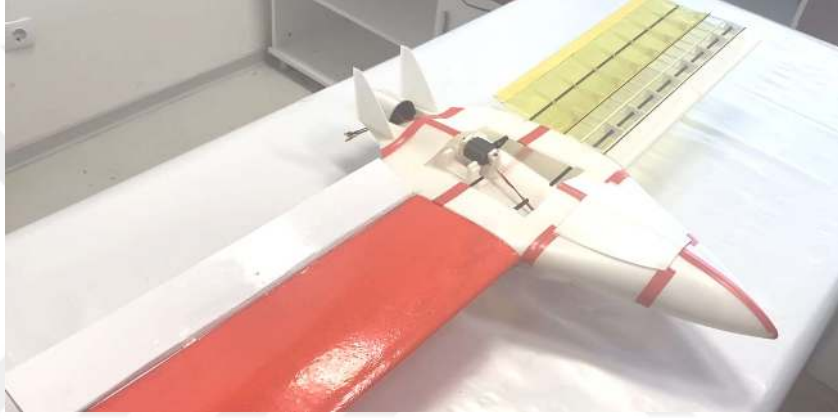
2. Aşamada ise aynı Vatoz İHA gövdesine birer konvansiyonel ve şekil değiştiren kanat prototipi takılarak hareketleri karşılaştırılmıştır. Elevon kontrol yüzeyinin sahip olması gereken simetrik ve asimetrik hareketler gerçekleştirilerek hareket deplasmanları incelenmiştir. Görsel 5.12, 5.13, 5.14 ve 5.15’te bu testten kareler tek tek gösterilmiştir.



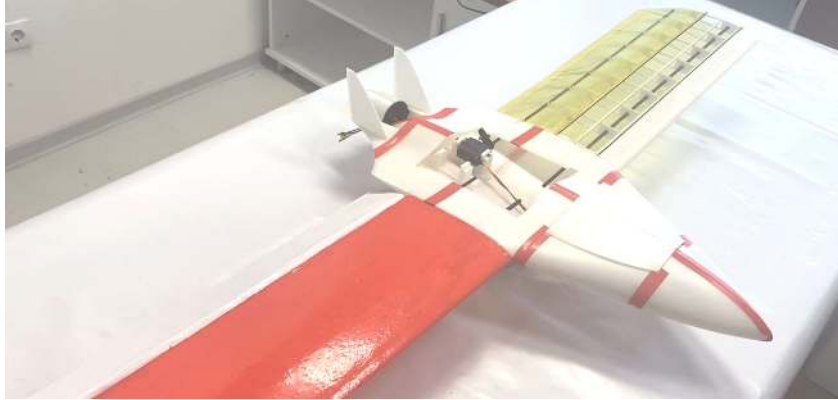
Görsel 5.12. Mekanizma testi sola yatış hareketi



Görsel 5.13. Mekanizma testi sağa yatış hareketi



Görsel 5.14. Mekanizma testi burun aşağı hareketi



Görsel 5.15. Mekanizma testi burun yukarı hareketi

6. BALIK KILÇIĞI BENZETİMLİ ŞEKİL DEĞİŞTİREN KANADIN HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ ANALİZLERİ

6.1. Türbülans Modelinin Belirlenmesi

Gerçekleştirilen nümerik çalışmada PW51 kanat profiline ait mevcut değerler ile akış analizlerinden çıkan değerler karşılaştırılmış ve doğrulanmış yapı üzerinde farklı geometriler analiz edilerek sonuçlar incelenmiştir. Modeller üzerindeki HAD (hesaplamalı akışkanlar dinamiği) analizleri Siemens Star-CCM+ 2210 yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerin çözümü sırasında geometri 2D olarak modellenmiştir. Çözümlerde türbülans modeli olarak, havacılık sektöründe özellikle aerodinamik çözümlerde sıklıkla tercih edilen bir türbülans olan k-omega türbülans modeli kullanılmıştır.

Chhari ve ark., [138] yaptıkları çalışmada, düşük hızda uçan sabit kanatlı İHA'lar için aerodinamik ve mekanik özelliklerine göre en uygun kanat profilini seçmek için akış ve mekanik dayanım analizleri gerçekleştirmiştir. Spalart-Allmaras denklemi kullanılarak çözülen akış analizleri ve Cosmosworks kullanılarak çözülen yapısal analizler sonucunda, kaldırma kuvvetine dayalı olarak S1223'ün en baskın kanat profili, kaldırma-sürüklenme oranına dayalı olarak en baskın kanat profilinin CH10 olduğu ile karşılaştırılmıştır [138].

Niu ve ark., [139] yaptıkları çalışmada, çeşitli uçuş koşullarında kanat profilinin değişimine göre uçağın aerodinamik performansını uyarlamalı olarak iyileştirmenin etkili bir yolu hesaplamalı akışkanlar dinamiğine göre incelenmiştir. 2D ve 3D olarak kanat geometrisinin k- ω Shear Stress Transport (SST) türbülans modeli ile çözümleri gerçekleştirilmiştir. Çözümlerin ardından ise bir şekil optimizasyonu önerilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, şekil değiştiren kanadın profilinin direnci azalttığı ve geniş kaldırma oranında uçuş verimliliğinin arttığı incelenmiştir [139].

Du vd., [140] yaptıkları çalışmada, Delft Teknoloji Üniversitesi tarafından geliştirilen DU 06 W 200 kanat profili üzerindeki akış özellikleri, HAD simülasyonu ve Particle Image Velocimetry ölçümleri ile incelenmiştir. CFD analizlerinde k- ω SST türbülans modeli kullanılmıştır. Particle Image Velocimetry deneyleri rüzgâr tüneli testi ve duman akışı görselleştirmesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca DU 06 W 200 ve NACA 63215 kanat profilleri üzerinden hibrit bir kanat profili elde edilerek test edilmiştir. Elde edilen hibrit modelin akış modelini önemli ölçüde değiştirebildiği ve aerodinamik performansın iyileştirildiği görülmüştür [140].

Wang vd., [141] yaptıkları çalışmada, bir uçağın aerodinamik performansını artırmanın etkili iki yolu olan aktif akış kontrolü ve değişken kamber teknolojisini bir kanat profilinin üzerine uygulayarak bir optimizasyon çalışması gerçekleştirmiştir. Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) denklemleri ve Spalart-Allmaras türbülans modelinin uygulandığı çalışmada, enjeksiyon yuvasının ve emme yuvasının konumu, emme yuvasının açısı dahil olmak üzere birçok önemli parametre göz önünde bulundurulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde, 4° hücum açısında kaldırma katsayısını %32,1 ve kaldırma-sürüklenme oranının %93,8 artırılabilirdiği görülmüştür [141].

Deng ve Agarwal, [142] yaptıkları çalışmada, yer etkisinde üç boyutlu bir kanat-gövde konfigürasyonu üzerinde çalışılmıştır. Geçmişte yapılan çalışmalarda, havada sınırsız akışta yapılmış birçok çalışma olsa da yer etkisi ile farklılıklar ilk defa incelenmiştir. Spalart-Allmaras ve $k-\omega$ türbülans modellerinin bulunduğu çalışmalarda öncelikle sınırsız yükseklikte çalışmalar karşılaştırılarak, yer etkisi incelenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, kanatta kaldırma kuvveti kazancı, sürüklenmede bir kayıp ve burun yukarı yunuslama momentinde bir kazanç ile karşılaşılmıştır [142].

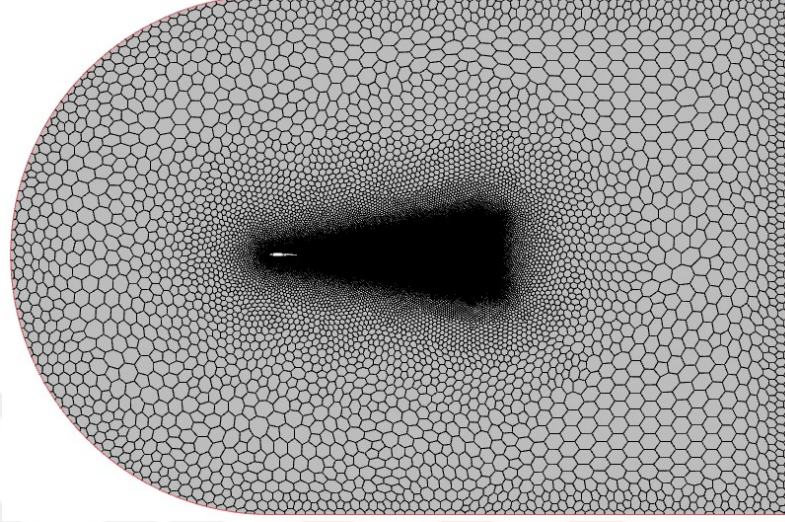
Vakilipour ve ark., [143] yaptıkları çalışmada, enine kesitsel damar topolojisinin, salınan oluklu doğa benzetimli kanat profilinin akış modeli ve aerodinamik performansı üzerindeki etkiyi araştırmıştır. Ashena Cyanea türündeki canlının kanadının enine kesiti 3 farklı konfigürasyonda modellenmiştir. Hava akışı 1000, 5000 ve 14000'lük 3 Reynolds sayısına tabii tutulur. Sonuçlar, Reynolds sayısı arttıkça damar yapısının etkilerinin daha önemli hale geldiğini göstermiştir. 1000 ve 5000 Reynolds aralığında profil minimum sürüklenme katsayısına sahipken 14000'e doğru önemli ölçüde artmaktadır [143].

6.2. Çözüm Ağı

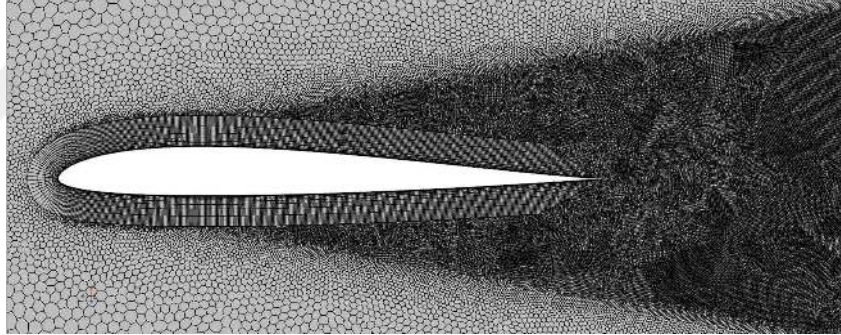
Çözüm ağı oluşturulması sırasında y^+ değeri 1 olarak kabul alınarak çözüm ağının oluşturulması sağlanmıştır. Şekil 6.1 ve 6.2'de çözüm ağına ait görseller bulunmaktadır. Kanat profilinin bulunduğu sınır tabaka bölgesine prizmatik yapıda çözüm ağı uygulanmıştır. Akış hacminin bulunduğu alanda ise poligonal çözüm ağı kullanılmıştır.

Nümerik analizlerde alınan sonuçların güvenilirliğini belirleyen tekniklerden birisi çözüm ağı bağımsızlık analizidir. Çözüm ağı bağımsızlık analizlerinde, analiz çıktıları göz önünde bulundurularak çözüm ağı düzenli olarak artırılır. Çözüm ağı ne kadar artırılırsa artırılсын analiz çıktısının değişimi çok değişmeyecektir. Nümerik analizler, çözüm ağı yoğunluğu ve bilgisayar donanımına göre belirli süreler almaktadır. Burada işlemci (CPU) süresi ve çözüm ağının yeterli seviyede bulunması çözüm sürelerini

önemli oranda etkiler. Bu nedenlerden dolayı, sonuçların en az değişkenlik gösterdiği ilk çözüm ağı seviyesi doğru olarak kabul alınır.

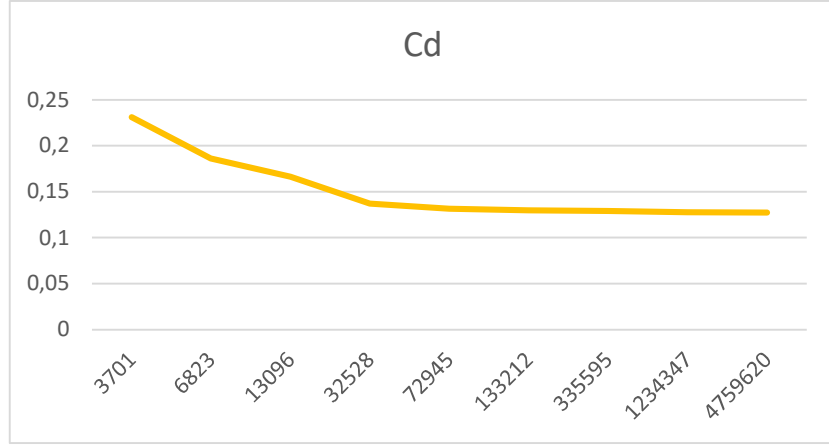


Şekil 6.1. Çözüm ağı

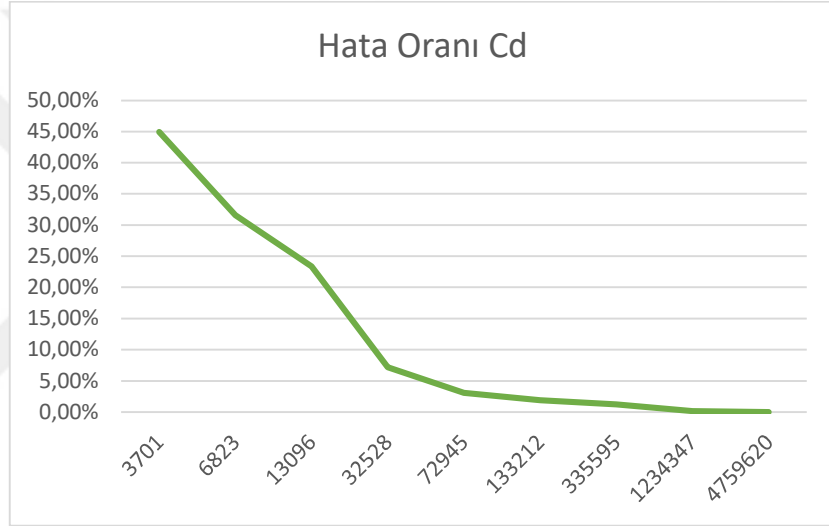


Şekil 6.2. Yakınlaştırılmış çözüm ağı

Gerçekleştirilen çözüm ağı analizine göre, sürüklenme katsayısı değerinin verdiği sonuç üzerinden yeterli çözüm ağı seviyesi belirlenmiştir. Şekil 6.3 ve 6.4 incelendiğinde, 3.000, 6.800, 13.000, 32.500, 73.000, 133.000, 335.600, 1.200.000 ve 4.800.000 çözüm ağı seviyelerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda 133.000 çözüm ağı seviyesinden sonra sonuçların hata oranının %2'nin altına düştüğü 1.200.000 seviyesinin üzerinde ise %1'in altına düştüğü gözlenmiştir. Bundan sonraki analizler 1.200.000 seviyesinden devam ettirilerek sonuçların doğruluğu kabul edilmiştir.



Şekil 6.3. Sürüklenme katsayısı çözüm ağı analizi

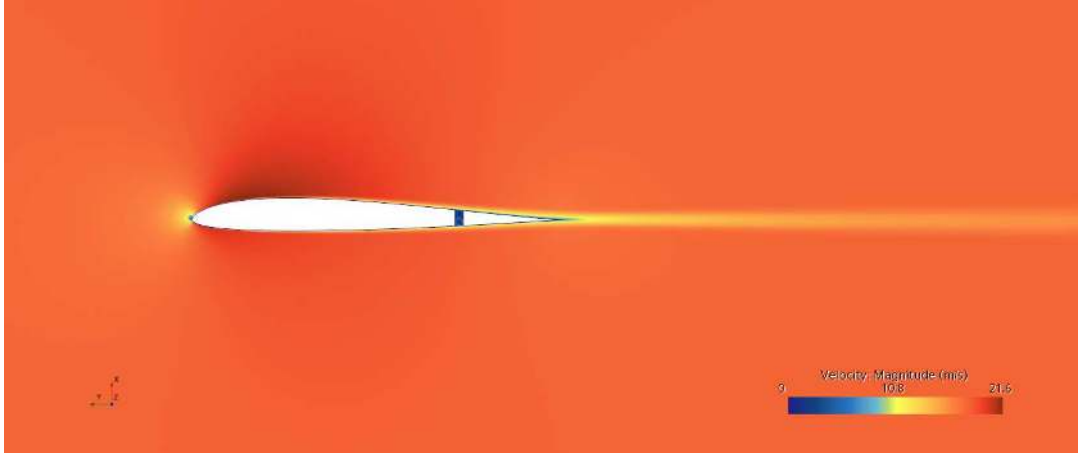


Şekil 6.4. Sürüklenme katsayısı çözüm ağı hata oranı

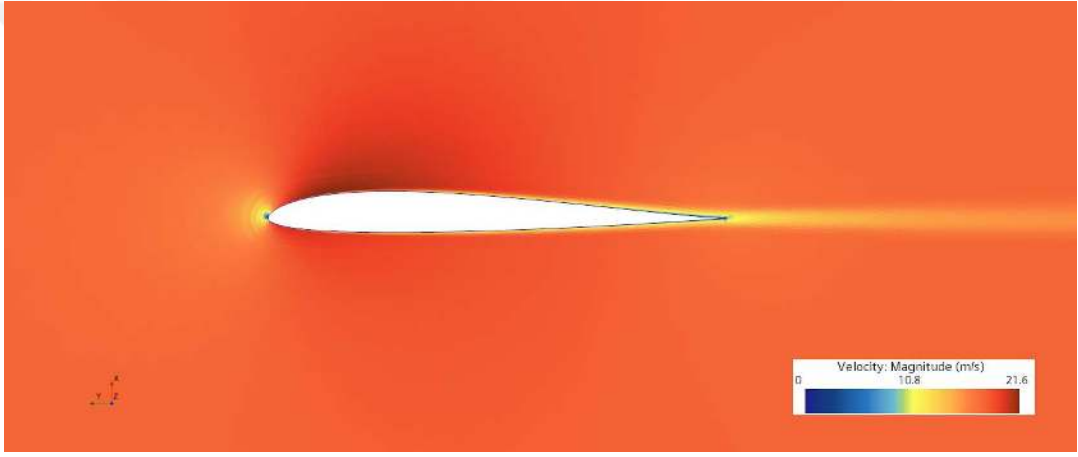
6.3. Kontrol Yüzeyi Boşluklarının HAD Analizi

Tezin motivasyonlarının arasında gösterilen, konvansiyonel kontrol yüzeyleri arasındaki boşluğun hava aracı performansına etkilerinin anlaşılabilmesi amacıyla bu HAD analizleri gerçekleştirilmiştir.

Bu etkinin incelenebilmesi için Vatoz İHA'nın konvansiyonel kanat durumu ve şekil değiştirmiş kanat durumu arasında analiz yapılmıştır. Görsel 5.9'da yer alan görsel üzerinde de belirgin şekilde belli olan, kontrol yüzeyi boşluğu ölçülmüş ve Vatoz İHA'da kullanılan PW-51 kanat profili üzerine uygulanarak 1. Model oluşturulmuştur. 2. Model şekil değiştiren Vatoz İHA kanadı kullanılarak oluşturulmuştur. Görsel 6.1 ve Görsel 6.2 sırasıyla iki modelin hücum açısız, hiçbir flap hareketi olmayan durumunun 18 m/s akış altındaki hız gradyanını göstermektedir.

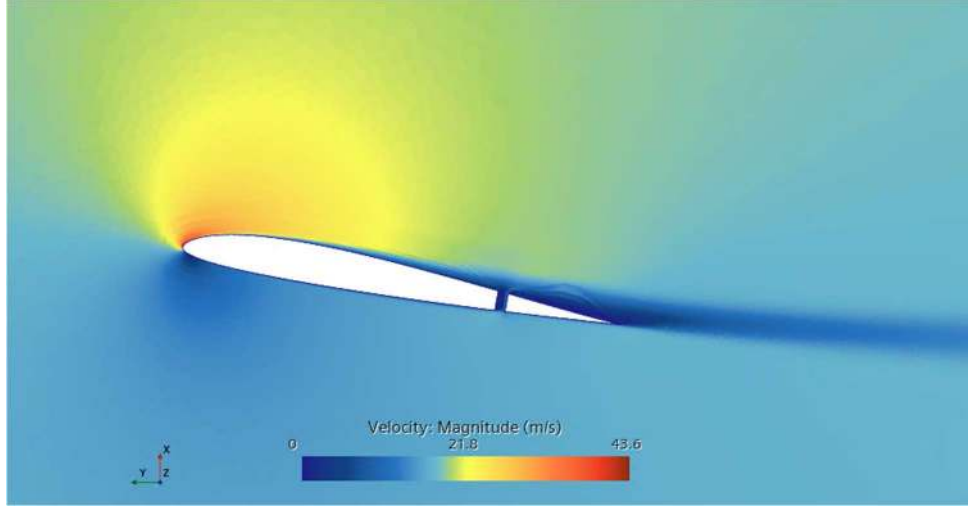


Görsel 6.1. Kontrol yüzey boşluklu model 1

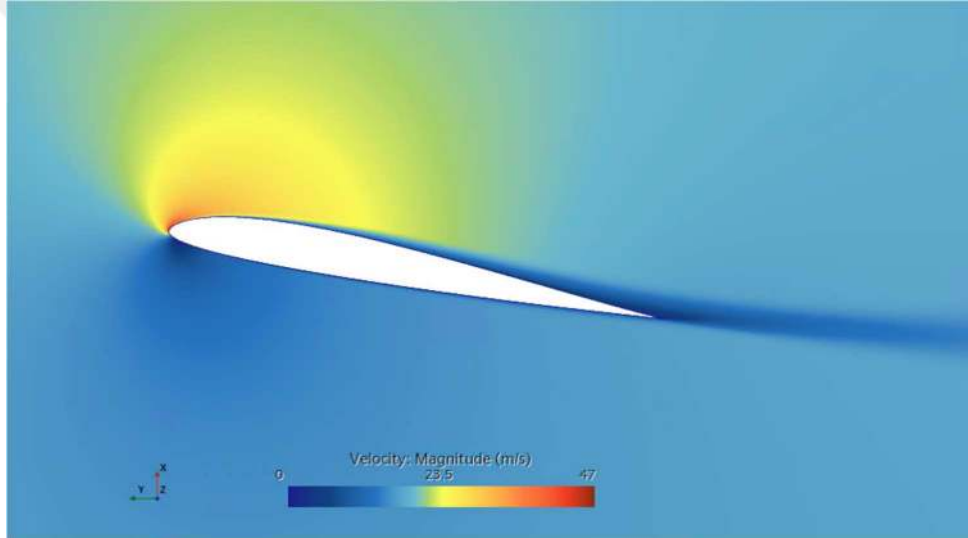


Görsel 6.2. Kontrol yüzey boşluksuz, şekil değiştiren kanat model 2

Görsel 6.1 ve Görsel 6.2’de sunulan analiz çözümlerinde hız gradyanlarında büyük bir değişiklik olmadığı görülebilmektedir. Bu etkinin incelenmesi için yapılan 2. analizde bu kez 10° hücum açısında iki modelin davranışı incelenmiştir. Görsel 6.3 ve Görsel 6.4’de sırasıyla iki model için hız gradyanları gösterilmiştir.



Görsel 6.3. Kontrol yüzey boşluklu model 1 – 10°



Görsel 6.4. Kontrol yüzey boşluksuz, şekil değiştiren kanat model 2 – 10°

Görsel 6.3 ve Görsel 6.4'te 10° hücum açısında, hız gradyanları arasında Model 1 ve Model 2 arasında bu kez gözle görülebilen farklılıklar ortaya çıktığı görülmektedir. Tüm hücum açılarındaki nümerik sonuçlar ise Model 1. için Tablo 6.1 ve Model 2 için Tablo 6.2'de verilmiştir.

Tablo 6.1. Model 1 için $0^\circ - 10^\circ$ hücum açısı sonuçları

Hücum Açısı	Sürüklenme Kuvveti (N)	Taşıma Kuvveti (N)
0°	0,693	3,617
1°	0,711	8,671
2°	0,744	14,221
3°	0,780	19,506
4°	0,831	24,728
5°	0,942	29,857
6°	1,025	34,541
7°	1,156	39,254
8°	1,279	43,831
9°	1,490	47,496
10°	1,724	50,627

Tablo 6.2. Model 2 için $0^\circ - 10^\circ$ hücum açısı sonuçları

Hücum Açısı	Sürüklenme Kuvveti (N)	Taşıma Kuvveti (N)
0°	0,624	3,821
1°	0,630	9,348
2°	0,645	14,817
3°	0,668	20,174
4°	0,701	25,588
5°	0,745	30,970
6°	0,801	36,182
7°	0,871	41,292
8°	0,960	46,249
9°	1,072	51,045
10°	1,219	55,781

Tablo 6.1 ve Tablo 6.2’de sunulan değerler incelendiğinde kontrol yüzeyi boşluğu bulundurmeyen Model 2’nin, konvansiyonel kontrol yüzeyi Model 1’e göre aerodinamik verim olarak ifade edilebilecek L/D değerinin,

- 0° hücum açısında %17,1
- 3° hücum açısında %20,8,
- 10° hücum açısında %55,8 yükseldiği hesaplanmıştır.

İnsansız hava aracı kontrol yüzeylerinde bırakılan hava boşluklarının etkisinin, hücum açısı arttıkça daha dramatik bir performans sorunu haline geldiği böylece analitik olarak ortaya koyulmuştur.

Tezde uygulanan balık kılçığı benzetimli kanat şekil değişikliği bu sorunu ortadan kaldırmaktadır. Konvansiyonel kanatlı insansız hava aracının üretimi sırasında da bu kanat kontrol yüzeyi boşlukları montaj sırası veya montaj sonrası uygulamalarla minimize edilebilir veya ortadan kaldırılabilir. HAD analizleri sırasında veya kanat profili seçilirken bu kontrol yüzeyleri söz konusu değildir. Sears, [144] tarafından raporlanan, NACA'da gerçekleştirilen rüzgâr tüneli testlerinde de 4 farklı kontrol yüzeyi boşluğu test edilmiş ve boşluk değeri arttıkça kanadın sürüklenme katsayısının arttığı, taşıma katsayısının ise azaldığı ifade edilmiştir [144].

Montaj sırasında bu boşluk kapatma uygulamaları yapılmadığında, tasarlanan ve amaçlanan performansının altında insansız hava aracı uçuş performansları ile karşılaşılabılır. Şekil değiştiren veya konvansiyonel kanatlı İHA'larda bu boşluklara karşı önlem alınması gereklidir. Analiz sonuçları incelendiğinde 10° hücum açısında, %9,2 taşıma katsayısı artışına karşın, sürüklenme katsayısı %29,2'lik dramatik bir azalma ortaya çıkmıştır. Buradan hareketle, kontrol yüzeyi boşluklarının sürüklenme kuvveti üzerinde, taşıma kuvvetine olan etkisinden daha dramatik bir etki yarattığı ifade edilebilir. Kontrol yüzeyi boşluklarının uçak performansının yanı sıra yakıt performansını da olumsuz etkileyeceği bu sonuçlardan hareketle ortaya çıkmıştır.

6.4. Şekil Değiştiren Kanadın Konvansiyonel Flap ile Karşılaştırılması

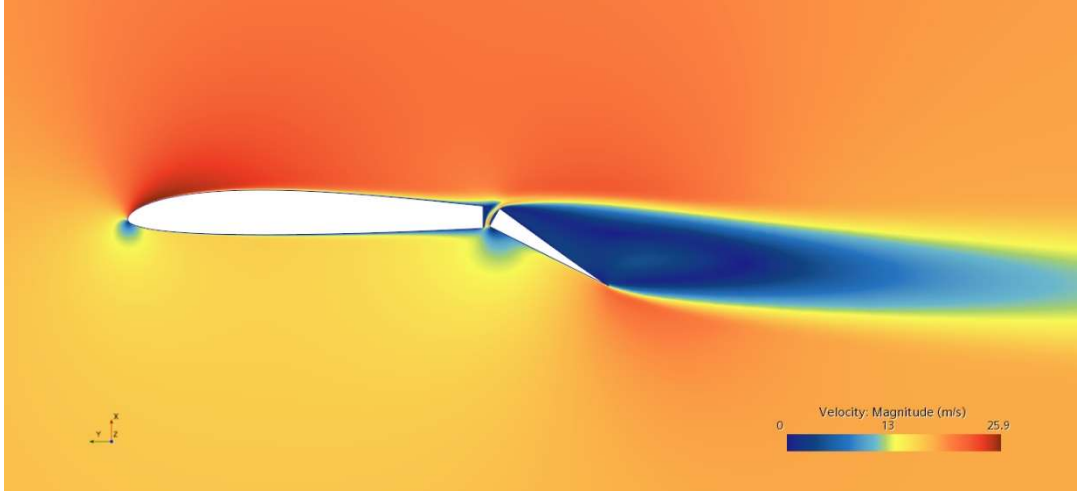
Çalışma kapsamında gerçekleştirilen 3. HAD analizi ise yine Siemens Star-CCM+ 2210 yazılımı kullanılarak, konvansiyonel kanat ve şekil değiştiren kanat arasında flap hareketinin incelenmesi üzerine gerçekleştirilmiştir.

Bu amaçla oluşturulan modellere, 6.3. başlığında tanımlanan ve analizlerine yer verilen Model 1 ve Model 2 ile karıştırılmaması için Model 3 ve Model 4 isimleri verilmiştir.

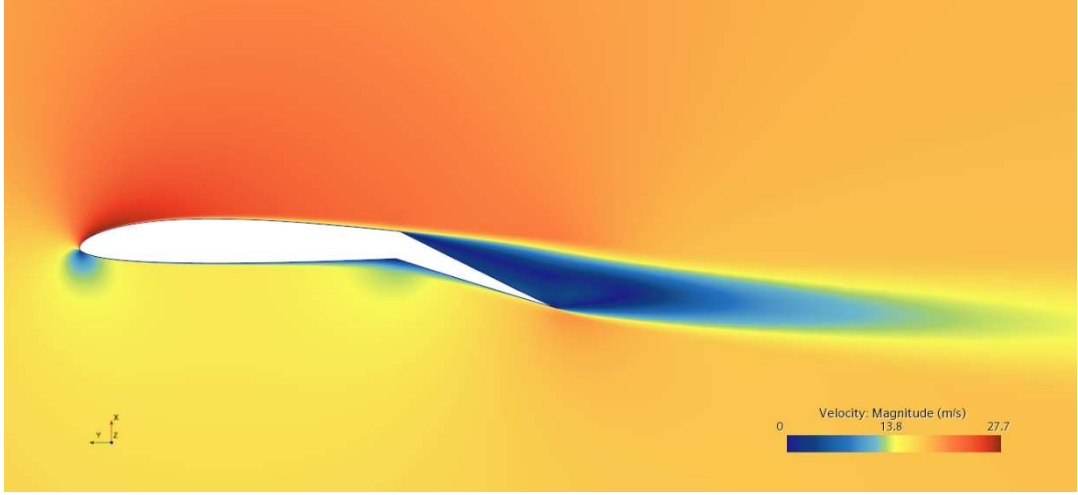
Model 3: Konvansiyonel kanatta 30° flap aşağı hareketi

Model 4: Şekil değiştiren kanatta 30° flap aşağı hareketi

Görsel 6.5 ve 6.6'da sırasıyla Model 3 ve Model 4 için HAD analizlerinden ekran görüntüleri paylaşılmıştır. Şekillerde hücum açısız durum incelenmiştir. Hücum açısı olmayan durumda dahi hız gradyanında yer alan büyük farklılıklar göze çarpmaktadır.



Görsel 6.5. Model 3 hız gradyanları



Görsel 6.6. Model 4 hız gradyanları

Model 3 ve Model 4 için 0-10° hücum açısı aralığında bu analiz itere edilmiştir. Tablo 6.3 ve 6.4'te sırasıyla bu iki model için HAD analizlerinin nümerik sonuçları sunulmuştur.

Tablo 6.3. Model 3 için $0^\circ - 10^\circ$ hücum açısı sonuçları

Hücum Açısı	Sürüklenme Kuvveti (N)	Taşıma Kuvveti (N)
0°	4,972	44,030
1°	5,115	48,438
2°	5,206	52,529
3°	5,292	56,501
4°	5,398	60,297
5°	5,538	64,285
6°	5,692	68,285
7°	5,827	71,582
8°	6,051	75,184
9°	6,273	78,357
10°	6,609	81,150

Tablo 6.4. Model 4 için $0^\circ - 10^\circ$ hücum açısı sonuçları

Hücum Açısı	Sürüklenme Kuvveti (N)	Taşıma Kuvveti (N)
0°	2,942	51,256
1°	3,063	55,172
2°	3,177	58,829
3°	3,305	62,555
4°	3,442	66,147
5°	3,602	69,808
6°	3,764	73,137
7°	3,957	76,295
8°	4,193	79,219
9°	4,518	81,776
10°	4,970	83,318

Tablo 6.3 ve Tablo 6.4’de verilen değerler incelendiğinde, Görsel 6.5 ve Görsel 6.6’da incelenebilen hız gradyanı farklılığının değerlere de ciddi şekilde yansıdığı görülmüştür. Model 4’ün, konvansiyonel kontrol yüzeyi Model 3’e göre aerodinamik verim olarak ifade edilebilecek L/D değerinin,

- 0° hücum açısında %96,8,
- 3° hücum açısında %77,2

- 10° hücum açısında %36,5 yükseldiği hesaplanmıştır.

L/D değerlerindeki bu ciddi değişikliklerin çoğunlukla sürüklenme katsayısı kaynaklı olduğu görülmüştür. Hücum açısız durumda %16,4 taşıma artışı ve %40,8 sürüklenme düşüşü hesaplanmıştır.

6.5. HAD Analizlerinin Yorumlanması

Gerçekleştirilen analizlerde şekil değiştiren kanadın motivasyonlarından birini oluşturan kontrol yüzeyleri arasındaki boşlukların etkileri incelenmiştir. Bu etkilerin yüksek hücum açılarında, özellikle sürüklenme katsayısı anlamında dramatik etkiler yaratabildiği görülmüştür.

Kontrol yüzeyi boşluklarının elimine edilmediği uçakların taşıma katsayısı anlamında çok büyük bir kayıp yaşanmadığı, bu durum da insansız hava aracının uçabilirliği konusunda problem oluşmadığını göstermektedir. Ancak birçok projede bu durum İHA'nın uçabilirliğini etkilemese de itki kullanımını ve yakıt verimliliğini dramatik olarak etkilemektedir. Gerçekleştirilen analizlerde 6 mm bir boşluk değeri kullanılmıştır. Bu değer tahmini veya tesadüfi olarak seçilmemiştir. İHA üretmek konusunda çok sayıda ödüle sahip Anatolia Aero Design ekibi öğrencileri tarafından üretilen bir insansız hava aracının kanadından ölçülmüştür.

Araştırmacı da yıllar içerisinde katıldığı birçok insansız hava aracı tasarımı ve uçuş yarışmasında herhangi bir önlem alınmamış kontrol yüzeyi boşluklarıyla karşılaşmıştır. Bu konunun farkındalığının artırılması anlamında bu analizler oldukça değerlidir. Çalışmanın motivasyonlarından birini temellendirmek konusunda da fayda sağlamıştır.

Başlık 6.4'te sunulan “Şekil Değiştiren Kanadın Konvansiyonel Flap Performansı ile Karşılaştırılması” başlıklı analizde, özellikle flapların aşağıya indirildiği durumda hücum açısız durumda %96,8 oranında L/D değişimi gözlemlenmiştir. Bu durum İHA'nın kontrol yüzeyi boşluğu ve konvansiyonel flap birleşimi ile ciddi bir verim kaybı yaşadığını ortaya koymaktadır.

7. BALIK KILÇIĞI BENZETİMLİ ŞEKİL DEĞİŞTİREN KANADIN RÜZGÂR TÜNELİ TESTLERİ

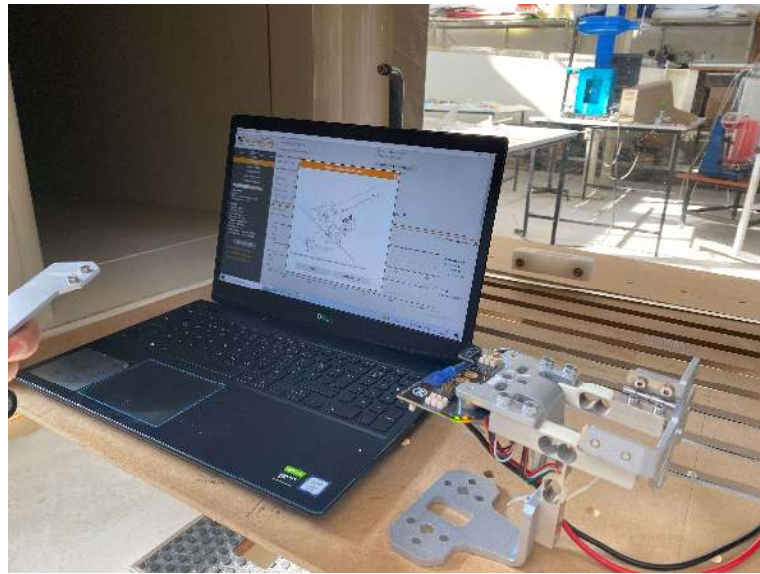
Rüzgâr tüneli testleri, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Aerodinamik Laboratuvarında bulunan kapalı devre, ses altı rüzgâr tüneli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Testler, söz konusu tünelde atmosferik şartlarda ve kapalı test odası içerisinde gerçekleştirilmiştir. Tünele entegre bir test düzeneği veya enstrumantasyon kabiliyeti bulunmadığı için itki testlerinin gerçekleştirilmesi için kullanılan bir test düzeneği tünele entegre edilmiştir.

7.1. Test Düzeneğinin Oluşturulması

Rüzgâr tünelinin kapalı test odası içerisine kanadın konumlandırılabilmesi ve ölçümlerin alınabilmesi için tünele RC Benchmark tarafından üretilen motor test düzeneği entegre edilmiştir. Bu düzenek esasen elektrik motorlarının itki testlerinin gerçekleştirilmesi için üretilmiş bir üründür. Ancak bu çalışmada, üzerinde yer alan yük hücreleri vasıtasıyla taşıma ve sürüklenme değerlerinin ölçülmesi amacıyla kullanılmıştır.

Düzeneğin USB ile bilgisayar bağlantısı sağlanabilmektedir. Çıktılar .csv uzantılı olarak kaydedilebilmektedir. Test verilerinin otomatik kaydı gerçekleştirilebilmektedir. Bu özelliklerinin yanı sıra kalibrasyon sürecini de içeren kolay ulaşılabilir bir arayüzü bulunmaktadır. Cihazın üzerinde yer alan yük hücreleri 5 kilogram ölçme kapasitesine ve $\pm 0,5\%$ hassasiyete sahiptir (http-10).

Düzeneğin monte edilmiş haline ve bilgisayar arayüzüne Görsel 7.1’de yer verilmiştir.



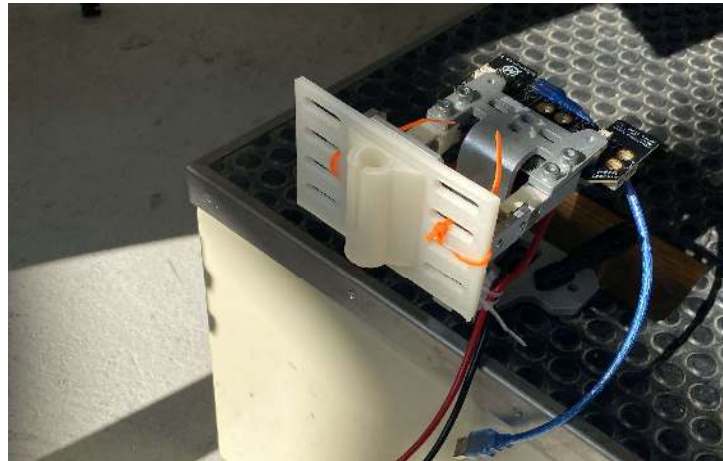
Görsel 7.1. RC benchmark test düzeneğinin kurulumu

Test düzeneğinin montajı ve bilgisayar bağlantısı tamamlandıktan sonra kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon sürecinde arayüzde yer alan kalibrasyon basamakları takip edilmiş ve kit içerisinde yer alan kalibrasyon ağırlıkları kullanılmıştır. Görsel 7.2 kalibrasyon sürecine yer vermektedir.



Görsel 7.2. Test düzeneğinin kalibrasyonu

Kalibrasyon süreci tamamlandıktan sonra, test düzeneğinin kanat ölçümleri yapabilecek şekilde modifikasyonu gerçekleştirilmiştir. Düzenek-kanat birleşimini sağlayacak özel bir montaj parçası tasarlanarak üç boyutlu yazıcı ile üretimi yapılmıştır. Bu parçanın test düzeneğine montajı Görsel 7.3'deki gibi gerçekleştirilmiştir. Cıvatasomun bağlantılarının yanı sıra plastik kelepçeler de entegre edilerek vibrasyon oluşma olasılığı en aza indirilmiştir.



Görsel 7.3. Test düzeneği-kanat montaj parçası

Test düzeneğinin, rüzgâr tünelinin kapalı test odasına yerleştirilecek kanat parçası ile bağlantısını sağlamak için 10 mm çapında ve 600 mm uzunluğunda bir karbon fiber borudan yararlanılmıştır. Karbon fiber boru ve üç boyutlu baskısı yapılan montaj parçası birbirlerine 5 dakikalık epoksi yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır. Böylece bu bağlantıda kanadın taşıma üretmesi ile birlikte ayrılma veya vibrasyon yaratma riski ortadan kaldırılmıştır. Bu eklenti ile birlikte test edilecek kanat parçası kapalı test odasının tam merkezine konumlandırılmıştır.



Görsel 7.4. Kapalı test odası-test düzeneği bağlantısı

Karbon fiber boru ve kanat bağlantısını sağlayacak bir T parça oluşturulduktan sonra kanat çeyrek veterinden test düzeneğine bağlanmıştır. Bu aşamada tekrar değerler okunarak kalibrasyonunun korunduğu konusunda teyit alınmıştır.

Kanadın yerleştirilmesi ve sabitlenmesinden sonra kanat kontrol yüzeyine hareketi verecek olan servo bağlantı kabloları rüzgâr tüneli test odasının dışına çıkarılmış ve test odasının altında kalan boşluklar şeffaf bant ve gri tamir bandı kullanılarak kapatılmıştır. Karbon borunun akış yönünde hareketinin engellenmesi için bir strafor köpük yerleştirilmiştir.

Kanadın montajı ve yerleştirilmesinin yapılmasının ardından rüzgâr tüneli test odasının yan kapakları da kapatılmış ve Görsel 7.5'deki gibi test hazırlıklarında son aşamaya geçilmiştir.



Görsel 7.5. Test parçasının rüzgâr tüneli test odasında yerleşimi

Kanat parçaları üzerinde testlere başlanmadan önce, kanadın sabitlendiği hücum açısının kontrolü “pitch gauge” aleti ile Görsel 7.6’daki gibi gerçekleştirilmiştir.



Görsel 7.6. Test parçasının hücum açısı kontrol uygulaması

7.2. Test Süreci ve Sonuçlar

Hazırlıkların yapılmasının ardından bir test protokolü oluşturulmuştur. Test protokolünün maddeleri aşağıdaki gibidir:

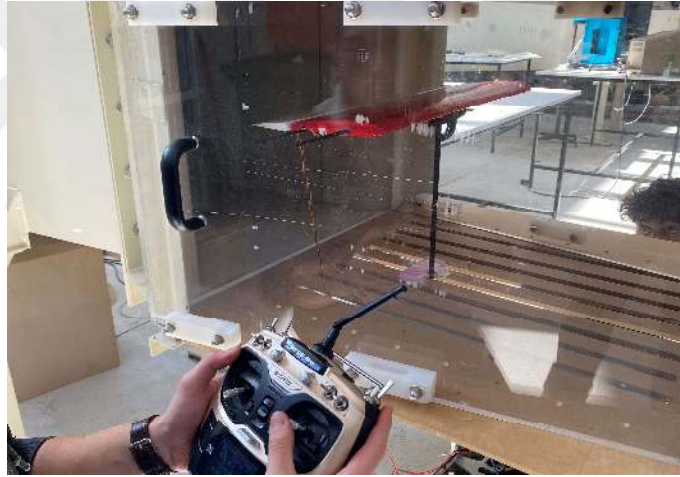
- Test parçasının yerleştirilmesinin ardından hücum açısı kontrolü,
- Test parçasının yerleştirilmesinin ardından arayüzden değerlerin okunması ve data alma işlemi,
- Rüzgâr tüneli test odasının yan kapaklarının kapatılması,
- 5 m/s hıza çıkılarak titreşimin gözlemlenmesi,

- 10 m/s hıza çıkılarak titreşimin gözlemlenmesi,
- 15 m/s hıza çıkarak titreşimin gözlemlenmesi,
- 18 m/s hıza çıkarak beş saniye beklenmesi ve değerlerin alınması,
- Arzu edilen flap hareketi için gerekli PWM değerinin servoya gönderilmesi,
- Flap hareketinin değerinin doğrulanması,
- Hava akışının yavaşça düşürmek suretiyle kesilmesi ve testin sonuçlandırılması.

Testlerin uygulandığı parçalar ve durumlar aşağıdaki gibidir:

Test Parçası 1: Konvansiyonel kontrol yüzeyine sahip, uçuş testleri gerçekleştirilen kanat (Görsel 7.7) için:

- 0° hücum açısı flapsız, 0° hücum açısı aşağı flaplı,
- 10° hücum açısı flapsız, 10° hücum açısında aşağı flaplı,



Görsel 7.7. Test parçası 1 rüzgâr tüneli testleri

Test Parçası 2: Tez kapsamında tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen balık kılıcı benzetimli şekil değiştiren kanat (Görsel 7.8) için:

- 0° hücum açısı flapsız, 0° hücum açısı aşağı flaplı,
- 10° hücum açısı flapsız, 10° hücum açısında aşağı flaplı,



Görsel 7.8. Test parçası 2 rüzgâr tüneli testleri

İki test kanat parçası için gerçekleştirilen toplam 8 analizin verileri, RC benchmark test düzeneğinin USB bağlantısı kullanılarak aktarılmıştır. CSV formatında aktarılan bu verilerde Görsel 7.9’da görülen zaman damgaları ve yük hücresi verileri elde edilmiştir. 8 deney için toplamda 20.992 satır veri elde edilmiştir. Veriler üzerinde rüzgâr tüneline 18 m/s hıza ulaşıldığı satırlar alınarak yük hücresi değer okumalarının kuvvet dönüşümü gerçekleştirilmiştir.

Time (s)	AccX (g)	AccY (g)	AccZ (g)	Torque (N·m)	Thrust (kgf)	Current (A)	Left Load Cell (mV)	Right Load Cell (mV)	Thrust Load Cell (mV)	Vibra
0	0	0,00195313	-0,9785156			0,020009835				
0	0	0,0078125	-0,9765625		-0,042306094	0,019846382			0,424343398	
0,025655	-0,0117188	0,015625	-0,9765625			0,019356621				0,01
0,04907	-0,0195313	0,02539063	-0,9765625			0,019189915				0,01
0,073415	0	0,00390625	-0,9785156	0,00350663		0,01969913	0,129075911	-0,463534765		0,01
0,11063	0	0,0078125	-0,9765625			0,018857883				0,01
0,131225	-0,0078125	0,01367188	-0,9785156			0,01848519				0,01
0,15115	0	0,0078125	-0,9765625		-0,04268131	0,019154991			0,42396725	0,01
0,17605	0	0,00585938	-0,9765625			0,017239219				0,01
0,20778	-0,0117188	0,015625	-0,9765625			0,019726272				0,01
0,228195	0	0,0078125	-0,9765625	0,003473809		0,019308601	0,12918715	-0,463447974		0,01
0,25744	-0,0234375	0,02734375	-0,9765625			0,018879921				0,01
0,278435	0	0,0078125	-0,9785156			0,018740985				0,01
0,299175	0	0,00585938	-0,9804688		-0,042834508	0,018837955			0,423813671	0,01
0,335135	0	0,00390625	-0,9765625			0,019271409				0,01
0,35895	-0,0078125	0,01367188	-0,9785156			0,018205862				0,01
0,382475	0	0,00585938	-0,9785156	0,003445153		0,018085602	0,129232128	-0,463321656		0,01
0,40439	0	0,0078125	-0,9765625			0,017059479				0,01
0,425315	0	0,0078125	-0,9785156			0,017249373				0,01
0,464315	-0,0117188	0,015625	-0,9785156		-0,042902425	0,016690316			0,423745586	0,01
0,506075	0	0,00390625	-0,9785156			0,017516256				0,01
0,53248	-0,0078125	0,01171875	-0,9765625	0,003380529		0,019253305	0,129544361	-0,463241107		0,01
0,55366	0	0,0078125	-0,9765625			0,019490572				0,01
0,583775	0	0,00585938	-0,9765625			0,021248826				0,01
0,60541	0	0,00585938	-0,9785156		-0,043068562	0,01880238			0,423579036	0,01
0,62644	-0,015625	0,01953125	-0,9765625			0,019896711				0,01
0,66253	0	0,00390625	-0,9785156			0,02012885				0,01
0,68728	0	0,00390625	-0,9785156	0,003351458		0,019885984	0,129675811	-0,463196138		0,01
0,71076	0	0,00585938	-0,9765625			0,020545364				0,01
0,732865	-0,015625	0,01757813	-0,9765625			0,020417096				0,01
0,7577	0	0,00390625	-0,9765625		-0,042608475	0,01917739			0,424040266	0,01
0,780875	0	0,00390625	-0,9785156			0,019329188				0,01
0,802565	0	0,00585938	-0,9785156			0,020181318				0,01
0,82791	0	0,00585938	-0,9765625	0,003433548		0,020710037	0,129056343	-0,463082463		0,01
0,850535	0	0,00585938	-0,9785156			0,020448936				0,01

Görsel 7.9. Rüzgâr tüneli testleri veri dosyasından ekran görüntüsü

Testler sonucunda elde edilen verilere Tablo 7.1’de yer verilmiştir:

Tablo 7.1. Rüzgâr tüneli test sonuçları: 8 durum

Test Koşulları	Konvansiyonel Kanat		Şekil Değiştiren Kanat		L/D Değişimi
	Lift (N)	Drag(N)	Lift(N)	Drag(N)	
0° Hücüm Açısı Flapsız	4,125	0,660	4,273	0,593	0,152
0° Hücüm Açısı Flaplı 30°	37,299	3,586	39,920	2,784	0,378
10° Hücüm Açısı Flapsız	37,965	3,348	38,847	3,007	0,139
10° Hücüm Açısı Flaplı 30°	47,118	4,921	48,807	4,025	0,266

7.3. Rüzgâr Tüneli Testlerinin Değerlendirilmesi

Rüzgâr tüneli test sonuçları yorumlanırken iki farklı değerlendirme yapılmıştır. Öncelikle sonuçları tekrarlamak gerekirse:

Konvansiyonel kontrol yüzeyine sahip kanat ve şekil değiştiren kanat arasında:

- Hücüm açısı ve flap hareketi bulunmayan durumda %15,2 aerodinamik verim artışı,
- Hücüm açısı bulunmayan, 30 derece flap aşağı hareketi verilen durumda %37,8 aerodinamik verim artışı,
- 10° hücüm açısı verilen, flap hareketi olmayan durumda %13,9 verim artışı,
- 10° hücüm açısı ve 30 derece flap aşağı hareketi verilen durumda ise %26,6 verim artışı sağlanmıştır.

Rüzgâr tüneli testleri ve HAD analizlerinde elde edilen sonuçlar bir arada değerlendirildiğinde, her iki teknikte de 4 durumun tamamında şekil değişimi kabiliyetine sahip balık kılıcı benzetimli kanadın avantaj sahibi olduğu ortaya konulmuştur.

Aerodinamik verim artış miktarında ve üretilen taşıma-sürüklenme kuvvetlerinin miktarlarında farklılıklar bulunmaktadır. Bu farklılıklarla literatürdeki birçok çalışmada da karşılaşılabilmektedir. Bilgisayar ortamında gerçekleştirilen hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri, tasarım projelerinde zaman tasarrufu sağlamaya yarayan, düşük maliyetli analizlerdir. Her ne kadar bu analiz yöntemleri geliştirilse de empirik verilerle aralarında tutarsızlıklar görülmesi doğaldır. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen HAD analizlerinde elde edilen bulgular ve rüzgâr tüneli testlerinde elde edilen L/D değerleri Tablo 7.2’de sunulmuştur:

Tablo 7.2. Rüzgâr tüneli test sonuçları-had analizleri karşılaştırması

	HAD Analizleri Sonucu	Rüzgâr Tüneli Sonucu	Sapma Miktarı
0° Hücüm Açısı Flapsız	%17,1	%15,2	%1,9
0° Hücüm Açısı Flaplı 30°	%96,8	%37,8	%59
10° Hücüm Açısı Flapsız	%55,8	%13,9	%41,9
10° Hücüm Açısı Flaplı 30°	%36,5	%26,6	%9,9

HAD analizlerinde görülen bu sapmaların, özellikle kanadın “kontrol yüzeyi boşluğu” bölgesinde çözüm ağlarının uygun tanımlanmaması nedeniyle meydana gelmiş olabileceği değerlendirilmesi sonuçlar ışığında yapılabilir.

İkinci değerlendirme olarak; gerçekleştirilen rüzgâr tüneli testlerinde elde edilen değerler, literatürdeki diğer şekil değiştiren kanat çalışmalarının rüzgâr tüneli testi sonuçları ile kıyaslanmıştır.

Riviero vd. [145], gerçekleştirdikleri rüzgâr tüneli testlerinde balık kılıcı benzetimli şekil değiştiren kanatların konvansiyonel flaplara göre %20-%25 aralığında daha yüksek L/D oranı verdiğini ifade etmiştir [145].

Communier ve ark. [105], gerçekleştirdikleri çalışmada firar kenarı şekil değiştirme kabiliyetine sahip bir kanadı rüzgâr tüneli testlerine tabi tutmuştur. Çalışmada %20-%30 aralığında konvansiyonel kanatlara göre avantaj sağlandığı ifade edilmiştir [105].

Poonsong [146], gerçekleştirdiği çalışmada çok bölmeli bir şekil değiştiren kanadın rüzgâr tüneli testlerini yapmıştır. Çalışmada 5° altındaki hücum açılarına odaklanılmıştır. Çalışmanın sonucunda bu hücum açılarında %20 ve %40 aralığında L/D oranı artışı ifade edilmiştir [146].

Yukarıda yer alan üç çalışma, bu tez çalışmasında yer alan tasarımla gösterdikleri benzerlikten hareketle sonuçların kıyaslanması için uygun örnekler teşkil etmektedir. Rüzgâr tüneli testlerinde elde edilen ve Tablo 7.1’de özetlenen bulgular, bu üç çalışmada ifade edilen verim kazanımlarına yakın değerler ortaya koymuştur. Bu değerlendirme sonucunda, rüzgâr tüneli testlerinin literatürdeki veriler ile uyum gösterdiği ortaya çıkmıştır.

8. ŞEKİL DEĞİŞTİREN KANAT İLE UÇUŞ TESTİ GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Şekil değıştiren kanat çalışmalarına ait literatür incelemeleri sırasında, uçuş testi gerçekleştirme aşamasına taşınmış nadir sayıda çalışma olduğu görülmüştür. Çalışmaların erevesi genellikle bir teorik kanada şekil değıştirme kabiliyeti kazandırmak ve bunun testlerini yapmak olarak çizilmiştir.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmada Vatoz İHA adlı uçabilir bir insansız hava aracı tez kapsamında tasarlanıp üretilmiştir. Daha sonra konvansiyonel kanatlar ile uçuş testi gerçekleştirilen Vatoz İHA için, konvansiyonel kanatlarla tamamen eş şekil değıştirme kabiliyetine sahip balık kılçığı benzetimli kanatlar üretilmiştir.

Çalışma sürecinde tasarımı, üretimi, analizleri ve testlerin gerçekleştirilmesinin ardından balık kılçığı benzetimli şekil değıştiren kanat ile uçuş gerçekleştirilme hazırlıklarına başlanmıştır.

8.1. Uçuş ncesi Hazırlıklar

Bölüm 4.3'te ele alınan konvansiyonel kanatlı uçuşların ardından zaten Vatoz İHA platformunun uçuş karakteriştiği ve pilotajı konusunda tecrübe edinilmişti. Tez çalışmasının tamamlanması için gerçekleştirilecek bu uçuşun önündeki en büyük sorunsal olarak elden atış sırasında yaşanabilecek insan faktörleri olarak görülmüştür. Vatoz İHA platformu ve şekil değıştiren kanat çiftinin üretimi, yazarın ğretim faaliyetlerinde yer alması ve projelerde bulunması nedeniyle yaklaşık 3,5-4 ay sürmüştür. Platformun uçuşta hasara uğraması veya bir daha uamayacak şekilde kaybedilmesi bu nedenle büyük stres kaynağı oluşturmuştur.

Elden atış sürecinde insansız hava aracının yeterli itkiye sahip olması ve uçabilir olmasının yanı sıra, elden atışı gerçekleştirecek atıcının doğru hücum açısında ve uçağın kanadı yer eksenine paralel olacak şekilde, yeterli kuvveti uygulayarak uçağı fırlatması oldukça önemlidir. Araştırmacının Anatolia Aero Design ekibi ile gerçekleştirdiği uçuşlar sürecinde birçok kez elden atış sırasında insan faktörleri olarak ifade edebileceğimiz bu unsurların devreye girebildiği tecrübe edilmiştir.

Bu tecrübeler ve tez kapsamında üretilen şekil değıştiren kanatlı Vatoz İHA'nın zaman maliyeti dolayısıyla uçuşun başlangıcında emniyet sağlamak için alışılmışın dışında bir metoda başvurulmuştur. Vatoz İHA'nın elden atılması yerine, hareketli bir platformun üzerinden kalkışını gerçekleştirmesinin riski düşüreceği değerlendirmesi yapılmıştır. Bu hareketli platform için bir otomobil ve motosiklet arasında değerlendirme yapıldıktan sonra, motosikletin daha uygun bir seçenek olacağına karar verilmiştir.

Motosikletin arkasında oturan atıcının İHA'yı elinden serbest bırakması seçeneğinin de insan faktörleri oluşturacağı ön görülerek, atıcı için bir düzeneğe inşa edilmiştir. Düzeneğin inşasında termoplastik uçak kaplama filmlerinin etrafına sarıldığı karton rulolar ve kumaş parçaları kullanılmıştır. Düzeneğe Vatoz İHA'nı merkezinde konumlandırarak ve Görsel 8.1'de görülen 5° hücum açısını verecek şekilde hazırlanmıştır.



Görsel 8.1. Vatoz İHA elden atış düzeneği

Ayrıca ek bir önlem olarak, düzeneğin atıcının elindeki yatay konumunun ayarlanması ve yere paralel şekilde tutulabilmesi için bir su terazisi plastik kelepçelerle düzeneğe sabitlenmiştir. Böylece uçuş hazırlıkları tamamlanmıştır.

8.2. Uçuş Testi ve Değerlendirmeler

Vatoz İHA'nın şekil değiştiren kanat ile uçuş testi, 11 Aralık 2022 tarihinde, Dr. İbrahim Yavuz Dal Pilotajında gerçekleştirilmiştir. Uçak 8.1 başlıklı bölümde açıklandığı gibi motosiklet üzerinden hareket almıştır. Uçuş testi 6 m/s rüzgâr şiddetinde gerçekleştirilmiştir. 30 metre irtifaya çıkıldıktan sonra, 200 metre uzunluk ve 100 metre genişlikte bir patternde uçuş yapılmıştır.

Uçuş sırasında herhangi bir trim verilmemiş ve yaklaşık %40 gaz kolunda seyir uçuşu gerçekleştirilmiştir. Uçağın hareketlerinde, konvansiyonel kanatlı uçuştan farklı bir durum hissedilmemiştir. Şekil değiştiren kanadın, elevonların hem simetrik hem de asimetrik hareketini başarıyla gerçekleştirdiği, uçağın konvansiyonel kanatlı uçuşuna

benzer bir uçuş karakteristiği görülmüştür. Görsel 8.2, 8.3, 8.4 ve 8.5'te uçuş testinden görüntüler yer almaktadır.

Yaklaşık 3 dakika 36 saniye süren test uçuşu, başarılı bir iniş ile tamamlanmış ve uçak muhafaza altına alınmıştır. Uçuş videosuna çevrimiçi olarak “<https://youtu.be/qO4vxypVH04>” bağlantısından erişilebilmektedir.



Görsel 8.2. Vatoz İHA havalanma anı



Görsel 8.3. Şekil değiştiren kanat ile uçuştan bir fotoğraf



Görsel 8.4. Son yaklaşma sürecinde kanadın görünümü



Görsel 8.5. Gövde üzerine başarıyla gerçekleştirilen iniş

9. SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR

9.1. Tez Çalışmasının Sonuçları

Tez çalışmasının sonuçları irdelenirken tezin motivasyonu ve amaçlarının da yeniden anılmasında fayda bulunmaktadır. Tez çalışmasında:

- Şekil değiştiren kanat teknolojisi karşısındaki ön yargılarla mücadele edilmesi,
- Doğadan esinlenme kullanılarak daha verimli tasarımlar geliştirilmesi,
- İnsansız hava araçlarında verimlilik artışı sağlayacak komponentlerin geliştirilmesi ana motivasyonlar olarak ortaya çıkmıştı.

Söz konusu ön yargılar, değişken yapıların komplekslik, ek ağırlık ve maliyet getirerek sağladıkları verimlilikten daha büyük sorunlara neden olan yapılar olduğu düşüncesinin hava aracı tasarımında yaygın bir görüş olduğu ifade edilmişti. Çalışma tamamlandıktan sonra bu ön yargılar ekseninde değerlendirmeye tabii tutulmuştur.

Komplekslik Değerlendirmesi:

Tez çalışması kapsamında tasarımı, üretimi ve uçuş testleri gerçekleştirilen insansız hava aracı ve şekil değiştiren kanatta, diğer çalışmalardan farklı bir artikülasyon metodu belirlenmiştir. Bu metot kompleksiteyi artıran fazladan dönen parça, elektromekanik ünite veya makine elemanı eklenmeden artikülasyonun sağlanmasını sağlamıştır. Patent başvurusuna da konu olan bu tasarım ile kanatta bulunan servomotor gövde içerisine çekilmiş ve normalde yapısal bir eleman olan arka spar gövdeden döndürülmüştür.

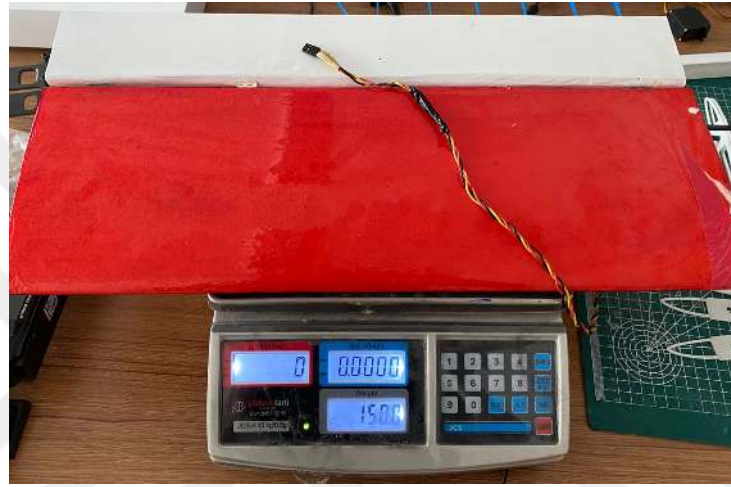
Ek olarak sadece kanat arka sparının gövdeye bağlandığı noktaya bir bearing eklenmiştir. Konvansiyonel kontrol yüzeylerinde kullanılan menteşeler ve servomotor hareketini ileten pull-push rod yapılarının ortadan kalktığı düşünüldüğünde bu bearing ağırlığının kompanse edildiği söylenebilir.

Kompleksite anlamında değerlendirildiğinde, menteşe ve pull-push rodların yuvalarından çıkma olasılığı ortadan kaldırıldığı için nitel bir görüşle, kompleksitenin azaldığı iddia edilebilir.

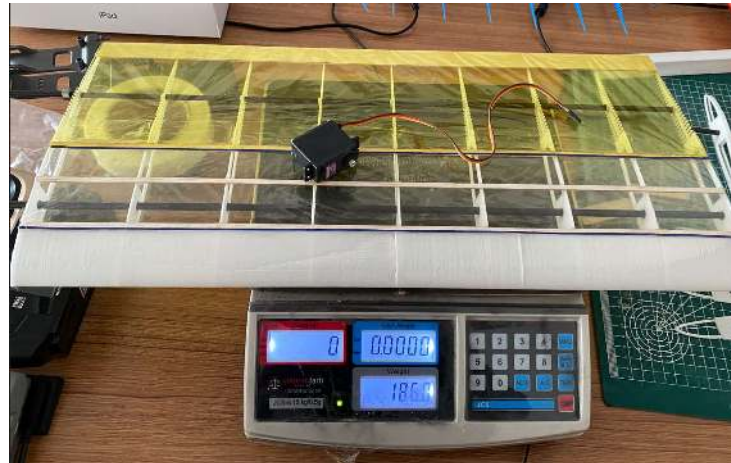
Ağırlık Değerlendirmesi:

Çalışmanın literatür bölümünde bazı çalışmalarda şekil değiştiren kanat uygulamasının verildiği ancak ağırlığın okuyucu ile paylaşılmadığı ifadesine yer verilmişti. Bazı çalışmalarda ise şekil değiştiren kanadın doğrudan eşdeğer bir konvansiyonel kanadı olmadığı için bu durum havada kalmıştır.

Vatoz İHA'ya ait konvansiyonel kanat ve şekil değiştiren kanat ağırlıkları, iki kanat da uçuş gerçekleştirdikten sonra, konvansiyonel kanat için 150 gram, şekil değiştiren kanat için 186 gram olarak ölçülmüştür. 36 gramlık bu ağırlık artışı, %24 kanat ağırlığı artışı anlamına gelmektedir. Görsel 9.1 ve 9.2'de tartı üzerinde görüntülere yer verilmiştir. Ağırlık artışında temel etken servomotorun değiştirilmesi olmuştur. Kanatta kullanılan servomotordan daha yüksek torka sahip bir servomotor gövde içerisine yerleştirilmiştir.



Görsel 9.1. Konvansiyonel kanat ağırlığı



Görsel 9.2. Şekil değiştiren kanat ağırlığı

Hem testler sürecinde hem de uçuşta kullanılan servomotorun torku düşünüldüğünde, aslında servomotor seçimi konusunda daha hassas bir çalışma ile daha hafif bir servomotor seçimi gerçekleştirilebileceği anlaşılmıştır. Görsel 9.3'te yer aldığı

gibi konvansiyonel Vatoz İHA kanadında kullanılan servomotor, şekil değiştiren kanatla birlikte tartıldığında 138,5 gram değeri ortaya çıkmıştır.



Görsel 9.3. Şekil değiştiren kanadın konvansiyonel servomotoru ile ağırlığı

Elde bulunduğu için tercih edilen bu iki servomotorun ara değerinde bir servomotor tespit edilerek bu çalışmaya özel olarak temin edildiği ve kullanıldığı durumda, 150-155 gram gibi bir değer ortaya çıkacaktır. Bu da konvansiyonel kanat ve balık kılıcı benzetimli şekil değiştiren kanadın birbirine denk ağırlıklarda üretilebileceği veya %10 ağırlık marjı içerisinde çekilebileceğini ortaya koymaktadır.

Maliyet Değerlendirmesi:

Çalışmanın tasarım aşamasından itibaren maliyet konusunda tek bir bakış açısı benimsenmiştir. Bu bakış açısı: şekil hafızalı kompozitler, piezoelektrik malzemeler kullanarak şekil değiştiren kanat uygulaması gerçekleştirilen çalışmaların aksine; maliyeti düşük, erişilebilirliği yüksek bir tasarım ve üretim süreci tasarlamaktır.

Vatoz İHA yapımında, artık çoğu tüketicinin evlerine bile aldığı üç boyutlu baskı cihazlarında kullanılan Lightweight PLA baskı malzemesi ana yapı malzemesi olarak kullanılmıştır. Bu malzeme ve üretim yöntemi aynı zamanda zaman maliyeti de düşünülerek belirlenmiştir.

Vatoz İHA şekil değiştiren kanatlarında ise rib ve hücum kenarı D kutusunda PLA baskı yapılmıştır. Kanat kaplamasını destekleyecek balsa ağacı plakalar lazer kesici ile kesilmiştir. Kanadın sparları için karbon fiber boru kullanılmıştır. Kanadın kaplaması için ise termoplastik model uçak kaplaması kullanılmıştır. Bu malzemeler arasında bir model uçak meraklısının erişemeyeceği bir malzeme veya üretim yöntemi bulunmamaktadır. Bunun yanı sıra, konvansiyonel kanatta kullanılan malzemelerle kıyaslandığında maliyet

anlamında büyük fark yaratacak hiçbir yapı bulunmamaktadır. Bu değerlendirmeler ışığında çalışmanın amaçlarına, maliyet anlamında ulaşıldığı ifade edilebilir.

Genel Değerlendirme:

Tez çalışması sürecinde bir iş akışı belirlenmiş ve bu iş akışı başarıyla gerçekleştirilmiştir. Alanyazında eksik olduğu tespit edilen ağırlık, maliyet ve komplekslik gibi konularda detaylı olarak durum tespiti yapılmıştır.

Çalışmanın kapsamında sınır tabaka enjeksiyonu, kanallı elektrik motoru ve harmanlanmış kanat gövde yapısı içeren özel ve yenilikçi bir insansız hava aracı tasarlanmıştır. Bu insansız hava aracının tasarlanması, çalışma kapsamında ikisi de uçan konvansiyonel bir kanat ve şekil değiştiren bir kanadın doğrudan kıyaslanabilmesine imkân sağlamıştır.

Şekil değiştiren bir kanat tasarlanması, üretilmesi ve analizlerinin yapılması gibi genel geçer bir akışı yerine daha detaylı bir süreç tercih edilmiştir. Böylece yine literatürde nadirliği ifade edilen, şekil değiştiren kanatla uçuş testleri konusunda da ortaya somut çıktılar koyulabilmiştir.

Vatoz İHA tasarımı harmanlanmış kanat gövde yapısına sahip olduğu için, kanatta aileron veya flap değil, elevon hibrit kontrol yüzeyinin hareketinin gerçekleştirilmesi gerekmiştir. Yani şekil değiştiren kanat hem simetrik hem de asimetrik durumlarda test ve uçuşu başarmıştır. Bu bağlamda, Vatoz İHA'nın uçuşunun aynı zamanda hiçbir kontrol yüzeyi bulunmayan bir sabit kanatlı uçağın -araştırmacının internet sorgularına göre- ilk uçuşu olma özelliği ile havacılık ilkleri arasında yer aldığı ifade edilebilir.

9.2. Gelecek Çalışmalar

Gelecek çalışmalar konusunda planlamalar ve öneriler birkaç noktada yoğunlaşmaktadır. Bu çalışmalar tez sürecinin sonrasında ve sürecin zaman baskısının dışında, araştırmacı tarafından sürdürülecektir.

Vatoz İHA gövde baskısı için uygun bir malzeme olsa da kanat riblerinin baskısında PLA tercihindan daha uygun seçenekler bulunabilir. Daha uzun ömür ve daha yüksek sıcaklık dayanımına sahip bir malzeme kullanımı balık kılçığı benzetimli şekil değiştiren kanat uygulamaları için yerinde olacaktır. PLA malzemesinin alternatifi olabilecek birçok üç boyutlu baskı sarf malzemesi geliştirilmektedir. Bu malzemelerin baskısını yapabilecek üç boyutlu baskı cihazları ve bu sarf malzemelerin temini ile daha uygun malzemelerin tespiti gelecek çalışmalar arasında yer almaktadır.

Şekil değiştiren kanadın kaplanması için tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmada model uçak kaplama filmi kullanılmıştır. Bu kaplama filmi riblere yapışmak konusunda sorunlar çıkartabildiği gibi yer yer kırışıklıkların da oluşmasına neden olmuştur. Ağırlık ve maliyet konusunda hedeflere sadık kalınarak yeni kaplama tiplerinin araştırılması veya kaplamanın kanat iskeleti ile birleşiminde daha uygun tekniklerin geliştirilmesi gelecek çalışmalar arasında yer almaktadır.

Çalışmada gerçekleştirilen uçuş testlerinde nitel gözlemler ve pilottan alınan geri dönüşler haricinde veri toplanamamıştır. Bir uçuş kartı entegrasyonu ve çeşitli sensörlerin yerleştirilmesi ile yatış hareketinin açı/saniye mertebesinde ölçülebilmesi, stall hızındaki ve seyir hızındaki değişikliklerin gözlemlenebilmesi ve motor tarafından çekilen akım değerleri ölçülebilir. Her iki kanat ile aynı uçuş patterni uçularak bu verilerin otopilot kontrolünde toplanması literatüre çok değerli bilgiler sağlayacaktır. Bu entegrasyonun gerçekleştirilmesi ve bu çalışmaların gelecek araştırma makaleleri olarak yayınlanması planlanmaktadır.

Kanadın açıklığı boyunca uzanan bir kontrol hareketinde, kanat ucuna doğru hareketin büyüklüğünü azaltmak kanat ucu girdaplarının oluşumunu azaltmaya imkân sağlayacaktır. Kanat kökünden, kanat ucuna doğru gittikçe çapı artan bir arka spar kullanılarak, şekil değiştirme hareketinin büyüklüğünü bölgesel olarak değiştirmek ve bunun sonuçlarını incelemek, çalışmanın yönelebileceği bir başka rota olarak belirlenmiştir.

Tez kapsamında gerçekleştirilen balık kılçığı benzetimli şekil değiştiren kanat tasarımının daha büyük İHA'lara, genel havacılık uçaklarına ve hatta yolcu uçaklarına uygulanabilirliğinin incelenmesi ve ölçeklemenin mümkün olup olmayacağı da bir başka çalışma kapsamında incelenecektir.

KAYNAKÇA

- [1] M. R. Singh, "Civil aviation in India: historical perspective," *Asian Journal of Research in Social Sciences and Humanities*, vol. 3, no. 12, pp. 199-206, 2013.
- [2] S. Lee and Y. Choi, "Comparison of topographic surveying results using a fixed-wing and a popular rotary-wing unmanned aerial vehicle (drone)," *Tunnel and Underground Space*, vol. 26, no. 1, pp. 24-31, 2016.
- [3] D. Lentink et al., "How swifts control their glide performance with morphing wings," *Nature*, vol. 446, no. 7139, pp. 1082-1085, 2007.
- [4] Y. Yu and Z. Guan, "Learning from bat: aerodynamics of actively morphing wing," *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, vol. 5, no. 1, pp. 13-15, 2015.
- [5] G. K. Taylor et al., "Wing morphing in insects, birds and bats: mechanism and function," in *Morphing Aerospace vehicles and structures*, 2012, pp. 11-40.
- [6] A. Dorobantu et al., "Frequency domain system identification for a small, low-cost, fixed-wing UAV," in *AIAA guidance, navigation, and control conference*, 2011, p. 6719.
- [7] R. C. Busan et al., "Wind tunnel testing techniques for a tandem tilt-wing, distributed electric propulsion VTOL aircraft," in *AIAA SciTech 2021 Forum*, 2021, p. 1189.
- [8] R. Alviani, G. A. Blaisdell, and J. Poggie, "Computational analysis of planned high-speed swept wing-elevon experiments," in *AIAA SCITECH 2022 Forum*, 2022, p. 2198.
- [9] Y. H. Lee and B. S. Liu, "Inflight workload assessment: Comparison of subjective and physiological measurements," *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, vol. 74, no. 10, pp. 1078-1084, 2003.
- [10] A. Murrieta-Mendoza et al., "Performance DataBase creation using a level D simulator for Cessna Citation X aircraft in cruise regime," in *IASTED Modeling, Identification and Control Conference*, Innsbruck, Austria, 2015, pp. 2015-826.
- [11] A. Dinc, R. Taher, M. Moayyedian, A. Bushehri, A. Alruwayeh, A. Alsaeedi et al., "A Performance Review of a High Altitude Long Endurance Drone," *Int. J. Prog. Sci. Technol.*, vol. 24, no. 1, pp. 32-39, Jan. 2020.
- [12] R. Martinez-Val and E. Perez, "Optimum cruise lift coefficient in initial design of jet aircraft," *J. Aircraft*, vol. 29, no. 4, pp. 712-714, Jul.-Aug. 1992.
- [13] M. Sadraey, "Wing design," in *Aircraft Design: A Systems Engineering Approach*, Wiley, 2012, pp. 808.
- [14] M. Selig, J. Guglielmo, A. Broern and P. Giguere, "Experiments on airfoils at low Reynolds numbers," in *34th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, NV, USA, Jan. 1996, p. 62.
- [15] J. Morgado, R. Vizinho, M. A. R. Silvestre and J. C. Páscoa, "XFOIL vs CFD performance predictions for high lift low Reynolds number airfoils," *Aerosp. Sci. Technol.*, vol. 52, pp. 207-214, Apr. 2016.
- [16] D. Reckzeh, "Aerodynamic design of the high-lift-wing for a Megaliner aircraft," *Aerosp. Sci. Technol.*, vol. 7, no. 2, pp. 107-119, Mar. 2003.

- [17] W. McCormick, *Aerodynamics, Aeronautics, and Flight Mechanics*, 2nd ed. Wiley, 1995.
- [18] M. Abdulrahim, "Flight dynamics and control of an aircraft with segmented control surfaces," in 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, USA, Jan. 2003, p. 128.
- [19] A. K. Stowers and D. Lentink, "Folding in and out: passive morphing in flapping wings," *Bioinspir. Biomim.*, vol. 10, no. 2, pp. 025001, Apr. 2015.
- [20] C. Harvey, V. B. Baliga, C. D. Goates, D. F. Hunsaker and D. J. Inman, "Gull-inspired joint-driven wing morphing allows adaptive longitudinal flight control," *J. R. Soc. Interface*, vol. 18, no. 179, pp. 20210132, Feb. 2021.
- [21] D. Li, S. Zhao, A. Da Ronch, J. Xiang, J. Drofelnik, Y. Li, and R. De Breuker, "A review of modelling and analysis of morphing wings," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 100, pp. 46-62, 2018.
- [22] Scienceworld, "Can You Flap and Fly?" ASTC Science World Society, 2022.
- [23] S. Wakayama, "Subsonic Multi-Role Aircraft," in 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, p. 1513, 2006.
- [24] S. Joshi, Z. Tidwell, W. Crossley, and S. Ramakrishnan, "Comparison of morphing wing strategies based upon aircraft performance impacts," in 45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics & materials conference, p. 1722, 2004.
- [25] C. Harvey, V. B. Baliga, P. Lavoie, and D. L. Altshuler, "Wing morphing allows gulls to modulate static pitch stability during gliding," *Journal of the Royal Society Interface*, vol. 16, no. 150, p. 20180641, 2019.
- [26] M. L. Rausch, *The Wright brothers and the airplane*. Gareth Stevens, 2007.
- [27] M. Cooper, *The Birth of Independent Air Power: British Air Policy in the First World War*. Routledge, 2021.
- [28] N. A. Orser and W. G. Glascoff III, *Civil Aviation and Facilities*. Aerospace Education II, 1969.
- [29] A. Contreras, S. Yiğit, K. Özay, and T. N. Veziroğlu, "Hydrogen as aviation fuel: a comparison with hydrocarbon fuels," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 22, no. 10-11, pp. 1053-1060, 1997.
- [30] W. G. Bozin, "Improving the Management Control of Aviation Fleet Maintenance Funds," *NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL MONTEREY CA*, 1981.
- [31] A. Waitz, J. Townsend, J. Cutcher-Gershenfeld, E. Greitzer, and J. Kerrebrock, "Aviation & the Environment," in Report to the United States Congress, 2003.
- [32] J. Lee, "Can we accelerate the improvement of energy efficiency in aircraft systems?," *Energy Conversion and Management*, vol. 51, no. 1, pp. 189-196, Jan. 2010.
- [33] F. A. Administrator, "Aviation emissions, impacts and mitigation: A primer," Office of Environment and Energy, 2015.
- [34] D. Li et al., "A review of modelling and analysis of morphing wings," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 100, pp. 46-62, Jan. 2018.

- [35] R. Pecora, "Morphing wing flaps for large civil aircraft: Evolution of a smart technology across the Clean Sky program," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 34, no. 7, pp. 13-28, Jul. 2021.
- [36] R. Pecora, F. Amoroso, and L. Lecce, "Effectiveness of wing twist morphing in roll control," *Journal of Aircraft*, vol. 49, no. 6, pp. 1666-1674, Nov. 2012.
- [37] H. Garcia, M. Abdulrahim, and R. Lind, "Roll control for a micro air vehicle using active wing morphing," in *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, 2003, p. 5347.
- [38] G. X. Dussart, S. Y. Yusuf, and M. M. Lone, "Effect of wingtip morphing on the roll mode of a flexible aircraft," in *2018 AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 2018, p. 1683.
- [39] E. Ozbek, G. Yalin, M. U. Karaoglan, S. Ekici, C. O. Colpan, and T. H. Karakoc, "Architecture design and performance analysis of a hybrid hydrogen fuel cell system for unmanned aerial vehicle," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 30, pp. 16453-16464, Jul. 2021.
- [40] U. Ofoma and C. Wu, "Design of a fuel cell powered UAV for environmental research," in *AIAA 3rd "Unmanned Unlimited" Technical Conference, Workshop and Exhibit*, 2004, p. 6384.
- [41] Morton, S., D'Sa, R., & Papanikolopoulos, N. (2015, Sep). Solar powered UAV: Design and experiments. In *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (pp. 2460-2466). IEEE.
- [42] D. Ajmera, M. Saroliya, and P. Arora, "Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)," *Int. Res. J. Innov. Eng. Technol.*, vol. 6, no. 1, pp. 22, 2022.
- [43] A. Rodriguez, "Morphing Aircraft Technology Survey," presented at the 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reston, Virginia, 8-11 January 2007, AIAA Paper 2007-0833.
- [44] R. K. Schmidt, "Design of Aircraft Landing Gear," *SAE Int.*, 2021.
- [45] A. C. Knowles, B. Krauskopf, and M. Lowenberg, "Numerical continuation analysis of a three-dimensional aircraft main landing gear mechanism," *Nonlinear Dyn.*, vol. 71, no. 1, pp. 331–352, 2013.
- [46] L. Morrison, A. D. Rodewald, G. Voelker, M. R. Colón, and J. F. Prather, Eds., *Ornithology: Foundation, Analysis, and Application*. JHU Press, 2018.
- [47] A. K. Jha and J. N. Kudva, "Morphing aircraft concepts, classifications, and challenges," in *Smart Structures and Materials 2004: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies*, vol. 5388. SPIE, 2004, pp. 213–224.
- [48] S. A. Rizzi, R. G. Rackl, and E. V. Andrianov, "Flight test measurements from the Tu-144LL structure/cabin noise follow-on experiment," *NASA/TM-2000-209859*, 2000.
- [49] T. A. Weisshaar, "Morphing aircraft systems: historical perspectives and future challenges," *J. Aircraft*, vol. 50, no. 2, pp. 337–353, 2013.

- [50] Min, Z., Kien, V. K., & Richard, L. J. (2010). Aircraft morphing wing concepts with radical geometry change. *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering*, 3(3), 188-195.
- [51] Reich, G., & Sanders, B. (2007). Introduction to morphing aircraft research. *Journal of aircraft*, 44(4), 1059-1059.
- [52] Ha, T. H., Lee, K., & Hwang, J. T. (2019). Large-scale design-economics optimization of eVTOL concepts for urban air mobility. In *AIAA Scitech 2019 Forum* (p. 1218).
- [53] Nathen, P., Strohmayer, A., Miller, R., Grimshaw, S. D., & Taylor, J. (2021). Architectural performance assessment of an electric vertical take-off and landing (e-VTOL) aircraft based on a ducted vectored thrust concept.
- [54] Dalamagkidis, K., Valavanis, K. P., & Piegls, L. A. (Eds.). (2009). *On integrating unmanned aircraft systems into the national airspace system: issues, challenges, operational restrictions, certification, and recommendations*. Dordrecht: Springer Netherlands.
- [55] Anderson, M. W. (1996). Flight test certification of multipurpose head-up display for general aviation aircraft. *Journal of aircraft*, 33(3), 532-538.
- [56] Giones, F., & Brem, A. (2017). From toys to tools: The co-evolution of technological and entrepreneurial developments in the drone industry. *Business Horizons*, 60(6), 875-884.
- [57] Lee, S., & Choi, Y. (2016). Reviews of unmanned aerial vehicle (drone) technology trends and its applications in the mining industry. *Geosystem Engineering*, 19(4), 197-204.
- [58] Salamí, E., Barrado, C., & Pastor, E. (2014). UAV flight experiments applied to the remote sensing of vegetated areas. *Remote Sensing*, 6(11), 11051-11081.
- [59] Otto, A., Agatz, N., Campbell, J., Golden, B., & Pesch, E. (2018). Optimization approaches for civil applications of unmanned aerial vehicles (UAVs) or aerial drones: A survey. *Networks*, 72(4), 411-458.
- [60] Barbarino, S., Bilgen, O., Ajaj, R. M., Friswell, M. I., & Inman, D. J. (2011). A review of morphing aircraft. *Journal of intelligent material systems and structures*, 22(9), 823-877.
- [61] R. Nangia, M. Palmer, and C. Tilmann, "Unconventional high aspect ratio joined-wing aircraft with aft-and forward-swept wing-tips," in *41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 2003, p. 605.
- [62] T. Elijah, R. S. Jamisola, Z. Tjiparuro, and M. Namoshe, "A review on control and maneuvering of cooperative fixed-wing drones," *International Journal of Dynamics and Control*, vol. 9, no. 3, pp. 1332-1349, 2021.
- [63] J. B. Samuel and D. Pines, "Design and testing of a pneumatic telescopic wing for unmanned aerial vehicles," *Journal of Aircraft*, vol. 44, no. 4, pp. 1088-1099, 2007.
- [64] J. Mestrinho, P. Gamboa, and P. Santos, "Design optimization of a variable-span morphing wing for a small UAV," in *52nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 19th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 13th*, 2011, p. 2025.

- [65] R. M. Ajaj, E. S. Flores, M. I. Friswell, G. Allegri, B. K. S. Woods, A. T. Isikveren, and W. G. Dettmer, "The Zigzag wingbox for a span morphing wing," *Aerospace Science and Technology*, vol. 28, no. 1, pp. 364-375, 2013.
- [66] R. M. Ajaj, M. I. Friswell, M. Bouchak, and W. Harasani, "Span morphing using the GNATSpar wing," *Aerospace Science and Technology*, vol. 53, pp. 38-46, 2016.
- [67] R. M. Ajaj and G. K. Jankee, "The Transformer aircraft: A multimission unmanned aerial vehicle capable of symmetric and asymmetric span morphing," *Aerospace Science and Technology*, vol. 76, pp. 512-522, 2018.
- [68] R. Ajaj, M. S. Parancheerivilakkathil, and M. Amoozgar, "ASAPP: A polymorphing wing capable of Active Span extension And Passive Pitch," in *AIAA Scitech 2021 Forum*, 2021, p. 0621.
- [69] J. Jeong and J. S. Bae, "Wind tunnel & Flight Test of VCCS Morphing UAV," in *2022 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, June 2022, pp. 1424-1431.
- [70] O. Kozlov, "Design and Modeling of the Fowler Flap With Adaptive Elements," in *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Jan. 2006, vol. 47659, pp. 73-79.
- [71] D. Perkins, J. Reed, and E. Havens, "Morphing wing structures for loitering air vehicles," in *45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference*, April 2004, p. 1888.
- [72] S. Barbarino, F. Gandhi, and S. D. Webster, "Design of extendable chord sections for morphing helicopter rotor blades," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 22, no. 9, pp. 891-905, 2011.
- [73] S. Siouris and N. Qin, "Study of the effects of wing sweep on the aerodynamic performance of a blended wing body aircraft," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, vol. 221, no. 1, pp. 47-55, 2007.
- [74] G. V. Foster and O. A. Morris, "Stability and Control Characteristics at a Mach Number of 1.97 of an Airplane Configuration Having Two Types of Variable-Sweep Wings," *NASA-TM-X-323*, 1960.
- [75] B. Spencer, "Stability and Control Characteristics at Low Subsonic Speeds of an Airplane Configuration Having Two Types of Variable-Sweep Wings," *National Aeronautics and Space Administration*, 1960.
- [76] P. Panagiotou, S. Antoniou, and K. Yakinthos, "Cant angle morphing winglets investigation for the enhancement of the aerodynamic, stability and performance characteristics of a tactical Blended-Wing-Body UAV," *Aerospace Science and Technology*, vol. 123, article no. 107467, 2022.
- [77] C. Greatwood, A. Waldock, and T. Richardson, "Perched landing manoeuvres with a variable sweep wing UAV," *Aerospace Science and Technology*, vol. 71, pp. 510-520, 2017.
- [78] G. Yang, H. Guo, H. Xiao, Y. Bai, and R. Liu, "Design and Analysis of a Variable-sweep Morphing Wing for UAV Based on a Parallelogram Mechanism," in *2021*

- IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Dec. 2021, pp. 1650-1655.
- [79] O. Stodieck, J. E. Cooper, P. M. Weaver, and P. Kealy, "Aeroelastic tailoring of a representative wing box using tow-steered composites," *AIAA Journal*, vol. 55, no. 4, pp. 1425-1439, 2017.
 - [80] H. Garcia, M. Abdulrahim, and R. Lind, "Roll control for a micro air vehicle using active wing morphing," in *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, Aug. 2003, p. 5347.
 - [81] A. Schlup, P. Bishay, T. McLennan, C. Barajas, B. Talebian, G. Thatcher, et al., "MataMorph 2: A new experimental UAV with twist-morphing wings and camber-morphing tail stabilizers," in *AIAA Scitech 2021 Forum*, Jan. 2021, p. 0584.
 - [82] K. Pham and E. A. Peraza Hernandez, "Modeling and design exploration of a morphing wing enabled by a twisting tensegrity mechanism," in *AIAA Scitech 2021 Forum*, Jan. 2021, p. 0099.
 - [83] Tahani, M. Masdari, and A. Bargestan, "Aerodynamic performance improvement of WIG aircraft," *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, vol. 89, no. 1, pp. 120-132, 2017.
 - [84] K. Pradhan and R. Nehra, "Challenge and advantage of materials in design and fabrication of composite UAV," in *Proc. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 455, no. 1, p. 012005, Dec. 2018.
 - [85] Y. Qu, Z. Xing, Y. Zhang, and Z. Yu, "Real-time wind vector estimation for a micro UAV," in *Proc. 2017 Int. Conf. Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pp. 1716-1721, IEEE, Jun. 2017.
 - [86] M. Abdulrahim and R. Lind, "Flight testing and response characteristics of a variable gull-wing morphing aircraft," in *Proc. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, p. 5113, Aug. 2004.
 - [87] N. Nigam, Y. Zhang, P. Chen, G. Wolfe, T. Pillsbury, N. M. Wereley, and P. M. Suh, "Adaptive control and actuation system development for biomimetic morphing," in *Proc. 24th AIAA/AHS Adaptive Structures Conference*, p. 1084, 2016.
 - [88] M. Wu, T. Xiao, H. Ang, and H. Li, "Investigation of a morphing wing solar-powered unmanned aircraft with enlarged flight latitude," *Journal of Aircraft*, vol. 54, no. 5, pp. 1996-2004, 2017.
 - [89] M. Wu, T. Xiao, H. Ang, and H. Li, "Optimal flight planning for a Z-shaped morphing-wing solar-powered unmanned aerial vehicle," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 41, no. 2, pp. 497-505, 2018.
 - [90] B. Lazos and K. Visser, "Aerodynamic comparison of Hyper-Elliptic cambered span (HECS) Wings with conventional configurations," in *Proc. 24th AIAA Applied Aerodynamics Conference*, p. 3469, Jun. 2006.
 - [91] J. Manzo and E. Garcia, "Demonstration of an in situ morphing hyperelliptical cambered span wing mechanism," *Smart Materials and Structures*, vol. 19, no. 2, p. 025012, 2010.

- [92] J. Anderson, EBOOK: Fundamentals of Aerodynamics (SI units). McGraw Hill, 2011.
- [93] M. Secanell, A. Suleman, and P. Gamboa, "Design of a morphing airfoil for a light unmanned aerial vehicle using high-fidelity aerodynamics shape optimization," in Proc. 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, p. 1891, Apr. 2005.
- [94] W. Zhao, M. Jrad, R. Gupta, and R. K. Kapania, "Multidisciplinary design analysis and optimization of performance adaptive aeroelastic wings," in AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference, 2017, p. 1392.
- [95] A. R. Jones, N. M. Bakhtian, and H. Babinsky, "Low Reynolds number aerodynamics of leading-edge flaps," *Journal of Aircraft*, vol. 45, no. 1, pp. 342-349, 2008.
- [96] T. Karagounis, T. Maxworthy, and G. SPEDDING, "Generation and control of separated vortices over a delta wing by means of leading edge flaps," in 2nd Shear Flow Conference, 1989, p. 997.
- [97] H. C. Smith and J. W. Schneider, "Wind-tunnel tests of flap gap seals on a two-dimensional wing model," *Journal of Aircraft*, vol. 33, no. 5, pp. 1026-1028, 1996.
- [98] H. Smith and J. Schneider, "Wind tunnel tests of the aerodynamic effects of flap gap seals on light aircraft," in Aircraft Engineering, Technology, and Operations Congress, 1995, p. 3973.
- [99] P. Marqués, "Advanced UAV aerodynamics, flight stability and control: an Introduction," in Advanced UAV aerodynamics, flight stability and control: novel concepts, theory and applications, 2017, vol. 1.
- [100] A. M. Pankonien and D. J. Inman, "Spanwise morphing trailing edge on a finite wing," in Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2015, 2015, vol. 9431, pp. 248-262.
- [101] Y. Guo and R. H. Thomas, "On aircraft trailing edge noise," in 25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2019, p. 2610.
- [102] D. Cadogan, T. Smith, F. Uhelsky, and M. Mackusick, "Morphing inflatable wing development for compact package unmanned aerial vehicles," in 45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference, 2004, p. 1807.
- [103] A. Zhao, H. Zou, H. Jin, and D. Wen, "Structural design and verification of an innovative whole adaptive variable camber wing," *Aerospace Science and Technology*, vol. 89, pp. 11-18, 2019.
- [104] E. J. Abdullah, C. Bil, and S. Watkins, "Testing of adaptive airfoil for UAV using shape memory alloy actuators," in Proceedings of the 27th International Congress of the Aeronautical Sciences, Nice, France, 2010, pp. 19-24.
- [105] D. Communier, R. M. Botez, and T. Wong, "Experimental validation of a new morphing trailing edge system using Price-Paidoussis wind tunnel tests," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 32, no. 6, pp. 1353-1366, 2019.

- [106] H. Takahashi, T. Yokozeki, and Y. Hirano, "Development of variable camber wing with morphing leading and trailing sections using corrugated structures," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 27, no. 20, pp. 2827-2836, 2016.
- [107] S. A. Meguid, Y. Su, and Y. Wang, "Complete morphing wing design using flexible-rib system," *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, vol. 13, no. 1, pp. 159-171, 2017.
- [108] B. K. S. Woods and M. I. Friswell, "Preliminary investigation of a fishbone active camber concept," in *Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*, ASME, 2012, vol. 45103, pp. 555-563.
- [109] Dayyani, B. K. Woods, M. I. Friswell, and H. H. Khodaparast, "The Optimal Design of a Coated Corrugated Skin for the FishBAC Morphing Wing," in *24th International Conference on Adaptive Structures and Technologies*, Oct. 2013.
- [110] B. K. Woods and M. I. Friswell, "Structural characterization of the fish bone active camber morphing airfoil," in *22nd AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference*, 2014, p. 1122.
- [111] B. K. S. Woods, O. Bilgen, and M. I. Friswell, "Wind tunnel testing of the fish bone active camber morphing concept," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 25, no. 7, pp. 772-785, 2014, doi: 10.1177/1045389X14521700.
- [112] A. E. Rivero, P. M. Weaver, J. E. Cooper, and B. K. Woods, "Progress on the Design, Analysis and Experimental Testing of a Composite Fish Bone Active Camber Morphing Wing," in *28th International Conference on Adaptive Structures and Technologies (ICAST)*, Oct. 2017, pp. 1-11.
- [113] D. Scopelliti, J. M. M. Gou, C. Bil, R. Carrese, and P. Marzocca, "Design, analysis and experimental testing of a morphing wing," in *Proceedings of the 25th AIAA/AHS Adaptive Structures Conference*, 2017, pp. 1-8.
- [114] C. Wang, J. Zhang, A. D. Shaw, M. Amoozgar, M. I. Friswell, and B. K. Woods, "Integration of the Spiral Pulley Negative Stiffness Mechanism into the FishBAC Morphing Wing," in *9th ECCOMAS Them. Conf. Smart Struct. Mater. (SMART 2019)*, Paris, France, 2019.
- [115] A. E. Rivero, S. Fournier, M. Manolesos, J. E. Cooper, and B. Woods, "Wind tunnel comparison of flapped and FishBAC camber variation for lift control," in *AIAA SciTech 2020 Forum*, Jan. 2020, p. 1300.
- [116] Wong, "Aerodynamic performance comparison of a conventional UAV wing and a FishBAC morphing wing," Ph.D. dissertation, RMIT University, Melbourne, Australia, 2021.
- [117] E. Rivero, S. Fournier, R. M. Heeb, and B. K. S. Woods, "Design, manufacture and wind tunnel test of a modular FishBAC wing with novel 3D printed skins," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 2, p. 652, Jan. 2022, doi: 10.3390/app12020652.
- [118] E. Rivero, S. Fournier, M. Manolesos, J. E. Cooper, and B. Woods, "Wind tunnel comparison of flapped and FishBAC camber variation for lift control," in *AIAA Scitech 2020 Forum*, Reston, VA, USA, 6-10 Jan. 2020, p. 301.
- [119] M. S. A. M. Nor, M. Aliff, and N. Samsiah, "A review of a biomimicry swimming robot using smart actuator," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 12, no. 11, 2021.

- [120] Hargroves and M. H. Smith, "Innovation inspired by nature Biomimicry," *Ecos*, no. 129, pp. 27-30, 2006.
- [121] E. Özbek, G. Yalin, S. Ekici, and T. H. Karakoc, "Evaluation of design methodology, limitations, and iterations of a hydrogen fuelled hybrid fuel cell mini UAV," *Energy*, vol. 213, p. 118757, Sep. 2020.
- [122] Turk, E. Ozbek, S. Ekici, and T. H. Karakoc, "A conceptual design of a solar powered UAV and assessment for continental climate flight conditions," *International Journal of Green Energy*, vol. 19, no. 6, pp. 638-648, Mar. 2022.
- [123] G. Zhou, J. Yang, X. Li, and X. Yang, "Advances of flash LiDAR development onboard UAV," *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 39, pp. B3-1083-B3-1087, Aug. 2012.
- [124] D. Keidel, G. Molinari, and P. Ermanni, "Aero-structural optimization and analysis of a camber-morphing flying wing: Structural and wind tunnel testing," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 30, no. 6, pp. 908-923, Mar. 2019.
- [125] Dehpanah and A. Nejat, "The aerodynamic design evaluation of a blended-wing-body configuration," *Aerospace Science and Technology*, vol. 43, pp. 96-110, 2015.
- [126] Liebeck, M. Page, and B. Rawdon, "Blended-wing-body subsonic commercial transport," in *36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 1998, p. 438.
- [127] O. Gur and A. Rosen, "Optimizing electric propulsion systems for unmanned aerial vehicles," *Journal of Aircraft*, vol. 46, no. 4, pp. 1340-1353, 2009.
- [128] E. C. Suiçmez, "Full Envelope Nonlinear Controller Design for a Novel Electric VTOL (eVTOL) Air-taxi via INDI Approach Combined with CA," 2021.
- [129] D. Darrah, J. Eppler, W. Liu, and W. A. Anemaat, "Electric Ducted Fan Design and Testing for High Performance UAV Integration," in *AIAA Scitech 2020 Forum*, 2020, p. 0017.
- [130] A. Plas, D. Crichton, M. Sargeant, T. Hynes, E. Greitzer, C. Hall, and V. Madani, "Performance of a boundary layer ingesting (BLI) propulsion system," in *45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 2007, p. 450.
- [131] T. Leifsson, "Multidisciplinary design optimization of low-noise transport aircraft," Ph.D. dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2006.
- [132] K. Moon, Y. E. Tan, J. Hwang, and Y. J. Yoon, "Application of 3D printing technology for designing light-weight unmanned aerial vehicle wing structures," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, vol. 1, no. 3, pp. 223-228, 2014.
- [133] N. A. Ahmed and J. R. Page, "Manufacture of an unmanned aerial vehicle (UAV) for advanced project design using 3D printing technology," in *Applied Mechanics and Materials*, vol. 397, 2013, pp. 970-980.
- [134] U. Ozdemir, Y. O. Aktas, A. Vuruskan, Y. Dereli, A. F. Tarhan, K. Demirbag, et al., "Design of a commercial hybrid VTOL UAV system," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 74, no. 1, pp. 371-393, 2014.

- [135] Chrust, E. Laurendeau, and L. Ostiguy, "Accelerating low-fidelity aerodynamic codes on multi-and many-core architectures," *The Journal of Supercomputing*, vol. 71, no. 9, pp. 3456-3481, Sep. 2015.
 - [136] Kim, "System identification for coupled fluid-structure: Aerodynamics is aeroelasticity minus structure," *AIAA Journal*, vol. 49, no. 3, pp. 503-512, Mar. 2011.
 - [137] R. Albertani et al., "Development of reliable and mission capable micro air vehicles," presented at the 9th International Micro Air Vehicle Competition, Seoul, South Korea, 2005.
 - [138] Chhari et al., "Aerodynamic and bending analysis of low-speed airfoils at high Reynolds number," *Materials Today: Proceedings*, vol. xxxx, pp. not yet available, Sep. 2022. doi: 10.1016/j.matpr.2022.09.381.
 - [139] W. Niu, Y. Zhang, H. Chen, and M. Zhang, "Numerical study of a supercritical airfoil / wing with variable-camber technology," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 33, no. 7, pp. 1850-1866, Jul. 2020. doi: 10.1016/j.cja.2020.01.008.
 - [140] W. Du et al., "The effects of surface modification on aerodynamic characteristics of airfoil," *International Journal of Thermofluids*, vol. 16, no. September, article no. 100208, Sep. 2022. doi: 10.1016/j.ijft.2022.100208.
 - [141] Ruochen, W.A.N.G., Xiaoping, M.A., Zhang, G., Pei, Y.I.N.G., & Xiangyu, W.A.N.G. (2022). Numerical investigation of co-flow jet airfoil with parabolic flap. *Chinese Journal of Aeronautics*. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2022.03.007>
 - [142] Deng and R. K. Agarwal, "Numerical simulation of DLR-F6 wing-body flow field in ground effect," *Computers and Fluids*, vol. 245, article no. 105576, Apr. 2022. doi: 10.1016/j.compfluid.2022.105576.
 - [143] Vakilipour, H. Zarafshani, and J. Al-zaili, "Numerical study of longitudinal vein effects on the aerodynamic characteristics of a corrugated bio-airfoil," *Computers and Fluids*, vol. 216, article no. 104821, Jan. 2021. doi: 10.1016/j.compfluid.2020.104821.
 - [144] R. I. Sears, "Wind-tunnel investigation of control-surface characteristics I: effect of gap on the aerodynamic characteristics of an NACA 0009 airfoil with a 30-percent-chord plain flap," *National Advisory Committee for Aeronautics*, Washington, DC, USA, Tech. Rep. NACA-WR-L-377, 1941.
 - [145] A. E. Rivero et al., "Experimental aerodynamic comparison of active camber morphing and trailing-edge flaps," *AIAA Journal*, vol. 59, no. 7, pp. 2627-2640, Jul. 2021.
 - [146] P. Poonsong, "Design and analysis of multi-section variable camber wing," M.S. thesis, Univ. of Maryland, College Park, MD, USA, 2004.
- http-1:** https://en.wikipedia.org/wiki/Variable-sweep_wing (Erişim tarihi: 17.09.2022)
- http-2:** <https://www.flyingmag.com/faa-certifies-boeing-777-folding-wingtips/> (Erişim tarihi: 19.09.2022)
- http-3:** https://tr.wikipedia.org/wiki/McDonnell_Douglas_AV-8B_Harrier_II (Erişim tarihi: 19.09.2022)

http-4: https://en.wikipedia.org/wiki/Bell_Boeing_V-22_Osprey (Erişim tarihi: 19.09.2022)

http-5: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4987107> (Erişim tarihi: 07.10.2022)

http-6: <https://leehamnews.com/2020/09/21/airbus-announces-zero-emission-airliner-concepts/> (Erişim tarihi: 07.10.2022)

http-7: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=pw51-pw> (Erişim tarihi: 07.11.2022)

http-8: <https://www.amazon.com/VGEBY-Brushless-QF2611%E2%80%99150mm-Compatible-Helicopter/dp/B097RFMZ4D?th=1> (Erişim tarihi: 07.11.2022)

http-9: <http://www.xflr5.tech/xflr5.htm> (Erişim tarihi: 12.11.2022)

http-10: <https://www.tytorobotics.com/pages/series-1520> (Erişim tarihi: 15.11.2022)

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Emre ÖZBEK

Yabancı Dil: İngilizce

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2015, Anadolu Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Gövde Motor Bakımı, Lisans
- 2018, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uçak Gövde Motor Bakımı, Yüksek Lisans
- 2019, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Porsuk Meslek Yüksekokulu, İnsansız Hava Aracı Teknolojisi ve Operatörlüğü Programı, Öğretim Görevlisi
- 2022, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Uçak Gövde Motor Bakım Anabilim Dalı (Doktora)

Yayın Faaliyetleri:

- Özbek, E., Yalin, G., Ekici, S., & Karakoc, T. H. (2020). Evaluation of design methodology, limitations, and iterations of a hydrogen fuelled hybrid fuel cell mini UAV. Energy, 213, 118757.
- Ozbek, E., Yalin, G., Karaoglan, M. U., Ekici, S., Colpan, C. O., & Karakoc, T. H. (2021). Architecture design and performance analysis of a hybrid hydrogen fuel cell system for unmanned aerial vehicle. International Journal of Hydrogen Energy, 46(30), 16453-16464.
- Balli, O., Ozbek, E., Ekici, S., Midilli, A., & Karakoc, T. H. (2021). Thermodynamic comparison of TF33 turbofan engine fueled by hydrogen in benchmark with kerosene. Fuel, 306, 121686.
- Yasar, O., Ozbek, E., Ekici, S., Yalcin, E., Midilli, A., & Karakoc, T. H. (2021). Assessment of fuel cell studies with particle image velocimetry applications: A key review. International Journal of Hydrogen Energy, 46(57), 29568-29582.
- Turk, I., Ozbek, E., Ekici, S., & Karakoc, T. H. (2022). A conceptual design of a solar powered UAV and assessment for continental climate flight conditions. International Journal of Green Energy, 19(6), 638-648.

Projeler:

- Youth Based Entrepreneurship Network of Unmanned Aerial Vehicle Industry and Technologies, Erasmus+ KA 205 Projesi, (2020-2022) Yürütücü: Prof. Dr. T. Hikmet Karakoç, Araştırmacı: Emre Özbek
- Unmanned Surface Object Assessment on Roads (U-SOAR) (2022-2024)- TÜBİTAK 2522 - Macaristan Arastırma ve Teknoloji Ulusal Ofisi (NRDIO) ile İkili İşbirliği Programı, Prof. Dr. T. Hikmet Karakoç, Araştırmacı: Emre Özbek
- Arazi Görevlerine Uygun, Modüler ve Termal Kameralı İHA Tasarımı, Üretimi ve Testleri (2021-2023), Genel Amaçlı BAP Projesi - ESTÜ BAP, Yürütücü: Prof. Dr. T. Hikmet Karakoç, Araştırmacı: Emre Özbek
- Değişken Kanat Yapısı Kullanımının İnsansız Hava Aracı Performansına Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi (2021-2023), DR BAP Projesi - ESTÜ BAP, Yürütücü: Prof. Dr. T. Hikmet Karakoç, Araştırmacı: Emre Özbek
- Gölge İnsansız Hava Aracı Sistemi Tasarımı, Üretimi ve Uçuş Testleri, Teknofest Savaşan İnsansız Hava Aracı Yarışmasına Katılım Gerçekleştirilmesi (2022-2024), ESTÜ BAP, Yürütücü: Prof. Dr. T. Hikmet Karakoç, Araştırmacı: Emre Özbek
- Arazi Görevlerine Uygun, Seralarda Yapısal Bütünlük İncelemesi Yapabilen, Modüler ve Kameralı İHA Tasarımı, (2020-2022), ESTÜ BAP, Yürütücü: Dr. Öğr. Üy. Elif Koruyucu
- Havaaracı Platformlarında Yakıt Pili Sisteminin Performansının İncelenmesi, (2017-2019), ESTÜ BAP, Yürütücü: Prof. Dr. T. Hikmet Karakoç, Araştırmacı: Emre Özbek
- Elektromekanik Doğa Benzetimli Gözlem Mini-İHA Tasarımı, Üretimi ve Testleri (2016-2018), ESTÜ BAP, Yürütücü: Prof. Dr. T. Hikmet Karakoç, Araştırmacı: Emre Özbek
- İnsansız Hava Araçlarında Alternatif Enerji Kaynaklarının Kullanılması (2016-2017) ESTÜ BAP, Yürütücü: Prof. Dr. T. Hikmet Karakoç, Araştırmacı: Emre Özbek