



T.C.
TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ROBOTİK KUŞ TASARIMI

Mustafa Satan
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

TOKAT
2022
Her Hakkı Saklıdır.

ETİK SÖZLEŞME

Bu belge ile bu tezdeki bütün bilgi toplama ve raporlaştırma sürecinin Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'ne, Lisansüstü Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kılavuzuna, genel akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak gerçekleştirildiğini; bu tez çalışmasının “intihal engelleme” programı ile tarandığını, bana ait olmayan tüm bilgi, düşünce ve bulgulara atıf yaptığımı ve kaynağını gösterdiğimi beyan eder, sorumluluğun tarafıma ait olduğunu kabul ederim.

..../...../.....

Mustafa SATAN

ÖNSÖZ

Çalışmalarım boyunca yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Ebubekir YAŞAR'a, öğrenim hayatım boyunca tercihlerimin, isteklerimin ve hedeflerimin arkasında duran, beni istediğim doğrultuda desteklemekten asla gocunmayan aileme, maddi manevi her zaman yanımda oldukları ve bunu hissettirdikleri için sonsuz minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Mustafa SATAN

TOKAT-2022

ÖZET

ROBOTİK KUŞ TASARIMI

Satan, Mustafa

Yüksek Lisans, Mekatronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Ebubekir Yaşar

Aralık 2022, x+73 Sayfa

Kuşlar eski çağlardan bu tarafa en ilgi çeken hayvanlardan olmuştur. Bunun neticesinde her zaman nasıl uçtukları soru işareti olarak kalmıştır. Son yüzyıllarda kuşlar hakkında üstüne daha çok düşülmüş olsa da günümüzde ki teknolojik gelişmeler sayesinde şu zamanlarda çok daha fazla ilerleme katedilmiştir.

Kanat yardımıyla uçan doğal canlıları taklit ederek geliştirilen ornithopterler, birçok göreve hizmet edecek şekilde tasarlanabilmektedir. En büyük avantajları doğal uçan canlılara benzerliği, sessiz olmaları ve yapılarının basit oluşudur. Bu yapıların şarj süreleri uzatılabilirse, özellikle kamufle olabilme yetenekleri sayesinde güvenlik ve askeri amaçla kullanılabileceklerdir. Albatros kuşunun yapabildiği gibi saatlerce uçup, kanat çırpmadan kilometrelerce yol kat edebilir ise işlevselliği ve önemi dahada artacaktır. Bu çalışmada kuşların nasıl uçtuğu, uçmak için gerekli kuvvetlerin neler olduğu, kanat yapıları gibi kuşların önemli parametreleri açıklanmıştır. Açıklanan parametrelere uygun bir robotik kuş tasarımı yapılmış ve yapımında kullanılabilecek malzemeler araştırılmıştır. Kanat profillerinin analizinde, akışkanlar mekaniğinde, bir akışkanın, atalet kuvvetlerinin, viskozite kuvvetlerine olan oranını belirleyen Reynolds sayısının düşük değerleri için kanat profillerini, kanatları ve uçakları analiz edebilen açık kaynak kodlu bir tasarım ve analiz programı olan XFLR5 programı kullanılmıştır. Bu sayede robotik kuş tasarımında kullanılacak olası etkin kanat profilleri elde edilmiştir. Çalışmada elde edilen kanat profilleri ve analiz değerleri kullanılarak 3D bir robot tasarımı da yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Robotik kuş (ornithopter), Aerodinamik, Airfoil yapılar, Kanat

ABSTRACT

ROBOTIC BIRD DESIGN

Satan, Mustafa

Master's Thesis, Department of Mechatronics Engineering

Advisor: Asst. Prof. Dr. Ebubekir Yaşar

December 2022, x+73 pages

Birds have been one of the most interesting animals since ancient times. How they fly has always remained a question mark. Especially the latest technological developments have provided many advantages in imitating birds and flying bird robots have been made.

Developed by imitating natural creatures flying with the help of wings, ornithopters can be designed to serve many tasks. Its greatest advantages are its resemblance to natural flying creatures, its quietness, and its simple structure. If the charging times of the batteries, which are the energy sources of these structures, can be extended, they can be used for security and military purposes, especially thanks to their camouflage capabilities. If it can fly for hours and travel kilometers without flapping its wings, as the albatross bird can, its functionality and importance will increase even more. In this study, important parameters of birds such as how birds fly, what forces are required to fly, and their wing structures are explained. A robotic bird design was made in accordance with the described parameters and the materials that could be used in its construction were investigated. In the analysis of airfoils, XFLR5, an open source design and analysis program that can analyze airfoils, wings and aircraft, was used for low values of Reynolds number, which determines the ratio of inertial forces to viscosity forces in fluid mechanics. In this way, possible effective wing profiles to be used in robotic bird design were obtained. A 3D robot design was also made using the wing profiles and parameters obtained in the analysis obtained in the study.

Keywords: Robotic bird (ornithopter), Aerodynamics, Airfoil structures, Wing

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK SÖZLEŞME	i
ÖNSÖZ	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
SİMGELER ve KISALTMALAR	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
1.GİRİŞ.....	1
2.LİTERATÜR TARAMASI	14
3.MATERYAL ve METOT.....	18
3.1 Proje Amacı	18
3.2 Tasarım.....	18
3.3 Tasarım İçin Gerekli Doneler	19
3.4 Kanat Tasarımı.....	20
3.4.1 Airfoil tanımı	21
3.4.2 Kanat geometrisinin matematiksel oluşum mantığı	22
3.5 Aerodinamik Katsayılar	25
3.5.1 Basınç katsayısı	27
3.5.2 Taşıma kuvveti ve oluşumu	31
3.5.3 Sürüklenme kuvveti ve oluşumu.....	33
3.6 Aerodinamik Verimlilik	36
4.BULGULAR ve YORUMLAR	36
4.1 Robotik Kuşun Çizim ve Analizleri	37
4.1.1 Kanat yapısı	37
4.1.2 Kanattaki basınç dağılımı	45
4.1.3 Taşıma ve sürüklenme kuvvetleri	48
4.2 Kuyruk Tasarımı	50
4.3 Kanat Çırpma Frekansı	53

4.4 Dişli Çarklar ve Motor	53
4.5 Bilgisayar Destekli Tasarım	55
4.6 Malzeme Seçimi.....	61
4.7 Dişli Sisteminin Yapımı	64
4.8 Yapılabilecek Prototip Örneği	67
5.SONUÇ ve DEĞERLENDİRME.....	68
KAYNAKÇA.....	70
ÖZGEÇMİŞ	73



SİMGELER ve KISALTMALAR

AR: Kanat açıklık oranı

b: Kanat açıklığı

C: Ağırlık merkezi

Ch: Veter çizgisi

C_G : Ağırlık merkezi

C_P : Basınç merkezi

C_{HT} : Yatay kuyruk hacim katsayısı

D: Sürüklenme kuvveti

F_{LW} : Kuyruk taşıma kuvveti

Fa: Aerodinamik kuvvet

Fi: İtme kuvveti

f : Kanat çırpma frekansı

G: Aerodinamik merkez

L: Taşıma kuvveti

L_{HT} : Kanat ve kuyruk basınç merkezleri arası mesafe

MAC: Ortama veter uzunluğu

p_∞ : Serbest akış statik basıncı

Re: Reynolds sayısı

S: Gövde kesit alanı

S_{HT} : Yatay kuyruk alanı

T: İtme kuvveti

V_∞ : Serbest hava hızı

X_{C_P} : Hücum kararıyla basınç merkezi arası mesafe

X_{C_G} : Hücum kararıyla basınç ağırlık merkezi arası mesafe

$X_{C_{PK}}$: Kuyruk hücum kararıyla basınç merkezi arası mesafe

δ : Kalınlık oranı

μ : Viskoz kuvvetleri

ξ : Eliptik dönüşüm

ρ : Hava akımı yoğunluğu

ϕ : Açık değeri

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Leonardo da Vinci'ye ait bir ornithopter tasarımı,1486-1490	1
Şekil 1.2 Les Merveilles de la Science'ın yaptığı, Besnier'in tasarladığı aparatlarla uçtuğunu gösteren çizim	2
Şekil 1.3 Marquis de Bacqueville'in Paristeki evini çatısından, Seines nehri üzerinden uçmaya çalışmasının, Albert Tissandier tarafından çizilen resmi	3
Şekil 1.4 Gerard'ının tasarladığı uçuş makinası 1784.....	4
Şekil 1.5 Vélocipède aérien'nin manuel olarak kontrol edilen kanatlara sahip insan gücüyle çalışan bir uçan makine için tasarım çizimleri,1866	4
Şekil 1.6 Jakob Degen'in Flugmaschine'nin yaptığı ortada hidrojen balonlu ve kaldırma kanatları bulunan bir tasarımın illüstrasyonu,1813	5
Şekil 1.7 DeGroof'un uçan makinasının reprodüssiyonu,1890	6
Şekil 1.8 I.M. Kaufmann tarafından eskiz çalışması	7
Şekil 1.9 1871'den başlayarak Pichancourt Penaud'un tasarladığı ornithopterler	8
Şekil 1.10 Pichancourt tarafından, kuş hareketini taklitte yapılmış tasarım,1889.....	9
Şekil 1.11 Gustave Trouvé, basınçlı havayla çalışan bir ornithopter tasarımı,1870	10
Şekil 1.12 Gustave Trouvé tasarımını uçurduğu düzenek	10
Şekil 1.13 Lawrence Hargrave, sıkıştırılmış hava motorlu tasarımı,1891	11
Şekil 1.14 Alman NSFK üyeleri tarafından yapılmış olan ornithopter,1929.....	12
Şekil 1.15 Percival Spencer geliştirdiği, oyuncak ornithopter	12
Şekil 1.16 Radyo kontrollü, Valentin Kiselev'in tasarladığı ornithopter	13
Şekil 2.1 Otto Lilienthal'in Birdflight as the Basis of Aviation adlı kitabından bir figür ve Wright kardeşlerin airfoil tasarımıyla Otto Lilienthal'in airfoil geometrileri	19
Şekil 3.1 Farklı kanat profilleri	21
Şekil 3.2 Joukowski dönüşümünden faydalanılarak oluşturulan kanat profili (a) z düzlemi (b) ζ düzlemi	23
Şekil 3.3 Uçağı maruz kaldığı aerodinamik kuvvetler	24
Şekil 3.4 Hücum açısının artışına bağlı olarak, profil üzerinden geçen havanın hızlanması	25
Şekil 3.5 Kanat profilinde oluşan aerodinamik kuvvetler	27
Şekil 3.6 Basıncın kanat profilinin alt ve üst yüzeylerindeki basınç dağılımı.....	28

Şekil 3.7 Değişken hücum açılarına göre basınç katsayısı	29
Şekil 3.8 NACA 0012 ve NACA 2424 kanat profilleri için basınç katsayıları	30
Şekil 3.9 Taşıma katsayısının hücum açısıyla değişimi	32
Şekil 3.10 Sürüklenme katsayısının Re ve Alpha'ya göre değişim grafiği	33
Şekil 3.11 Kanat ucu girdabı ve serbest hava akışını yönlendirmesi	34
Şekil 3.12 Sürüklenme kuvvetlerinin vektörel gösterimi	34
Şekil 3.13 Sürüklenme katsayısının, indüklenmiş sürüklenmeyle hücum açısına göre değişim grafiği	35
Şekil 4.1 Analiz için seçilen airfoil yapıları	39
Şekil 4.2 Seçilen kanat profillerinin aerodinamik katsayı grafikleri	40
Şekil 4.3 Taşıma katsayısı- hücum açısı grafiği	41
Şekil 4.4 Taşıma- Sürüklenme katsayısı grafiği	41
Şekil 4.5 Kanat profili performans grafiği	42
Şekil 4.6 Moment- hücum açısı grafiği	42
Şekil 4.7 S1223 airfoilin 3 boyutlu çizimi	43
Şekil 4.8 Kanat kaplaması	44
Şekil 4.9 Bir kanattaki bütün airfoil yapıları	44
Şekil 4.10 Kanat profilinin Cp dağılımı	45
Şekil 4.11 Kanat profili Cp- Q grafiği	46
Şekil 4.12 Kanat ve kuyruk negatif Cp dağılımı	46
Şekil 4.13 Kanat ve kuyruk pozitif Cp dağılımı	47
Şekil 4.14 Basınç dağılımının Paskal cinsinden gösterim	47
Şekil 4.15 Kanattan çıkan sürüklenme çizgileri	48
Şekil 4.16 Kanat sürüklenme açıları	49
Şekil 4.17 Robotik kuşun havada oluşturduğu akımlar ve kanat ucu girdabı	49
Şekil 4.18 Kanat ve kuyruğun değişken nokta gösterimleri	51
Şekil 4.19 Robotik kuş tasarımında ağırlık merkezleri	52
Şekil 4.20 Robotik kuşun 2B dişli sistemi	54
Şekil 4.21 Robotik kuşun izometrik üst görünümü	55
Şekil 4.22 Robotik kuşun izometrik alt görünümü	56
Şekil 4.23 Batarya ve ESC çizimleri	56
Şekil 4.24 Kontrolcü ve sinyal alıcı çizimleri	57
Şekil 4.25 Ana gövde parçası (ön gövde)	58
Şekil 4.26 Kuyruk kontrol servolarının üst görünümü	59

Şekil 4.27 Kuyruk bölgesi	60
Şekil 4.28 Geliştirilmiş polipropilene (EPP) malzemesinin görünümü	62
Şekil 4.29 Karbonfiber boru ve plaka	62
Şekil 4.30 Farklı modül, boyut ve mukavemetlere sahip çizilen dişli modelleri	64
Şekil 4.31 Ana gövde ve dişli sistemi bağlantılar	65
Şekil 4.32 Dişli sistemi ve motor bağlantısı	65
Şekil 4.33 Robotik kuşun genel iskelet görünümü	66
Şekil 4.34 Robotik kuş iskelet parçaları 3D Cura görünümü	67
Şekil 4.35 Robotik kuş kanat airfoil yapıları 3D Cura görünümü	68



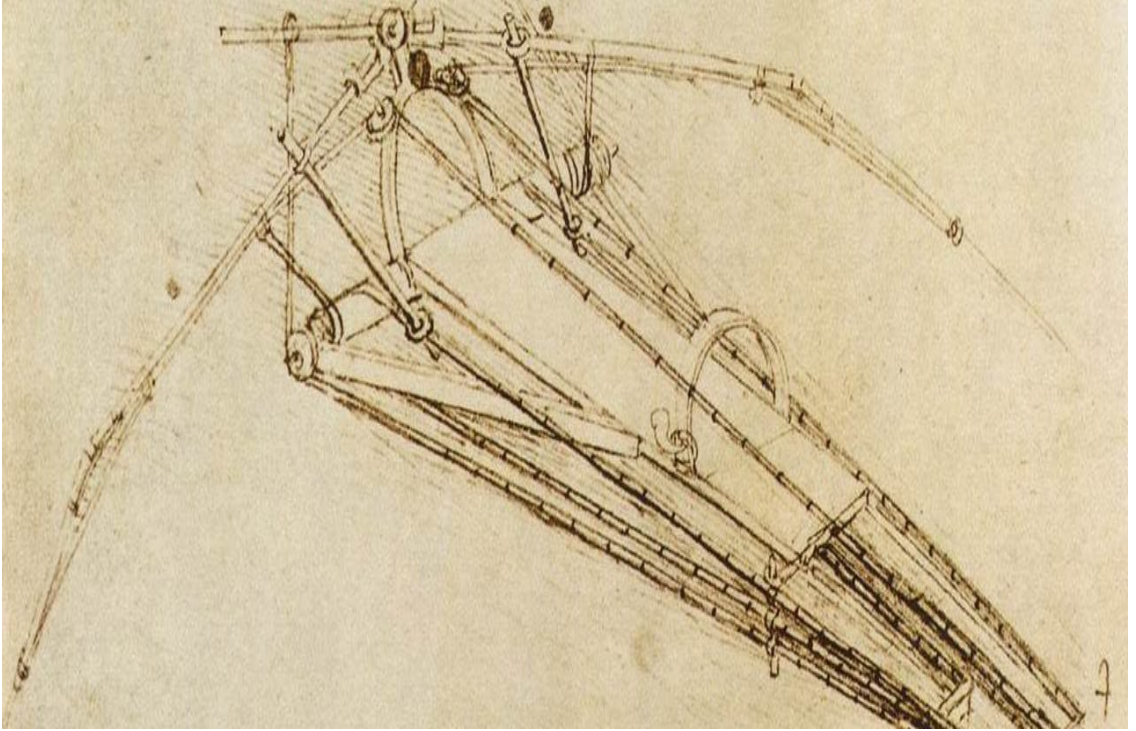
ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 4.1 Altın kartalın genel özellikleri	37
Çizelge 4.2 Airfoil yapıların hücum açılarına göre katsayı değerler	39
Çizelge 4.3 Robotik kuşun analiz parametreleri	48
Çizelge 4.4 Kuyruk hesabı için gerekli değişkenler	50
Çizelge 4.4 Gövde ve kanat aday malzemelerinin teknik özellikleri	61
Çizelge 4.4 Dişli malzemeleri	63



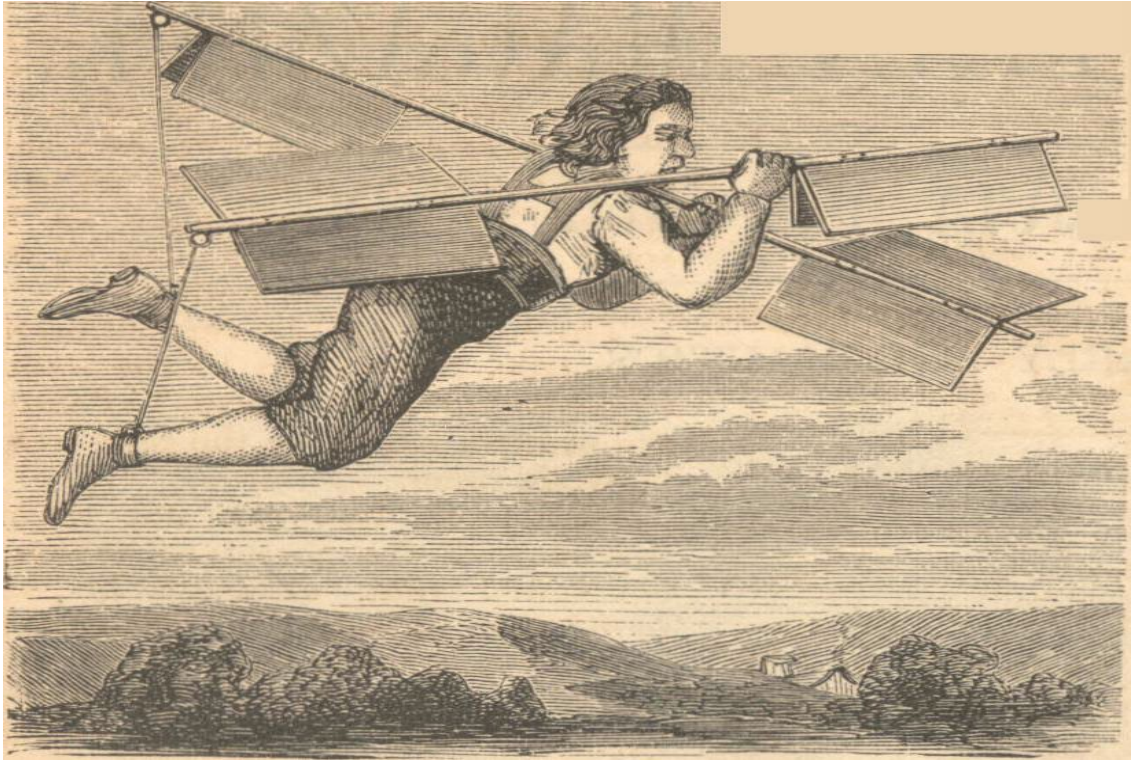
1. GİRİŞ

Eski çağlardan bu tarafa insanlar hep kuşları ilgiyle seyretmişlerdir. Onlar gibi uçup özgür olma düşüncesi insanların akıllarının bir köşesinde her zaman olmuştur. Bu düşünceler insanların kuşları taklit ederek uçmaya çalışmalarına neden olmuştur. İlk ve orta çağda yaşayan insanların kollarına kanat takarak çatı veya kule gibi yüksek yerlerden uçmaya çalıştıkları bilinmektedir. Bu insanlardan ilk uçmaya çalıştığı bilinen Abbas İbn Firnas'dır. Endülüslü Firnas tahtadan bir kanat iskeletinin üzerine kumaş geçirerek yüksek bir noktadan süzülerek uçtuğu bazı kaynaklarda belirtilmektedir. Daha sonra 11. Yüzyılda Malmesbury'li Eilmer bir manastırın tepesinden atladığı ve süzülerek uçtuğu kaydedilmiştir. Ancak inişi sert olmuş ve iki bacağına da kırmıştır. Erken dönem bu uçuş denemelerinde yere sert inmelerindeki neden, kuyruk kısmının hesaba katılmamasıdır. Bu şekilde uçulamayacağını anlayan insanlar zamanla bazı mekanizmalar geliştirmiş ve çizimler yapmıştır. Bu çırpan kanatlı makineler Ornithopter olarak adlandırılmıştır. Yakın zamandaki tarihi araştırmalar, Leonardo da Vinci'nin insan uçuşu fikrine saplandığı ve 15.yüzyıl sonlarına doğru birçok ornithopter tasarladığını ortaya koyduğu bilinmektedir. Hayatta kalan el yazmalarındaki 35000'den fazla kelime ve 500 çizim uçuşla ilgilidir (Anderson, 2005). Davinci ornithopter konusunda çizimden öteye geçmemiştir.



Şekil 1.1 Leonardo da Vinci'ye ait bir ornithopter tasarımı,1486-1490

Yakın tarihte bilinen ilk kanatlı uçuş deneyi, XIV. Louis hükümdarlığı altında, Saint Germain'deki terastan Vesinet ormanına uçan Allard adlı bir Fransız'dı. Aparat, omuzları üzerinde menteşelenmiş iki tahta çubuktan, aşağı vuruşta düz açılacak ve yukarı vuruşta kenardan üste katlanacak şekilde katlanır. Panjur şeklinde düzenlenmiş tahta kanatlardan oluşuyordu. Bunlar dönüşümlü olarak ayak ve kollar tarafından o kadar akıllıca çekilirdi ki, sağ el sağ kanadı aşağı çektiğinde sol bacak sol kanadı aşağı çekebilirdi. Böylece yürüme sırasındaki klasik hareketi taklit ederek olayı çözümledi. Besnier ilk başta yerden yükselmeye ya da havada yatay olarak uçmaya çalıştı. Sadece kısa mesafeler denedi; bir sandalyeden, sonra bir masadan, sonra bir perde pervazından ve ardından bir evin çatı katından atlayarak denemelerini sürdürdü. Şekil 2'de gösterilen sadece bir eskiz çalışmasıdır. Şekilde omuzdaki menteşe gösterilmediği için, kanatları bacaklarıyla aşağı çekmek için olan ataşman açıkça yetersiz ve destek yüzeyleri tamamen işlevsizdir. Kanatların he biri 0,91 x 0,61m, dört kanat toplamda 2,32 m² olur, bunun çok küçük bir değer olduğu ortadadır. Ağırlığı ile orantılı olarak taşıma yüzeyi yetersiz olduğundan dolayı kısa süzölmeler gerçekleştirebilmiştir. Çok daha büyük kanatlara ihtiyaç duymaktadır. Bunlardan dolayı hiçbir zaman uzun mesafeli uçuşlar gerçekleştirememiştir (Charles V.E, 1919).



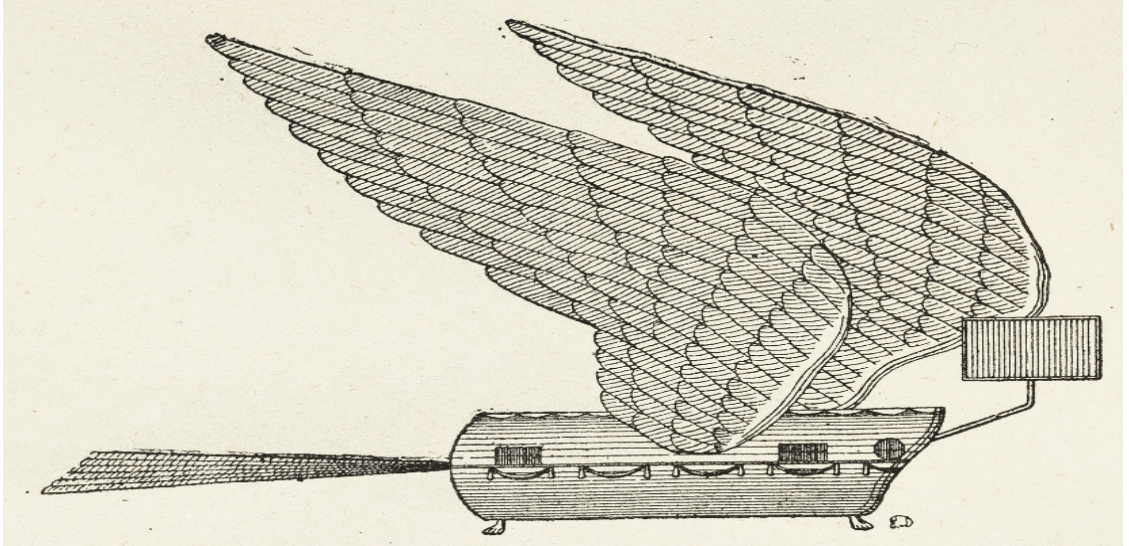
Şekil 1.2 Les Merveilles de la Science'ın yaptığı, Besnier'in tasarladığı aparatlarla uçuşunu gösteren çizim (Charles V.E, 1919).

Marquis de Bacqueville'in 1742'de, Paris'teki rıhtımın köşesinde bulunan konağından Seine nehri boyunca uçacağını açıkladı. 19 Mart'ta büyük bir kalabalığın bakışları arasında, ellerine ve ayaklarına büyük kanatlar takmış vaziyette olan Marquis (Şekil 2), 150 veya 180mt mesafeden atladı. Belirli bir mesafe süzöldükten sonra ellerinin ve ayaklarının kontrolünü kaybedip nehir kıyısına düştü ve yaralandı. Kanatların yüzey alanı ağırlığını taşıyacak büyüklükte değildi (Charles V.E, 1919).



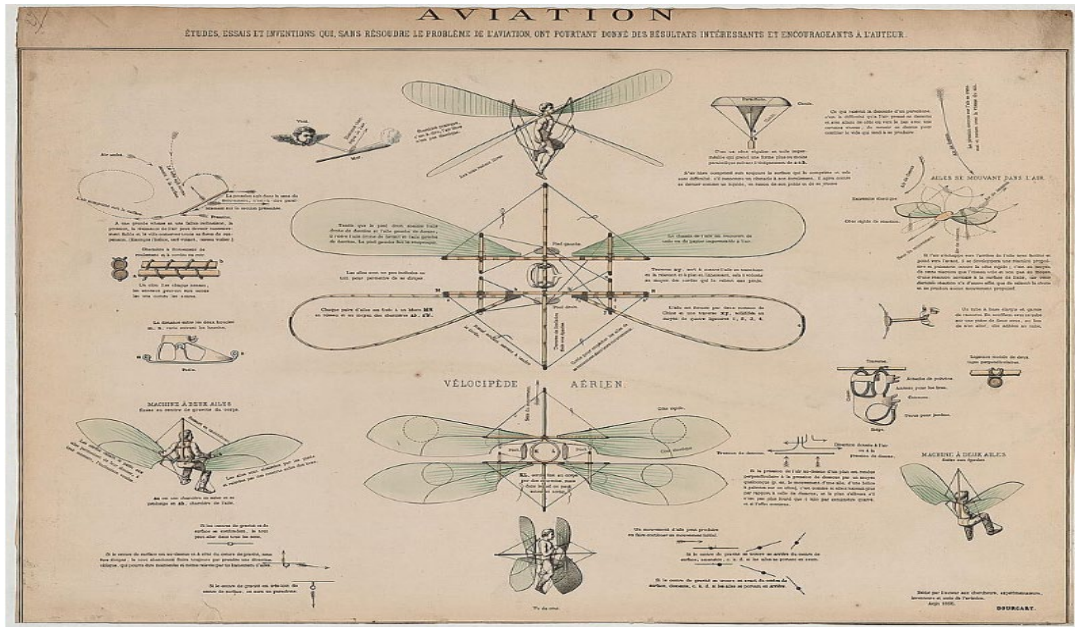
Şekil 1.3 Marquis de Bacqueville'in Paristeki evini çatısından, Seines nehri üzerinden uçmaya çalışmasının, Albert Tissandier tarafından çizilen resmi (Lawrence, 1904)

Blanchard 1781 bunlar gösteriyor ki insanın kas gücüyle uçmak imkânsız. Gérard 1784 yılında bir ornithopter tasarımı yaptı. Bu tasarımda gövde ve kanatlara ek olarak önce direksiyon görevi gören bir düzenleme ve üzerine ineceği yaylı ayaklar yaptığını görüyoruz. Gérard itki gücünü nasıl sağladığını belirmemiştir ancak çizimden roket gibi bir yapıyla itki sağlanıp kesmende kanat çırparak ilerleyeceği anlaşılmaktadır. 1830'da Bay F.D. Artingsall Gérard'ın çizimini gerçekleştirmek için çok küçük bir buhar motoru yaptı. Bu motorun piston koluna kanatları sabitleyerek kanat hareketini sağladı. Kanatlar kanat dibinden dikeyde 80°'lik bir açı yaparak kanat çırpıyordu. Kanatlar çalışmasına rağmen ornithopter uçmadı çünkü motorun yaptığı sarsıntı düzenli bir uçuş rejimi oluşturamadığı için daha ilk denemede cihaz parçalandı (Lawrence, 1904). Gérard'ın ornithopteride denge problemleri sebebiyle başarısızlıkla sonuçlanmıştır.



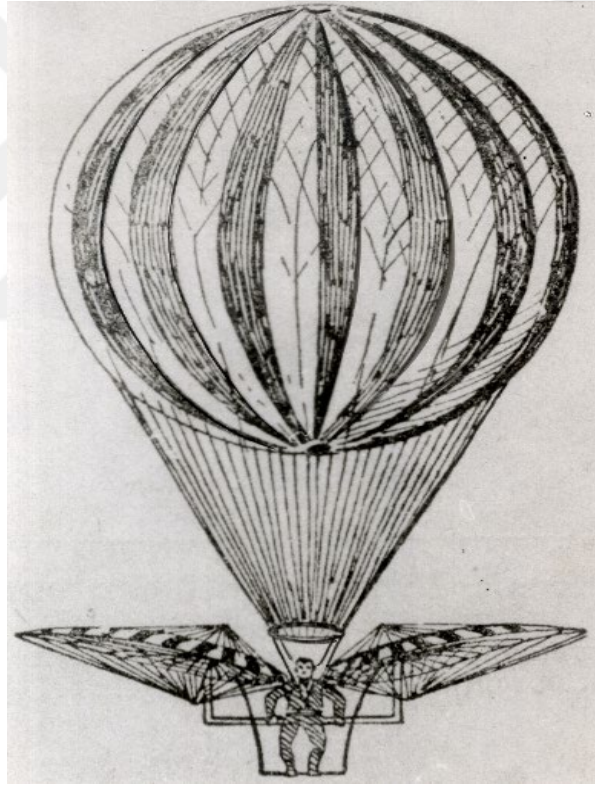
Şekil 1.4 Gerard'ının tasarladığı uçuş makinası 1784 (Burkart, 1866)

Bourcart, 1866'da bir ornithopter tasarımı (Şekil 1.4) yapmıştır. Kanatlar, kullanıcı tarafından kolları ve bacakları hareket ettirerek elle çalıştırılır. Tasarımının adı Velocipede aerien (aerial velocipede)dir. Yukarı vuruşta kanadı havaya, aşağı vuruşta geniş kanadı havaya sunacak şekilde, tüy hareketine sahip dört kanattan oluşuyordu, ancak sonuçlar beklenildiği gibi olmadı ve deneyden vazgeçildi. Kanat alanları toplamı yaklaşık 36 metrekare boyutundaydı, ancak yalnızca aşağı vuruşta etkilidir. Bununla birlikte, insanlar bu tür tasarımların çalışması için üretebilecekleri güç bakımından çok ağırdır (Burkart, 1866).



Şekil 1.5 Vélocipède aérien'nin manuel olarak kontrol edilen kanatlara sahip insan gücüyle çalışan bir uçan makine için tasarım çizimleri, 1866 (Tom C., 2021)

Bazı araştırmacılar şemsiye benzeri yüzeylerin kanatlardan daha etkili olabileceği ve taşımayı arttırabileceğini öne sürülmüştür. Bunlardan Sir George Cayley 1808 yılında bombeli bir çerçeve üzerine sıkıca gerilmiş bir kumaşla bir çift kanat inşa ettirdi. Bu çerçeve birbirine dik açılı, bükülmüş ve sağlamlığı sağlamak için birbirine bağlanmış iki nervürden oluşmaktaydı. Cayley bu sistemdeki kanatların insanı havada tutmak için gerekli olan yüzey alanının oluştur masada 58 kg kaldırma kuvveti oluşturduğunu beyan etmiştir. Şemsiye kanatlarla ilgili deneylerden biride Viyanalı saat ustası Jakon Degen tarafından yapılmıştır (Şekil 1.5). Degen şemsiye kanata ek olarak gaz balonu ilavesini yaptı. Balonun kaldırma kuvvetinden faydalanıp havalanmayı, kanat çirparaksa ilerlemeyi planlıyordu. Kısmen başarılı oldu ama Pariste düzenlenen bir gösteride bir kaçkere uçmaya çalışsada rüzgâr sebebiyle başarısız oldu (Tom C., 2021)

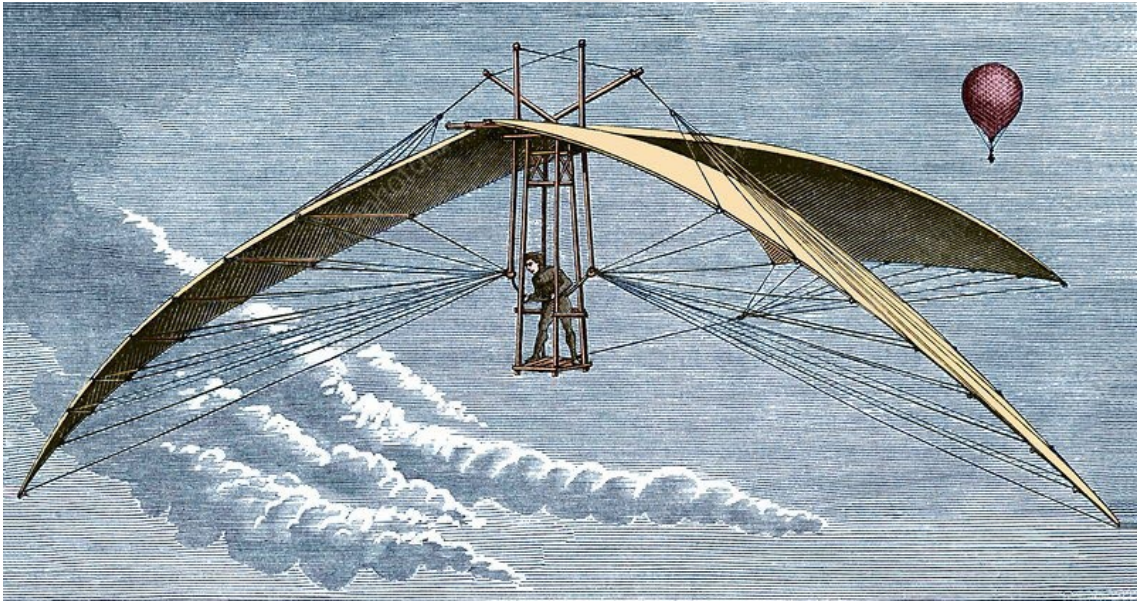


Şekil 1.6 Jakob Degen'in Flugmaschine'nin yaptığı ortada hidrojen balonlu ve kaldırma kanatları bulunan bir tasarımın illüstrasyonu,1813 (Charles V.E, 1919).

Tarih 1841'e geldiğinde demirci kalfası Manojlo Petrovic'in rahipler tarafından Belgrad'daki Katedral'in tepesinden atlamasına engel olması ardından gizli bir şekilde atılmasına neden oldu. Manojlo, bir kişinin sadece kendi kaslarının gücünü kullanarak kalkış yapmasının mümkün olup olmadığını test etmek istedi. Havalanmayı planladığı

cihaz, kuşun kanatlarını andıran ve küçük bir paraşütten oluşan bir yapıydı. Paraşütün amacı inişi daha güvenli hale getirip, düşüş hızını azaltmaktı. Manojlo'nun girişiminde, toplanmış insanların şaşkın bakışları arasında başlarının üzerinden uçtu, ancak kısa süre sonra, neyse ki küçük bir paraşüt ve kar hayatını sayesinde bu küçük süzülme gösterisi kazasız sonuçlandı (Charles V.E, 1919).

Şemsiye fikrinden sonra paraşüte benzeyen kanatların fikirleri oluştu. De Groof adlı Belçikalı bir ayakkabıcı 1864 yılından paraşüt kanatlarla bir hava aracı tasarladı. Bu tasarımda tahta çerçeve üzerine gerdirilmiş kumaştan kanatları elleriyle ve arka kuyruk olarak tasarlanan kısmı ise ayaklarıyla idare ederek uçan bir hava aracı yaptı. Hava aracının her bir kanadı 7m ve kuyruğun uzunluğuysa 6m idi. De Groof ilk olarak yaptığı bu araçla 5 Temmuz 1874'te Londra'daki Cremorne Gardens'tan, Bay Simmons'ın balonuna bağlı olarak yükseldi. 300m yüksekliğe çıktıktan sonra balondan ayrıldı ama sonuç hüsrana oldu ve Groof yere çakılarak hayatını kaybetti. De Groof'un yere çakılmasının sebebi kanatların uzun olup sağlam olmamasından dolayı geriye katlanmasıydı. Bu uçuş makinası da başarısızlıkla sonuçlanmış oldu (Tissandier G, 1886)

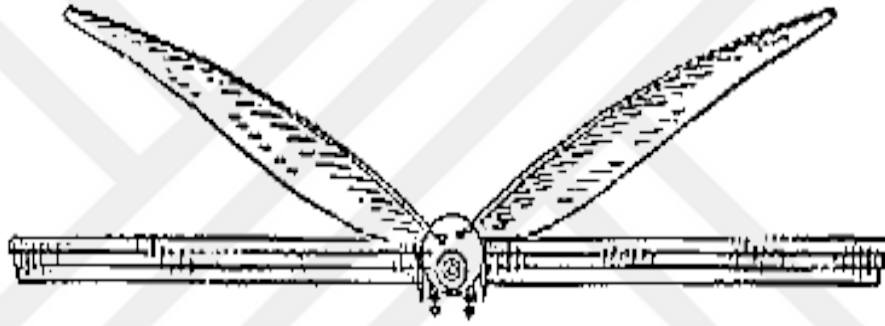


Şekil 1.7 DeGroof'un uçan makinasının reprodüssiyonu, 1890 (Gordon J.J, 2006)

Büyük Britanya Havacılık Cemiyetinde 1868'de düzenlenen bir fuarda Bay I. Palmer, dönen bir aksa tutturulmuş ve ördeğin yüzerken ki ayak hareketleri gibi, inişte genişleyecek ve çıkışta kapanacak şekilde düzenlenmiş bir çift kanat (güçle tahrik edilecek) tanıttı; bu hareket, dikey kaldırma gücünü yatay kuvvetten birine dönüştürmek

için anında konumu değiştirilebilen eksantrik bir kam üzerinde çalışan bir silindir tarafından oldukça basit bir şekilde elde edilebiliyordu. Ama bu sadece düşüncede kaldı.

Aynı fuarda Glasgow mühendisi Bay I.M. Kaufmann, şekil 8'de temsil edilen çalışma modelini sergiledi. Aparat, tekerlekler üzerine monte edilmiş ve iki uzun kanadı buhar kazanı ve motorla hareket ettirilen bir sistemden oluşuyordu. Aşağı çırpma sırasında, geriye doğru eğimli bir yönde ayarlanmış ve yukarı çırpma sırasında ileri bir açıyla dönmesi sağlanmıştı. Model 20kg ağırlığındaydı ve küçük olması nedeniyle yapılan deneyler sırasında buhar bağımsız bir kazandan sağlanıyordu. Sağlanan bu basınçla birlikte kanatlar kısa bir süre kanat çırpı ve çok hızlı bir şekilde kanat çırpı için olan kanatların kopmasıyla sonuçlandı (Gordon J.J, 2006)

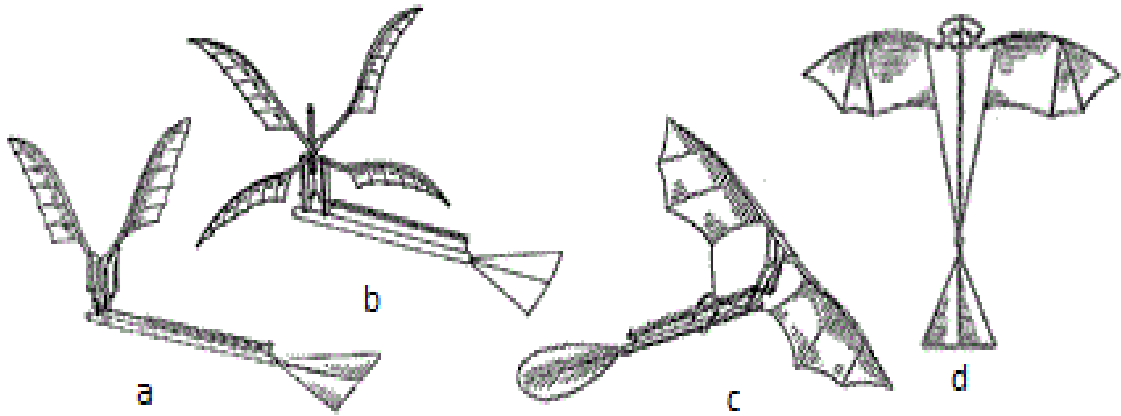


Şekil 1.8 I.M. Kaufmann tarafından eskiz çalışması (Gauja P, 1915)

Bu bölüme kadar olan ornithopter denemelerinde insan merkezli hareket edildiği görülmektedir. 19. Yüzyılın insan gücüyle kanat çırparak sağlıklı bir şekilde uçuş gerçekleştirilemeyeceği anlaşılmıştır. Daha sonra küçük ve hafif ornithopterler tasarlanmıştır. Bu ornithopterler ilk olarak buharlı motorla çalışan tiplerinin yapıldığını beyan etmiştik. Buharlı motorların yüksek kanat frekansı oluşturmamasından dolayı verimsiz ve tehlikeli olduğu görülmüştür.

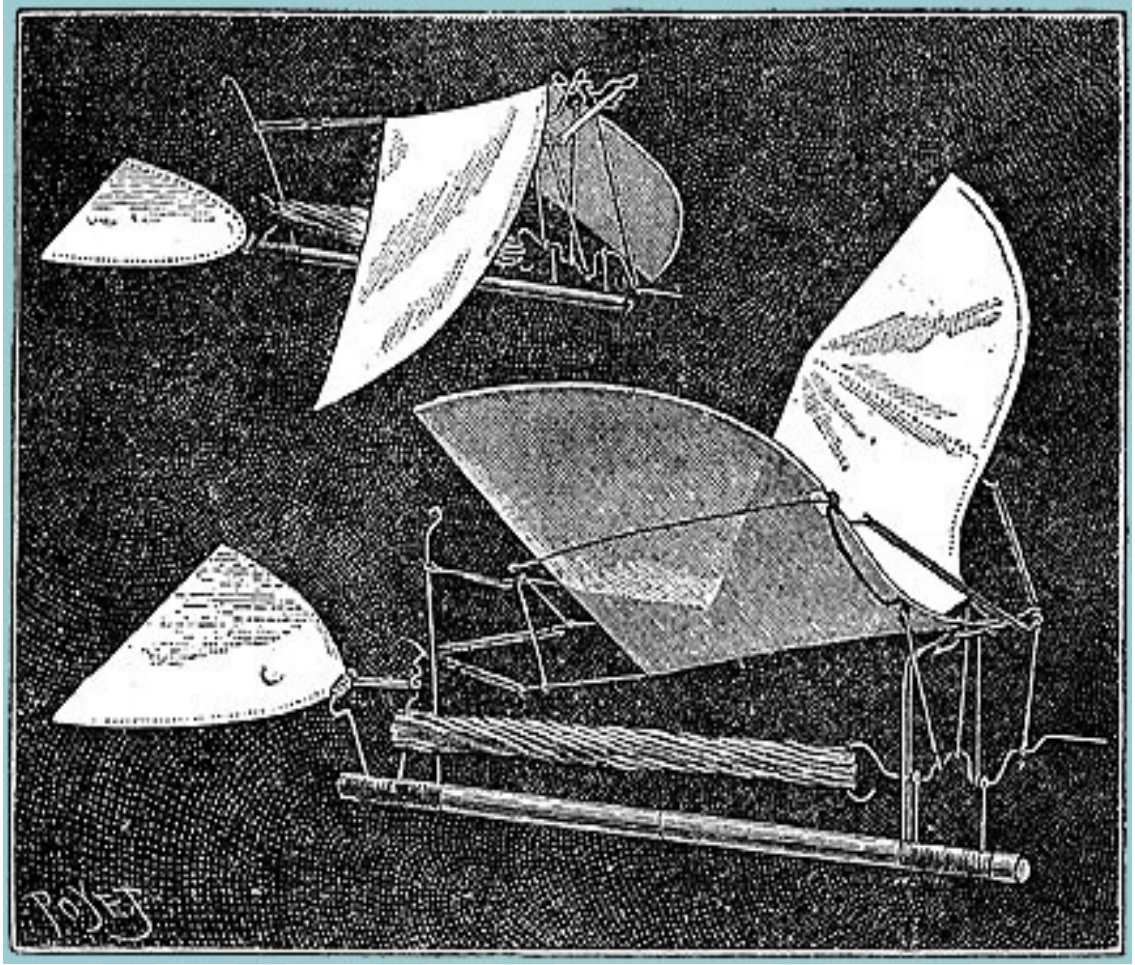
1871 yılında kanatların hareket sistemi diğer ornithopterlerinkine göre farklı bir şekilde inşa edilmeye başlandı. Şekil 9'da gösterilen ornithopter 1871'de Penaud tarafından uçurulan model gösterilmiştir. Penaud kanat hareketini iki direk arasına yerleştirilmiş bir lastik bant ile gerçekleştirmeyi başardı. Şekilde de gösterilen lastiğin döndürülmesiyle beraber oluşan kinetik enerji lastik bant serbest bırakıldığında dönü hareketi oluşturmaktaydı. Krank çevrilip potansiyeli yüklendikten sonra, krankın kanatlara bağlı kısmı omega şeklinde olduğu için kanatları hareket ettiriyordu. Telin

omega kısmı alt ölü noktaya geldiğinde kanatlar aşağı, üst ölü noktaya geldiğinde kanatlar yukarı yönlü hareket ediyordu. Ertesi yıl Penaud dört kanatlı modeli (b) geliştirdi. Dört kanadın kullanılması, kanatları çırpma için gereken tork miktarını azaltan akıllıca bir yenilikti. Diğer modelde(c) ise 1872 yılında Alphonse Penaud'ın ornithopteri görünmektedir. Penaudle aynı mekanik sisteme sahiptir ve ilk deneme elle fırlatılarak yapılmıştır. Bu denemede ilk hız elde edildikten sonra 7 saniyede 15metre mesafe katetmiştir. Ayrıca kalkış noktasından 2,5- 3 metre yükselmiştir. Aynı yıl içerisinde Fransız Havacılık Derneği'nin daimî Sekreteri Hureau de Villeneuve farklı bir model(c) sunmuştur. Bu modelde farklı olarak kanatlar 45°'lik bir açıyla yerleştirilmiştir ve güç bükülmüş kauçuktan elde edilir. Elle fırlatmaya ihtiyaç duymadan doğrudan yerden kalkabiliyordu ancak lastiğin gücü nedeniyle yerden yalnızca 1,5 metre yükselebildi daha sonraysa süzülerek iniş yaptı (Gauja P, 1915)



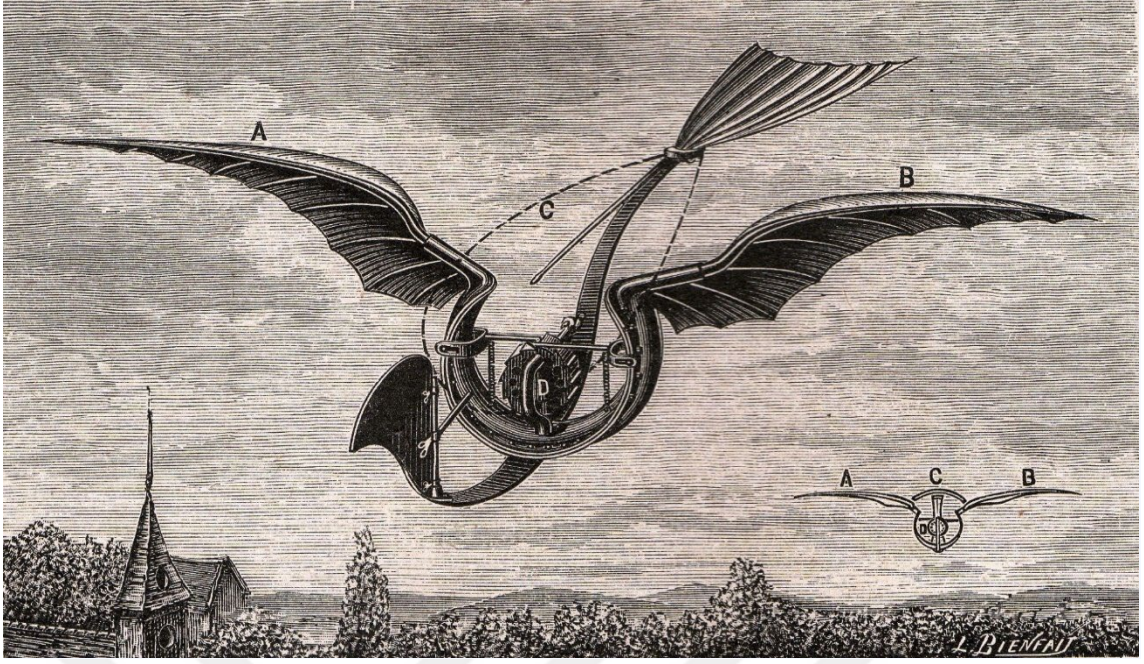
Şekil 1.9 1871'den başlayarak Pichancourt Penaud'un tasarladığı ornithopterler
(Chanute, 1894)

1889' da Pichancourt Penaud'un yaptığı ornithopter tasarımını biraz daha ileri taşıyarak şekil 11 de gösterilen kuşu yaptı. Bu yapının hareket sisteminde; her biri eksantrik koluna uzanan, üç farklı noktadan tutturulmuş kanat bağlantısı vardı. Yaklaşık 43 gram ağırlığında olan model 8 metre yüksekliğe çıkarak 22 metre mesafe katetmiştir. Pichancourt'ın yaptığı ornithopterin bir diğer önemi ise ilk ticari girişimi bünyesinde barındırmasıdır.



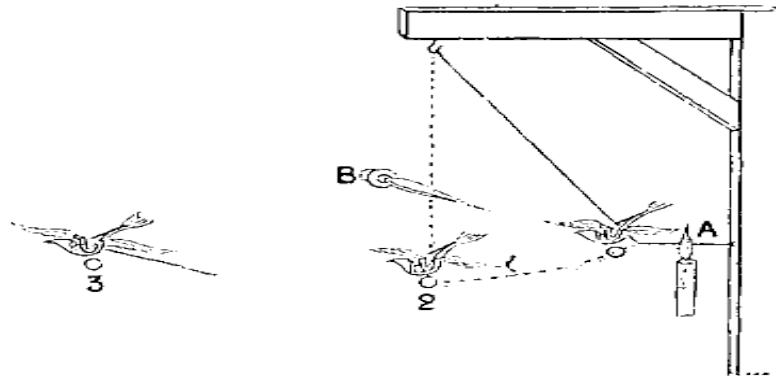
Şekil 1.10 Pichancourt tarafından, kuş hareketini taklit ederek yapılmış tasarım, 1889
(Chanute, 1894)

Muhtemelen uçan bir makine için şimdiye kadar sunulan en orijinal fikir 1870'de Fransız Bilimler Akademisi'ne sunulan M. G. Trouvé'in yaptığı mekanik kuştur. Trouvé basınçlı hava ile çalışan bir ornithopter yaptı (Şekil 1.10). Projede buhar basıncı ölçmede kullanılan Bourdon tüpünü kullandı. Bu borunun özelliği, içindeki basınç arttıkça dış uçların birbirinden ayrılması ve basınç azaldıkça birbirlerine doğru dönmeleridir. M. Trouvé birinci tüpün içine ikinci bir tüp yerleştirerek bu eylemin verimliliğini arttırdı ve deneysel modelde tüp ile iletişim halinde olan tabanca namlusunda (D) bulunan 12 fişegi patlatarak bir dizi alternatif sıkıştırma ve genişletme üretti. Bu, C ile gösterilen ipek bir destek düzlemi ile bağlantılı olarak kuşu havada iten ve sürükleyen bir dizi kanat darbesi üretti (Charles V.E, 1919).



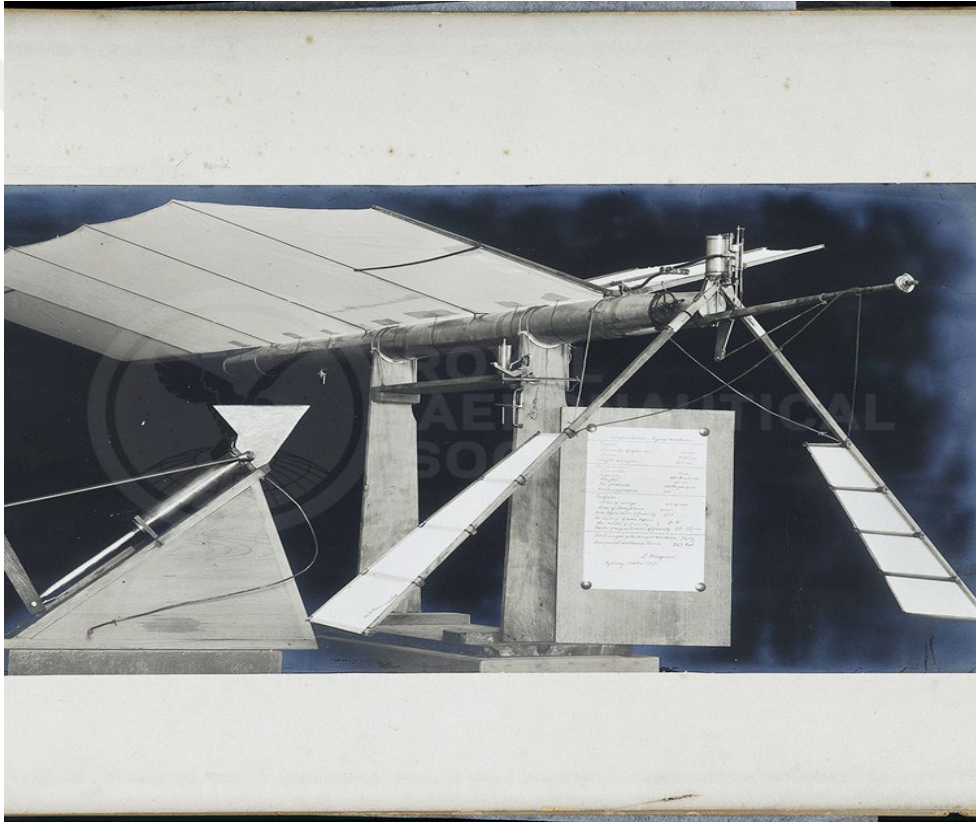
Şekil 1.11 Gustave Trouvé, basınçlı havayla çalışan bir ornithopter tasarımı, 1870
(Ader C, 1965)

Kuşu başlatma şekli eşit derecede zekice ve tuhaftır. Şekil 12'de gösterildiği üzere kuş, dikeyde tahtaya tutturulmuş bir çengele ve ilaveten arka kısımdan da aynı şekilde asılır. A noktasındaki mum yakıldığında aynı zamanda B noktasındaki üfleme borusunda alevlendirilir. Kuş ip koptuktan sonra ikinci pozisyonuna harekete başlar. Dikeydeki ip borusu taraftan yakılır ve çekiç kapağı düşer, bir patlama meydana gelir, kanatlar şiddetli bir şekilde aşağı-yukarı çırpılır ve 3. pozisyonda gösterildiği gibi kuş yukarı doğru uçar. Daha sonra gazlar Bourdon tüpünden çıkar, kanatları kaldırır ve revolver namlusunu döndüren ve çekici çalıştıran iki mandalı harekete geçirir, böylece taze bir patlama meydana gelirken kuş uçmaya devam eder. 12 fişek tükendiğinde kuş, yere süzülerek iniş gerçekleştirmektedir. Bu şekilde Trouvé'nin ornithopteri 70 ila 75 metre uçmuştur (Ader C, 1965)



Şekil 1.12 Gustave Trouvé tasarımını uçurduğu düzenek (Dupin, 1921)

Lawrence Hargrave birçok ornithopter tasarımı yaptı. Bu modelleri buhar ve basınçlı hava ile çalışmaktaydı. Ulusal Hava ve Uzay Müzesi'nde asılı olan Şekil 13 de gösterilen model 2 metre uzunluğunda ve kendi icadı olan basınçlı hava ile çalışan radyal bir döner motor kullandı. İcat ettiği motor ondan sonraki yıllarda uçaklarda kullanılacak öneme sahipti. Motor, merkezi bir krank etrafında daire şeklinde düzenlenmiş üç silindire sahipti. Krankı çevirmek yerine, krank uçan modelin gövdesine sabitlendi ve silindirler krank etrafında döndürüldü. Bu motorun avantajları, basit ama etkili bir valf zamanlamasına sahip olması ve silindirlerin motorun volanı olarak hareket etmesi nedeniyle çok az ağırlıkla çok düzgün çalışmasıydı. Verimli ve hafif olan bu motorla ornithopteri daha iyi bir şekilde şekil de uçurdu (Dupin, 1921).



Şekil 1.13 Lawrence Hargrave, sıkıştırılmış hava motorlu tasarımı,1891 (Sydney, 1906)

1929 yılında Alexander Lippisch ve Almanya'daki NSFK grubunun üyeleri bir dizi pistonlu ornithopter inşa etti. Lippisch'in ornithopterleri 3 metre kanat açıklığına sahipti ve 1950 gram ağırlığında olan ornithopter 4 cc benzinli motor kullanarak 16 dakikaya kadar uçuş yapmayı başardı (Rodrigues S, 2011)



Şekil 1.14 Alman NSFK üyeleri taraşından yapılmış olan ornithopter,1929
(L'Aéronaute, 1873)

Daha sonraki yıllarda birçok uçak ve kanat tasarımı yapan Percival Spencer, çocukluk yıllarında yaptığı ilk ornithopterini geliştirdi. 1958'de kauçukla çalışan ornithopterinin patent lisans haklarını 650.000 adet üreten The Wham-O Manufacturing Company'ye sattı. Ayrıca şirket için üretim araçlarını geliştirdi ve 1960'a kadar danışman olarak kaldı. Bu, Life Magazine'de yayınlanan bir makalede yılın en iyi on oyuncağından biri olarak değeriendirildi. 1961-1964 yılları arasında Spence, bir martı gibi, benzinli motorla çalışan ilk başarılı ornithopteri geliştirdi. Prototip, Smithsonian Enstitüsü Hava ve Uzay Müzesi'nde dünyada bir ilk olarak sergileniyor (L'Aéronaute, 1873)



Şekil 1.15 Percival Spencer geliştirdiğı, oyuncak ornithopter (Jackson P, 2013)

İçten yanmalı motorlar gerek ağırlık gerekse güç açısından ornithopterler için verimsiz bir hareket mekanizmasıydı. Elektrik motorlarının gelişimiyle bu minik hava araçlarında kullanılmaya başlandı. Güç-ağırlık oranı olarak bakıldığında içten yanmalı

motorlardan çok daha verimli olan elektrik motorları, kanat hareket mekanizmasını basitleştirip çalışmasını daha kolay hale getirir.

1984’de Valentin Kiselev, Rusya’da radyo kontrollü, çift kanatlı bir ornithopter inşa etti. Daha yaygın olarak kullanılan zar tipinin aksine, kalın tandem kanatlara sahipti. Bir uçağın kanatlarına benziyorlardı, ancak kanat çırpma döngüsü boyunca kanadın her bir parçasının doğru hücum açısına sahip olmasını sağlayacak şekilde yapının gerekli bükülmesine izin verecek şekilde özel olarak tasarlanmaları gerekiyordu. Bunu başardı ve ilk elektrik motorlu ornithopteri uçurdu (Jackson P, 2013)



Şekil 1.16 Radyo kontrollü, Valentin Kiselev’in tasarladığı ornithopter (Daniel, 1987)

Paul Maccready, 70 milyonla 140 milyon yıl önce yaşayan uçan bir sürüngen olan dev gibi bir pterodaktilin, yarı boyutlu bir modelini yaptı. Bu model kanat açıklığı 5.5m olan ve uçuşu radyo frekansı ile kontrol edilen büyük bir ornithopterdi. İlk uçuşlar başarısızlıkla sonuçlansa da Paul daha sonraki denemelerde uçurmayı başarmıştır. Modelin kanat tahriki elektrik motoruyla sağlanmış ve motor mini bilgisayarla kontrol edilip stabilitesi sağlanmaya çalışılmıştır (Daniel, 1987)

Bir doğa bilimci olan Profesör Pettgrew 1873'te kanat çırparak uçan kuşların kanatlarını bir pervaneye benzeyecek şekilde büküğüne ve uçların 8 hareket tanımladığına dikkat çektiği "Hayvan Hareketler " üzerine çalışmasını yayınladı. Bu, insanların kanat çırpma hareketini yanlış yaptığı için kendisinin kanatlarla kaldırmayı başaramadığı sonucuna götürdü ve 1879'da Dandreu, bir figürü tanımlamak için

kanatların eğik bir aksa tutturulduğu sekiz hareketini oluşturacak şekilde bir aparat yaptı. Sonuçlar istenildiği gibi değildi ve başarısızlıkla sonuçlandı (Daniel, 1987).

2. LİTERATÜR TARAMASI

Düşünülen ornithopter projesi için günümüze kadar gelen bilgi birikimler büyük öneme sahiptir. Yıllar geçtikçe oluşturulan fikirler, çizimler ve makaleler sürekli geliştirilerek ve bu materyaller bir araya getirilerek birçok çalışma ortaya konulmuştur.

Karada hareket eden robotlar hareket kabiliyeti, rahat malzeme seçimi, otonom yetenekler ve birçok özellik bakımından donanımlı olmasına karşın, havada hareket eden robotlar onların kabiliyetlerinden çok uzaktır. Bu nedenlerden dolayı robotik kuş benzeri robotların tasarım ve kontrolü birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir.

Günümüzün modern uçakları, tonlarca ağırlıklarına rağmen sabit ve düzgün uçuş için son derece etkileyicidir. Bu uçakların pervaneleri, itiş çok verimli bir şekilde oluşturduğu ve günümüzün bombeli airfoil yapısı, hız ve verimlilik konusunda son derece optimize edildiği için bu makinalar havada kalabilmektedir. Ancak uçuş eylemine farklı açılardan bakıldığında kuşların gösterdiği performans, bizim yaptıklarımıza bakıldığında üst düzeyde olduğunu kabul etmeliyiz.

Kuşlarda bulunan verim, bizim yaptığımız küçük, orta ve büyük ölçekli tüm hava cihazlarda bulunmayan özelliklerdendir. Çok küçük miktarda yakıtla binlerce kilometre yol kat edebilirler. Ağırlıkları 16kg'a kadar ulaşan And akbabası (*Vultur gryphus*) üzerine yapılan araştırmada, 216 saatlik uçuşta kanata yerleştirilen biyo-kayıt cihazı sayesinde öğrenilen bilgiye göre And akbabalarının, uçuş sürelerinin yalnızca %1'i kadar kanat çırparak, geniş bir rüzgâr ve termal koşulları kullanarak süzülmeyi sürdürebildiklerini göstermektedir. Bu omurgalılarda en düşük enerji hareket maliyetleri arasındadır. Hatta bir kuş 5 saat boyunca kanat çırpmadan uçarak ~172 km yol kat ettiğini göstermişlerdir (Williams, 2020). İnsanların en hızlı hareketi olan koşma hareketi göz önüne aldığımızda vücut uzunluğunun 3-4 katı hareket ettikleri görülür, bir yarış atı saniyede yaklaşık vücut uzunluğunun 7 katını, bir çita saniyede vücut uzunluğunun 18 katını koşmaktadır (Norberg, 1990), SR-71 gibi süpersonik bir uçak , 3 Mach (~2000 mph) hızında hareket edebilen “Blackbird” yaklaşık saniyede vücut uzunluğunun 32 katı hızda gidebilirken, sıradan bir güvercinin (*Columba livia*) saniyede vücut uzunluğunun 75 katına çıkabilmesi

şaşırtıcıdır. Bir Avrupa sığırcığı (*Sturnus vulgaris*) saniyede 120 vücut uzunluğunda uçuşa yeteneğine sahiptir ve saniyede 140 vücut uzunluğunun üzerinde olan çeşitli hızlı türler daha da etkileyicidir (Shvy W., 2008). Bu tarz etkileyici yeteneklerin mekanik akşamlarla uygulanabilmesinden bu yüz yılda bile çok uzağız.

Kuşlar havayı yönlendirme ve etkileme yönünden baktığımızda da yaptığımız makinalardan ayrılmaktadır. Kanat çırpmadaki profesyonelliklerinin dışında, uçuşa sırasında çevrelerindeki hava akımıyla hassas bir şekilde etkileşim içerisinde oldukları görülmektedir. Bu etkileşimler, okyanus üzerindeki kesme tabakası veya bir sırt boyunca yükselen hava akımları gibi nispeten kalıcı aerodinamik yapılardan, geçici termal ve rüzgâr esintilerine, tek bir kanatla meydana gelen kararsız aerodinamiğe kadar birçok farklı zaman ölçeğinde meydana gelir. Kuşların dinamiklerinin farklı olması onların anlaşılması ve taklit edilmesini zorlaştırmaktadır. Büyük yolcu uçakları veya süpersonik savaş uçaklarının, kütle ve boyutlarından dolayı atmosferde gerçekleşen küçük hava olaylarına tepkisiz kalır. Ancak bunlardan önemli ölçekte küçük ve yavaş olan kuşların bu dinamiklerle verimli bir şekilde uçmayı ve konforu sağlamaktadırlar. Bu dinamikleri öylesi ne ustalıklarla kullanırlar ki dünyaya göre sabit kalabilirler. Yüzlerce metre yukarıdan aşağıdaki avını takip edebilmek için gözlerini sabit tutarlar, bunu karmaşık hava akımlarına karşı kanat ve kuyruk bölgelerinde küçük ayarlamalar yaparak sağlarlar. Günümüzde haberleşme, elektronik, pil ve aktüatörlerdeki minyatürleşme, malzeme teknolojilerinin gelişmesi araştırmacıların bu konulara daha fazla ilgi göstermesini sağlamıştır.

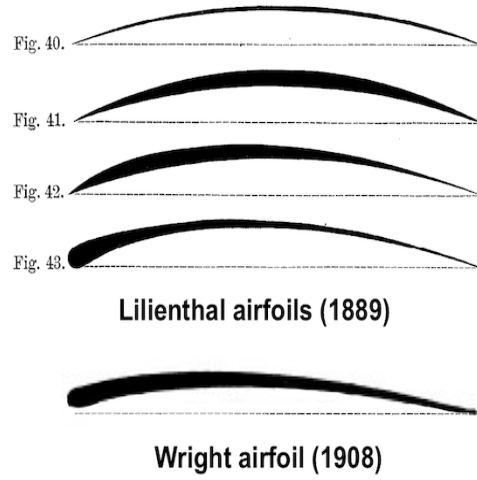
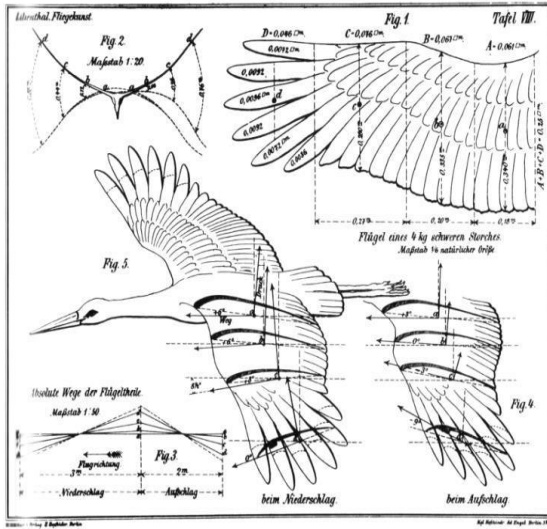
Bilimsel araştırmalardaki ilerlemeler ve endüstriyel uygulamalardaki gelişmeler, robotik üzerine kinematik ve dinamik, kontrol, programlama, sensörler, yapay zekâ, simülasyon ve mekanik tasarım gibi çok çeşitli yönleri kapsayan eğitim programların ortaya çıkmasına yol açmaktadır. Robotik kuşun kinematik ve dinamik modelinin geliştirilmesiyle davranış analizinin yapılabildiği bazı tatmin edici sonuçların çıkarılabileceğini gösteren çalışmada, kayma, kanat çırpma, kalkış, iniş, yörüngeleri takip etme ve diğer birçok argümanı, her türlü kapalı döngü eylemini simüle etmenin mümkün olduğu gösterilmiştir (Couceiro v Micael S., 2009).

Kuşlar kanat çırparken net ivme yoktur, yani tüm fiziksel kuvvetler sıfırdır. Taşıma kuvveti ağırlığı dengeler ve itki kuvveti sürüklemeyi dengeler. Kanat çırpma esnasında, kanat üzerine etki eden anlık kuvvetler dinamik bir şekilde etki etmektedir. Bu

esnada sürekli değişen kanat formu ve tüylerin elastik deformasyonu, anlık kuvvetleri hesaplamayı neredeyse imkânsız hale getirmektedir (Hedenström A., 2002). Burada aerodinamiğin ana ilişkilerini basitleştirmek, analizleri kolaylaştırır ve tahmini değerler ortaya koyulmasını sağlar. Bu indirgemeler, yalnızca kararlı akış durumu modelinin kullanıldığı, vuruş düzleminin yatay olduğu, kaldırma kuvvetinin bağlıl rüzgâr yönüne dik a ıllarda  retildeği, indüklenen rüzgârın nispeten küçük olduğu, kanat hareket ve formlarının benzer şekillere sahip olduğu, kanatın üst ölü noktaya ve alt ölü noktaya hareket sürelerinin aynı olduğu, ana hatlarıyla bu şekilde sıralanabilir. Bu varsayımlar havada almak için gereken ortalama taşıma katsayısı (c_L) gibi olguları bulmamıza yarar (Torkel W.F, 1973).

Uçuş aerodinamiğinin modellenmesi için iki tane yaklaşım vardır. İlk yaklaşım kanat boyunca uzanan şeride etki eden yerel kuvvetler tahmin ederek, bu kuvvetlerden elde edilecek sonucu tüm kanat açıklığına entegre ederek bulunur. Kararsız kanat hareketinde kanat üzerinde ani kuvvetlerin, aynı yerel hız ve saldırı açısı ile kararlı sabit bir akışkan gibi davrandığı varsayılır. Bir diğer yaklaşım ise çırpılan kanatların etrafındaki akışkanı deformasyona uğratmasıyla alakalıdır ve bu düzensizlikten yararlanır. Kanattaki aerodinamik kuvvet, momentum değişimi sonucu itki ile ilişkilidir. Bu nedenle uçan hayvanın arkasında biriken hava topolojisi ve kinetik enerjiden kaldırma ve sürükleme kuvvetleri hesaplanabilir. Bu yöntemler kanat vuruşunda hesaplanabilir kinematiğin problemlerini düzgün bir şekilde çözebilir, ancak anlık kanat kuvvetlerine bir çözüm sunamaz. Bunlardan dolayı seçilecek yaklaşım modellenecek hava aracının yapısına göre değişiklik gösterir (Torkel W.F, 1973). Her iki yaklaşım da üç ana sürükleme kuvvet bileşeninde paydaş olur. Bu bileşenler, indüklenmiş, profil ve parazit sürüklemesidir. Bunların toplamı, havadaki pozitif hız ile çarpıldığında, sabit harekette uçmak için gereken gücü verir. Basit ve yaygın olarak kullanılan bir uçuş modelinde, kanat çırpma sırasındaki aerodinamik kuvvetlerin değişkenliği dikkate alınmaz ve kuş, çap olarak kanat açıklığı olan dairesel bir disk ile temsil edilir ve vücudu ise  n perspektif görünümü temsil eder. Bu yaklaşım, prensipte, aşağı doğru saptırılmış havanın bir çekirdek jetini çevreleyen sonsuz ince bir girdap tabakasına sahip bir girdap izi modelidir. Kuş morfolojisi sadece kanat açıklığı ve ağırlığı ile temsil edildiğinden, kanat açıklıkları ve ağırlıkları aynı ise oldukça farklı kuşlar için aynı aerodinamik karakterizasyon elde edilecektir (Pennycuick, C.J., 1975).

Ornithopter 'in dinamikleri düşünülürken, birçok basitleştirme gerçekleştirilerek olayın anlaşılması ve kavranması kolaylaştırılmıştır. En yaygın indirgeme aerodinamiğin üç boyut değil iki boyutlu düşünülmesi olmuştur. Üç boyutlu aerodinamiğin modellenmesi sadece zor değildir, aynı zamanda doğru sonuçlar için esnek yapıların ve akışkan dinamiklerinin de modellenmesi gereken hareketli bir nesne ile üç boyutlu akışkan dinamiğini doğru bir şekilde simüle etmek, hesaplama açısından çok zahmetli ve maliyetlidir. Bu nedenle özellikler kanat yapılarının analizleri yapılırken iki boyutlu airfoil yapıları düşünülerek analizler gerçekleştirilir (Gies, S. H., 2017).



Şekil 2.1 Otto Lilienthal'ın Birdflight as the Basis of Aviation adlı kitabından bir figür ve Wright kardeşlerin airfoil tasarımıyla Otto Lilienthal'ın airfoil geometrileri

Şekil 17'de gösterilen resmin solun da Lilienthal, yirmi yıl boyunca kanatları anlayıp inşa etmek için (1867-1889) kuş kanatları üzerinde çalıştı ve küçük ölçekli deneyler yaptı. Sağdaki resimdeyse Wright kardeşlerin uzun yıllar süren azami deneylerinin sonucu olarak onlara, öne eğimi daha fazla yeni bir kanat geometrisi verdi. Bu küçük görünen değişim aslında Flyer'in başarısı için çok önemliydi.

Airfoil analizlerinde, taşıma- sürüklenme katsayıları ve bu katsayılarla bağlı oranlar çıkartılabilmektedir. Katsayılar tahmini sonuçlar verir, kanat yapısı bir bütün olarak düşünüldüğünde kanat esnekliği, alanı, veter uzunluğu vb. konular beraber düşünülmelidir. Kanat yapısının bu argümanlarının arasında kanat esnekliği önemli yere sahiptir. Yapılan araştırmada, 30000-10000 Reynolds sayısı aralığında, kanadın itme ve verimlilik özelliklerini elde etmek için iki bileşenli bir kuvvet dengesi kullanılarak bir su tüneline yapılan deneylerde, üç farklı sertlikte kanat yapısı kullanılarak deneyler

yapılmıştır. Orta düzey esnekliğe sahip kanadın itki üretimde daha verimli olduğu gözlemlenmiştir (Gies, S. H., 2017).

3. MATERYAL ve METOT

3.1 Proje Amacı

İnsansız hava araçları ilk örnekleri ornithopterler olsa da mekanik ve teknik zorluklardan dolayı ilk sivil ve askeri amaçlı insansız hava araçları sabit kanat ve sonrasında döner kanat cihazlar olmuştur. Bu cihazlardan sabit kanatlı olanları havada uzun süre kalabilmekte, döner kanat cihazlarsa çok kısa süreler havada kalabilmektedir. Buna karşılık robotik kuşta döner kanatlardan daha fazla havada kalabilmekte ve süzülme faaliyetiyle birlikte verimi arttırılabilmektedir. Robotik kuşların iskelet sisteminin çok hafif olması ve kanat açıklığı ve kanat alanına bağlı olarak yüksek taşıma kuvveti üretimi sayesinde havada kalma süresi uzatılabilmektedir. Özellikler termit gibi doğa olaylarının kullanılmasıyla robotik kuşun gökyüzüne tırmanıp süzülme hareketiyle uzun mesafeler katetmesi gerçekleştirilebilir özelliklerdir.

Robotik kuşu diğer insansız hava araçlarından ayıran özellikse kamufle olma yeteneğidir. Teknolojinin gelişmesiyle oluşan ileri İHA sistemlerine karşılık oluşturulan dron savar sistemleri askeri amaçla kullanılacak sistemlerin gözetleme ve yer tayini gibi konularda sıkıntı yaşamalarına sebep olmaktadır. Bu tip sistemler kamufle olma yeteneği sayesinde robotik kuşlara engel olamamaktadır.

Büyük boyutlu robotik kuşla çalışmak bazı konularda mikro hava araçlarını anlamayı kolaylaştırabilir. Bu projede ne kadar büyüklük ve ona bağlı olarak taşıma kuvveti önemli olsa da MAV'lar içinde benzer mekanik sistemler kullanılmaktadır. Projede tecrübe edilecek olan elektroniksel, yazılımsal ve mekanik uygulamalar MAV'ları içinde ışıktır (Heathcote, Sam, Z. Wang, 2008).

3.2 Tasarım

Günümüzde ve geçmişte doğadan ilham alınarak yapılan birçok çalışma vardır. İnsanlar ihtiyaçlarına uygun ya da doğaya olan hayranlıklarından ötürü birçok çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmalar geçmişte daha yüzeysel tasarımlar olarak hayat bulmuştur. Teknolojik yetersizliklerden dolayı uygulama zorluklarıyla karşılaşmış ve çoğu tasarım çizim ve düşüncede kalmıştır.

Son bir asırda sağlanan gelişmeler vasıtasıyla, elektrik-elektronikte ve malzeme biliminde çok fazla yol alınmıştır. Bu gelişim insansız hava araçlarında yansımış, 20 yıl içerisinde model uçak tasarımı ve yapımı gerçekleştirilmiştir. Maliyetlerinde düşmesi ve ulaşılabilirliğin artmasıyla üretim zinciri genişlemiştir. Bazı standart haberleşme protokolleri ve elektronik sistemler vasıtasıyla her kesimden insanın yapabildiği insansız hava araçları yayınlamıştır.

Uçan hayvanlar yüzyıllardır bilim insanları tarafından incelenmişlerdir. Özellikle kanat çırpma mekanizmaları üzerine yapılan incelemelerle birçok çizim ve tasarım yapılmıştır. Her ne kadar kuşlar incelenip taklit edilmeye çalışılsalar da henüz ulaşamadığımız teknolojiyle sahiptirler. Kanat katlama yapıları, kanat teleklerinin aerodinamik faydaları, keskin manevra kabiliyetleri, çok uzun mesafeler alabilmeleri gibi birçok ulaşılamayan donanımlara sahiptirler. İnsansız hava araçları kuşların sahip oldukları bu ve benzeri birçok özellikten çok uzaktır.

İnsansız hava araçlarının çırpan kanat modellerine yaklaşık 10 yıldır ciddi çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar benzetimi yapılacak kuşun ilk önce iki boyutlu airfoil'lerinin incelenip analiz edilmesiyle, daha sonrada bu airfoil yapısı kullanılarak kanat inşa edilip deneysel olarak incelenmesini kapsamaktadır. Bu kapsamda elde edilmek istenen yüksek taşıma kuvvetidir.

Bir diğer insansız hava aracı çalışması ise mini boyuttaki kuşlar ve mikro yapıdaki sineklerdir. Bunlara ise genel olarak kanat çırpma şekillerinin taklit edilmesi şeklinde çalışılmaktadır. Boyutları çok küçük olan bu cihazlar özellikle yüksek manevra kabiliyetleri sayesinde birçok araştırmacının ilgi odağı olmuştur.

3.3 Tasarım İçin Gerekli Doneler

Tasarımın başlangıç aşaması nasıl bir kuş benzetimi yapılacağının seçilmesi olduğundan dolayı çok önemlidir. Bu tasarlanacak ve uygulaması yapılacak robotik kuşun inşa edilebilmesi ve başarıya ulaşabilmek için dikkate alınmalıdır.

Gerçekleştirilmesi düşünülen robotik kuşun doğadaki kuş türleri arasında seçilimi yapılması gerekmektedir. Bu seçim süzülme yeteneği, literatürde verilerine kolay ulaşabilme, uçuş seyir hızlarının değerlendirilmesi, kanat açıklık oranı gibi konularda analizleri düzgün bir şekilde yapıp, üretilebilirliğine ikna olunmalıdır.

3.4 Kanat Tasarımı

Uçuşun en ideal şekli kuşların havada gösterdikleri harikalarla ifade edilmektedir. Şimdiye kadar B747, A320, F22 vb. gibi birçok uçak tipi tasarlanmıştır. Ama bu geleneksel rijit uçaklar, belirli bir uçuş zarfına veya yakıt tüketimine ve daha az manevra kabiliyetine sahiptirler. Örnek verilecek olursa, en-boy oranı düşük bir uçak, mükemmel manevra kabiliyeti ile daha hızlı uçmaktadır, ama yakıt verimliliğinden bahsetmek zordur. Bir diğer taraftan bakılacak olursa, en-boy oranı yüksek uçaklar daha yavaş uçmaktadır, ama aerodinamik parametreleri iyi ve yakıt yakma konusunda ekonomik olacaktır. Mükemmel uçuş performansını sağlamak ve kontrol yetkisinin sürekli gereksinimleri ile, dönüşen kanat konseptinin, çok çeşitli çalışma koşullarında geliştirilmiş aerodinamik özellikleri sağlaması önerilmiştir ve çeşitli kanat değiştirme mekanizmaları, pasif bir şekilde önerilmiştir. Ancak kuşların uçuşu ve manevra kabiliyetlerinin çok uzağında kalınmıştır. Her şeyden önce, kuşların mükemmel uçuş yeteneklerinin anahtarı, özel kanat profillerini kullanarak kanat şekillerini akıllı ve verimli bir şekilde değiştirebilmeleridir. Şimdiye kadar, geleneksel kanatlara sahip hava araçlarına çok fazla çaba gösterildi. Bununla birlikte, ikincil bir tüy kuş uçuşunda önemli bir rol oynamıştır. Bu nedenle, ikincil bir tüy ile belirli bir kombine kanat profili ve ikincil bir tüyün manevra sırasında aerodinamik üzerindeki etkileri araştırma konularındandır (Tang, D ve ark., 2019)

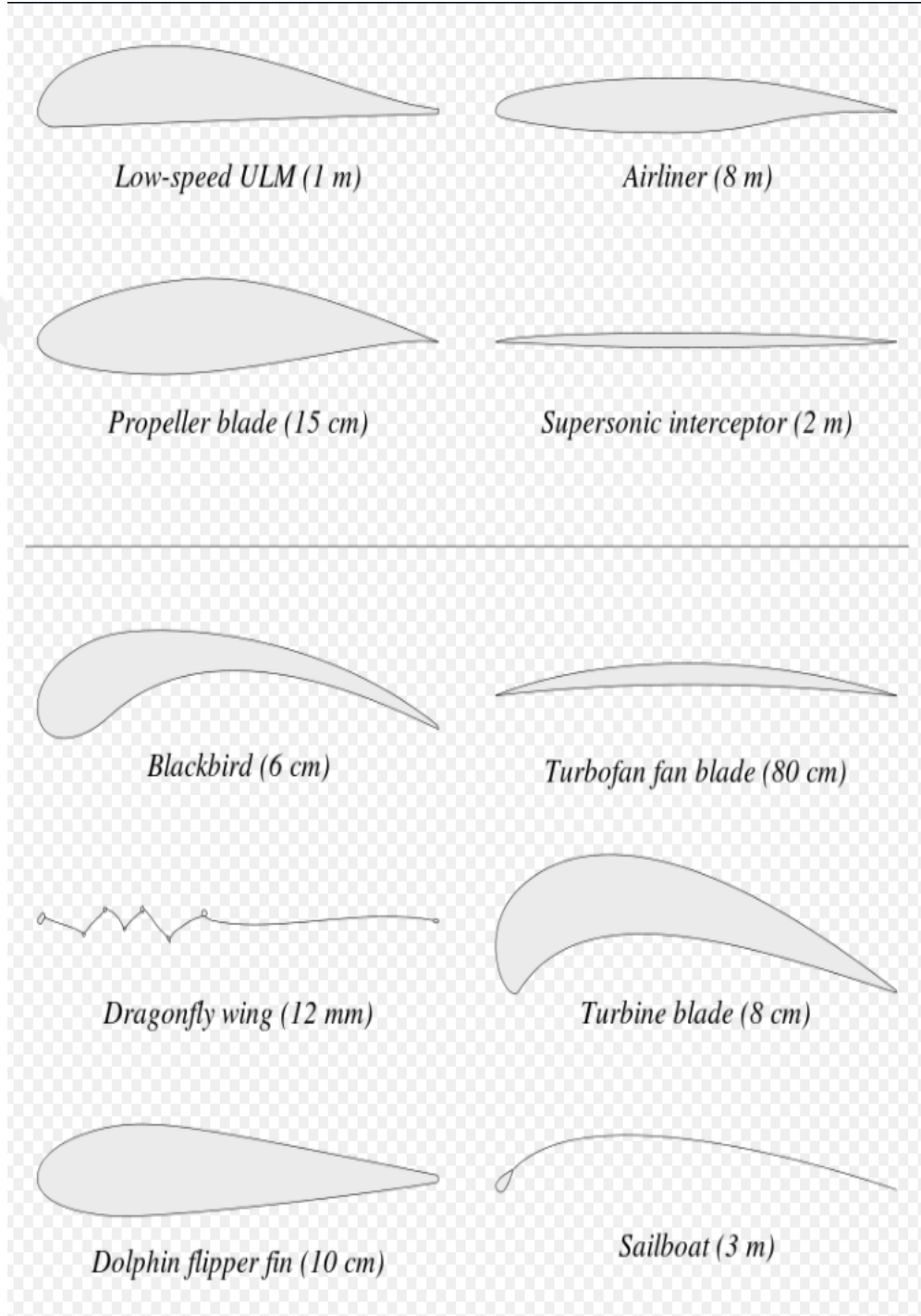
Kanat bir kuşun nasıl uçacağını belirlemede en önemli faktördür. Yüzey alanı, veter uzunluğu, kanat açıklık oranı, kullanılan malzemeler, eklem yapısı, airfoil yapıları taşıma ve itki üretiminin ana nedenleridir. Bu nedenle belirlenmesi gereken parametreler, robotik kuşun performansını taşıma/sürüklenme oranı ve sürüklemeyi doğrudan etkileyecektir.

Geleneksel uçak ve planörlerdeki tasarımla robotik kuşu kıyasladığımızda bazı ölçütler değişmektedir. Kanatların hareketli oluşu ve kanadı örten malzemenin esnekliği durumu fazlasıyla değiştirmektedir. Diğer hava araçlarında bulunan aileronların, robotik kuşta aşağı ve yukarı kanat çırpma doğal olarak esnemeleri kalkış ve tırmanıştaki farklılığı ortaya koymaktadır.

3.4.1 Airfoil tanımı

Kanat profili genel manada herhangi bir akışkanın içerisinde hareket eden taşıtın en uygun C_l/C_d oranını yakalamak için oluşturulan geometridir. Bu geometri genellikle

bir damlayı andırsa da çok farklı modelleri mevcuttur. Aerodinamik kuvvetin hava aracının ağırlığını kaldırabilmesi için özel olarak şekillendirilmiş bir cismi kanat olarak kullanarak, taşıma kuvveti üretilmektedir. Hava içerisindeki hareketine karşı direnç göstermeden gidiş istikametine dik yönlü bir aerodinamik kuvvet (taşıma) oluşturmak üzere şekillendirilmiş cisimdir.



Şekil 3.1 Farklı kanat profilleri (Holmes, 1984)

Kanat profilleri Bernoulli prensibine göre tasarlanır, yani profilin emme yüzeyinde (profilin üst bölgesi) havanın hızının artması statik basıncın düşmesi, profilin baskı yüzeyindeyse (profilin alt bölgesi) tam tersi olan, emme yüzeyine kıyasla yüksek statik basınca sahip olması istenir. Bundan dolayı aerodinamik kuvvetler oluşur ve hava aracı havada kalabilmektedir.

Kanat profilleri kullanım amacına ve hava aracından beklenen özelliklere göre seçilmektedir. Şekil 3.1 'da simetrik ve asimetrik kanatlar bulunmaktadır. Bu kanat profilleri süpersonik hızlar, yüksek hızlar ve düşük hızlar için kullanılmaktadır. Profil seçimi hava aracının inşasında çok önemli bir rol oynar.

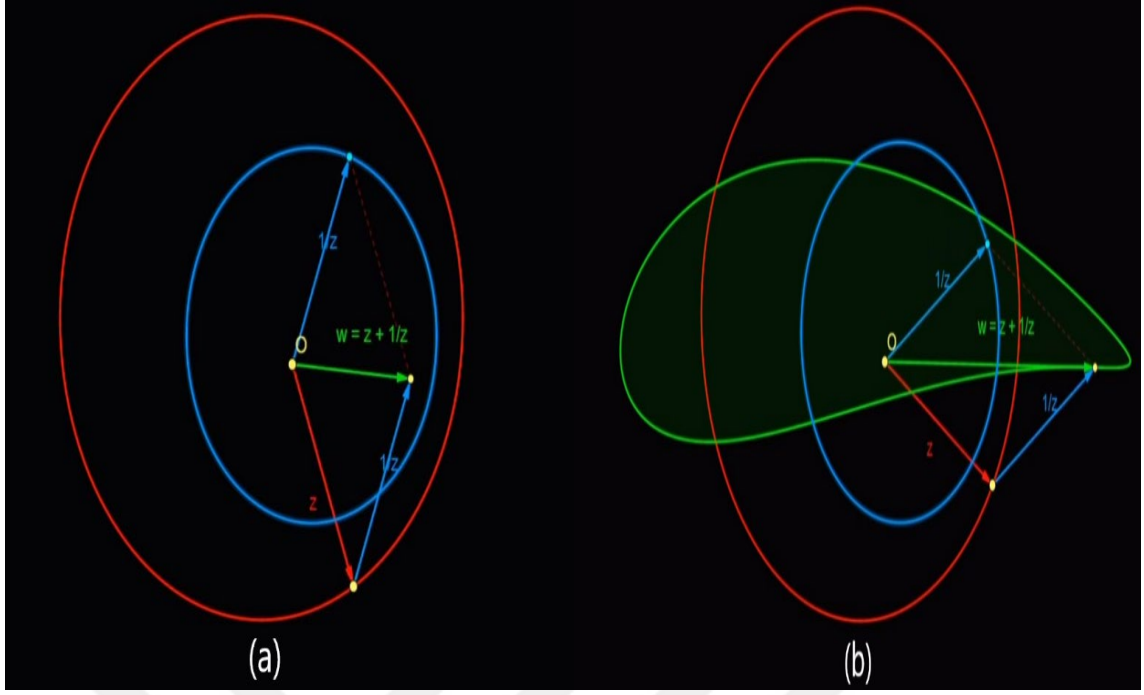
3.4.2 Kanat geometrisinin matematiksel oluşum mantığı

Uçuşun sırrı kanat profilinden geçmektedir. Kuşlar ve yarasalara baktığımızda çok çeşitli bir kanat profili yelpazesi olduğu anlaşılmaktadır. Bu farklılıklar hız, manevra kabiliyeti ve havada asılı kalma gibi farklı niteliklerin çeşitliliğine izin vermektedir. Bunlara dayanarak birçok farklı kanat profil yapısı bulunmaktadır. 20.yy'ın başlarına kadar daha çok deneyimlerle anlaşılmaya ve öğrenilmeye çalışılan kanat profilleri, sonralarda matematiğin yardımıyla üretilmeye başlanmıştır.

Yeni bir kanat profili tasarlamada özellikle önemli olan, birçok çalışma koşulunda istenilen kanat profili performansının elde edilebilmesidir. Bahsedilen performans gereksinimleri ise tipik olarak maksimum ve minimum kaldırma katsayılarına, düşük sürüklenme aralığının genişliğine, kanat profili kalınlık oranına ve yunuslama momenti olarak ifade edilebilir (Yükselen M.A, 2006)

Bir kanat profilinin geometrisi, genellikle koordinatların birleştirilmesiyle belirlenir. Bir kanat profili hattı oluşturmak için bir dizi koordinat noktasının verisi oluşturarak ve görüntü nokta matrisini düzgün bir eğri ile birbirine bağlayarak yapılandırılır. Bu nedenle, bir dizi koordinat verisi yalnızca bir kanat profilini temsil eder.

Analitik fonksiyon (Joukowski kanat profili dönüşümü) kanat profilini veya kanadı ifade etmek için kullanılır. Fonksiyondaki sabit değer değiştiğinde, yeni bir kanat profili oluşturulabilir ve fonksiyon parametrelerinin geometrik anlamı çok açıktır. Parametre değerleri ayarlanarak istenilen kanat profili oluşturulabilir ve ters tasarım gerçekleştirilir.

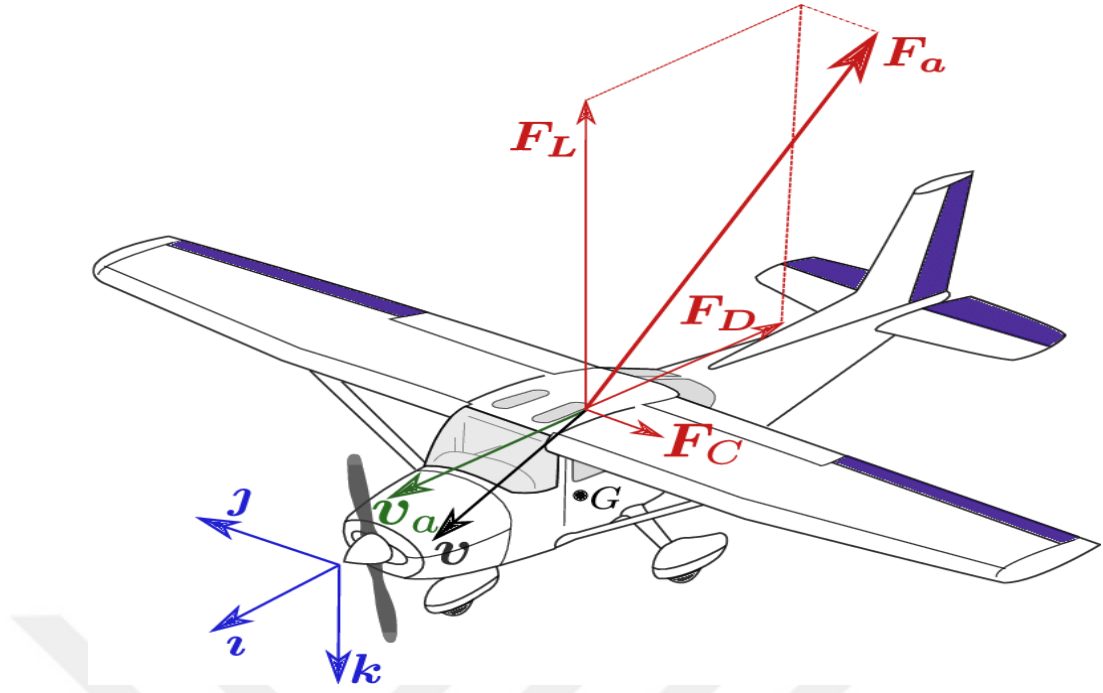


Şekil 3.2 Joukowski dönüşümünden faydalanılarak oluşturulan kanat profili (a) z düzlemi (b) ζ düzlemi

$$z = \zeta + \frac{1}{\zeta} \quad (1.1)$$

Joukowski dönüşümü, z düzlemindeki bir daireyi, ζ düzlemindeki bir kanat profili şekline (1) nolu denkleme eşleyen karmaşık bir değişkenin analitik bir fonksiyonudur. Haritalama, dönüşümün kritik noktaları dışında işlevseldir. Bu, görüntü noktalarında gerçekleşir.

Kanat profilinin keskin arka kenarı, daireyi kritik noktadan geçmeye zorlayarak elde edilir. Kanat profilinin arka kenarı konumunda bulunur ve ön kenar, kanat profili konturunun geçtiği nokta olarak tanımlanır. Bu nokta kanat profili şekline göre değişir ve sayısal olarak hesaplanır. Kanat profilinin ön kenarından arka kenarına kadar olan mesafe, aerodinamik topluluğunun birim açıklık başına boyutsuz kaldırma ve yunuslama momenti ölçümleri için karakteristik uzunluk olarak kullandığı kiriştir momenti ölçümleri için karakteristik uzunluk olarak kullandığı kiriştir (Yükselen M.A, 2006).



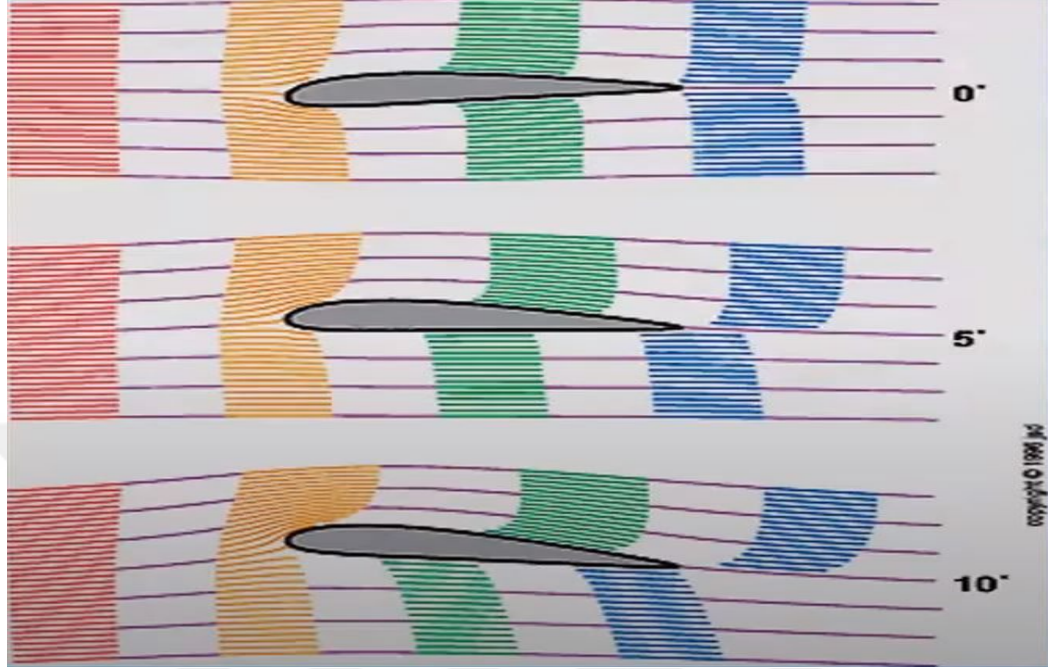
Şekil 3.3 Uçağı maruz kaldığı aerodinamik kuvvetler (Anderson Jr., 2001)

Kanat profili seçerken, hava aracının boyutu, ağırlığı gibi argümanlara bakılarak bazı kuvvetlerin analizi yapılmalıdır. Havada kalabilmesi ve ilerleyebilmesi, bazı aerodinamik kuvvetlerin sorgulanmasıyla mümkün olur. Kanat profilini seçerken dikkat edilmesi gereken hususlar:

- Basınç katsayısı
- Taşıma kuvveti
- Sürüklenme kuvveti
 - Parazit sürüklenme
 - İndüklenmiş sürüklenme

Öncelikle hücum açısının açıklanması gerekir. Hava aracının ilerlemekte olduğu doğrultuda, izafi rüzgârın etkili olması demektir. Hava aracının dış yüzeyine etkiyen izafi rüzgâr uçuş doğrultusuna ters yöndedir. Bu bilgilere dayanarak veter çizgisi ve uçuş doğrultusu arasında meydana gelen açı hücum açısıdır. Bir hava aracı genel olarak yerden kalkarken yerle yaptığı açı değil, uçuş doğrultusuyla yaptığı açı hücum açısı olarak kabul edilmelidir. Bu açı (α) simgesiyle gösterilmektedir.

Kuşlar hücum açısını en verimli kullanan hayvanlardır. Süzülme olayını gerçekleştirmek için optimum hücum açısıyla izafi rüzgâra karşı durabilmekteler. Bu duruş onların saatlerce sürüklenmelerini sağlamaktadır.



Şekil 3.4 Hücum açısının artışıyla ilgili olarak, profil üzerinden geçen havanın hızlanması (Bana, 1969)

Emme ve baskı yüzeylerinden akan akışkanın hücum açısına bağlı olarak nasıl değiştiği, şekil 3.4’ de gösterilmiştir. Kırmızı renkte hava akış çizgileri, serbest akımı ifade eder. Hücum açısının 0° olduğunda hava akım çizgilerinin değişmediği, açının 5° ve 10° olduğu görsellere bakıldığında aynı renkte bulunan hava akım çizgilerinin farklılığı yani emme bölgesindeki akım çizgilerin baskı bölgesindekilere göre daha hızlı olduğu görülmektedir.

3.5 Aerodinamik Katsayılar

Aerodinamik kuvvetlerin iki ana bileşeni vardır. Kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri, kuş ve hava arasındaki nispi hareketin neden olduğu kanatlar üzerindeki aerodinamik kuvvetin bileşenleridir. Bunlar gelen hava akışına göre yönleriyle tanımlanırlar. Kaldırma, gelen hava akışına dik olan kuvvet bileşenidir ve sürtünme, havayla aynı doğrultuda olan bileşendir (Yavçin, E, 2014). Sadece kuş ve hava arasındaki bağıl hareket söz konusudur. Hava yere göre hareketsiz ve kuş yatay olarak uçuyor ise kar taneleri gibi asılı kalan parçacıklar yatay olarak yaklaşıyor gibi görünürken, kuş

alçalırken gelen hava akışını görür. Akış hangi yönden gelirse gelsin, kaldırma kuvvetin o yöne dik bileşeni, sürüklenme ise onunla aynı doğrultuda olan bileşen olarak tanımlanır. Çırpınan bir kanatta, gelen hava akışı kanadın farklı kısımlarında farklı yönlerden gelir ve sonuç olarak toplam kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin katkı sağlayan kuvvetler oluşur.

Kanat, gelen hava akışına neredeyse dik olan ve böylece kaldırma-sürüklenme oranını en üst düzeye çıkaran bir kuvvet oluşturan yapıdır. Kuşlarda ve hava araçlarında da benzer şekilde uçuşun sırrı, ağırlığı desteklemek ve manevra yapmak için kaldırma kuvvetlerini kullanmaktır ayrıca diğer bir mesele ise çok daha küçük sürüklenme kuvvetinin oluşmasının sağlanmasıdır. Düşünülenin aksine havada asılı duran bir helikopterin motoru doğrudan yerçekimine karşı iş yapmaz. İş, endüvi miline tork uygulayan bir motor kuvveti veya her bir kanadın ucuna yatay bir şekilde kuvvet uygulayan jetler tarafından yapılır. Motor, kanatları yatay olarak döndürür ve kaldırmalarına karşı değil, sürtünmelerine karşı çalıştırır. Bir rotor kanadının kaldırma-sürüklenme oranı sonsuz olsaydı (gelen hava akışına dik aerodinamik kuvvet), o zaman helikopter güç harcamaksızın havada asılı kalabilirdi. Bu, sonlu çaplı bir rotorla mümkün değildir, çünkü indüklenen güç, kanatlar üzerinde indüklenmiş sürüklenme olarak görünür.

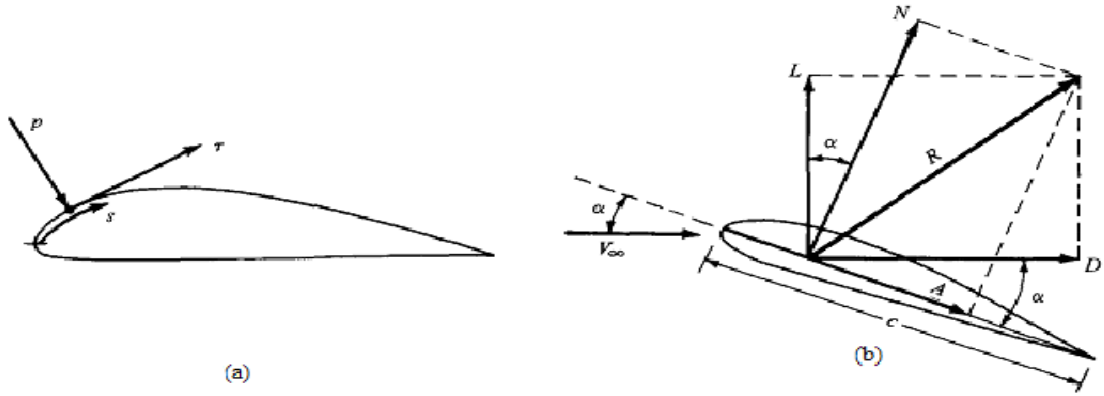
Herhangi bir cismin ağırlığı her zaman dünyanın merkezine, bizlerin “aşağı” dediği yönü gösterir. Bir planör sabit bir hızla düz uçtuğunda ağırlığı, bağıl hava akışına neredeyse (ama asla tam olarak dik olmayan) kaldırma ve sürüklenmenin sonucu Şekil 3.5’de gösterilen bileşke kuvvet olan (R) ile dengelenir. R ’nin dikey olarak yukarıya bakması gerekir, bundan dolayı R ’nin bağıl hava akışına dik bileşeni olan kaldırma kuvveti bu durumda dikey değil, ileriye doğru eğimlidir. Sürüklenme kuvveti, uçuş yolu boyunca geriye ve hafifçe yukarıya işaret eder.

Bir pervaneli uçak düşündüğümüzde pervane, sürüklemeyi dengeleyen bir itme kuvveti oluşturur. Artık uçuş yolu boyunca net bir kuvvet olmadığından, ağırlık yalnızca kaldırma ile dengelenebilir, bu da uçuş yolunun yatay olabileceği anlamına gelir. Pervane, ağırlıktan çok daha küçük olan sürüklenme kuvvetine karşı çalışır. Bir paraşütçüyü düşündüğümüzde ağırlığı hala aşağıyı gösterir, ancak saf bir paraşüt, kaldırma olmaksızın yalnızca sürüklenme üretir ve bu nedenle uçuş yolu doğrudan aşağı yönlendirilir. Acil durum paraşütünün işlevi, hızı yeterince yavaşlatmaktır, böylece paraşütçünün zemine çarpmasını engellemiş olur. Paraşütçülerin paraşütleri, seçilen bir iniş noktasına

yönlendirmek için yeterli kaldırma sağlar. İndüklenen güç için ifade yani sonsuz çaplı bir rotora sahip bir helikopter veya sonsuz kanat açıklığına sahip bir kuş, indüklenmiş bir güç olmadan gerçekten havada kalabilecektir. Gerçek dünyada, kanat açıklığı ne kadar büyükse, indüklenen güç o kadar az olur. Bu gücün matematiksel ifadesi şu şekildedir (Pennycuick, C.J, 2008):

$$P_{ind} = \frac{2k(mg)^2}{v_t \pi B^2 \rho} \quad (1.2)$$

denklemden mg ağırlığı, v_t gerçek hava hızını, B kanat açıklığını, k ise sabit bir değer olup indüklenmiş güç faktörünü ifade etmektedir.



Şekil 3.5 Kanat profilinde oluşan aerodinamik kuvvetler (Anderson Jr., 2001)

Kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin büyüklükleri kendi başlarına çok bilgilendirici değildir, ancak boyutsuz katsayılar, kaldırma katsayısı ve sürüklenme katsayısı olarak ifade edilerek bir anlam verilebilir. Her katsayı, hava hızını, kanat alanını ve hava yoğunluğunu hesaba katan gerçek kuvvetin bir referans kuvvete oranıdır. Bu referans kuvveti, dinamik basıncın kanat alanı ile çarpılmasıyla oluşur. Dinamik basınç, serbest rüzgârı gösteren kör bir tüpteki basınçtır ve şu şekilde ifade edilir (Pennycuick, C.J, 2008):

$$q = \frac{\rho V_t^2}{2} \quad (1.3)$$

3.5.1 Basınç katsayısı

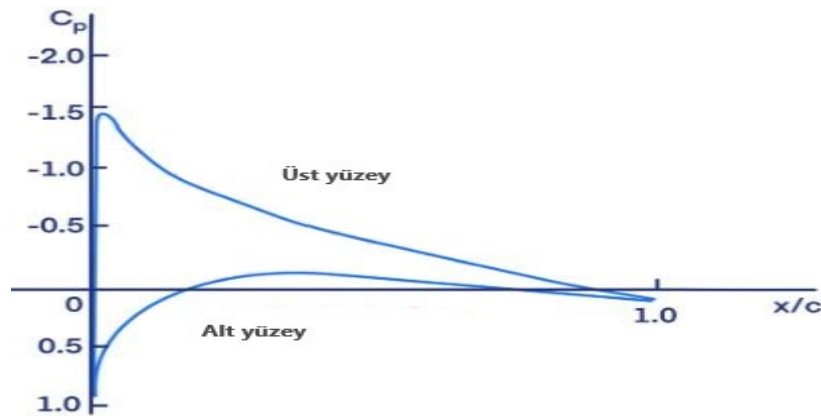
Bir hava aracının basınçla olan ilişkisi, hareket nedeniyle doğrudan alakalıdır. Hava araçlarına etki eden dört ana kuvvet, kaldırma, sürüklenme, itme ve ağırlıktır. Sabit

durum uçuşu sırasında, bir hava aracı oluşturduğu ağırlığı kaldırma kuvvetiyle ile dengelerken, bir hava aracının sürüklemesi üretilen itme kuvveti ile dengelenecektir.

Bir kanat profili üzerindeki basınç dağılımı, normal olarak bileşenlere ayrılan net bir bileşke kuvvet oluşturur. Kanat profili serbest akış yönüne göre kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri veya kanat profiline göre normal ve eksenel kuvvetler olarak düşünülür. Ortaya çıkan kuvvet genellikle bir kaldırma kuvveti, sürüklenme kuvveti ve kanat profilinin ön kenarından itibaren toplam veter uzunluğunun dörtte birinde bulunan, bir nokta etrafında hareket eden moment olarak ifade edilir.

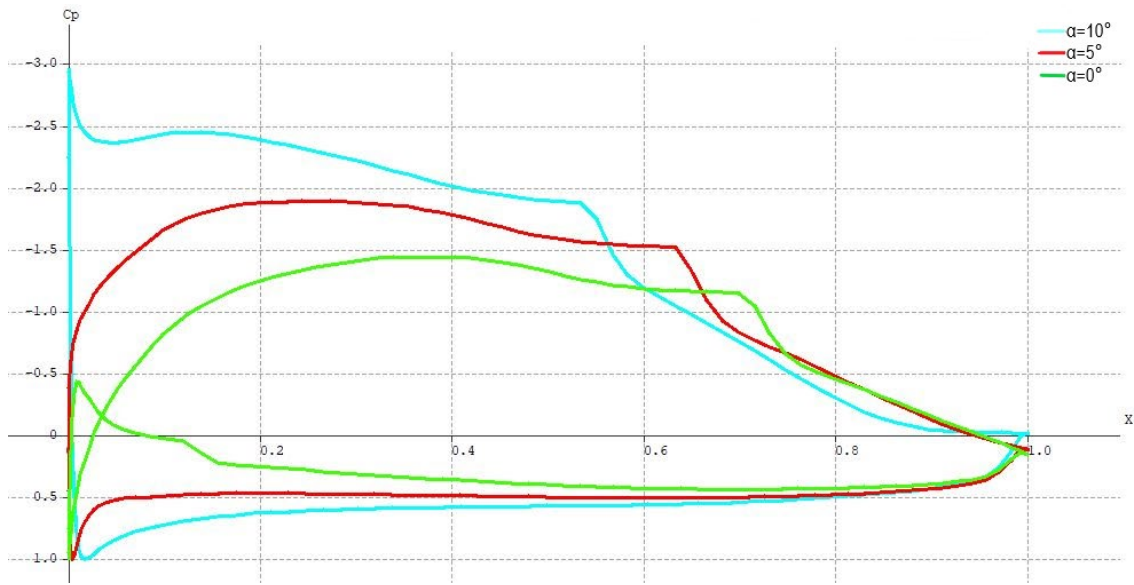
Basıncın dağılımı, kanadın üst hücum kenarı üzerindeki atmosferik basınç olaylarından çok daha düşük basınçlarla karakterize edilir. Bu, en büyük yüzey eğriliği alanı ile ilişkili olup, hava hücum kenarı etrafında hızlandırıldığında statik basınç düşer. Hava üst yüzey üzerinden firar kenarına doğru giderken, basınç atmosferik basınca doğru geri döner. Alt yüzey üzerindeki hava akışı, havanın kinetik enerjisinin tamamen statik basınca dönüştürüldüğü, alt hücum kenarı yüzeyinde bir durgunluk noktası ile karakterize edilir. Bu nokta en yüksek mutlak basınç noktası olarak adlandırılır. Alt yüzey üzerindeki hava basıncı tipik olarak atmosfer basıncından daha yüksektir ve basınç firar kenarına doğru azalır.

Negatif basınç katsayıları, atmosfer basıncından daha düşük yerel hava basınçlarını temsil ederken, pozitif basınç katsayıları, atmosfer basıncından daha yüksek yerel hava basınçlarını temsil eder (Caramin, 2015). Ulaşılabilir maksimum basınç katsayısı, durgunluk basıncını temsil eden bir katsayıdır. Sıfır basınç katsayısı, atmosfer basıncını temsil eder. Bir basınç katsayısı grafiğinin y eksenini tersine çevrilir, böylece grafikteki üst çizgi üst kanat profili yüzeyi üzerindeki basınç katsayılarını gösterir.



Şekil 3.6 Basıncın kanat profilinin alt ve üst yüzeylerindeki basınç dağılımı

Kanat profili üzerindeki basınç katsayılarının dağılımı, kanat profilinin hücum açısına ve hava akışının Reynolds sayısına göre değişiklik göstermektedir. Basınç dağılımları, gerçek şartlar göz önünde bulundurulduğunda rüzgâr tüneli testi ve sayısal hesaplama yöntemleri dahil olmak üzere birçok iyi geliştirilmiş yöntem kullanılarak tahmin edilir. Hücum açısının basınç katsayısına etkisi de büyüktür. Hücum açısının basınç dağılımına etkisi Şekil 3.7’de gösterilmektedir. Hücum açısı arttıkça üst hücum kenar yüzeyi üzerindeki tepe basınç katsayıları artarken, hücum açısının artmasıyla alt hücum kenar yüzeyindeki durma noktası geriye doğru hareket etme eğilimi gösterir.



Şekil 3.7 Değişken hücum açılarına göre basınç katsayısı

Yüzeyde oluşan basınç dağılımının katsayısı olarak kanat profiline etkileri bileşke kuvveti temsil eder. Viter uzunluğu boyunca normal, eksenel kuvvet ve moment katsayıları dağılımın integrasyonu yoluyla hesaplanabilir. Hava aracı tasarlanırken davranış biçiminin tahmini ve gövdenin geometrisinin aerodinamik yükleri olumlu bir şekilde karşılayabilmesi için basınç dağılımının iyi analiz edilmesi gerekmektedir.

Sıkıştırılamaz akıştan hipersonik akışa kadar tüm aerodinamiklerde kullanılmaktadır. Aerodinamik literatüründe, basıncın kendisinden ziyade C_p cinsinden verilen basınç katsayılarını bulmak çok yaygındır. Matematiksel modeli şu şekildedir (Yükselen M.A, 2006):

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{q_\infty} \quad (1.4)$$

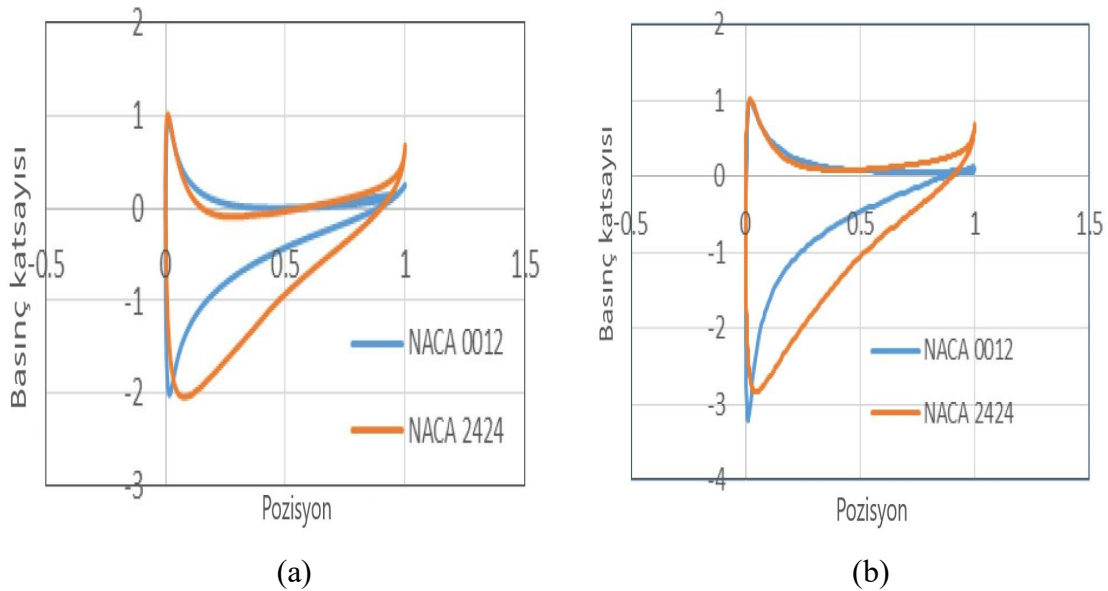
$$q_{\infty} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{\infty} \cdot V_{\infty}^2 \quad (1.5)$$

Burada p yerel basınç kuvveti, p_{∞} serbest akış statik basıncı, q_{∞} serbest akış dinamik basınçtır. Dinamik basınçsa yoğunluk ve hız ile ters orantılı olarak değişmektedir.

Sıkıştırılmaz akış için, C_p yalnızca hız cinsinden ifade edilebilir. p_{∞} basıncı ve V_{∞} hızı ile serbest akışa daldırılmış bir aerodinamik gövde üzerindeki akışı düşünülürse. Akışta basınç ve hızın sırasıyla p ve V olduğu keyfi bir nokta seçildiğinde (Yükselen M.A, 2006):

$$C_p = 1 - \left(\frac{v}{v_{\infty}} \right)^2 \quad (1.6)$$

olarak bulunmaktadır. Basınç kuvveti kanatın emme yüzeyinde hızın en yüksek olduğu yani basıncın en düşük olduğu noktaların grafiğinin çizilmesi işlevseldir. Grafik veter boyunca basıncın nasıl davrandığını açıklayan çok önemli bir göstergedir. Ön ve arka yüzeylerinde basınç davranışını, buna dayanarak kanat profil seçimine yardımcı olmaktadır.



Şekil 3.8 NACA 0012 ve NACA 2424 kanat profilleri için basınç katsayıları
(Issue S,2019)

Yukarıda grafiksel olarak gösterilen basınç katsayıları, hücum açısına göre değişimi gösterilmektedir. Şekil 25 (a) grafiğinin de hücum açısı 6° ve (b)'de ise 9° olarak

analiz edilmiştir. Kanat profilinde emme yüzeyinin basınç katsayısı negatif, baskı yüzeyinde ise pozitifdir, bundan dolayı kanat profilinin kaldırma kuvveti yukarı yöndedir. Hücüm açısı ne kadar büyükse, emme ve baskı yüzeyleri arasındaki basınç katsayı farkının da o kadar büyük olduğu görülmektedir. Basınç katsayı farkı ön kenarda arka kenardan çok daha büyüktür, bu nedenle kanat profilinin asıl kaldırma kuvvetini ürettiği yer olarak ön kenar olduğu anlaşılmaktadır.

3.5.2 Taşıma kuvveti ve oluşumu

Newton'un yasalarıyla, uçan bir kuş, dünyanın merkezine doğru yönlendirilmiş bir kuvvet, kuşun ağırlığını uygulayan yerçekimi alanına daldırılır. Newton'un Birinci Hareket Yasası, güvercin sabit yüksekliği koruyorsa ve yukarı veya aşağı doğru hızlanmıyorsa, üzerine etki eden net dikey kuvvetin sıfır olması gerektiğini, yani ağırlığın eşit büyüklükte yukarı doğru bir kuvvetle dengelendiğini söylüyor. Bu, kanatlardan geçen hava tarafından üretilen aerodinamik bir kuvvettir. Bu Newton'un, "kuvvet" in momentum değişim oranı ile aynı olduğunu söyleyen İkinci Yasasına bağlıdır. Havanın kütlesi vardır ve kuş, kanatlarının üzerinden geçen bir hava akımına aşağı doğru momentum vererek vücudunda yukarı doğru bir kuvvet oluşturur. Tüm uçan hayvanlar ve hava araçları aşağı doğru akım oluşturur ve momentum dengesini koruyarak düz uçuşta ağırlıklarını destekler. Sabit, hızlandırılmamış uçuşta bu, havaya aşağı doğru momentumun verildiği hızın kuşun ağırlığına eşit olması gerektiği anlamına gelir.

Kuşların kanatları karmaşık yapıya sahip oldukları için kanat modellerinde olduğu gibi bir rüzgâr tüneline test etmek mümkün değildir, ama bir kuşu eğimli bir rüzgâr tüneline süzülmesini sağlayarak ölçüm yapmak ve süzulebileceği minimum hızı belirlemek mümkündür. Sonuçlar, en-boy oranı 6-8 olan kuşların ve yarasaların, tam kontrol altında, 1,5-1,6 civarında taşıma katsayılarının istikrarlı bir uçuş için yeterli olduğunu ve süzulebildiğini, ama kanatlarının tam olarak uzatmadıklarını göstermektedir. Kuşlar, iniş yapmak gibi geçici olarak, düşük hızlı manevralarda maksimum kanat açıklığı ve alanı elde etmek için dirsek ve bilek eklemlerini anlık olarak uzatır. Biraz daha yüksek bir taşıma katsayısını (1,8 civarında) yönetebilirler. Çok düşük hızlarda ve yüksek hücum açılarında, birincil tüyler kanat uçlarında birbirinden ayrılır ve burun aşağı yönde bükülür, bunun sonucu olarak uçtaki yerel hücum açısı otomatik olarak azalır. Bu, kanat uçlarının tıkanmasını önler ve taşıma katsayısının klasik grafiklerinde olduğu gibi basit kanatlarda görülen taşıma katsayısı eğrisindeki keskin kırılmayı düzleştirir. Kuşların

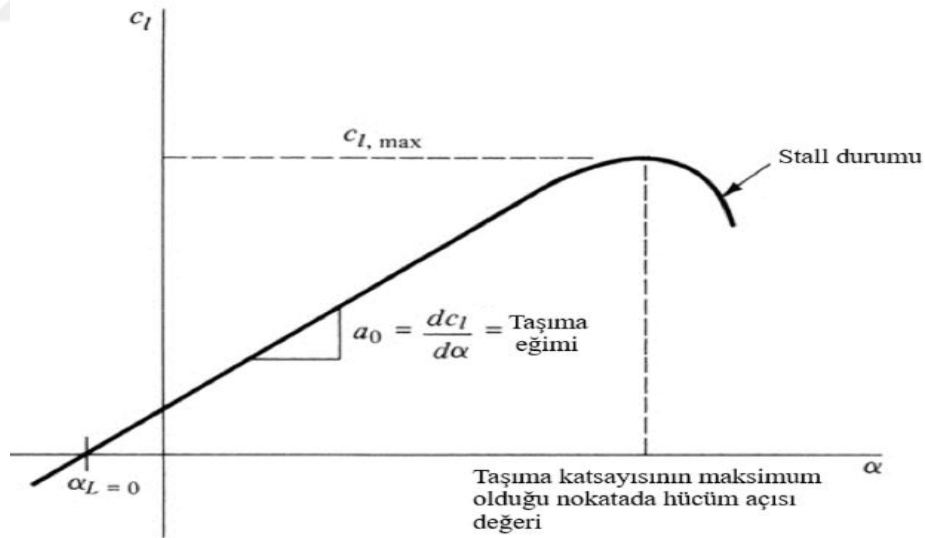
kanatlarında, kanat tamamen açıldığında zaman kanat kamburunu artıran otomatik bir mekanizma bulunurken, yarasaların kanat zarında düşük kaldırma katsayısı gerektiğinde kamberi düzleştiren kasları bulunmaktadır, ancak düşük hızlı uçuşta zarın yukarı doğru şişmesine izin vermek için zar gevşemektedir (Pennycuick, C.J, 2008).

Genel olarak, kaldırma kuvvetini hava aracının ve kanat profilinin üzerinde yukarı doğru hareket eden bir kuvvettir. Kanat profilinin kaldırmayı nasıl oluşturduğunu anlamak için öncelikle Bernolli ilkesine bakmak gerekir (Pennycuick, C.J, 2008):

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2 \quad (1.7)$$

Akışkanlar dinamiğinin en ünlü denklemlerinden olan bu denklem, akışın sabit olduğu, yoğunluğun sabit ve iç enerjilerden değiştik olmadığı varsayılarak kullanılır. Denklem hız ile basınç arasındaki ilişkiyi anlamamızı sağlar.

Kütlenin korunumu ilkesinin matematiksel bir ifadesi olan süreklilik denklemiyle Bernoulli ilkesi birleştirildiğinde, kanat profilinin çevresindeki akışkan havanın davranışı biliniyorsa, profil üzerinde oluşacak kaldırma kuvveti belirlenebilir. Bu konudan da anlaşılacağı gibi kanat profilinin geometrik seçimi çok önemlidir.



Şekil 3.9 Taşıma katsayısının hücum açısıyla değişimi (Issue S,2019)

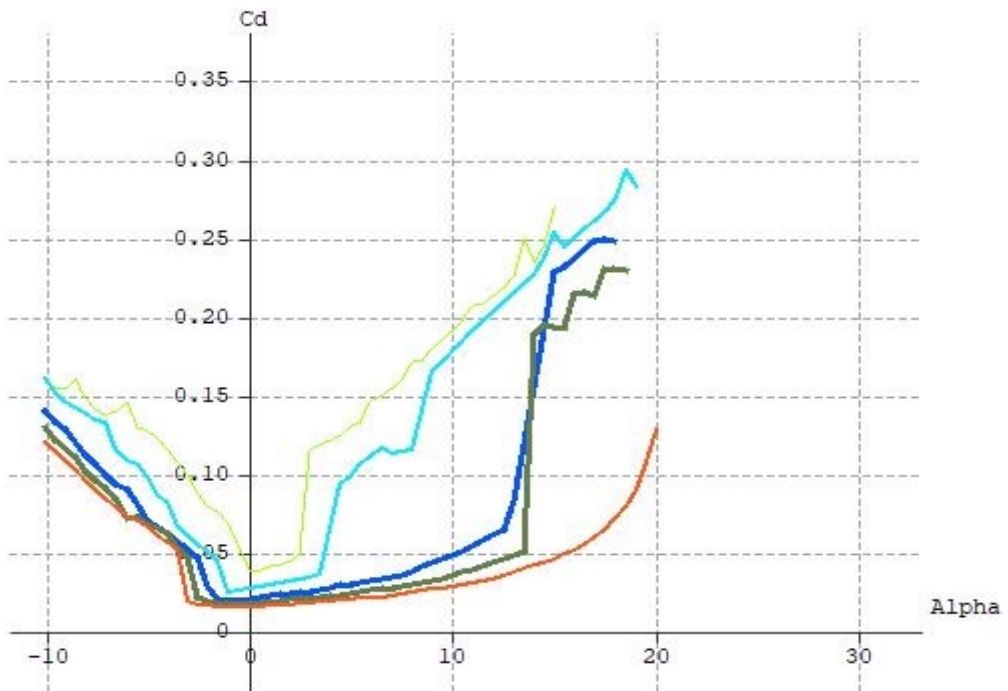
Taşıma kuvveti pratikte kat sayısal değer olarak kullanılmaktadır. Şekil 22’de görüldüğü üzere hücum açısı, kanat profiline bağlı olarak belirli bir seviyeye kadar doğrusal bir şekilde arttığında taşıma katsayısı artmaktadır. Daha fazla arttığında ise

kanadın oluşturduğu kaldırma kuvveti ortadan kalkarak tutunma kaybı (Stall) meydana gelmektedir.

3.5.3 Sürükleme kuvveti ve oluşumu

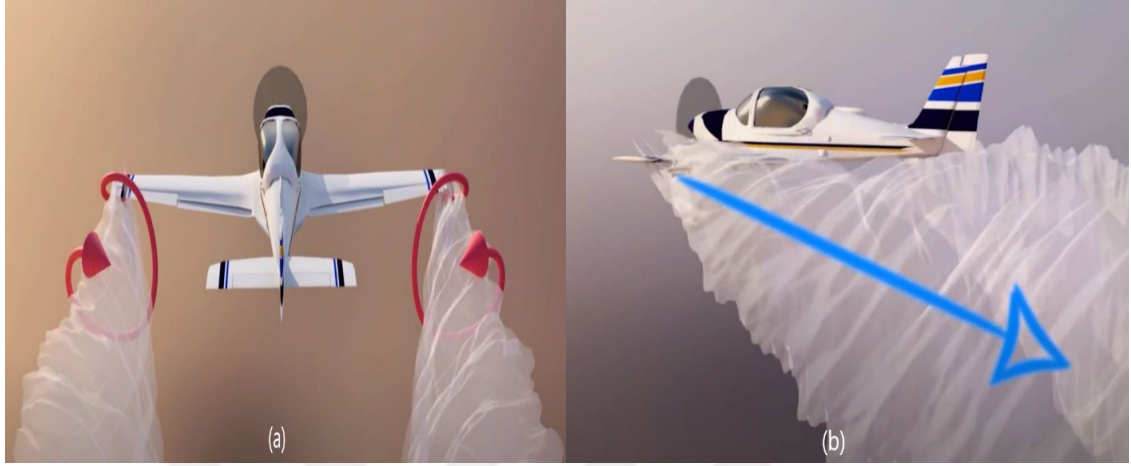
Aerodinamik kuvvetlerden taşıma kuvveti hava akımına dik iken sürükleme kuvveti paraleldir. Hava aracının uçuş doğrultusuna ters ve harekete gösterdiği dirençtir. Kanat profillerinin kalınlıkları düşük ve hücum açıları küçük ($\alpha < 15^\circ$) olduğundan dolayı profil yüzeyinde taşıma katsayısı ve yunuslama momenti, basınç dağılımına bağlı olduğu görülür. Sürükleme kuvvetindeyse basınç ve sürünmeye bağlıdır.

Bu kuvvete etkiyen iki ana değişken olan dinamik basınç ve yüzey alanın herhangi birindeki artış veya azalış hava molekülleri ve kanat yüzeyi arasındaki etkiyi doğru orantılı olarak değiştirecektir. Sürükleme kuvvetinin diğer sebepleri sürükleme katsayısı olarak ifade edilir. Sürükleme katsayısına etkiyen bir diğer değişken hücum açısıdır. Şekil 'deki grafikte kanat profilinin değişken Reynolds sayılarında hücum açısına bağlı olarak nasıl değiştiği gösterilmektedir. Grafikten de anlaşılacağı gibi sürüklemenin en aç olduğu noktalar hücum açısının düşük olduğu yerlerdir. Açılı belirli bir noktayı aştıktan sonra sürükleme büyük artış göstermektedir. Reynolds sayısının değişkenliği de sürükleme katsayısında önemli değişikliklere yol açmaktadır. Bu sayı küçüldükçe katsayı artmakta yani hava direnci büyümektedir.



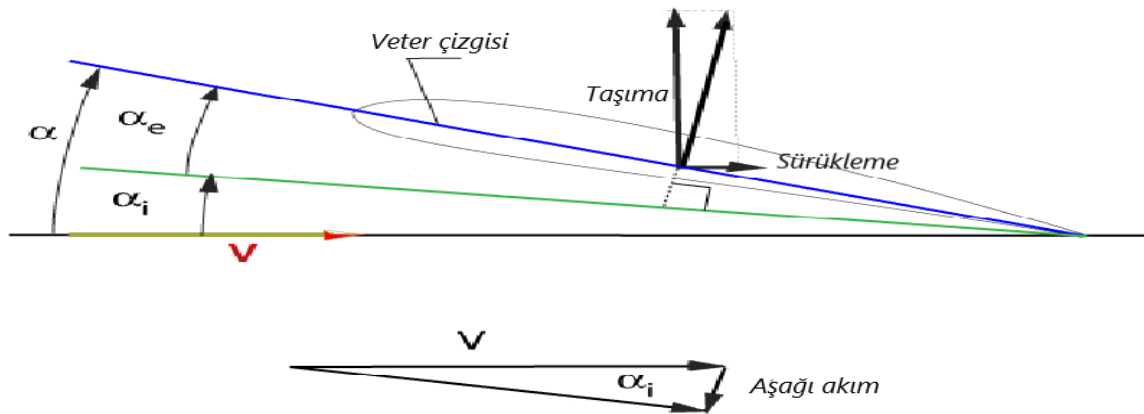
Şekil 3.10 Sürükleme katsayısının Re ve Alpha'ya göre değişim grafiği

Sürüklenme kuvveti parazit ve indüklenmiş sürüklenme olarak ikiye ayrılır. Taşıma kuvvetinden bağımsız olan parazit sürüklenme hava aracının yüzeyinden, şeklinden ve kanat-gövde gibi birleşim yerlerinden dolayı oluşan kuvvetler bütünüdür. Bu sürüklenme, hava akışının laminar veya türbülanslı oluşu, aracın yüzey alanı, enine kesiti ve bağlantıların geçişlerinin yumuşak olup olmama durumlarına bağlıdır.



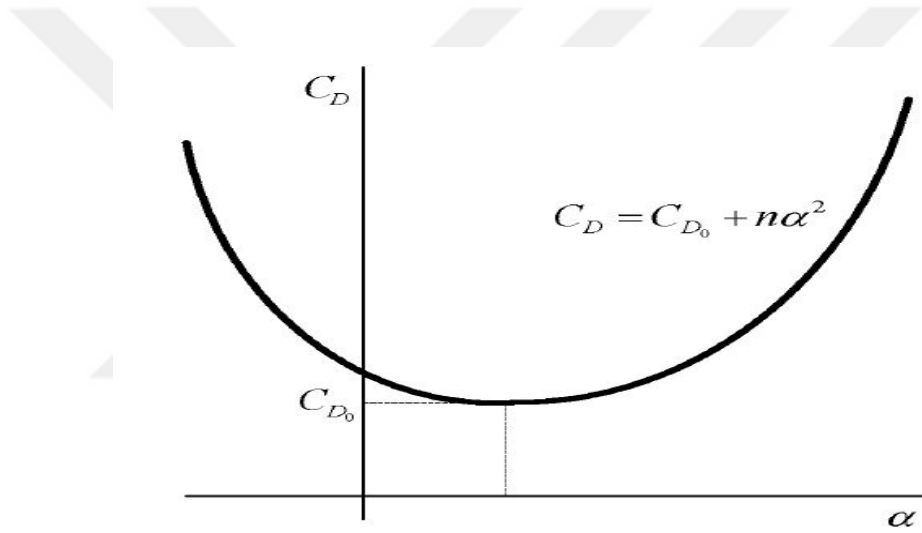
Şekil 3.11 Kanat ucu girdabı ve serbest hava akışını yönlendirmesi (Parkin, 1980)

Şekil sürüklenmesi akışkan içerisinde hareket halinde olan kanat profilinin yüzeyine direkt bağlıdır. Kanat profilinin hücum kenarında oluşan durma noktasının bulunduğu alan aynı zamanda yüksek basınç bölgesidir. Kanat profilini takip etmeye çalışan hava firar kenarına doğru dik açıyla ilerleyemez ve firar kenarında alçak basınç bölgesi oluşur. Bu basınç farkını azaltmak için, yumuşak geçişli yüzeyler oluşturulup havanın sınır tabakadan ayrılmasının geciktirilmesi sağlanmalıdır.



Şekil 3.12 Sürüklenme kuvvetlerinin vektörel gösterimi (Issue S,2019)

İndüklenmiş sürüklenme ise taşıma kuvvetinden dolayı oluşan kuvvettir. Kanadın üstündeki statik basınç, altındaki statik basınçtan daha düşüktür. Bu durum hava aracının gövdeden kanat ucuna doğru bir akışın gerçekleşmesine neden olur. Hava, kanat ucunun etrafından dolaşarak, düşük basıncın olduğu yere doğru hareket eder ve geriye doğru akar. Şekil 3.11 (a)'da gösterilen kanat ucu girdabı olarak adlandırılır ve ekstra enerji harcanmasına yol açar. Verimliliği düşüren dönen hava akımları sürüklemeye katkıda bulunur. Bu olay firar kenarı çizgisindeyse “Downwash” olarak adlandırılan hava akımlarına yol açar. Bu küçük hava akımları, serbest hava akımını aşağı yönlendiren kuvvetleri meydana getirir ve taşıma kuvvetinin yatay bileşenini etkiler. Bu olay indüklenmiş sürüklemeyi meydana getirir.



Şekil 3.13 Sürüklenme katsayısının, indüklenmiş sürüklenmeyle hücum açısına göre değişim grafiği (Shaha, 2015)

Bu kuvvetlerin matematiksel ifadeleri şöyledir (Yükselen M.A, 2006):

$$C_L = \frac{L}{(1/2) \cdot \rho \cdot V_\infty^2 \cdot S^2} (\text{Re}, M, \alpha) \quad (1.8)$$

$$C_D = \frac{D}{(1/2) \cdot \rho \cdot V_\infty^2 \cdot S^2} (\text{Re}, M, \alpha) \quad (1.9)$$

D = Sürüklenme katsayısı (N)

L = Kaldırma kuvveti (N)

ρ = Akışkan yoğunluğu (kg/m^3)

V_∞ = Serbest akış hızı (m/s)

S = Kanat yüzey alanı (m^2)

Denklem (3) ve (4) Reynolds sayısı, Mach sayısı ve hücum acısına bağlıdır. Reynolds sayısı:

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot V \cdot l}{\mu} = > \frac{\text{Atalet kuvvetleri}}{\text{Viskoz kuvvetleri}} \quad (1.10)$$

şeklinde tanımlanır. Reynolds sayısının küçük olması viskoz kuvvetlerinin akım alanı içerisinde baskın olması anlamına gelmektedir. Reynolds sayısı arttıkça laminar akımdan türbülanslı akıma geçiş hızlanmaktadır.

3.6 Aerodinamik Verimlilik

Hava araçlarının performansına etkiyen en önemli parametrelerden biridir. Bu değere fines oranı da denilmektedir. Toplam taşıma ve sürüklenme katsayılarının oranlanmasıyla bulunur ve yüksek değerde olması istenilir. Bu değer yüksek çıkması oluşturulan hava aracının yüksek verimlilikte olduğunu göstergesidir (Yükselen M.A, 2006):

$$E = \frac{C_L}{C_D} \quad (1.11)$$

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde yukarıda anlaşılmaya çalışılan metotlar ve yöntemler işlevsel hale gelerek fiziksel olguların ortaya çıkmasına vesile olacaklar. Bilgisayar destekli çizim programı, analiz – simülasyon programıyla yapılan analizler incelenecek ve deneysel sonuçlar aktarılacaktır.

Bilgisayar destekli tasarım konusunda, 3B çizimlerin rahat ve konforlu bir şekilde yapıldığı Solidworks programı tercih edilmiştir. Aerodinamik analizler, gerekli ağırlık ve boyutlar hesaplandıktan sonra ihtiyaç olan taşıma, sürüklenme, yunuslama momenti gibi çok önem arz eden katsayıların bulunmasında da bize XFLR5 andı program yardımcı olacaktır.

4.1 Robotik Kuşun Çizim ve Analizleri

Bu projede en önemli nokta kanatların üreteceği kaldırma kuvvetinin robotik kuşu havalandırabilmesi olacaktır. Bunun sağlanabilmesi için taşıma kuvvetini oluşturacak kanat yapısının ona göre dizayn edilmesi gerekmektedir. Yapının ilk analiz edilmesi gereken parçası kanat profilidir.

Yapılan proje doğadan ilham alınarak yapıldığından dolayı kuşların kanat profilleri incelenmiştir. Araştırılan ve incelenen kuş, altın kartalıdır. Bu kuşun seçilme nedeni yüksek kanat açıklığına sahip olması, süzülme becerisinin yüksek olması ve yüksek irtifada uçabilmesi olarak söylenebilir.

Çizelge 4.1 Altın kartalın genel özellikleri (Hartman, 2012)

Özellikler	Büyükklükler
Kanat açıklığı	2,34 – 1,8 m
Boyu	102 – 66 cm
Kuyruk uzunluğu	38 – 26,5 cm
En geniş veter uzunluğu	72 – 52cm
Kanat açıklık oranı	6 – 8
Kanat çırpma frekansı	3,85 Hz
Tırmanma ve dalış hızları	14-15 m/s v 52 m/s

4.1.1 Kanat yapısı

Tasarımın en önemli noktası olan kanat yapısının oluşturulabilmesi için bazı değişkenlerin ortaya koyulması gerekmektedir. Robotik kuşun ağırlığı, kanat açıklığı, ortalama veter uzunluğu vb. parametreler belirlenmelidir. Diğer hava araçlarının tasarımında, kullanım amacı göz önüne alınarak bu değişkenler belirlenmektedir. Ancak bu projeden doğadan ilham alınarak tasarlanacak olan robotik kuş olduğu için analizlerde altın kartalın verilerine göre işlemler yapılacaktır. Burada ilham alınan kuşla aynı

değişkenlerin kullanılamamasının sebebi kanat ve gövde yapılarının sadece benzetim yapılmasıdır. Özellikle kanat yapısındaki eklem farklılığı ve kuşun teleklerinin bulunması aynı verileri kullanmanın doğru olmayacağı çıkarımı oluşturmaktadır. Bu nedenlerden dolayı parametre seçimlerinde özgün davranılmıştır.

Diğer bölümde bahsedildiği üzere kanat açıklık oranı 6-8 olan kuşlarda yüksek taşıma değerleri (1,5 – 1,8) vardır. Bu sebeple kanat açıklığı 2.1m ve ortalama veter uzunluğu da 36 cm olacak şekilde analizlerin yapılmasına karar verilmiştir. Robotik kuşun boyu da aynı şekilde düşünülerek seçilmiştir. Seçilen değer altın kartalın en yüksek değeri olan 102cm'dir. Boyda seçilen değer kanat açıklığının yüksek olması ve moment dengesini oluşturacak kuyruk alanının geniş olmasından dolayı fazladır. Bu seçimler analizler sırasında değişmeksizin test edilecektir. Ağırlık meselesi göz önüne alındığında altın kartalın ağırlığı referans alınmayacak ve rijit bir mekanizma olduğu için düşük seçilmesi gerektiği ortadadır. Bundan dolayı ağırlığı 650 g seçilmiştir.

Robotik kuşun kütleri 650 g olarak seçilmişti. Bu değere göre:

$$W=mg \quad (2.1)$$

$$W=0,65 \cdot 9,81 = 6,38 \text{ N}$$

olmaktadır.

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot C_l \cdot \delta \cdot V_t^2 \cdot s_w \quad (2.2)$$

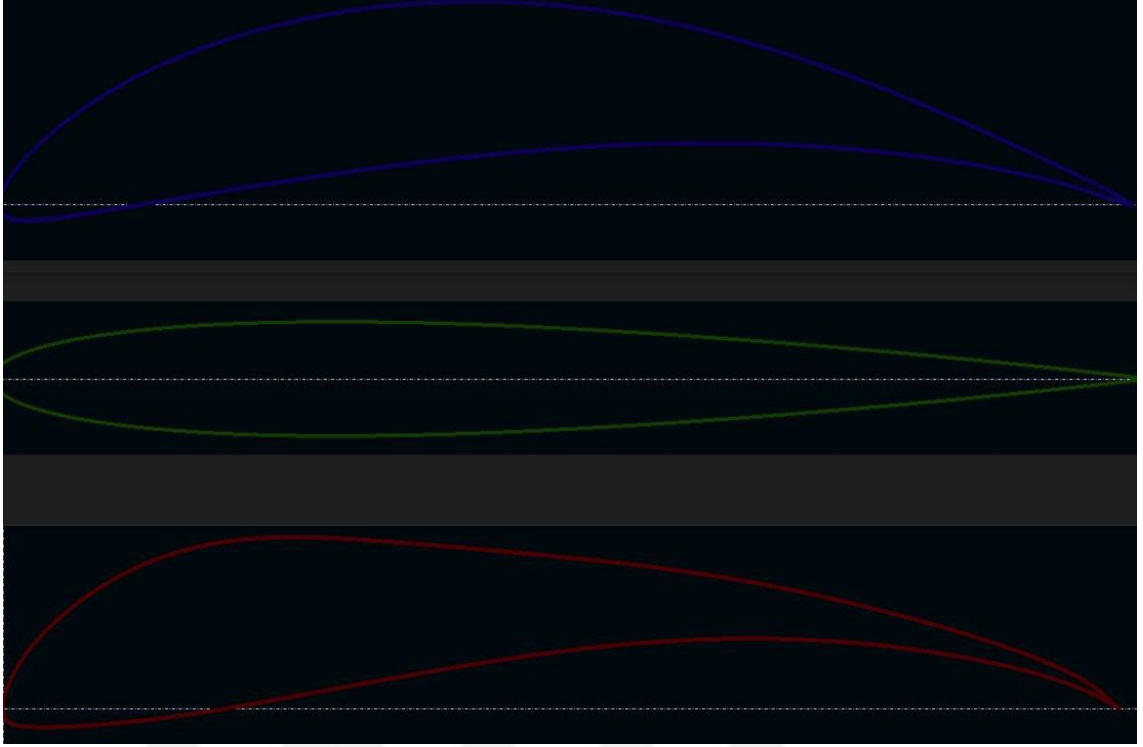
Burada hava yoğunluğu 1atmdeki basınç olan $1.225 \text{ kg} / \text{m}^3$, hava hızı 9.07m/s olarak alınmıştır.

$$6,38 = \frac{1}{2} \cdot C_l \cdot 1,225 \cdot 9,07^2 \cdot 0,545$$

$$C_l = 0,23$$

böylelikle robotik kuşun minimum taşıma katsayısı bulunmuş olur.

Airfoil yapısı, altın kartalın kanat profili ve bazı veri sayfalarında (Airfoil) karşılaştırılarak araştırılan airfoil yapılarının, analizlerine bakılarak ve araştırılan bu airfoiller uygun olabilecek aerodinamik karakteristiklere ve bulduğumuz minimum taşıma katsayısına göre seçilmiştir Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Analiz için seçilen airfoil yapıları

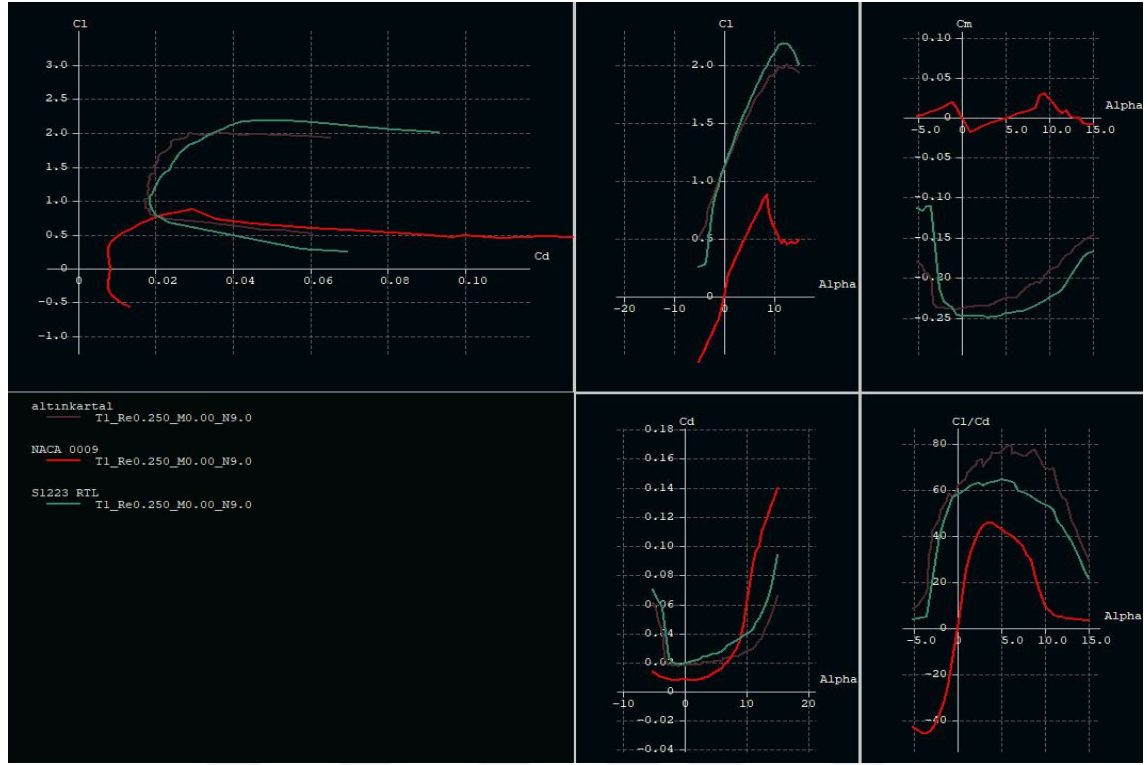
Şekil 4.1’de gösterilmiş olan kanat profillerinden sırasıyla mavi, yeşil ve kırmızı airfoil’lerinin isimleri altın kartal kanat profili, NACA0009 ve S1223’dir. Bu kanat profilleri yüzlercesinin arasından seçilerek en yüksek taşıma katsayısı, en düşük sürüklenme katsayısı ve kanat üzerindeki basın dağılımı olan basınç katsayıları dikkate alınarak seçilmiştir. Performans faktörü olan C_l/C_d oranı da değişken hücum açılarının bulunduğu grafiklere bakarak seçilmiştir.

Çizelge 4.2 Airfoil yapıların hücum açlarına göre katsayı değerler

Airfoil	Altın kartal	NACA0009	S1223
C_l v Alpha	2,01	1,23	2,35
C_d v Alpha	0,001	0,0018	0,0015
C_l v C_d	2,18	1,25	2,38
C_l/C_d v Alpha	83	45	67

Tablo 4.1’de yer alan değişkenler reynolds sayısı 0.25×10^6 alınarak çizilmiş grafiklerden alınmıştır. Değişkenler, değişken hücum açılarının ($\alpha = -5^\circ/15^\circ$) arasından değerlerin yüksek olduğu noktalardan alınmıştır. Tabloda görüldüğü üzere taşıma katsayısı en yüksek ve sürüklenme katsayısı en düşük olan kanat geometrisi S1223 olduğu

görülmektedir. Performans değerlerine bakıldığında S1223 ve Altın kartal kanat profilleri birbirlerine yakın görülmektedir.

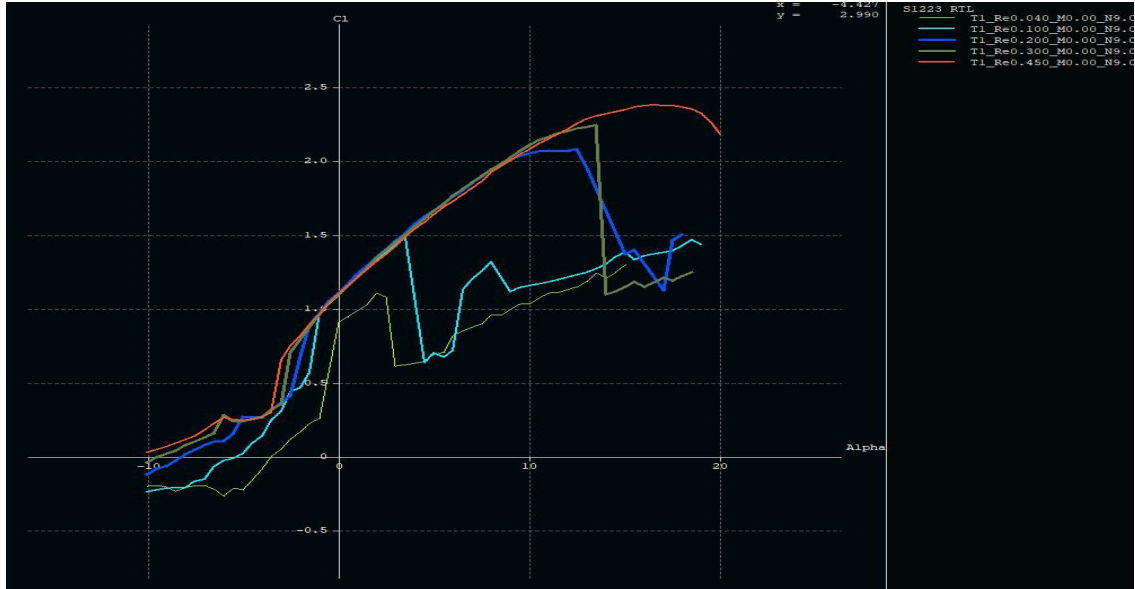


Şekil 4.2 Seçilen kanat profillerinin aerodinamik katsayı grafikleri

Şekil 4.2’de araştırılan üç kanat profilinin de çeşitli aerodinamik karakteristiklerinin gösterildiği grafikler bulunmaktadır. Analizler Reynolds sayısı 0.25×10^6 ayarlanarak yapılmıştır. C_l - C_d grafiği göz önüne alındığında taşıma katsayısının en yüksek olduğu kanat profili S1223’dir. Kanat profili kamburluğunun altın kartaldan fazla olması hem taşıma katsayısının yükselmesine hem de sürüklenme katsayısının düşmesine yol açtığı ortadadır. C_l - α grafiğinde S1223 kanat profilinin daha yüksek hücum açısına çıkabildiği ve taşıma katsayısının daha yukarı taşıdığı görülmektedir. C_d - α grafiğindeyse sürüklenme katsayısının en düşük olduğu kanat profili NACA009 olarak görülmektedir. Hücum açısı sıfırdan pozitif değere doğru arttıkça sürüklenme katsayısı keskin bir artış göstermektedir. Diğer iki kanat profili daha stabil bir grafik oluşturmuştur. Ancak taşıma katsayısında oluşan farklılıktan ve sürüklemenin ani artışından dolayı S1223 kanat profilinin sürüklenme katsayısı kabul edilebilir seviyede olduğu söylenebilir. Bir diğer grafik olan C_l/C_d - α , kanat profillerinde verimliliği gösterdiğini söylemiştik. Bu grafikte 83 değeriyle en yüksek altın kartal bulunmaktadır. S1223 profili ise hemen altında yer almakta ve düşük hücum açılarında altın kartalla yakın değerler göstermektedir.

Kanat profilinin seçimdeki unsurların değerlendirilmesi sonucu S1223 airfoil yapısı seçilmiştir. Özellikle seçilen ve altın kartal kanat profili birbirlerine yakın değerler gösterebilir de robotik kuşun ana meselesinin havalandırma olduğunu düşürürsek S1223 taşıma katsayısı dolayısıyla öne çıkmaktadır.

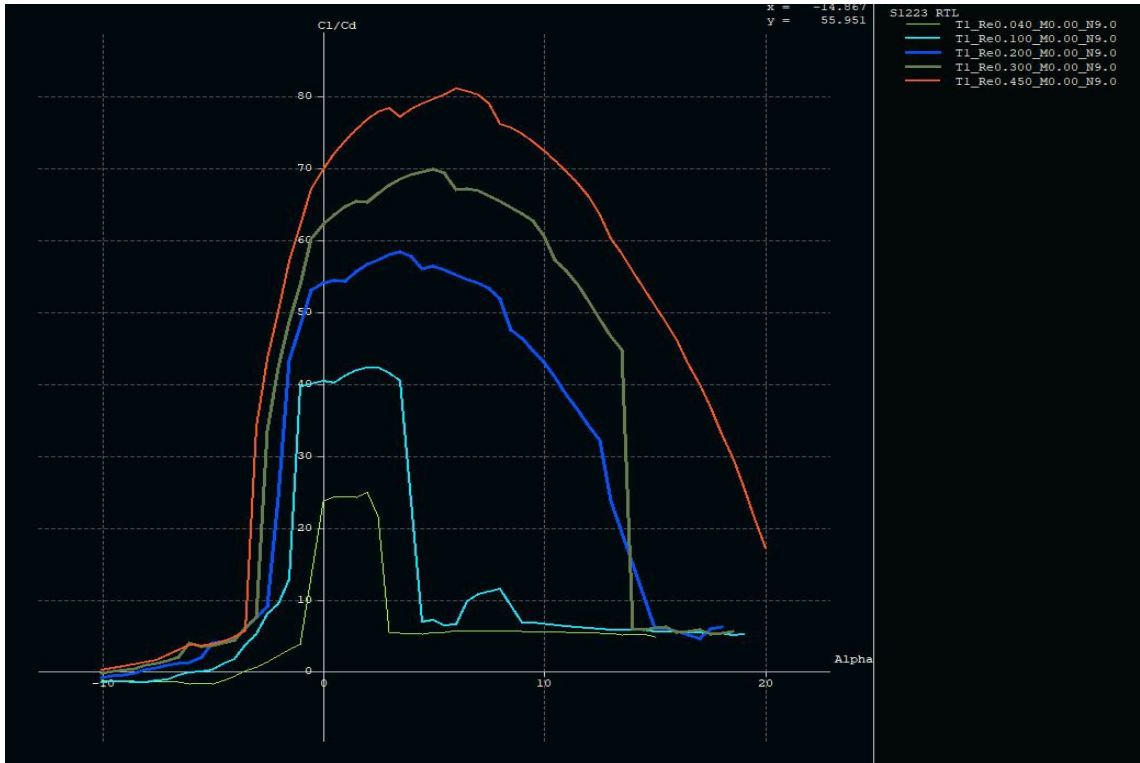
Seçilen kanat profilinin değişken reynolds sayılarına göre analizleri yapıp grafikleri oluşturulmuştur.



Şekil 4.3 Taşıma katsayısı- hücum açısı grafiği

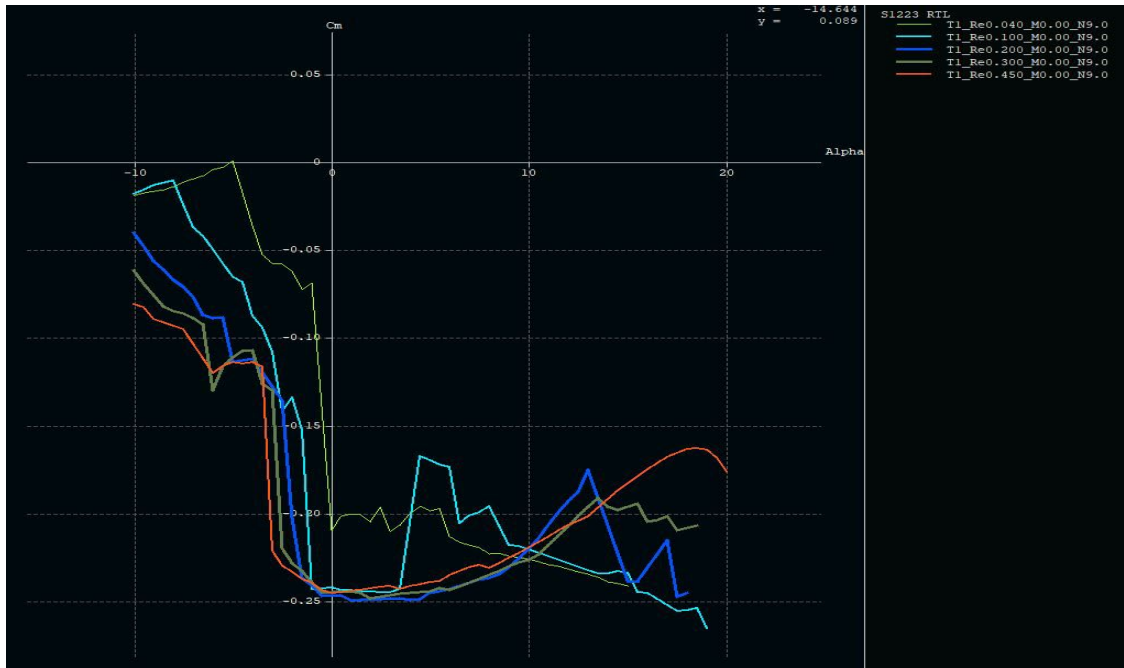


Şekil 4.4 Taşıma- Sürüklenme katsayısı grafiği



Şekil 4.5 Kanat profili performans grafiği

Grafiklerden de okunacağı gibi Reynolds sayısı belirli bir seviyeye gelene kadar ($<0.2 \times 10^6$) taşıma ve sürüklenme değerleri düzensizdir. Kanat profilinden verim alınamamaktadır. O seviyenin üzerine çıkıldığında verimliliğin arttığı ve aerodinamik karakteristiklerin istenilen seviyelere geldiği gözlemlenmektedir.

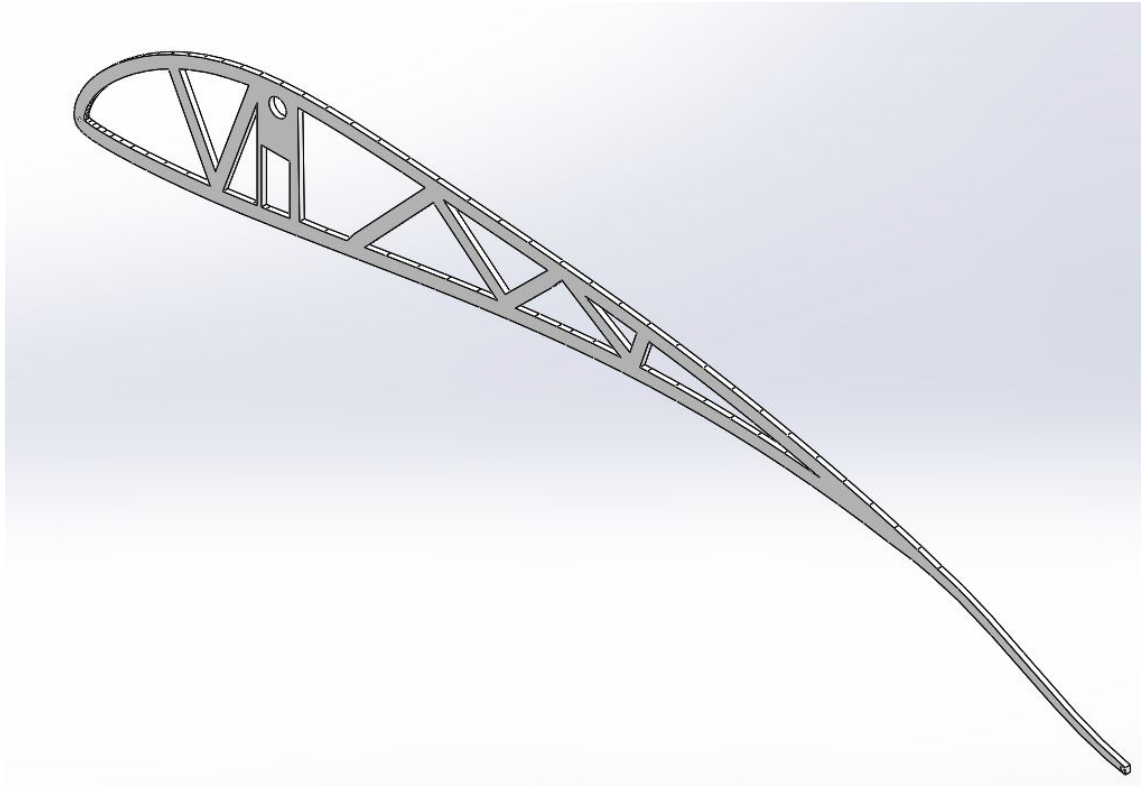


Şekil 4.6 Moment- hücum açısı grafiği

Yunuslama momentinin reynolds sayısıyla çok değişiklik göstermediği şekil ‘de görölmektedir. Moment, hücum açısı -5° civarında hızlı değişim göstermekle birlikte, 0° - 10° aralığından stabil uçuş gerçekleşebileceği anlamını taşımaktadır.

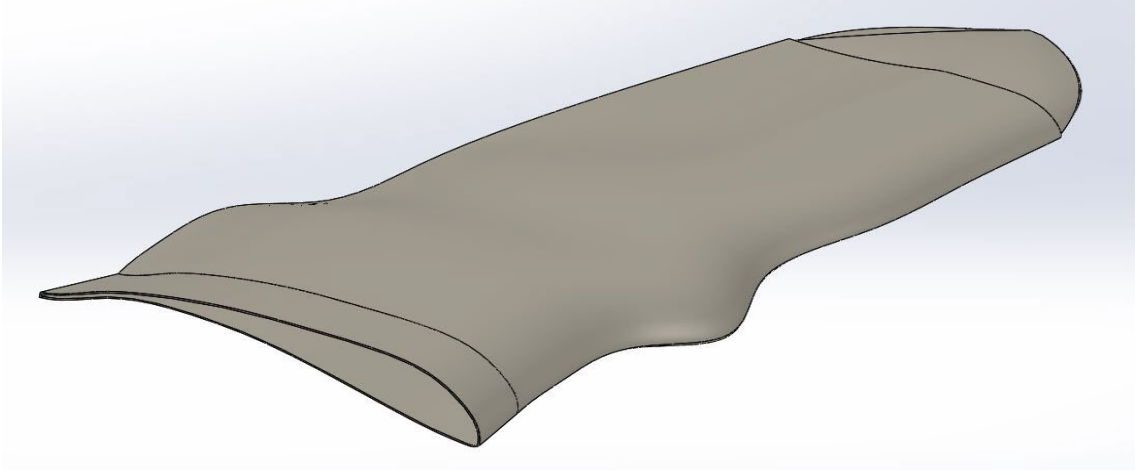
Seçilen kanat profilinin, kanatta oluşturduğu etkileri, gövde boyutlandırılmasının aerodinamik etkilerini, kuyruk bölümünün moment etkisini ve nasıl sonuçlar verdiğini gözlemlemek içinde XFLR5 programından faydalanılmıştır.

Robotik kuşun belirli hücum açısı aralığında nasıl performans gösterdiği incelenmiştir. Kanat ve kuyruk basınç dağılımı, sürüklenme kaybı, taşıma kuvveti, indüklenmiş sürüklenme olayları incelenmiştir.



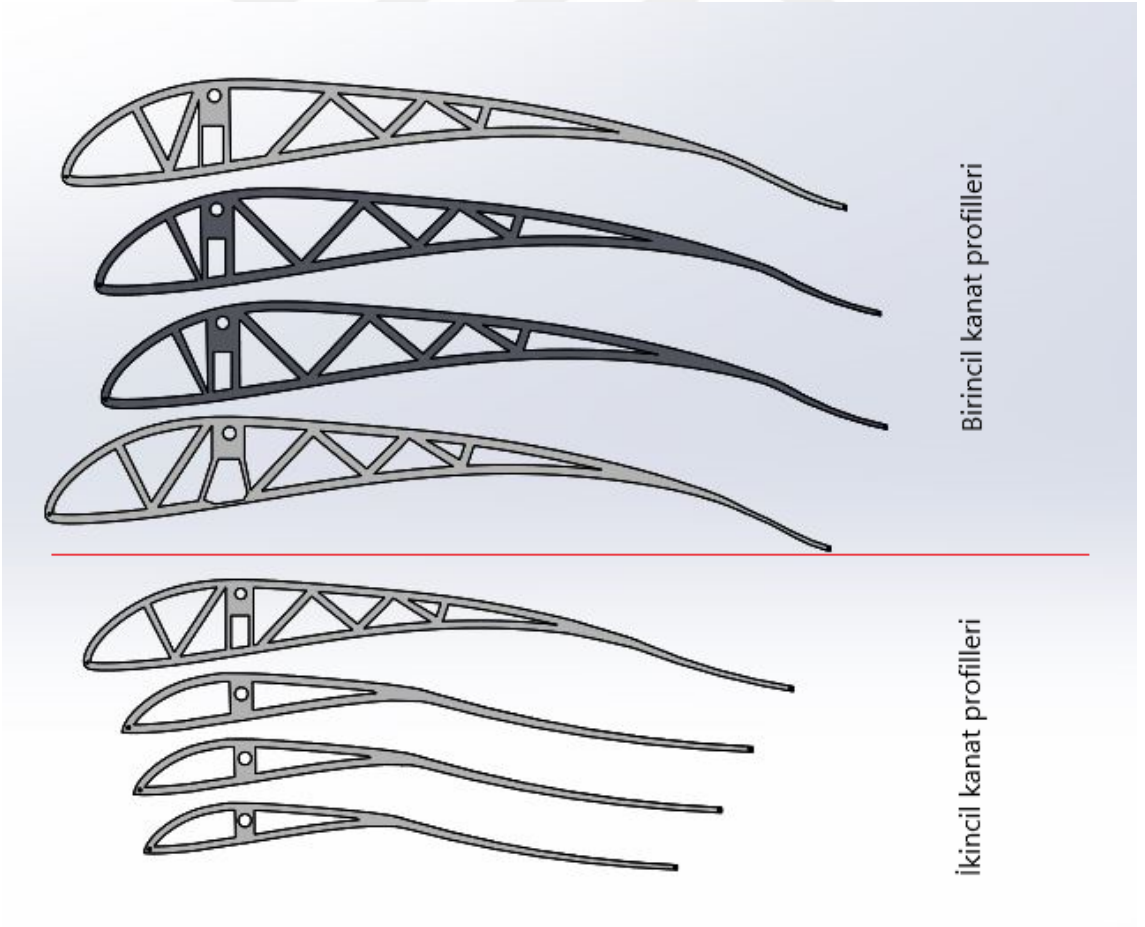
Şekil 4.7 S1223 airfoilin 3 boyutlu çizimi

Kanat profili ilk önce katlı imalat ile PLA filamentten çıktısı alınarak ilk prototip denemeleri yapılabilir. Bir kanatta toplamda 9 tane airfoil yapısı bulunmaktadır. İlk 4 kanat profili birincil kanatta, diğer 5’i ise ikincil kanatta bulunmaktadır. S1223 RTL kanat profilinden yola çıkılarak oluşturulan airfoiller, altın kartalın kanat yüzey alanı ve ortalama veter uzunluğu göz önünde bulundurularak oluşturulmuştur. Bu profiller kanadın şekline bağlı olarak kanat kökünden ucuna kadar dizilimi gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.9).



Şekil 4.8 Kanat kaplaması

Kanat kaplaması robotik kuşun en hassas noktalarındandır ve birçok alternatif malzeme düşünülebilir. Cam elyaf – epoksi ile sertleştirilmiş bir yüzey, ince poliüretan levhaya kanat yapısının prototipi yapılarak vakum yöntemiyle oluşturulabilir. Ancak bunlar maliyet gerektiren oluşumlardır.



Şekil 4.9 Bir kanattaki bütün airfoil yapıları

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot 0,867 \cdot 1,225 \cdot 9,07^2 \cdot 0,545$$

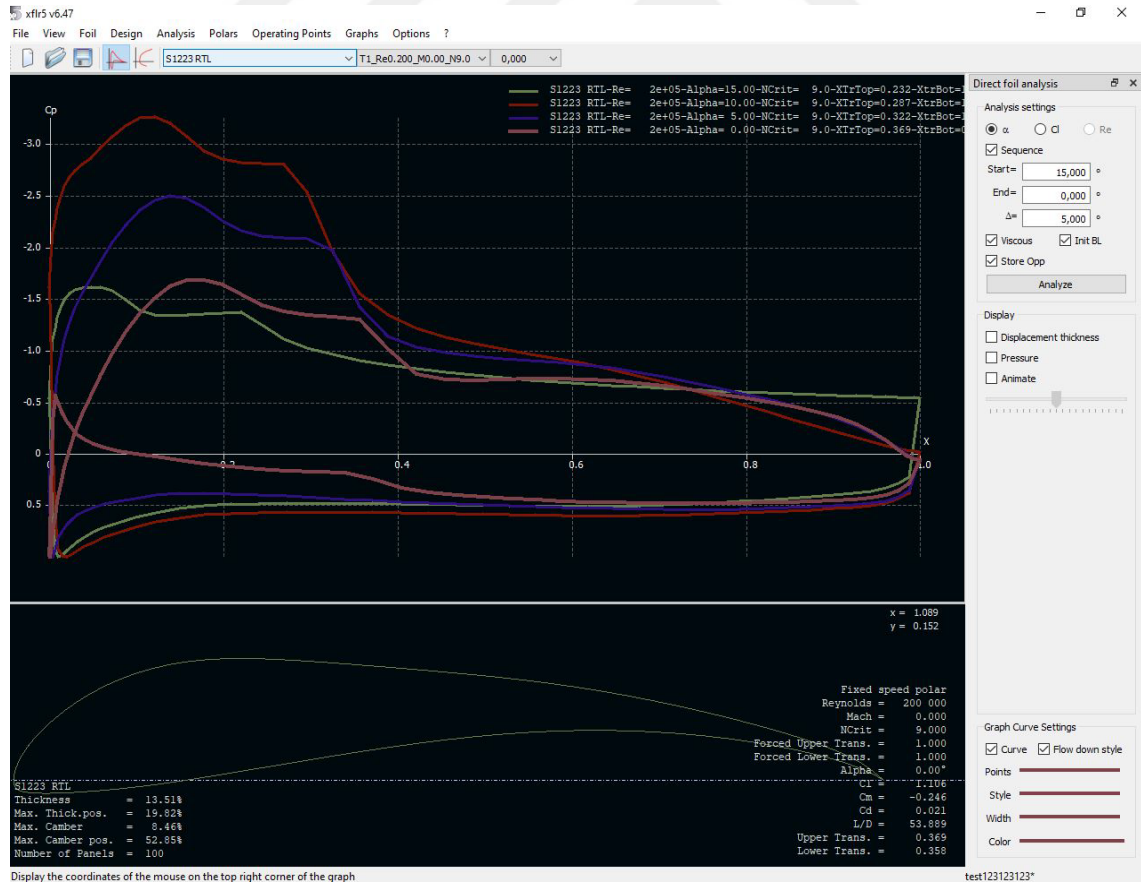
$$F_L = 23,8N$$

olarak bulunan kaldırma kuvveti ornithopterin yerden havalanması için gerekli olan minimum kuvvettir.

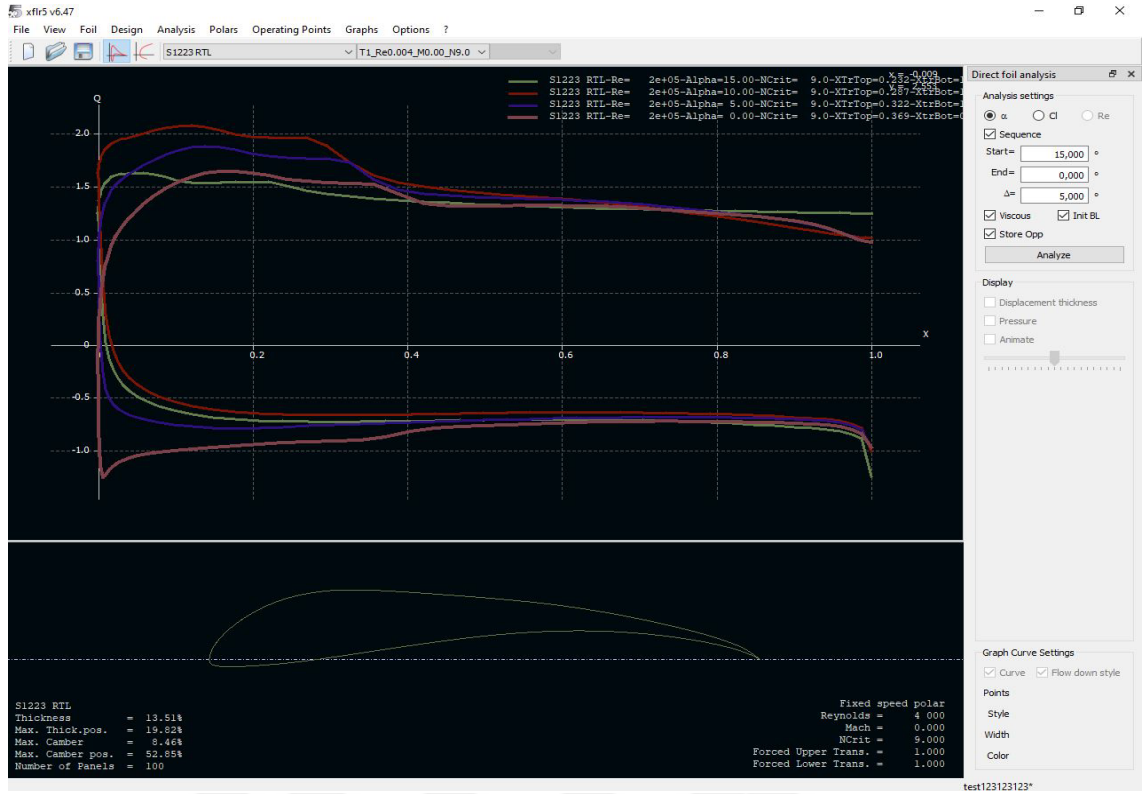
4.1.2 Kanattaki basınç dağılımı

Robotik kuşun havalanabilmesinde en önemli etken basınç kuvveti olduğu için kanat üzerindeki dağılımına bakılmalıdır. Analizler XFLR5 programında gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.3’de gösterilen profildeki basınç dağılımları, hücum açısının değişimiyle nasıl şekillendiği gösterilmiştir. Görüldüğü üzere hücum açısının artmasıyla üst yüzeydeki basınç düşmektedir. Buna bağlı olarak da kaldırma kuvveti yükselmektedir. Hücum açısının daha fazla artmasıysa üst yüzeydeki basıncın artmasıyla sonuçlandığı görülmektedir.

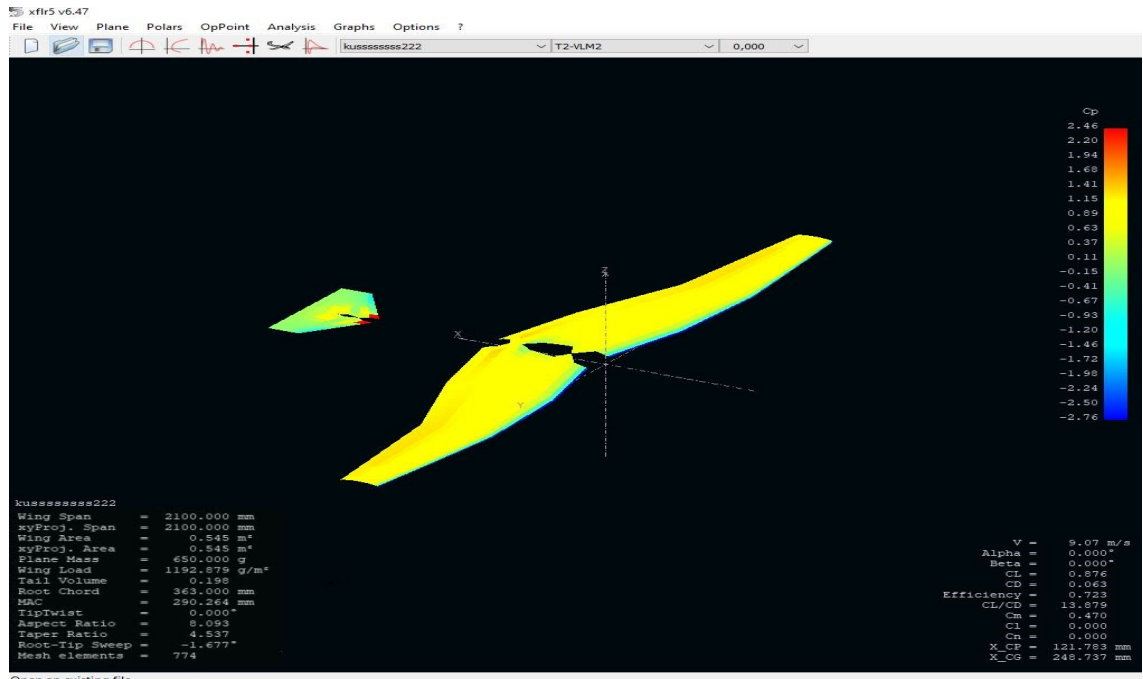


Şekil 4.10 Kanat profilinin Cp dağılımı

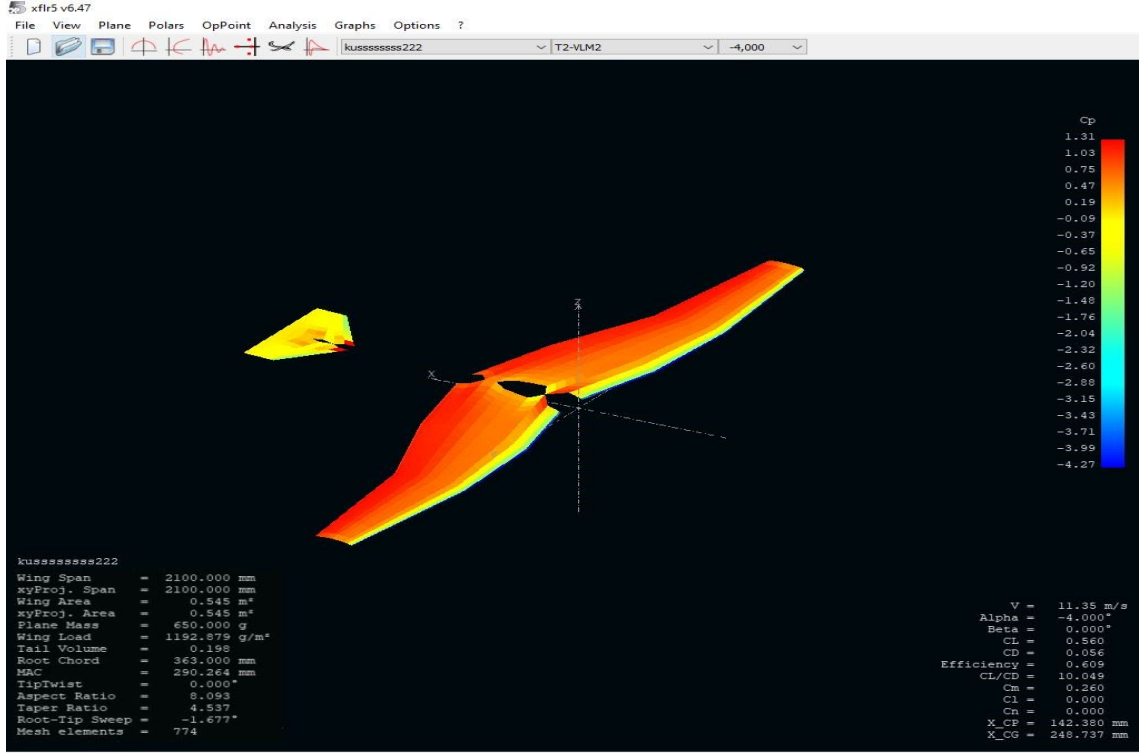


Şekil 4.11 Kanat profili Cp- Q grafiği

Havanın farklı hücum açılarına göre nasıl bir hız eğrisi gösterdiği Şekil 4.4'de gösterilmiştir. Kanadın üst yüzeyinde düşük basınçtan dolayı havanın hızlı aktığı görülmektedir.

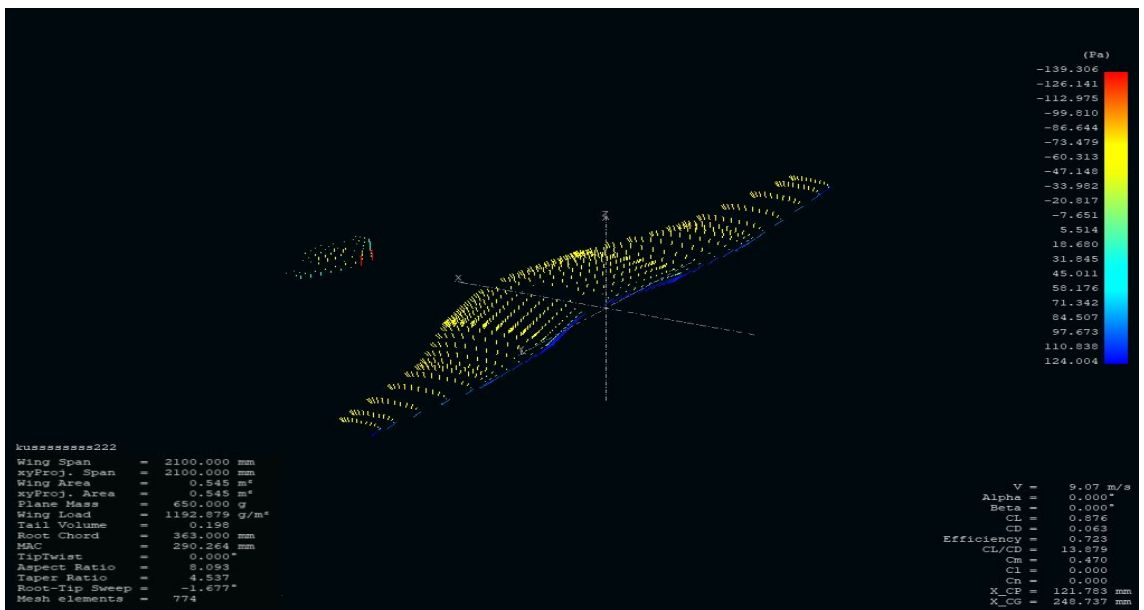


Şekil 4.12 Kanat ve kuyruk negatif Cp dağılımı



Şekil 4.13 Kanat ve kuyruk pozitif Cp dağılımı

Basınç dağılımı gövde boyutlandırılmasına ve hücum açısına göre değişiklik göstermektedir. Şekil 4.5’de robotik kuşun pozitif hücum açısı yaptığıında kanat ve kuyruk yüzeyinde basınç katsayısının negatif olduğu, şekil 4.6’da ise negatif hücum açısıyla basınç dağılımının pozitif olduğu görülmektedir. Viskoz olmadığı varsayılarak yapılan çözümlemeler, fikir verme açısından önemlidir.



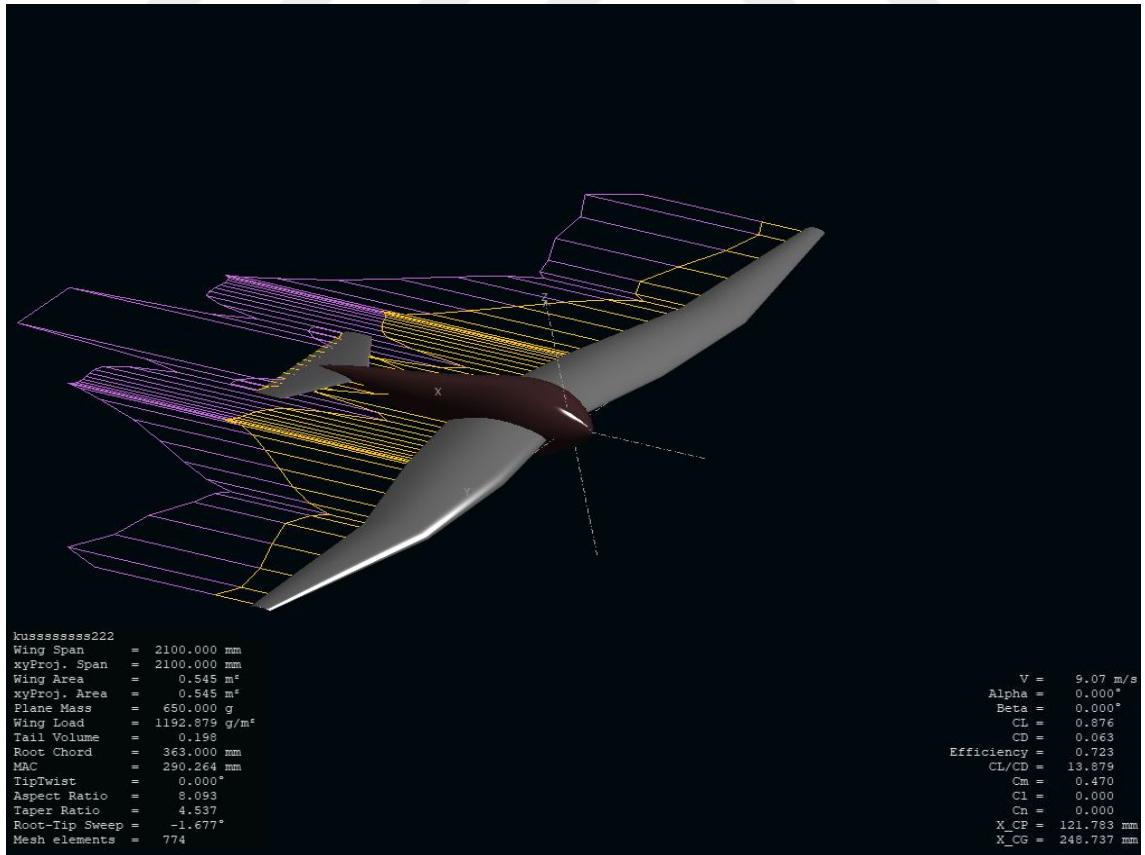
Şekil 4.14 Basınç dağılımının Paskal cinsinden gösterim

Çizelge 4.3 Robotik kuşun analiz parametreleri

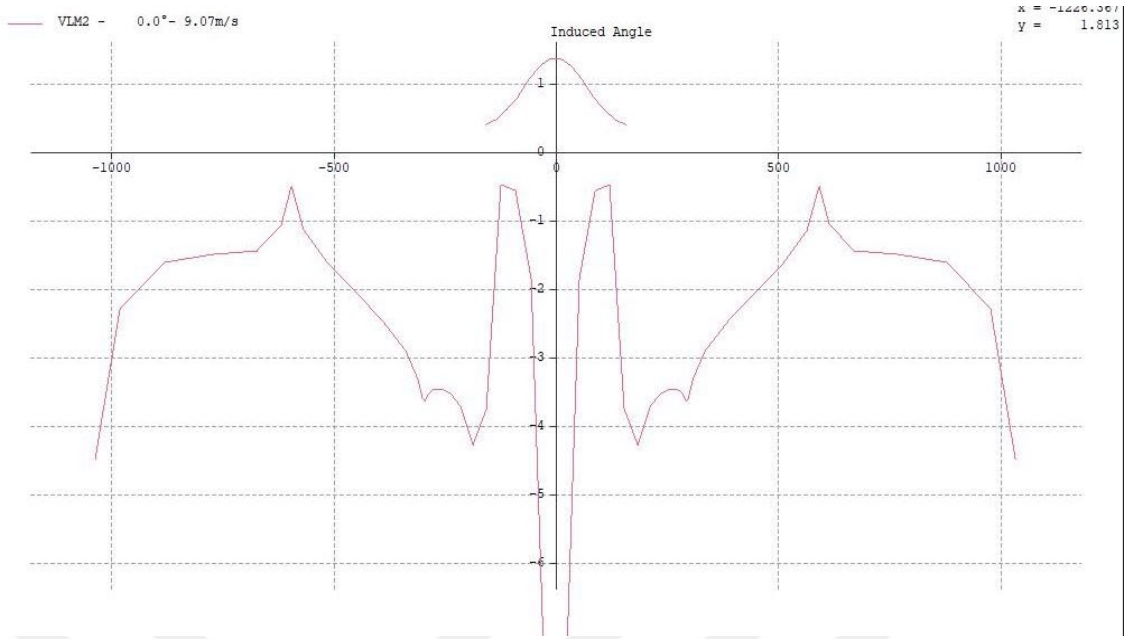
Sembol	Parametre	Değerler
C_l	Taşıma katsayısı	0,876
C_d	Sürüklenme katsayısı	0,063
C_m	Yunuslama momenti	0,47
C_l / C_d	Aerodinamik verimlilik	13,879
α	Hücum açısı	0°
v_t	Referans hız	9,07 m/s

4.1.3 Taşıma ve sürüklenme kuvvetleri

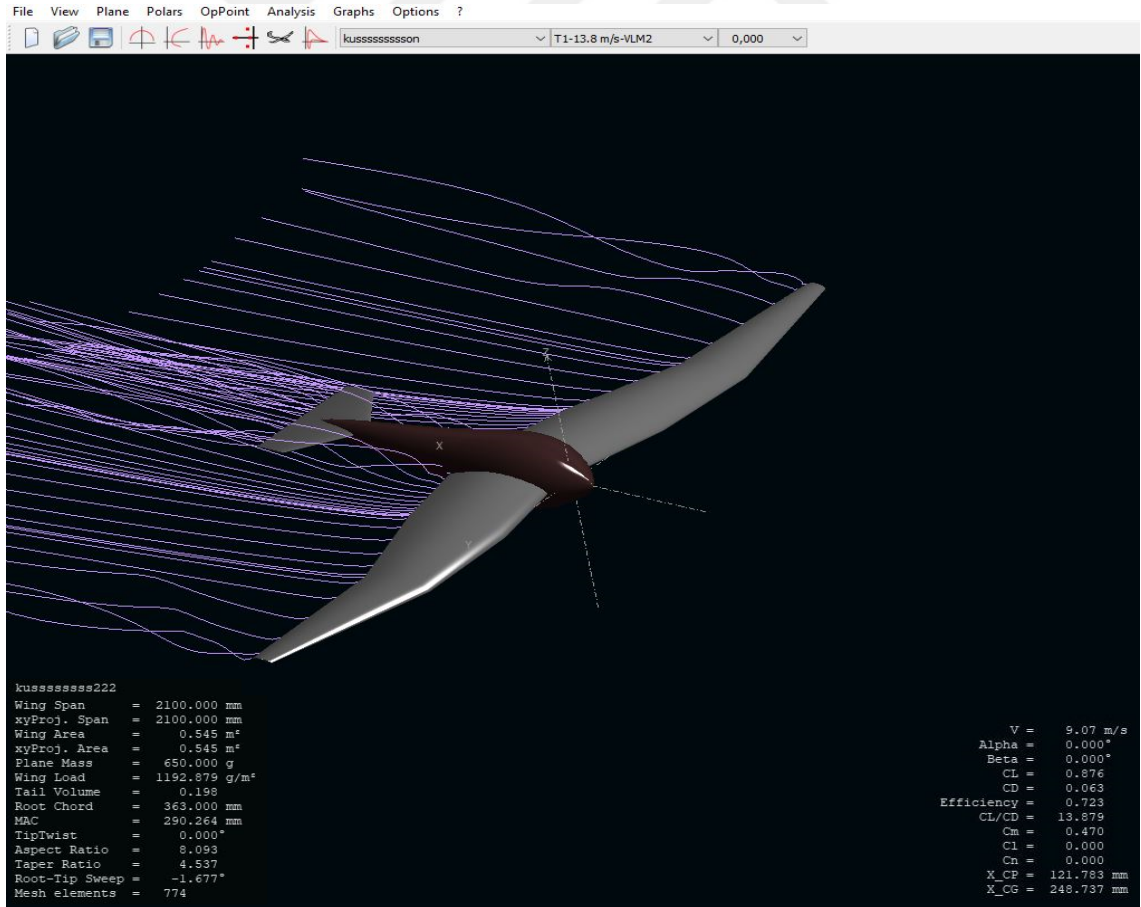
Bu kuvvetlerin analizi, itkinin oluşumunun arttırılması ve hava direncinin düşürülmesi için önemlidir. Ayrıca kanatların verimliliğinin ölçülmesi de bu iki değerin karşılaştırılmasıyla öğrenilir. Sürüklenme ve indüklenmiş sürüklenme kuvvetlerinin gösterildiği şekil 4.8’de iki sürüklemenin üst üste bindiği ve hava direncinin arttığı görülmektedir.



Şekil 4.15 Kanattan çıkan sürüklenme çizgileri



Şekil 4.16 Kanat sürüklenme açıları



Şekil 4.17 Robotik kuşun havada oluşturduğu akımlar ve kanat ucu girdabı

4.2 Kuyruk Tasarımı

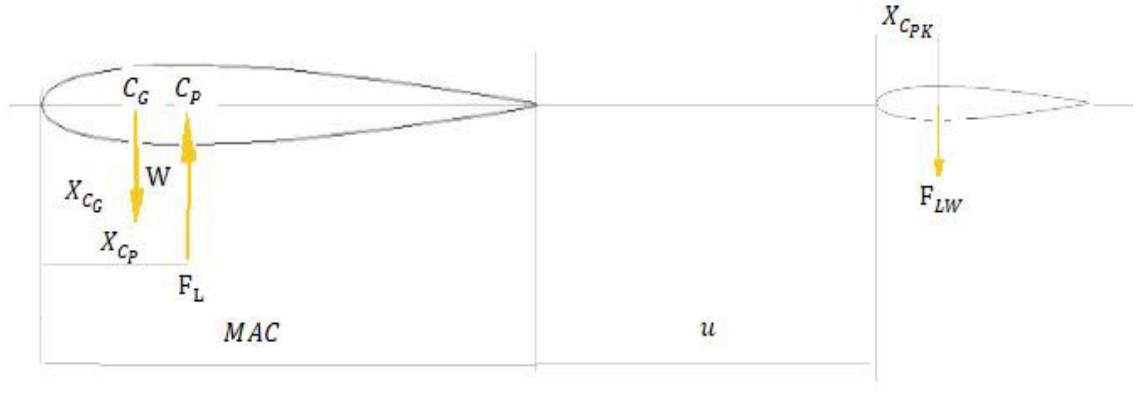
Hava araçlarının dengede kalması uçabilmelerinin yegâne sebebidir. Stabil ve düzgün bir uçuş sergilenebilmesi için hava aracının dengede kalması gerekir. Denge ağırlığın uçağın kaldırma kuvvetiyle olan ilişkisi ve kanatlarla kuyruğun ilişkisini gözetmek demektir. Stabil bir uçuş için hava aracının ağırlık merkezinde oluşacak momenti dengelemesi gerekir. Bütün mesele ağırlık merkezi ve aerodinamik merkez arasındaki ilişkiyle belirlenir. Oluşan bu moment yunuslama momenti olarak adlandırılır.

Ağırlık merkezi aerodinamik merkezin önündeyse ağırlık merkezi etrafında burun aşağı moment oluşacak, tam tersi durumdaysa burun yukarı moment oluşacaktır. Bu momentin dengesini oluşturacak unsursa kuyrukta mantığında bulunmaktadır. Kuyruğun asıl amacı hava aracının ağırlık merkeziyle aerodinamik merkezini aynı noktada buluşturmasıdır.

Çizelge 4.4 Kuyruk hesabı için gerekli değişkenler

Gösterim	Açıklama	Değer
W	Robotik kuşun ağırlığı	0,65kg
C_G	Ağırlık merkezi	-
C_P	Basınç merkezi	-
X_{C_P}	Hücum kararıyla basınç merkezi arası mesafe	153mm
X_{C_G}	Hücum kararıyla basınç ağırlık merkezi arası mesafe	121mm
$X_{C_{PK}}$	Kuyruk hücum kararıyla basınç merkezi arası mesafe	112mm
MAC	Ortalama veter uzunluğu	290mm
u	Kanat firar kenarıyla kuyruk hücum kenarı mesafe	231mm
C_{HT}	Yatay kuyruk hacim katsayısı	0,45
S_{HT}	Yatay kuyruk alanı	0,139 m ²
L_{HT}	Kanat ve kuyruk basınç merkezleri arası mesafe	512mm
C_h	Veter uzunluğu	363mm
S_W	Kanat alanı	0,545m ²

Tablodaki veriler altın kartalının verilerine bakılarak ve XFLR5 programında oluşturulan robotik kuşun analizleri sonucu oluşturulmuştur.



Şekil 4.18 Kanat ve kuyruğun değişken nokta gösterimleri

Dengenin matematiksel modeli:

$$\Sigma F = F_L - W - F_{LW} \quad (2.3)$$

şeklindedir.

Yunuslama momentinin bulunabilmesi içinse () numaralı formül kullanılır (Yükselen M.A, 2006):

$$M_Y = F_{LW} \cdot [MAC - (X_{C_G}) + u + (X_{C_{PK}})] \quad (2.4)$$

Moment denklemine baktığımızda kanat şekli ve alanıyla kuyruğunki direk ilişkilidir. Kuyruğun oluşturacağı moment tamamen alanıyla alakalıdır. Hesaplamanın yapılabilmesi için bir diğer denklem kuyruk hamin katsayısı hesabıdır (Yükselen M.A, 2006).

$$C_{HT} = \frac{L_{HT} \cdot S_{HT}}{C_h \cdot S_W} \quad (2.5)$$

şeklinde tanımlanmıştır.

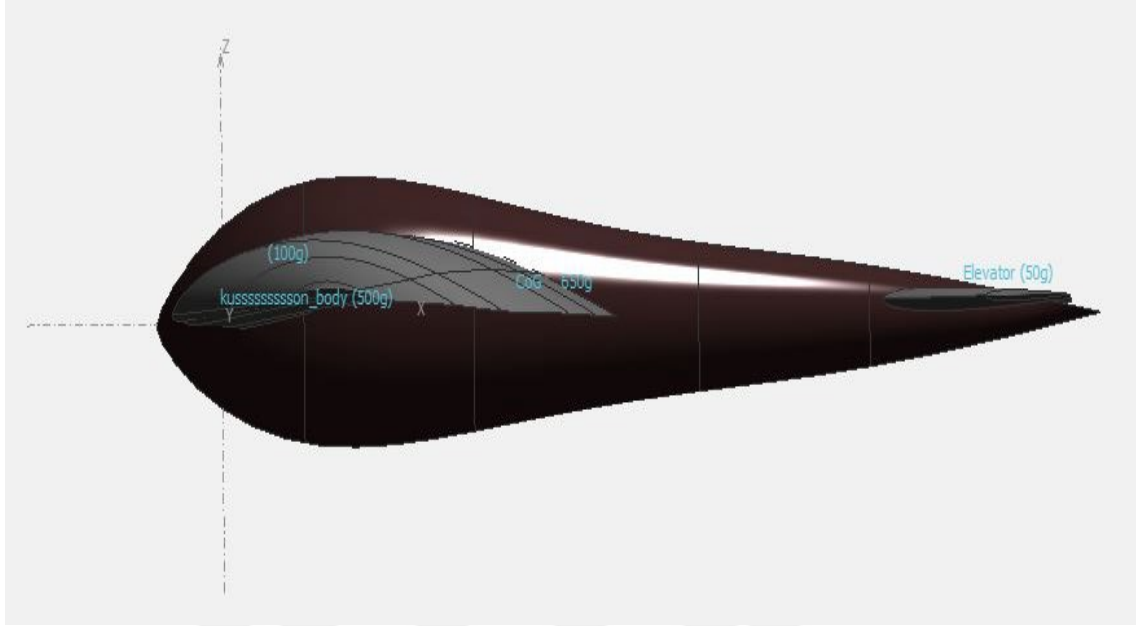
$$L_{HT} = [290-121] + 231 + 112$$

$L_{HT} = 512\text{mm}$ olarak tespit edilmiştir.

$$S_{HT} = \frac{C_{HT} \cdot C_h \cdot S_W}{L_{HT}}$$

$$S_{HT} = \frac{0,45 \cdot 0,290 \cdot 0,545}{0,512}$$

$S_{HT} = 0,139 \text{ m}^2$ olarak bulunur.



Şekil 4.19 Robotik kuş tasarımında ağırlık merkezleri

Robotik kuş tasarlanırken kanat profilleri ve gövde ağırlığı makul malzemeler (hafif ve dayanıklı olan karbonfiber gibi) seçilerek Solidworks programından çizilerek ağırlıklarına karar verilmiştir. Daha sonra XFLR5 analiz programında bu ağırlıklar girilerek analizler yapılmıştır. Şekil 'de kanat, gövde ve elevatör ağırlık merkezleri görülmektedir.

Yine XFLR5 programında yapılan 3B analiz sonucunda (Şekil 4,17) yunuslama momenti sıfır hücum açısında -0,47 olduğu görülmüştür.

$$M_Y = \frac{1}{2} \cdot C_m \cdot \delta \cdot V_t^2 \cdot S_w \cdot C_h \quad (2.6)$$

$$M_Y = \frac{1}{2} \cdot 0,47 \cdot 1,225 \cdot 9,07^2 \cdot 0,545 \cdot 0,290$$

$$M_Y = 3,74 \text{ N}$$

olarak bulunur.

Denklem (2.4) kuyruk momenti için kullanıldığında:

$$F_{LW} = \frac{(0,29 - 0,121) + 0,231 + 0,112}{3,74}$$

$$F_{LW} = 7,3 \text{ N}$$

bulunan bu değer kuyruk de dengeyi oluşturacak kuvvettir.

Kuvvetlerin dengesini görmek için denklem (2.3) kullanıldığına:

$$\Sigma F = 23,8 - 7,3 - 6,38$$

$$\Sigma F = 10,12 \text{ N}$$

Kuvvetler toplamının pozitif çıkması robotik kuşun dengeli bir uçuş sergileyeceğini göstermektedir.

4.3 Kanat Çırpma Frekansı

Uçaklarda motorla sağlanan itki kuvveti kuşlarda kanadın esnekliği ve kanat uçlarında bulunan aileronlar sayesinde olmaktadır. Taşıma kuvvetini faydalı hale getirmek için itkinin oluşması gerekmektedir. Robotik kuş da itkiyi oluşturacak olan ana unsur ikincil kanat kısımlarıdır. İtkinin oluşmasının yanı sıra robotik kuşun ağırlığını karşılaması için kanatlara belirli bir gücün aktarılması gerekmektedir. Bu güç kanat frekansı ile sağlanmaktadır. İfade şu şekildedir (Pennycuick, C.J, 2008):

$$f = m^{3/8} \cdot g^{1/2} \cdot B^{-23/24} \cdot s_w^{-1/3} \cdot \delta^{-3/8} \quad (2.7)$$

$$f = 0,65^{3/8} \cdot 9,81 \cdot 2,1^{-23/24} \cdot 0,545^{-1/3} \cdot 1,225^{-3/8} = 1,48 \text{ Hz}$$

olarak hesaplanmıştır. Girilen parametrelere sadık kalındığı takdirde minimum saniyede 1,48 kanat çırpma halinde robotik kuş yerçekimine karşı havalanabilecektir.

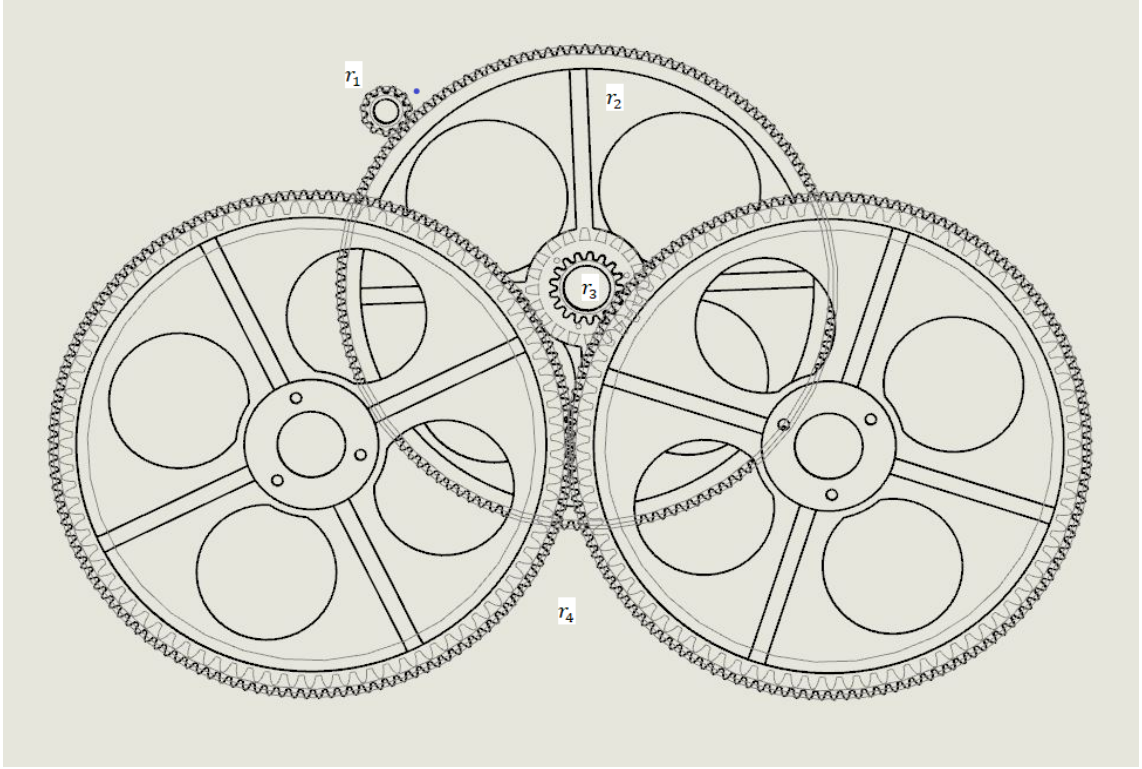
4.4 Dişli Çarklar ve Motor

Redüktör oranının belirlenirken öncelikle kanat frekans belirlenmeli ardından kanat dişlisinin açısal hızı bulunarak motor dişlisinin devir sayısı tespit edilmelidir. Projedeki robotik kuşun frekansı 1,48 olarak bulunmuştur. Bundan hareketle:

$$\omega = 2\pi f = 9,29 \text{ rad/s}$$

Kanat dişlisinin devir sayısını bulmak içinse:

$$n = \frac{\omega}{9,54} = 88,6 \text{ d/d}$$



Şekil 4.20 Robotik kuşun 2B dişli sistemi

Dişliler çizimlerde modülü düşük ($m=0,7$) olarak oluşturulmuştur. Bunun nedeni dişliler arasındaki boşluğun azaltılması ve çıkacak olan ses seviyesinin düşürülmesi, ayrıca kanat çırpma esnasında dişlilerin maruz kalacağı yüksek basınç karşı mukavemetinin artırılması hedeflenmiştir. Tasarlanan dişlilerin yarıçapları şu şekildedir:

$$r_1 = 7,7 \text{ mm} \Rightarrow n_1 = 11$$

$$r_2 = 88,2 \text{ mm} \Rightarrow n_2 = 126$$

$$r_3 = 25,9 \text{ mm} \Rightarrow n_3 = 37$$

$$r_4 = 79,8 \text{ mm} \Rightarrow n_4 = 114$$

Torku ve motor seçiminde yardımcı olması için redüktör oranı:

$$i_T = \frac{r_4 r_2}{r_1 r_3} = 35$$

olarak bulunmuştur.

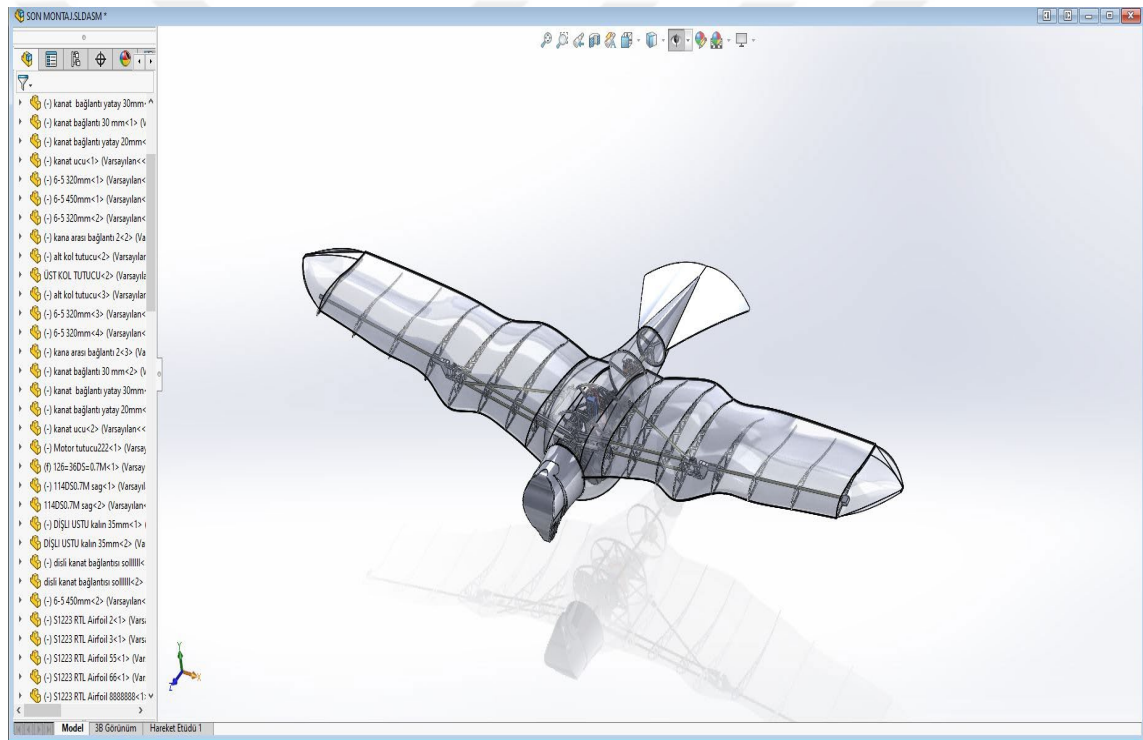
$$n_m = n_{knt} \cdot i_T$$

$$n_m = 88,6 \cdot 35 = 3101 \text{ d/d olmaktadır}$$

4.5 Bilgisayar Destekli Tasarım

Kuş uçuşunun sağlanabilmesi için dişli sisteminin kanat çırpma sırasında belirli açıları sağlaması gerekmektedir. Bu açılar robotik kuşun uçuşmasında ana etken ve dişli sistemi ile doğrudan bağlantılıdır. Kanat üst ölü noktaya ulaşırken dişlilerin maruz kaldığı basıncı ve yerçekimi ivmesiyle alt ölü noktaya indikten sonra yük altında kalan dişlilerin dayanımı ilgilenilmesi gereken konulardandır [32].

Süzülme gibi aktivitelerin yapılabilmesi için gerekli olan kanat alanının sağlanması da proje kapsamındadır ve S_w olabildiğince yüksek tutulmuştur. Kuşun kanat çırparak kazandığı irtifa ile birlikte kazanılan potansiyel enerjinin kinetik enerjiyle takas edilmesi süzülme olayı olarak ifade edilmektedir.

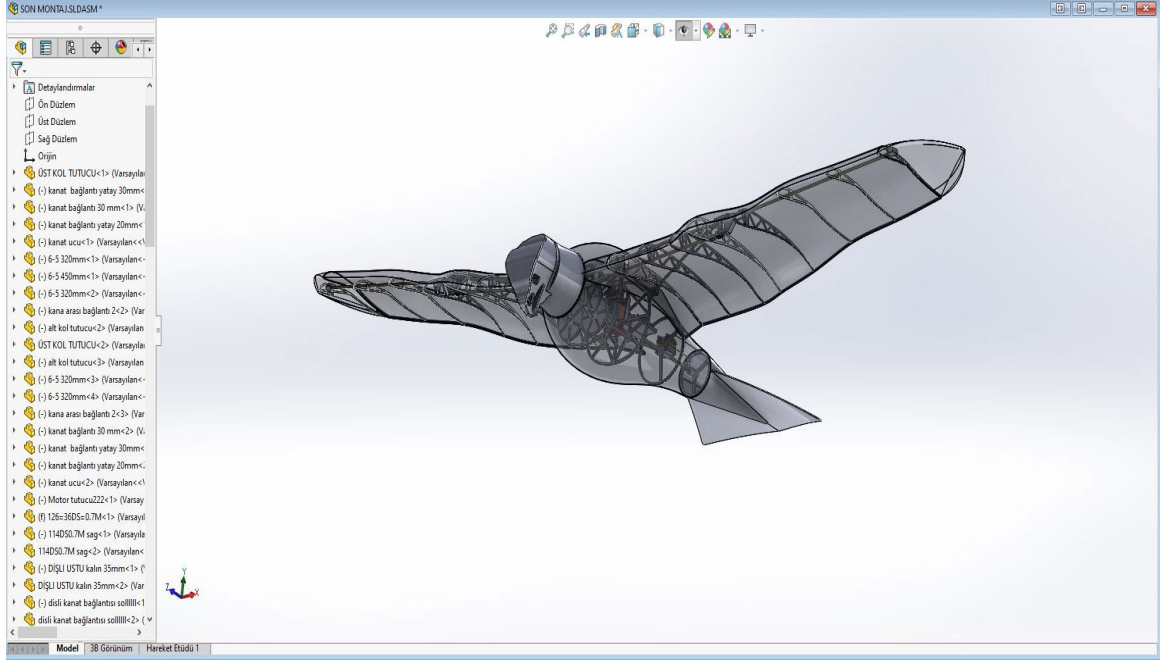


Şekil 4.21 Robotik kuşun izometrik üst görünümü

Tasarım ve kanat açısı analizler Solidworks programı yardımıyla yapılmış ve prototipler ona göre belirlenmiştir. Ampirik metodolojiden de faydalanarak ve aerodinamik analizlere uygun, taşıma ve itki oluşumlarının yüksek oluşmasını sağlayacak kanat folyosuna sahip bir tasarım oluşturulmaya çalışılmıştır.

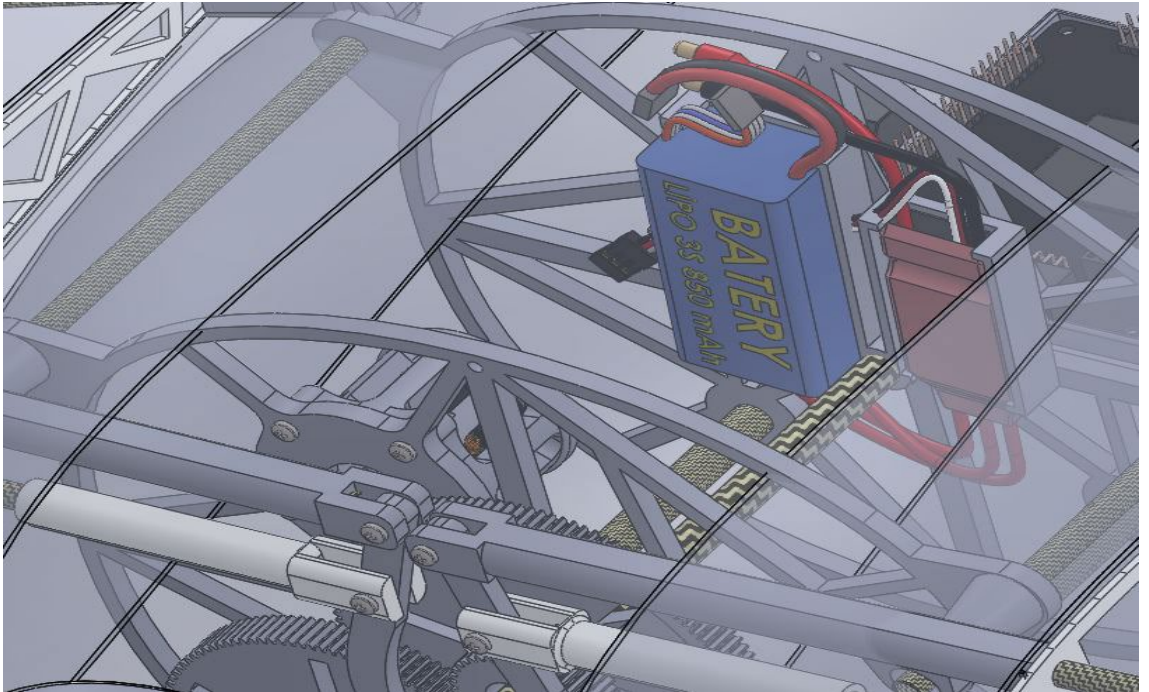
Robotik kuşun CAD tasarımı şekil 'de gösterilmiştir. Kuş tüm detaylarıyla ayrıntılı olarak çizilmiştir. Hafif olması gerektiği için iskelet yapısı olabildiğince seyrek ve mukavemetli yapılmıştır. Buna rağmen programdaki çiziminde 150'den fazla montajlı

parça mevcuttur. İskeletin hareketli eklem parçaları 4mm perçin kullanılarak montajlanmıştır.



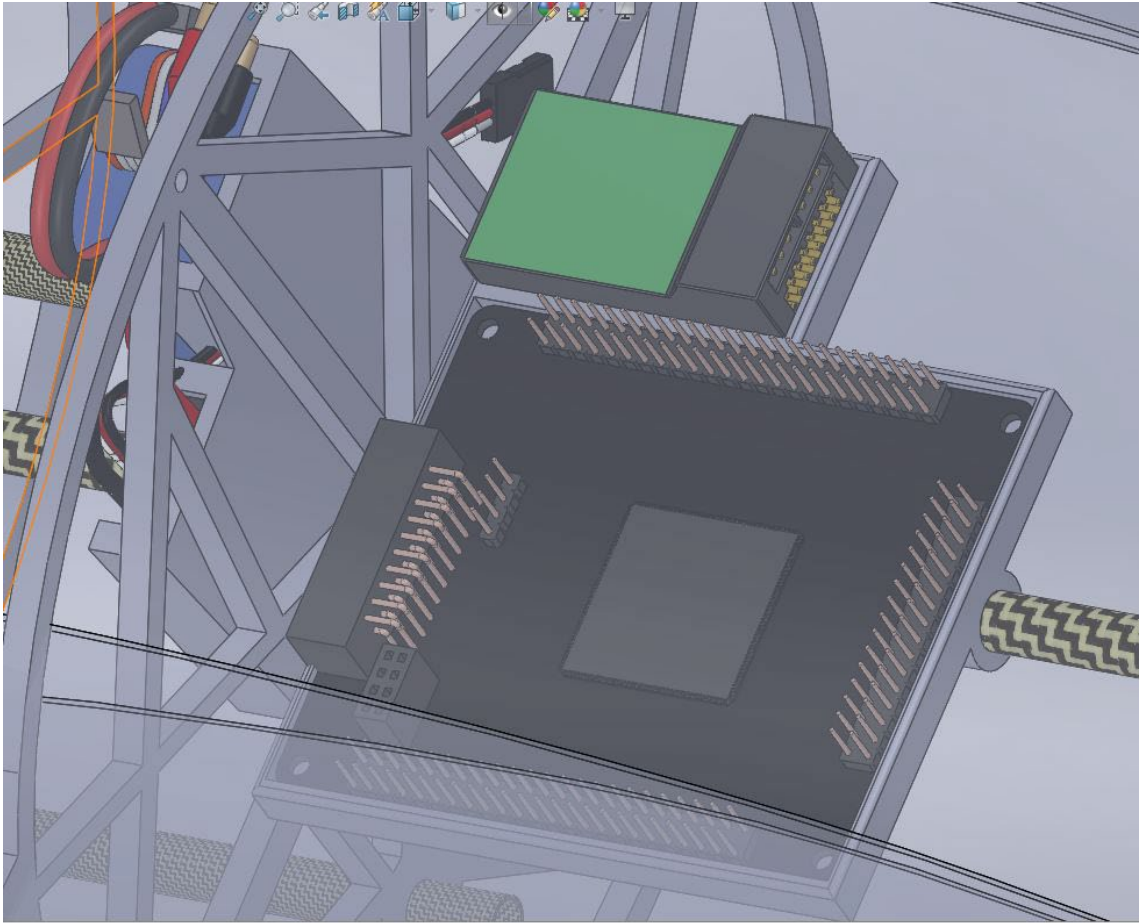
Şekil 4.22 Robotik kuşun izometrik alt görünümü

Robotik kuşa kanat çırpma mekanizmasına bağlı fırçasız dc motor, kontrolcüsü olan ESC ve batarya montajları da yapılmıştır (Şekil 23). Bağlantılar ana gövdeye yapılırken ara parçalar oluşturulmuştur.



Şekil 4.23 Batarya ve ESC çizimleri

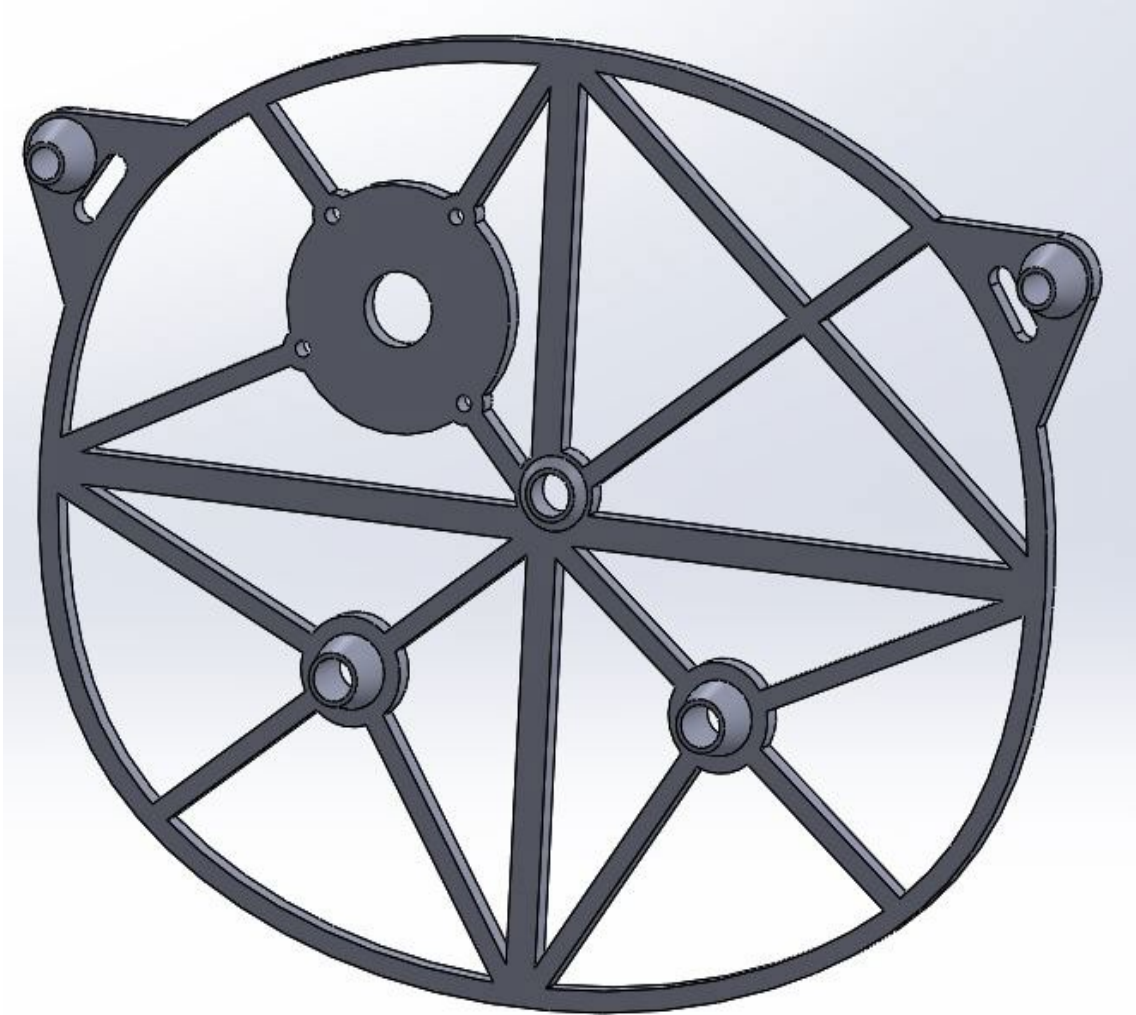
Motor hareketinin kontrolü, otomatik dengeyi oluşturmak için gereken üç eksenli ivme ölçer kontrolü, moment değişimlerinin sonucu olarak kuyruk bölümünü hareket ettirecek servo motor kontrolü ve kanat uçlarında bulunan aileron servolarının kontrolü için düşünülmüş olan STM32F407VG kontrolcüsüne sahip kart, kumanda ile kuş arasındaki iletişimi sağlayacak olan sinyal alıcı şekil 'de gösterilmiştir. Ana gövdeye bağlantısı, kartın üzerinde bulunana üç eksenli ivme ölçerden dolayı orta kısımda konumlandırılmıştır. Bağlantı elemanı olaraksa 3B yazıcı çıktısı olan plastikler düşünülmüş çizilmiştir.



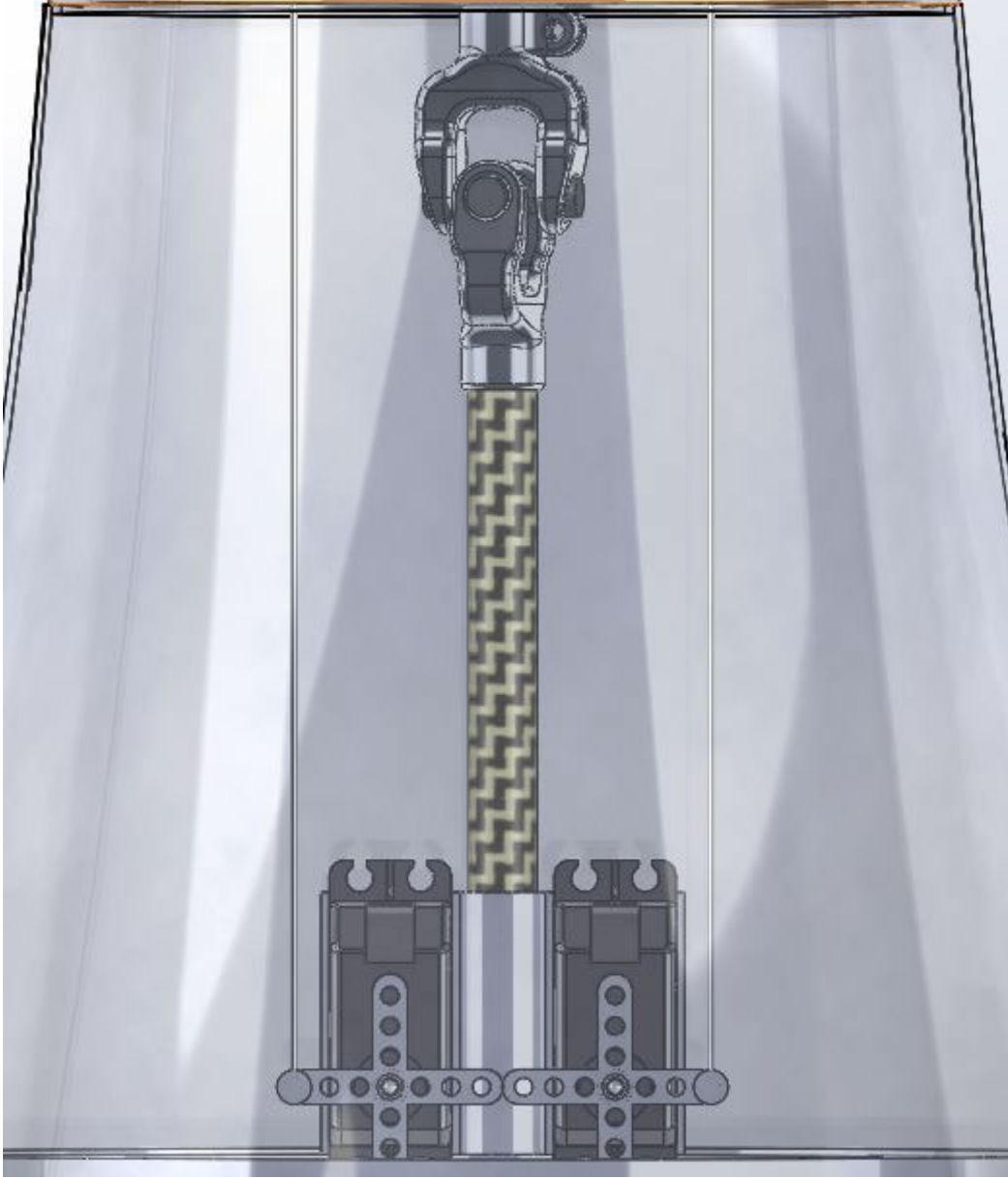
Şekil 4.24 Kontrolcü ve sinyal alıcı çizimleri

Robotik kuşun kanat dişlilerini hareket ettiren BLDC motor ve servo motorları kumanda yardımıyla kontrol edilecek olsa da dinamik hava akımlarının belirsizliği nedeniyle otopilot özelliğinin de olması gerekmektedir. Bu özellik ise STM32 kartı ve üzerinde buluna üç eksenli ivme ölçer yardımıyla yapılabilmektedir.

Robotik kuş olabildiğince hafif olması gerektiğinden ve dar bir çalışma alanı olduğundan dolayı çizimleri ve malzemeleri dikkatle seçmek gerektiğini söylemiştik. İskelet yapısının ana argümanı olan ana gövde parçası diğer parçalarda olduğu gibi hafiflik ve mukavemetin aynanda bulunması gerektiği en önemli parçadır. Ön ve arka ana gövde parçaları birbirlerine iki tane kanat mesnet noktası olan 6mm çapında, üç tane dişlinin yataklanması için kullanılan 8mm çapında karbonfiber borular vasıtasıyla bağlanmaktadır. Karbon fiber boruların ana gövde parçalarına bağlanma şekli sıkı geçme usulü gerçekleşmekte olup, aralarındaki mesafe ve gönyesi ayarlandıktan sonra yapıştırıcı ile son hali düşünülmektedir. İki ana parçanın aralarındaki mesafe diğer bölümde hesaplanan kanat alanı ve kanat profiline göre belirlenmektedir. Dişlilerin ve kanat mesnet noktalarının esnememesi için rijitliği tesis edilmesi önemlidir.



Şekil 4.25 Ana gövde parçası (ön gövde)

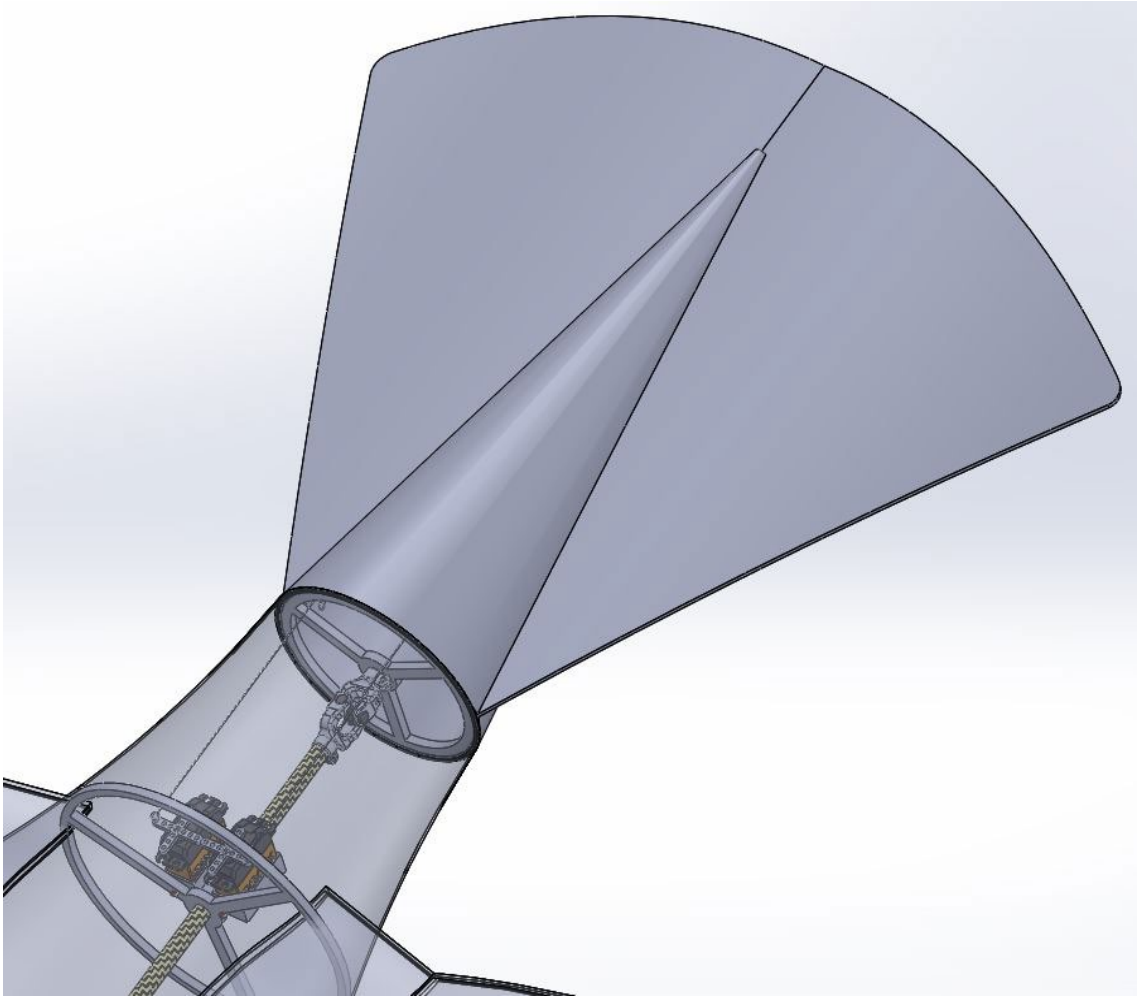


Şekil 4.26 Kuyruk kontrol servolarının üst görünümü

Kuyruk uçağın momentinin kontrol edilmesinde en önemli unsurdur. Genişliği ve uzunluğu diğer bölümlerde hesaplanmış olduğu için çizim programında gerekli mafsalları yapılarak oluşturulmuştur. Şekil 4.26’de görüldüğü üzere iki adet dijital servo motor bulunmaktadır. Bu servo motorlar karbonfiber boruya 3b yazıcı çıktısı ile sabitlenmesi düşünülmüştür.

Servo motorlar birlikte çalışarak kuyruğun açısının ayarlanmasını, robotik kuşun moment dengesinin oluşmasını sağlamaktadır. Kuyruğa sabitlenmiş olan dairesel parçaya servo motorlardan çıkan tel bağlanarak hareketin sağlanmıştır. Servo motorlar eş zamanlı olarak çalışmakta ve çekme-itme hareketi sayesinde kuyruğu hareket ettirebilmektedir.

Motorlar biri saat yönünde diğeri saat yönün tersinde hareket ettirildiğinde kuyruk aşağı doğru yönelir. Bu şekilde burun aşağı ve burun yukarı momentler ayarlanmaktadır. Kuyruğun yukarı veya aşağı bükülmesi hücum açısında değişikliğe yol açacağı için taşıma katsayısını da etkilemektedir. Bu etki performansı artırıcı olarak kullanılabilir. Kuyruk aynı zamanda robotik kuşun dönüşlerinde de etki göstermektedir.



Şekil 4.27 Kuyruk bölgesi

Kuyruk, ana iskelet sisteminin omurgası olan karbonfiber boruya mafsallı bağlantısı yardımıyla montaj edilmiştir. Mafsalda 3B yazıcı çıktısı ile üç parça olarak çıkarılıp birleştirilmesi düşünülmektedir.

4.6 Malzeme Seçimi

Malzeme robotik kuş yapımında ana meselelerdendir. Doğadaki kuşların aksine tasarlanan mekanik hava araçları da ağırlığın olabildiğince düşük olması istenir. Gövde malzemesi, iskelet yapısının malzemeleri ve seçilen kontrolcüler – motorlar en yüksek verimliliği tesis edecek şekilde planlanmalıdır. Bu projede bütün analiz ve çizimler bu destura göre yapılmıştır.

Çizelge 4.5 Gövde ve kanat aday malzemelerinin teknik özellikleri

Özellikler	Poliüretan levha	EPP	Strafor
Yoğunluk (kg/m^3)	35	20	10
Basınç dayanımı (MPa)	0,30	0,37	0,22
Bükülme mukavemeti (MPa)	0,48	0,54	0,59
Termal genleşme katsayısı ($\mu\text{m/m}^\circ\text{C}$)	61,3-108,2	55,1-98,8	41,2-65

Kanat ve gövdede kullanılabilecek birçok malzeme vardır. Tablo 4.5’de bazı malzemeler gösterilmiştir. Poliüretan levha, geliştirilmiş polipropilen (EPP) ve strafor levha bunlardan birkaçıdır. Bu malzemeler arasında maliyeti en düşük olan strafordur. Hafif ve hava geçirmeyen bir malzemedir. Ancak çok incelendiğinde (1-1.5mm) dayanıksızlaşır ve düşük hava akımlarında bile şekilsel bozulmalar oluşabilir. Bundan dolayı prototip aşamalarında kullanılsa bile nihai üründe kullanıma uygun değildir.

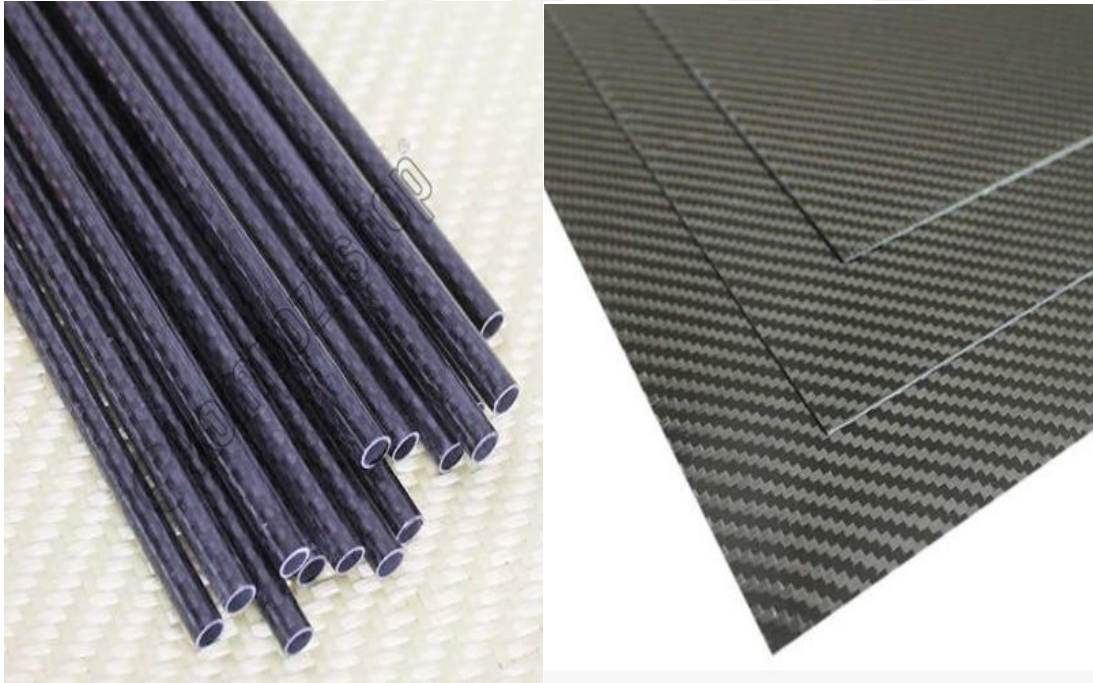
Poliüretan levha malzeme fiyatından çok şekillendirme maliyeti bulunan bir malzemedir. Bu levha, robotik kuşun kalıbının 3B yazıcıdan veya başka bir şekilde gövde ve kanat yapılarının şekilsel olarak oluşturulmasının ardından ısıtılarak vakumlanan poliüretan levhanın, oluşturulan robotik kuş prototipinin şeklini alması ve kurutulmasıyla oluşturulmaktadır. Oluşan kabuk yapıları oldukça sağlam ve esnemeyen yapıda olacaktır. Hafif olması, darbe ve hava akımlarına karşı mukavemetli olması proje açısından bu malzemeyi olumlu yönde etkilemektedir.

Geliştirilmiş polipropilene baktığımızda, tablo 4.5’de görüleceği gibi yoğunluğu düşük, basınç dayanımı ve bükülme mukavemeti en yüksek olan malzemedir. Her ne kadar diğerlerine göre ekonomik olmasa da bu malzeme, ince bir levha olarak kullanılacağı düşünüldüğünde kırılma ve yırtılma yapmamakta, saydam bir yüzeye sabit olmasına rağmen şekillendirme noktasında da olumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 4.28 Geliştirilmiş polipropilene (EPP) malzemesinin görünümü

İskelet oluşumu, prototip aşamalarında farklı malzemeler kullanılsa bile nihai üründe karbon fiber levha kullanılması gerekmektedir. Prototip ve son üründe karbon fiber kullanımı gerekmektedir. Karbonfiber borular 0,5mm et kalınlığında çok fazla mukavemet sağlamaktadır. Yerine tercih edilebilecek malzemeler çok kısıtlıdır.



Şekil 4.29 Karbonfiber boru ve plaka

Dişli malzemesi de hassas konulardandır ve seçimin doğru yapılması gerekmektedir. Birçok malzeme bulunmaktadır ancak burada önemli olan malzeme fiyatı, mukavemeti ve kolay işlenebilirliğidir.

Çizelge 4.6 Dişli malzemeleri

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Basınç dayanımı (MPa)	Akma gerilmesi (MPa)	Sürtünme katsayısı
ABS Flament	1,04	48,2-62	45,4	-
PLA Flament	1,24	40,4-43,9	54	-
Kestamit	1,15	93,2	80	0,39
PEEK	1,30	118-130	105	0,34
POM	1,41	88	65	0,35

Araştırması yapılan malzemeler Tablo 4.6'da gösterilmiştir. PLA ve ABS filamentler fikir verme açısından tabloya koyulmuştur. Ayrıca prototip yapma durumunda ilk olarak onlar kullanılmalıdır. Diğer malzemelere baktığımızda kestamit bulunması ve işlenmesi kolay bir malzemedir. Yoğunluğu da diğer malzemelere göre düşüktür. Ancak sürtünme katsayısı yüksektir.

Polioksimetilen (POM), düşük sürtünme katsayısına sahip ve kaygan bir malzemedir. Rijit ve sert bir malzeme olmasından dolayı küçük dişli uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Boyutsal stabilitesi poliamid grubuna göre daha iyidir. Uygun işleme teknikleriyle pürüzsüz yüzeyler oluşturulabilir.

Polieter eter keton (PEEK), polioksimetilenden daha düşük sürtünme katsayısına sahiptir. Endüstriyel olarak düşündüğümüzde bir plastikten beklenebilecek bütün dayanımları içinde barındırmaktadır. Çok yüksek çalışma sıcaklığına (-60°C / 310°C) sahip olan PEEK, tabloda da görüldüğü üzere basınç dayanımı ve akma gerilmesi diğer malzemelere göre çok yüksektir.

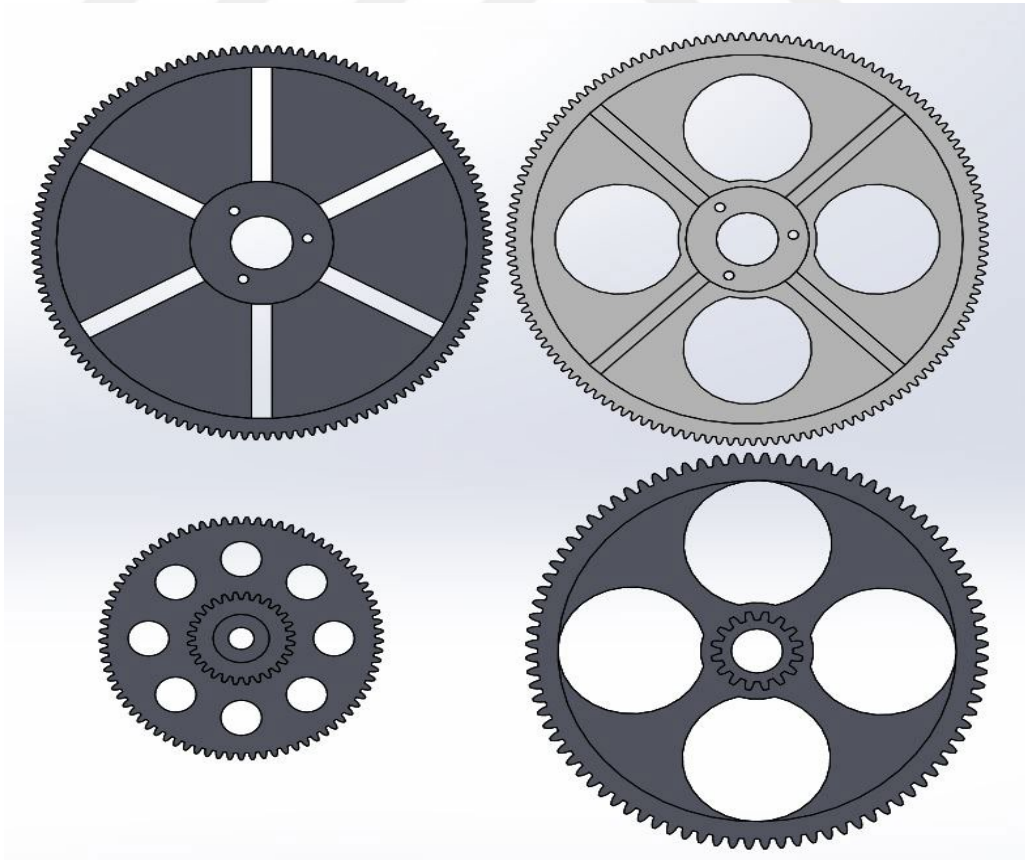
Tüm bu araştırmalar neticesinde robotik kuşun havadaki şartlara dayanacağı ve dişlilerde oluşacak yüksek basınca dayanabilecek olan malzeme polieter eter keton olduğu görülmektedir.

4.7 Dişli Sisteminin Yapımı

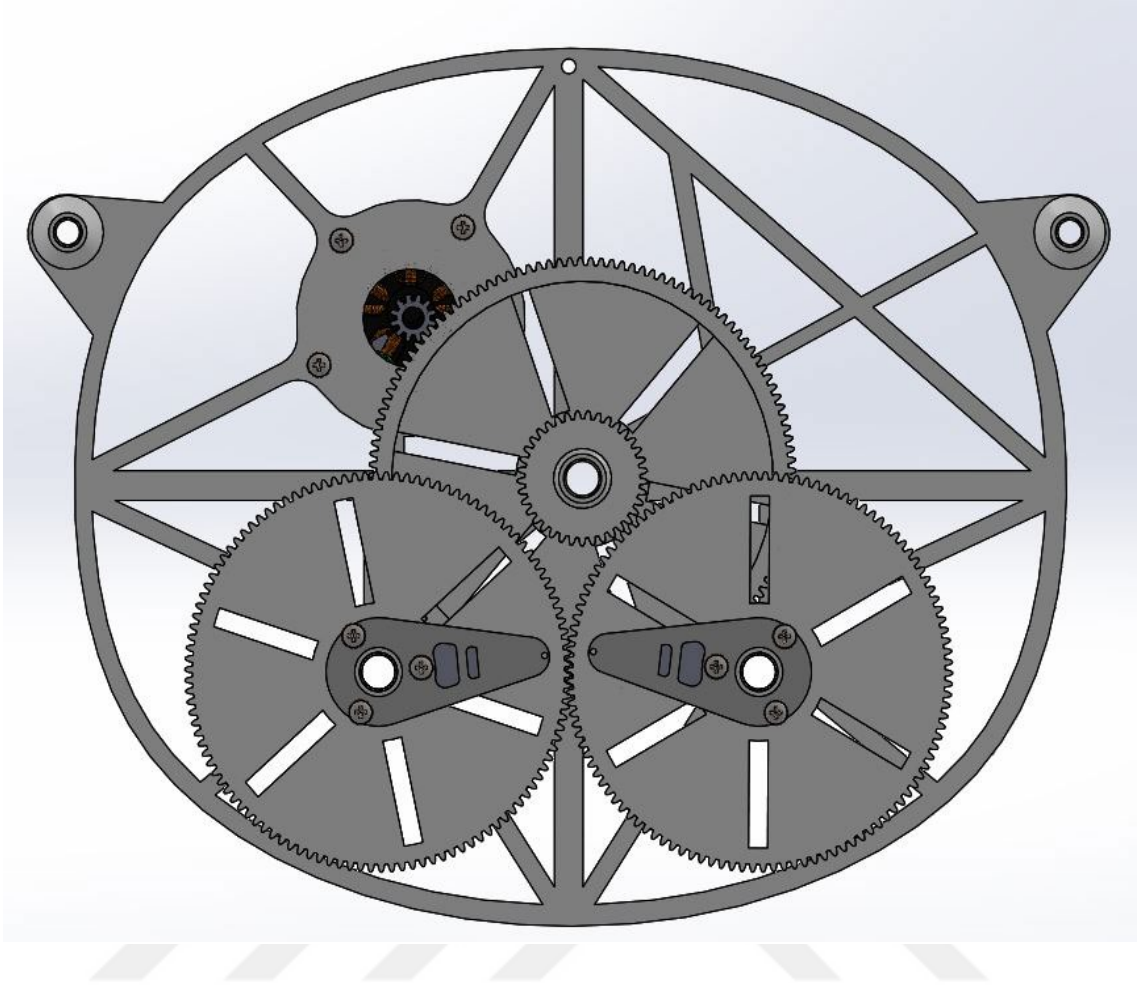
Bu projenin en önemli kısımlarında biri kuşkusuz dişli çark sistemidir. Tek bir motorla dili çarkların kanat kollarına verdiği güçle çalışan bu cihaz, dişli malzemesi dişli modülü, çevrim oranı gibi konular titizlikle çalışılmalıdır ve prototip çalışmaları hazırlanılırken farklı dişli sayısına sahip dolayısıyla farklı çevrim oranlarında denemeler yapılacağı unutulmamalıdır. Bu dişlilerde iki önemli konu bulunmaktadır. İlki denildiği gibi oran ve malzeme, ikincisi ise karbonfiber boru rulman yataklaması ve rulman dişli yataklamasıdır.

Yataklama yapılırken dikkat edilmesi gereken hususlar:

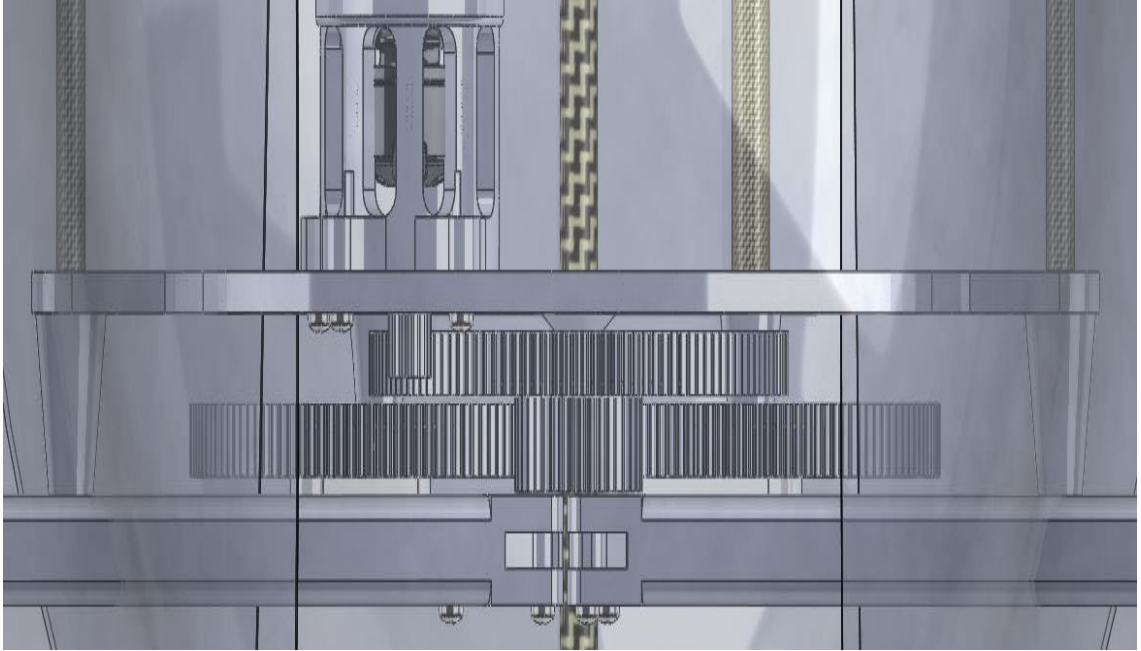
- Dişli merkezinde bulunan deliğin milimetrenin yüzde hassasiyetinde rulman diş çapına göre tornalanması
- Rulmanın karbonfiber boruda yataklanacağı bölgenin gönyeli ve dikkatli bir şekilde alınması
- Oluşturulan bu iki parçanın eksantrikliğe mahal vermeyecek şekilde bağlantısının yapılması



Şekil 4.30 Farklı modül, boyut ve mukavemetlere sahip çizilen dişli modelleri



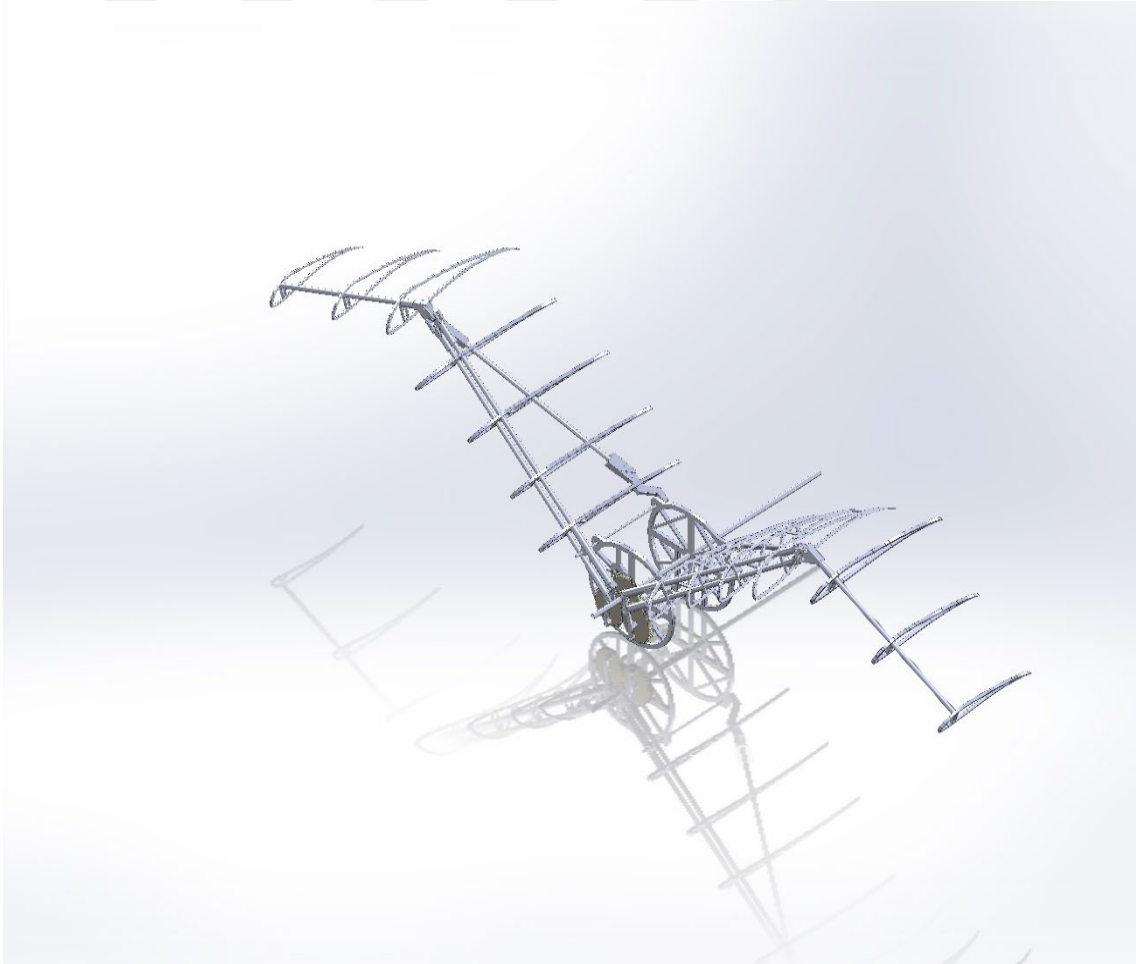
Şekil 4.31 Ana gövde ve dişli sistemi bağlantıları



Şekil 4.32 Dişli sistemi ve motor bağlantısı

Robotik kuşun genel olarak önemli parça ve bağlantıları bu şekildedir. Şekil 4.7’de kanat çırpma için gerekli olan tüm iskelet yapısının bulunduğu resimde, kanat dişlilerinin bağlı olduğu kolla ve kanat arası eklem bağlantılarını yapan parçaların hepsi PCB malzemesinden, Solidworks programında çizilip test edildikten sonra el ile imal edilmiştir.

Robotik kuşun en önemli noktalarından biride dişli sistemidir. Denemelerde anlaşılmıştır ki kanat çevriminin bazı noktalarında vuruş gerçekleşmektedir. Bu vuruşlar kanat frekansı yükseltildiğinde artmakta, frekans yükseldikçe vuruşun gerçekleştiği noktada 200-250ms duraksamaktadır. Frekans 1 iken az, 1.5 civarlarında hissedilir seviyelerde, 1.75-2 arasında durma noktasına gelmektedir. Gerekli olan frekans değeri ise 2.5-3 arasındadır. Bundan dolayı robotik kuş uçuş olayını gerçekleştirmekte zorlanmaktadır.

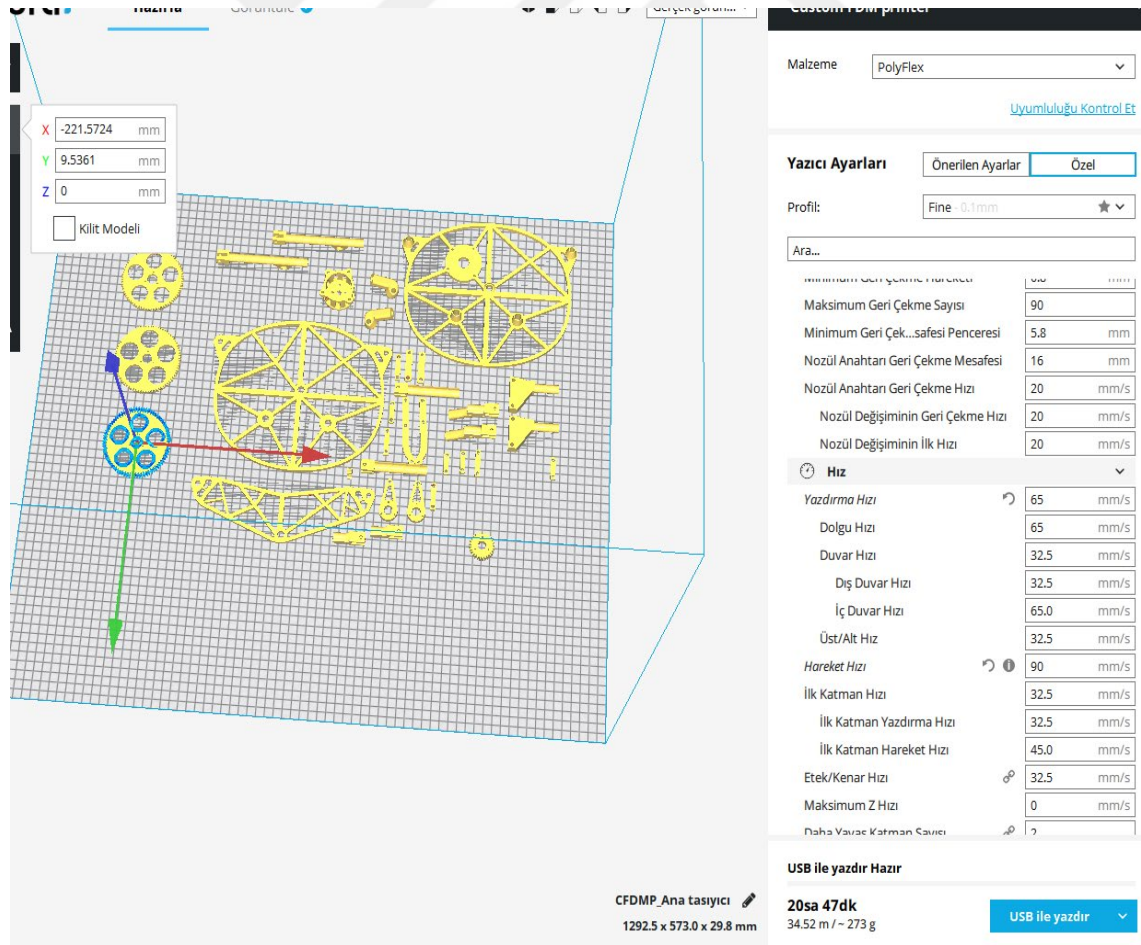


Şekil 4.33 Robotik kuşun genel iskelet görünümü

4.8 Yapılabilecek Prototip Örneği

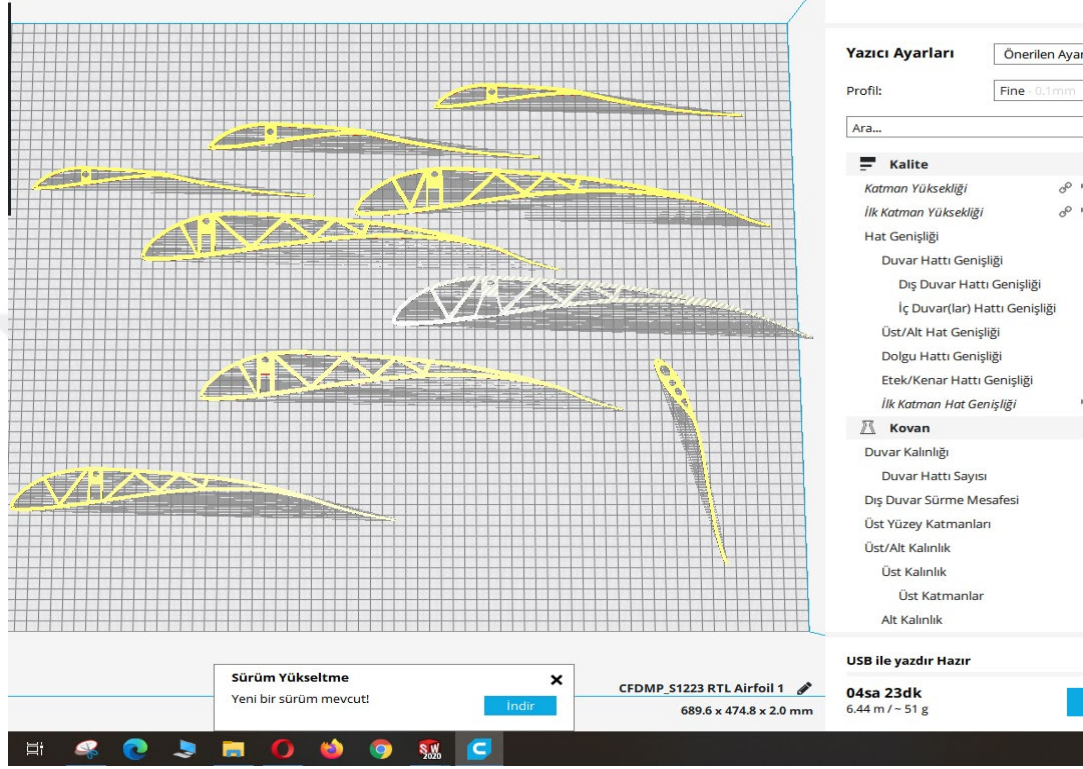
Bu prototipin değişik varyasyonları üretilebilir. Kanatların airfoil yapıları katlı imalatla üretildikten sonra karbonfiber borulara sabitlenerek ve akabinde kanat iskeleti oluşturulabilir. Kanat ilk prototipten sonuncusuna kadar iskeleti birçok kez hafifletme işlemlerine maruz kalacağı öngörülmektedir. Çizilen 9 airfoil yapısı 3B yazıcıda PLA filament ile çıkartılabilir ve ilk denemeler için kullanılabilir. PLA ile yapılacak olan airfoil yapıları birçok zorlamaya maruz kalacaktır ancak PLA esnek bir malzeme olduğu için kırılmadan kanatları deneme imkânı verecektir Kanat kaplama malzemesi olarak en rahat bulunacak malzemelerden olan kitap cildi düşünülebilir. Cildin ağırlığının çok düşük olması ve gergi bir şekilde kanat iskeletine geçirilebilecek olması onu cazip hale getirmektedir.

Gövdeyi oluşturmak içinse strafor hem bulunabilirlik hem de maliyet açısından uygundur. Straforu ısıtma işlemiyle şekillendirmek kolaydır ve istenilen gövde ve kuyruk şekillerinin oluşturulması mümkündür.



Şekil 4.34 Robotik kuş iskelet parçaları 3D Cura görünümü

Kanat ve gövdedeki eklem parçalarının 3B yazıcı vasıtasıyla çıkarılması kolaylıkla sağlanacaktır. Dayanım gerektiren parçaların ABS filament ile çıktılarının alınması daha uygun olur. Nihai ürüne benzetmek amacıyla bazı eklem parçaları eski PCB kartından kesmek suretiyle de oluşturulabilir. Bunu yapmak hem mukavemeti artıracak hem de ağırlığı düşürecektir.



Şekil 4.35 Robotik kuş kanat airfoil yapıları 3D Cura görünümü

Şekil 4.34- 4.35 ‘de prototip yapılması halinde baskısı alınabilecek parçalar gösterilmektedir. Cura programında dilimlenen kanat ve gövde parçaları fikir verme açısından önemlidir. Dişli parçaları da ABS filament ile basılabilir ve robotik kuşun redüktör sistemi oluşturulabilir. Bu sayede farklı çap ve modüllerde dişliler rahatlıkla denenebilir

5.SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışmasında robot kuş prototip uygulamasının ön adımları olan robotik kuş yapıları incelenmiş ve üretimi için gerekli araştırma ve analizler yapılmıştır. Robotun matematiksel hesapları, malzeme seçimi ve önemli tasarım analizleri üzerinde durulmuştur. Bu tezde bir robot kuşun en önemli uçuş bileşeni olan kanat yapısı üzerinde fazlaca durulmuştur. Kanat açıklığı ve kanat açıklık oranları uygun biçimde hesaplanıp bilgisayar ortamında oluşturulmuştur. Uygulamada tüm veriler altın kartal kuşunun

verilerine yakın seçilerek benzetim yapılmıştır. Benzetim kanat alanı, kuyruk alanı, kanat genişliği, kuşun boyut bilgilerini kapsamaktadır.

Robotik kuşun öngörülen ağırlığı belirlenmiş daha sonra kanatlarda oluşması gereken taşıma kuvveti hesaplanmıştır. Analizler için oluşturulan kuş üç farklı kanat tipinde denenmiştir. Taşıma, sürüklenme ve verimlilik grafiklerine bakılarak profil seçilmiş sonrasında basınç dağılımını gözlemlemek için 3B analiz yapılmıştır. Kanattaki basınç dağılımı analiz edilirken değişken Reynolds sayılarına bakılarak robotik kuş üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Hesaplanan minimum taşıma kuvvetinin üzerine çıktığı görülmüştür.

Klasik hava araçlarında kullanılan malzemelerin yanı sıra robotik kuş projesinde özellikle sert, sağlam, hafif ve çalışma sıcaklığı yüksek olması gerektiği ortadadır. Robotik kuşlarda ağırlık ve dayanıklılık çok önemli iki parametre olduğundan daha maliyetli ve özel malzemeler(polieter eter keton (PEEK), karbon fiber ve geliştirilmiş polipropilen (EPP)...) kullanılmalıdır. Bilindiği üzere uçan robotlarda havada iken küçük bir hata ve arıza ciddi maddi kayıplarla sonuçlanmaktadır.

Yapılan robotik kuş tasarımı ileriki çalışmalarda uygulamaya alınarak denenecektir. Yapılan incelemeler sonucunda hazırlanacak prototip yapısında karbonfiber iskelet yapısı, dış gövdenin geliştirilmiş polipropilenden oluşturulması ve dişli sistemin ise polieter eter ketondan imal edilmesi öngörülmüştür. Burada elde edilen verilerin ileriki çalışmalara ışık tutması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

Authors: Steven H. Collicott, Daniel T. Valentine, E. L. Houghton, P. W. Carpenter
Aerodynamics for Engineering Students 6th Edition - February 18, 2012

Anderson Jr. , Performance Analysis of Typical Airfoils Through Numerical Simulation Using Fluid-Structure Interaction - Scientific Figure on ResearchGate (Anderson Jr., 2001)

Anderson, John David, and Mary L. Bowden. Introduction to flight. Vol. 582. New York: McGraw-Hill Higher Education, 2005.

Bourcart, Jean Jacques, Tasarımcı. Havacılık, etütler, denemeler ve buluşlar qui, sans résoudre le problème de l'aviation, ont pourtant donné des résultats intéressants and cesaretlendiriciler à l'auteur / dédié par l'auteur aux exp chereurs, 't, , Burkart . , 1866.

Caramin, B., Dunn, I., Ney, R., Klawikowski, Y., Duarte, A. J., Malheiro, B., ... & Guedes, P. (2015, October). Design and implementation of a biologically inspired flying robot an EPS@ ISEP 2014 spring project. In Proceedings of the 3rd International Conference on Technological Ecosystems for Enhancing Multiculturality (pp. 211-218).

Chanute, Octave, et al. Progress in Flying Machines. [New York: The American engineer and railroad journal, 1894] Pdf. Retrieved from the Library of Congress, <www.loc.gov/item/31015366/>.

Couceiro, Micael S., et al. "The dynamic modeling of a bird robot." 9th Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions. 2009.

Couceiro, M. S., Ferreira, N. F., & Machado, J. T. (2010). Application of fractional algorithms in the control of a robotic bird. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 15(4), 895-910.

Clément Ader et Gabriel de La Landelle (1883-1884) Revue d'histoire des sciences et de leurs applications, 1965, Volume 18, Numéro 18-3, pp. 249-264, par Jacques Payen

Daniel, Clifton, ed., Chronicle of the 20th Century , Mount Kisco, New York: Chronicle Publications, 1987, ISBN 0-942191-01-3 , s. 136.

Dupin, Gustave. Considérations Sur Les Responsabilités De La Guerre. Paris, Société mutuelle d'édition, 1921. Image. Retrieved from the Library of Congress,

Fluid Mechanics for Engineers - P.S. Bana 1969

Gaston Tissandier'in 1886 tarihli "La Navigation Aérienne" kitabından, Project Gutenberg aracılığıyla (<http://www.gutenberg.org/files/28397/28397-h/28397-h.htm>).

General Correspondence: Hargrave, Lawrence, -1904. 1903. Manuscript/Mixed Material. Retrieved from the Library of Congress, <www.loc.gov/item/wright002456/>.

Gies, S. H. Ornithopter flight dynamics: measurement and analysis of the Robird's Flapping Wing. MS thesis. University of Twente, 2017.

Hazerfan Ahmet Çelebi'den önce uçan Müslüman bilim adamı. Abbas Kasım İbn Firnas - Nazan şara Şatana - Radikal Blog". 23 Aralık 2015 tarihinde kaynağından arşivlendi. 2015.

Hedenström, Anders. "Aerodynamics, evolution and ecology of avian flight." Trends in Ecology & Evolution 17.9 (2002): 415-422.

Airfoil Tools. <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=s1223-il>. [accessed 18 Nov, 2022]

Hartman, S., Hoeijmakers, H., & Musters, R. (2012). Experimental investigation of flow about wing of robot bird. In 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition (p. 55).

Heathcote, Sam, Z. Wang, and Ismet Gursul. "Effect of spanwise flexibility on flapping wing propulsion." Journal of fluids and structures 24.2 (2008): 183-199.

Holmes, B. J.; Obara, C. J.; Yip, L. P. (1 Haziran 1984). "Natural laminar flow experiments on modern airplane surfaces". NASA Technical Reports

L'Aéronaute, e année numéro 6, juin 1873, Observations physiologiques faites à bord de l'aérostat l'Étoile polaire, p.130

Leishman, J. Gordon (2006). Helikopter Aerodinamiğinin Prensipleri. Cambridge havacılık. 18 . Cambridge: Cambridge University Press. s. 7–9. ISBN 978-0-521-85860-1. 13 Temmuz 2014 tarihinde orjinalinden arşivlendi

Les fondations de l'Académie des Sciences (1881-1915) par Pierre Gauja, p.331, Prix Pénau

Mémoires et compte rendu des travaux de la Société des ingénieurs civils de France, 1875, p.23 et 520

dos Santos Rodrigues, Marcio. "Representações políticas da Guerra Fria: as histórias em quadrinhos de Alan Moore na década de 1980." (2011).

M. Adil Yükselen, Uçak Mühendisliğine Giriş ve Etik Ders Notları 2006

Nonlinear automatic control of fixed-wing aerial vehicles - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/Aerodynamic-forces-on-an-airplane_fig7_331245891 [accessed 18 Nov, 2022]

Tang, D., Fan, Z., Lei, M., Lv, B., Yu, L., & Cui, H. (2019). A combined airfoil with secondary feather inspired by the golden eagle and its influences on the aerodynamics. Chinese Physics B, 28(3), 034702.

Parkin, C. S., and J. J. Spillman. "The use of wing-tip sails on a spraying aircraft to reduce the amount of material carried off-target by a crosswind." Journal of Agricultural Engineering Research 25.1 (1980): 65-74.

Paul Jackson (7 Mart 2013). "Yöneticiye Genel Bakış: Jane's All the World Aircraft: Development & Production - 'Adalet ertelendi, adalet reddedildi ' ". IHS Jane'in Tüm Dünyanın Uçağı.

- Pennycuik, C. J. (2008). *Modelling the flying bird*. Elsevier.
- Pennycuik, C.J. (1975) *Mechanics of flight*. In *Avian Biology* (Vol. 5) (Farner, D.S. et al., eds), pp. 1–75, Academic Press
- 9 Pennycuik, C.J. (1989) *Bird flight Performance: A Practical Calculation Manual*, Oxford University Press
- Perseghetti, B., Gallagher, J., Goppert, J. M., Yantek, S., Matson, E., & Hwang, I. (2015). Optimizing energy efficiency of a flapping robotic bird through application of evolutionary algorithms. In *AIAA infotech@ aerospace* (p. 1456).
- Ryu, S. W., Lee, J. G., & Kim, H. J. (2020). Design, fabrication, and analysis of flapping and folding wing mechanism for a robotic bird. *Journal of Bionic Engineering*, 17(2), 229-240.
- Sydney, Drawing, three cylinder radial compressed air engine No.28/33, ink / pencil / paper, Lawrence Hargrave, New South Wales, Australia, 1906
- Special Issue, *International Journal of Applied Engineering Research* ISSN 0973-4562 Volume 14, Number 14, 2019 (Issue S,2019)
- Silva, M., Tenreiro Machado, J. A., & Jesus, I. S. (2008). Research issues in biological inspired sensors for flying robots. In *27th IASTED International Conference* (pp. 1-6).
- Shaha, Sarfaraj Nawaz, and M. Sadiq A. Pachapuri. "NACA 2415-Finding Lift Coefficient Using CFD, Theoretical and Javafoil." *International Journal of Research in Engineering and Technology* 04 7 (2015): 444-49.
- Vivian, E. Charles. *A History of Aeronautics*. W. Collins Sons & Co, 1919. 34-35.
- Yavçin, E. (2014). Uçma hareketinin biyomekaniğinin incelenmesi ve robotik kuş tasarımı
- Weis-Fogh, Torkel. "Quick estimates of flight fitness in hovering animals, including novel mechanisms for lift production." *Journal of experimental Biology* 59.1 (1973): 169-230.
- W. Shyy, Y. Lian, J. Teng, D. Viieru, and H. Liu. *Aerodynamics of Low Reynolds Number Flyers*. Cambridge Aerospace Series. Cambridge University Press, 2008.
- Williams, Hannah J., et al. "Physical limits of flight performance in the heaviest soaring bird." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117.30 (2020): 17884-17890.