

Uçma hareketinin biyomekaniğinin incelenmesi ve bir robotik kuş tasarımı çalışması

Erkan Yavçin^{1*}, Akın Oğuz Kaptı²

08.04.2014 Geliş/Received, 17.06.2014 Kabul/Accepted

ÖZ

Askeri amaçlarla insansız hava aracı (İHA) kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır. Günümüzde, bu amaçla klasik uçakların tasarım özelliklerine ve görünümüne sahip İHA'lar kullanılmaktadır. Bu özelliklerdeki İHA'ların yerine, kuşlardan alınan ilhamla geliştirilen robotik kuşların kullanılması, daha iyi kamufle olabilen ve uçak ya da helikopter gibi hava araçlarına göre daha verimli ve daha sessiz uçabilen sistemler elde edilmesini sağlayacaktır. Bu çalışmada, kuşların biyomekanik yapısı ve uçuş hareketinin kinematik-dinamik özellikleri incelenmiştir. Ayrıca, bir robotik kuşun tasarım ve analiz çalışmaları yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: robotik kuş, insansız hava aracı (İHA), uçuş biyomekaniği

Biomechanical investigation of flying and an ornithopter design study

ABSTRACT

The usage of unmanned aerial vehicles (UAV) for military purposes is becoming increasingly common. At present, the UAVs which ishaving the design properties and the appearance of conventional aircrafts are used for this aim. Instead of this kind of UAVs, the usage of robotic birds (ornithopters) developed with the inspiration taken from birds may provide the achievement of the new generation systems which may be better camouflaged and can fly more efficient and quiet in comparison with the conventional air vehicles such as aircraft or helicopter. In this study, the biomechanical structure of the birds and kinematic-dynamic properties of flight have been investigated. In addition, the design and analysis studies of a robotic bird have been conducted.

Keywords: robotic bird (Ornithopter), unmanned aerial vehicle (UAV), flight biomechanics

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

1 Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Sakarya - erkanyavcin@gmail.com

2 Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Sakarya - aokapti@sakarya.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Askeri amaçlarla insansız hava aracı (İHA) kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır. Bu amaçla, klasik uçak görünümüne ve tasarımına sahip İHA'lar yerine, kuşlardan alınan ilhamla geliştirilen robotik kuşların (ornithopter) kullanılması, daha iyi kamuflere olabilen, doğaya rahat adapte olabilen, uçak ve helikoptere göre daha verimli ve daha sessiz uçabilen sistemler elde edilmesi potansiyelini de beraberinde getirecektir. Günümüzde kullanılan uçaklar kuşlardan esinlenerek tasarlanmıştır. Kuşlar üzerinde yapılan yoğun gözlem ve araştırmalar neticesinde elde edilen bilgi birikimi sayesinde uçak tasarımlarının yapılması ve geliştirilmesi mümkün olmuştur. Ancak, klasik uçak ve helikopter tasarımları, özellikle kalkış ve inişlerdeki sınırlamaları, kamuflere olamadan uçamamaları ve sesleri nedeniyle İHA amaçlı kullanımlar için çok uygun olmayabilir. Kuşların özelliklerinin kopyalanmasıyla geliştirilecek robotik kuş uygulamaları bu alanda ideal şartlara yakınlaşmayı sağlayacaktır. Bu çalışmada, kuşların biyomekanik yapısı ve uçuş hareketinin kinematik-dinamik özellikleri incelenmiştir. Ayrıca, bir robotik kuşun tasarım ve analiz çalışmaları yapılmıştır.

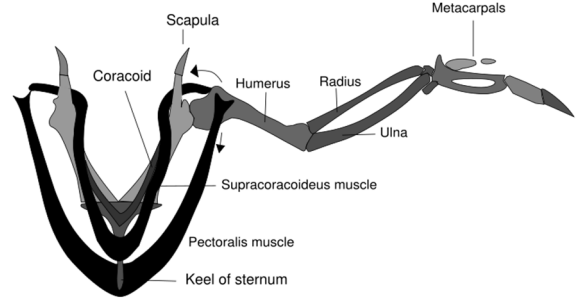
Hava akımının etki ettiği cisimlerde oluşan dinamik basınç neticesinde, vektörel büyüklükler olarak aerodinamik kuvvetler oluşmaktadır. Aerodinamik çalışmalarda, teoriler, formüller, hesaplamalar ve iddia edilenler ile tecrübeler ve deneylere dayalı olarak geliştirilenler şeklinde iki yöntem söz konusu olmaktadır [1].

Festo (Almanya) firmasının geliştirdiği "smartbird" adlı robotik kuş çalışması şekil 1'de verilmiştir. İlgili firmanın tasarladığı robotik kuş, her ne kadar formüller ve hesaplamalar üzerine inşa edilse de, uygulama aşamasında defalarca başarısızlıkla sonuçlanan denemeler söz konusu olmuştur. Bu uzun denemeler neticesinde yapılan düzeltmelerle şu anda doğadaki kuş uçuşunu taklit etmeyi başardıklarını bilim dünyasına duyurmaktadırlar [2].



Şekil 1. Festo (Almanya) firmasının geliştirdiği robotik kuş (The robotic bird developed by Festo company (Germany)) [2]

2. UÇUŞ BİYOMEKANİĞİ (FLIGHT BIOMECHANIC)



Şekil 2. Kanat kas ve kemik yapısı (Muscle and bone structure of the wing) [3]

Şekil 2'de kuşun kanat kas ve kemik yapısı detaylı olarak verilmektedir. Bir kanat çırpma hareketinin oluşması için, üst kol kemiği (humerus) ile ön kol kemiği (radius), dirsek kemiğinin (ulna) birleştikleri dirsek, kanadın yukarı kalkışında fleksiyon hareketi yaparak havayı kesmekte ve kanat çırpma periyodu üst ölü noktaya geldiğinde pectoralis kası, humerus kemiğini çekmekte ve bu sayede oluşan ekstansiyon hareketiyle kanadın ilk konumuna gelmesi sağlanmaktadır. Pectoralis ve supracoracoideus kaslarının aynı anda ve gerekli olan değerlerde çekiye çalışması kanadın gergin bir şekilde konumlanmasını sağlamakta ve bu hareket kanadın aerodinamik kuvvetleri ve bu kuvvetlerin ani azalış ve artışlarını karşılayabilmektedir.

Literatürde bu konuya benzer çalışmalar yapılmış olup yüksek kanat alanına sahip kuşların daha çok planör mantalitesinde uçtukları gözlemlenmiştir. Kuşların uçuşları yarı düzenli ve düzensiz olmak üzere iki farklı şekilde sınıflandırılabilir. Geniş kanat alanına sahip kuşlar için yarı düzenli uçuş yapabildikleri söylenebilir. Çünkü bu kuşların kanat çırpışları uçuş esnasında daha az sıklıktadır. Bu demek oluyor ki kanat uç hızları (kanat ucu çizgisel hızı) uçuş hızından daha düşüktür. Böylece bu geniş kanat alanına sahip kuşlar martı ve kartal gibi yüksekte uçuş eğilimine sahiptir. Diğer yandan küçük kuşlar ve böcekler düzensiz hal rejiminde uçarlar ki, onların kanat uç hızları uçuş hızından daha fazladır [4].

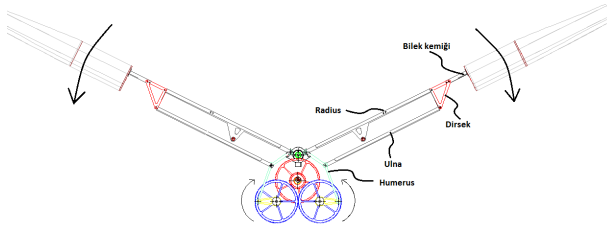
Başka bir çalışmada kanat çırpmalı Mikro-Hava-Aracının (MHA) geliştirilmesi için kanat çırpmalı uçuş ile sabit kanatlı havada süzülerek yapılan uçuşun karşılaştırmalı aerodinamik yararlarını belirlemek için deneysel bir çalışma yürütüldü. Kanat çırpmalı uçuşlarda kanat esnekliğinin aerodinamik performans üzerindeki etkilerini ölçmek için farklı esnekliğe sahip iki esnek zar kanadın (esnek naylon kanat ve çok esnek kauçuk kanat) zaman ortalamalı aerodinamik performansları (ortalama kaldırma ve itme/çekme) geleneksel rijit kanatlarla karşılaştırıldı. Ölçüm sonuçları açık bir şekilde gösterdi

ki test edilen bütün kanatlarda, ilerleme oranı (ileri hareket hızının kanat uç hızına oranı) 1.0 den küçük olan düzensiz uçuşlarda kanat çırpma hareketi belirgin bir avantaj sağlamakta olduğu tespit edildi [5].

Bir başka çalışmada esnek kanat yapısında bir robotik kuşun itme ve taşıma kuvvetinin kanat çırpma hızıyla artışı deneysel olarak gözlemlenmiş olup her kanat çırpma esnek kanat yapısının hücum açısı artışına sebebiyet vermesi taşıma kuvvetinin artmasına vesile olmuştur [6].

Ayrıca kararsız uçuş yapan küçük ebatlı robotik kuşun gövdesine gelen aerodinamik kuvvetlerin gövdenin stabil bir şekilde karşılaması ve yörünge kontrolünün yapılması microair tasarımında yararlı olabileceği kanısına varılmıştır [7].

Şekil 3’de robotik kuşun, gerçek kuştan esinlenen kanat yapısı görülmektedir. Kanat aşağı doğru hareketinde kanadın dirsekten sonrası bilek kemiği ekstansiyon hareketi yaparak hava akımını kanadın altına doldurması ve kanadını aşağı itelediğinde oluşan geri sürüklenme kuvvetinin, yükseliş istikametine kanalize edilmesiyle gerçek kuş ya da robotik kuşun kendini yukarı kaldırması mümkün olmaktadır. Buradan da anlaşılacağı üzere kuşun yerdeyken ilk kanat çırpması esnasında yukarı kaldıran kuvvet aslında yükseliş istikametine kanalize edilen geri sürüklenme kuvvetidir. Ayrıca kuşlar, kanatlarındaki uçuş tüylerini, kanatlarını yukarı kaldırırken aralarını açarak hava moleküllerinin direnç oluşturmasını engeller, kanatlarını aşağıya doğru indirdikleri sırada ise kanat tüylerini, aralarından hava geçmeyecek şekilde kaparlar. Bu koordinasyonla yükseliş hareketini rahatlıkla yapabilmektedirler.



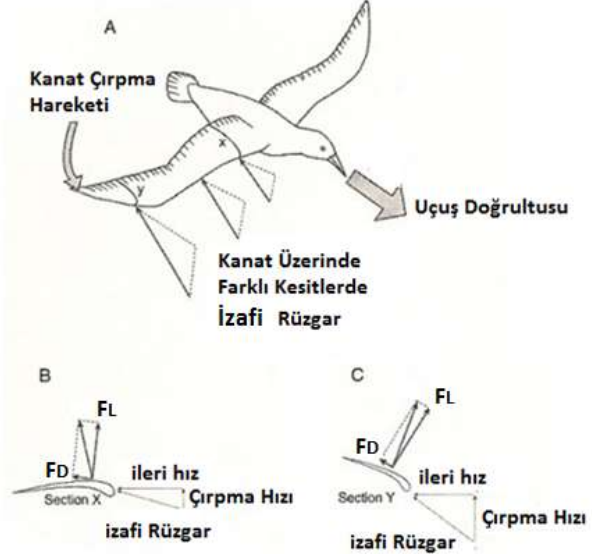
Şekil 3. Robotik kuş kanat yapısı (The wing structure of the robotic bird)

2.1. Kuşlarda Taşıma ve İtme Kuvvetinin Biyomekanik Açısından İncelenmesi (Biomechanical Study of the Lift and the Thrust Forces for Birds)

Kuşun kanat çırpmasında oluşan izafi rüzgâr ve bunun oluşturduğu kanat ucundaki taşıma kuvvetinin itme kuvvetine nasıl dönüştüğünün kesit alınarak anlatımı şekil 4’de verilmiştir.

Şekil 4 (A)’da kuşun gövdesi yakınında yani kanadın kök kısmında kanat çırpmadan oluşan küçük bir hareket söz

konusu. Fakat kanadın uç kısmına gidildikçe kanat profili aşağı doğru açılı (hücum kenarı firar kenarından daha aşağıda) ve kanat çırpma hareketinde en çok yer değiştirmeyi uçtaki profil yapmaktadır. Bu sayede kanat ucunun çizgisel hızı daha fazla olmaktadır [8].



Şekil 4. Kuşta itme kuvvetinin oluşması (Generation of the thrust force for a bird) [8]

Şekil 4 (B)’de kanattan X kesiti alınmış ve görülen profilde F_L kuvveti hemen hemen dikey doğrultuda olması her kanat çırpma kuşa irtifa kazandırmaktadır [8].

Şekil 4 (C)’de kanadın Y kesitindeki profilin konumu negatif hücum açısı oluşmuş, hücum kenarı aşağıda firar kenarı yukarıda kalarak F_L kuvvetinin yönü uçuş doğrultusunda ve çizgisel hızın yüksek olması nedeniyle kanadı dolayısıyla kuşu ileri iteleme hızının büyüklüğü de yüksek olmaktadır [8].

Bu uçuş, hareketsiz kanat ucunun oluşturduğu itkidir. Kanat ucu bir defa ve gerektiği kadar hücum açısını azaltır ve sonrasında aynı çırpma hareketini tekrarlar. Hareketli kanat modellemesinde (genellikle küçük kuşlarda gözlenir) ise, her kanat çırpışında kanat ucu yunuslama hareketi yaparak en uygun taşıma kuvvetini yakalar ve bunu ileri istikamete kanalize ederek itme gücünü istenilen değerde artmasını sağlar.

2.2. Kuşun Fiziksel Ebatları (The Physical Dimensions of Bird)

Robotik kuş için kısa bilgi verilmesi gereken birtakım kavramlar söz konusudur. Bunlar;

Kanat açıklığı (B): Bir kanat ucundan diğer kanadın ucuna kadar olan mesafedir (Şekil 5).

Hücum kenarı: Kanadın ön kısmıdır, kanat boyunca rüzgara ilk temas eden hattır (Şekil 5).

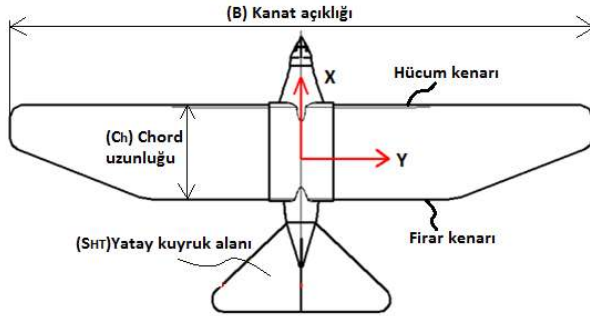
Fırar kenarı: Kanadın arka kısmıdır, rüzgarın kanadı yalayarak geçip kanadı terk ettiği kanat boyunca hattır (Şekil 5).

Chord uzunluğu (Ch): Kanadın hücum kenarı ile fırar kenarı arası mesafedir (Şekil 5).

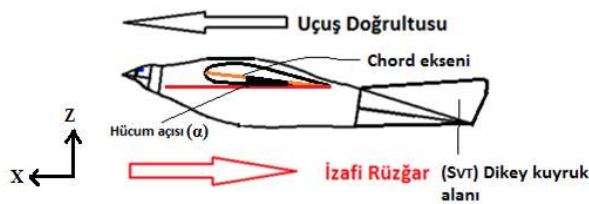
Yatay kuyruk alanı (S_{HT}): Robotik kuşun burun aşağı yada burun yukarı momentini, yapılan hesaplamalarla istenilen değerlerde tutmasını sağlayacak olan alandır (Şekil 5).

Dikey kuyruk alanı (S_{VT}): Robotik kuşun uçuş esnasında rüzgârı karşısına alabilmesi sağlayan aynı zamanda uçuş istikametini dengeleyen alandır (Şekil 6).

Hücum açısı (α): Kanat chord eksenine ile uçuş doğrultusu (izafi rüzgâr) arasında kalan açıdır (Şekil 6).



Şekil 5. Robotik kuş üstten görünüşü (The top view of the robotic bird)



Şekil 6. Robotik kuş yandan görünüşü (The side view of the robotic bird)

3. ROBOTİK KUŞ TASARIMI (ROBOTIC BIRD DESIGN)

Bu çalışmada kanat çırparak uçan bir robotik kuşun tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarım çalışmaları ve kinematik analizler için Catia V5-R19 programı, hesaplamalar sırasındaki analizler için XFLR5 programı, kanat koordinatlarının dxf. uzantılı dosyaya dönüştürülmesi için ise Profscan programı kullanılmıştır.

Ayrıca hesaplamalarda kullanılan tüm parametrelerin kısaltılmış anlamları aşağıda verilmiştir.

C_G : (Center of Gravity) Ağırlık merkezi robotik kuşun ağırlık merkezi

C_P : (Center of Pressure) Basınç merkezi taşıma kuvvetinin (F_L) kanat üzerinde etki ettiği nokta

X_{C_P} : Kanadın hücum kenarıyla CP arası mesafe

$X_{C_{PK}}$: Kuyruk hücum kenarı ile kuyruk CP merkezi arası mesafe

X_{C_G} : Kanadın hücum kenarıyla CG arası mesafe

MAC: Ortalama chord uzunluğu

u: Kanat fırar kenarı ile kuyruk hücum kenarı arası mesafe

F_L : Taşıma kuvveti (N)

C_L : Taşıma katsayısı (Boyutsuz)

δ : Hava yoğunluğu (1.225 kg/m^3)

V_t : Gerçek hava hızı (izafi rüzgâr hızı) (m/s) (Robotik kuş için 13.8 m/s öngörüldü)

S_w : Kanat alanı (0.425 m^2 öngörüldü)

F_D : Sürüklenme kuvveti (N)

C_D : Sürüklenme katsayısı (Boyutsuz)

K: İndüklenmiş sürüklenme katsayısı

C_{D0} : Parazit geri sürüklenme katsayısı (Boyutsuz)

A_R : (Aspect Ratio) Kanat en boy oranı (Robotik kuş için 7.7 tasarlandı)

e: Oswald sayısı, kanat verim faktörü (Kuşlar için 0.95)

M_y : Yunuslama momenti

C_h : Chord uzunluğu (MAC uzunluğu 0.253 m)

C_m : Yunuslama momenti katsayısı (Yapılan analiz sonucu moment katsayısı -0.16 gelmektedir)

u: 0.31 m öngörüldü.

S_{HT} : Yatay kuyruk alanı (m^2)

L_{HT} : Yatay kuyruk Cp merkezi ile kanat Cp merkezi arası mesafe (m)

C_{HT} : Yatay kuyruk hacim katsayısı (tablodan alınır)

V_t^- : Kanat ucu X doğrultusundaki hızı (13.8 m/s) vektörel

V_C^- : Kanat çırpma hareketi kanat ucu çizgisel hız vektörel

V_{izafi} : Kanat ucunun ileri ve aşağı istikamette oluşturduğu bileşke hız vektörü

T : Kanat çırpma periyodu

C_D : Sürüklenme katsayısı

C_L : İtki katsayısı

η : İtki üretim verimi

U_∞ : Serbest akım hızı

ω : Çırpma hareketini sağlamak için gereken girdi gücü

V_{dalma} : Kanat kesitinin dalma hızıdır

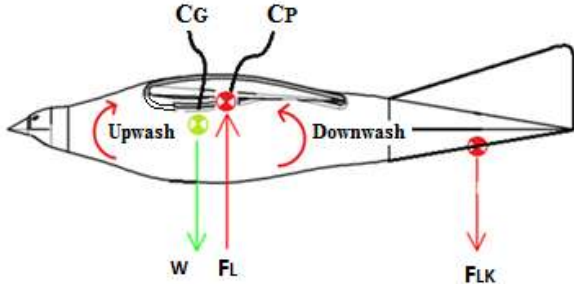
w_{yunus} : Kanat kesitinin yunuslama hareketinden dolayı oluşan açılal hızıdır (kanat uçlarındaki mikro servo motorların oluşturacağı açılal hız)

P_{ind} : İndüklenmiş güç ihtiyacı

k: İndüklenmiş güç katsayısı (kanat çırpmalı uçuş için $k=1.2$)

m: Robotik kuşun kütlesi (kg)

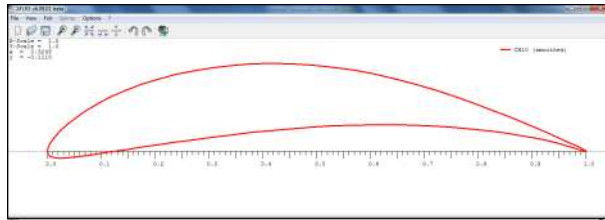
- g: Yerçekimi ivmesi (9.81 m/s²)
 B: Kanat açıklığı (m)
 P_{am}: Sistem için gerekli minimum güç ihtiyacı (W)
 P_{pro}: Profil güç ihtiyacı (W)
 S_b: Gövde kesit alanı (0.027 m²)
 X: Profil güç faktörü (Kuşlar için 1.2)
 V_{mr}: En uzak menzile gidebilmesi için hız değeri (m/s)
 S_d: Disk alanı, kanatların süpürdüğü alan (m²)
 V_{mp}: En düşük güç sarfiyatı için hız değeri (m/s)
 P_{par}: Parazit güç ihtiyacı (W)



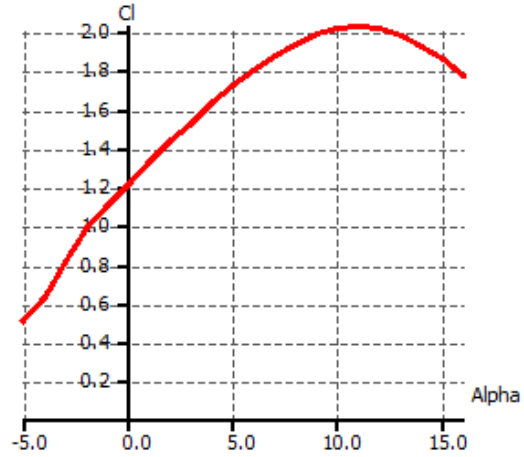
Şekil 7. Robotik kuş üzerindeki aerodinamik merkezler (The aerodynamic centers on the robotic bird)

Kuşun havalanmasını sağlayan uzvu kanatlarıdır. Kanatlarda oluşan taşıma kuvveti (F_L) kanadın basınç merkezine C_P (Center of Pressure) etki etmektedir. Bu nokta ağırlık merkezinden C_G (Center of Gravity) farklıdır. Kanat yapısına, hücum açısına, uçuş hızına bağlı olarak basınç merkezinin yeri değişmektedir. Robotik kuş tasarımında en önemli unsur kanat tasarımıdır. Kanat profilinin belirlenmesi için, kuşun kütlesi, kanat açıklığı, kanat alanı, hangi hızlarda uçtuğu parametrelerinin belirlenmesi gereklidir.

İki boyutlu kanat profili seçilirken düşük Reynold sayısı, düşük hızlarda ve düşük hücum açısında (kuşlar için 0°-5°) yüksek taşıma katsayısı C_L ve dolayısıyla yüksek taşıma kuvveti F_L sağlayan bir kambur profil seçilmiştir (Şekil 8). Seçilen bu profil XFLR5 programında analizlere tabi tutulmuş ve elde edilen analiz sonuçları robotik kuş tasarımında kullanılmıştır.

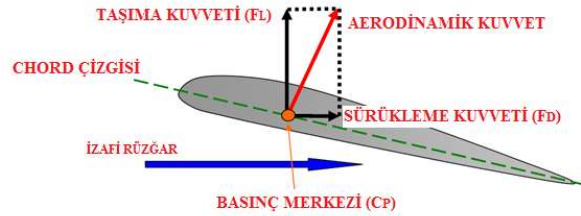


Şekil 8. Kambur airfoil profil yapısı (The cambered aerofoil profile structure)



Şekil 9. Hücum açısı-taşıma katsayısı grafiği (Angle of attack/lift coefficient graph)

Şekil 9'da seçilen profilin düşük hücum açısında dahi (kuşlar için 0° ile 5° arası) yüksek taşıma katsayısı C_L sağladığı görülmüştür. Bunun avantajı, robotik kuşun yüksek hızlara çıkamaması nedeniyle düşük hızlarda kendi ağırlığını taşıyabilmesidir.



Şekil 10. Kanada etkiyen aerodinamik kuvvetler (Aerodynamic forces acting on the wing)

3.1. Taşıma Kuvveti (Lift Force)

Şekil 10'da görüldüğü üzere aerodinamik kuvvetin hava hızına dik bileşenine taşıma kuvveti denir ve "FL" ile ifade edilir. Buna göre taşıma kuvvetinin ifadesi:

$$F_L = 0.5 C_L \delta V t^2 S_w \quad (1)$$

Taşıma kuvveti F_L, robotik kuşun havada süzülebilmesi için ağırlığından kaynaklanan yerçekimi kuvvetine (W) eşit olması gerekmektedir. (1) Eşitliğinde değerler yerine konularak taşıma katsayısı C_L elde edilmiştir. Bu taşıma katsayısını veren bir airfoil seçilerek tasarımın kanat aşaması tamamlanmıştır.

$$F_L = W$$

Robotik kuşun ağırlığı 2 kg olarak öngörülmüştür.

$$W = 29.81$$

$W = 19.62 \text{ N}$ (F_L yerine (1) eşitliğinde bu değer yazıldığında C_L taşıma katsayısı 0.39 çıkmaktadır)

Seçilen airfoil profili geometrisinde 3d kanat çizimi yapıp XFLR5 programında analize tabi tutulduğunda 0° hücum açısında C_L taşıma katsayısı için çıkan sonuç 0.7'dir. Bu durumda robotik kuşun kanatlarının ürettiği taşıma kuvveti;

$F_L = 34.7 \text{ N}$ bu değer robotik kuşun ağırlığını karşılamaktadır.

3.2. Sürüklenme Kuvveti (F_D) (Drag Force)

Şekil 10'da görüldüğü üzere bileşke aerodinamik kuvvetin hava hızına paralel bileşenine sürüklenme kuvveti denir ve F_D ile gösterilir. Buna göre sürüklenme kuvvetinin ifadesi:

$$F_D = 0.5 C_D \delta V t^2 S_w \quad (2)$$

Robotik kuşun ileri istikamette uçuşu esnasında 0° hücum açısında elde edilen sürüklenme katsayısı analiz sonucu C_D 0.039 çıkmaktadır. Değerler (2) eşitliğinde yerine yazıldığında $F_D = 1.93 \text{ N}$ olarak bulunur. Bu değer robotik kuşun 0° hücum açısında süzülmesi esnasında toplam sürüklenme kuvvetidir. Kanat çırpma başladığında sürüklenme katsayısını düşüğünden dolayı sürüklenme kuvveti de azalacaktır.

3.3. Parazit Sürüklenme Katsayısı (C_{D0}) (Parasite Drag Coefficient)

Parazit sürüklenme, kuşun gövde yapısından ve kuşun komple varlığından kaynaklanan sürüklenmedir. Parazit sürüklenme katsayısı (C_{D0}) değeri hesaplanması aşağıdaki gibidir;

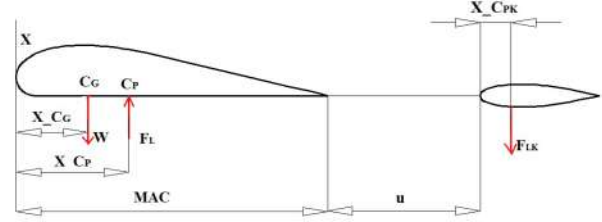
$$C_D = C_{D0} + K C_L^2 \quad (3)$$

$$K = \frac{1}{\pi A_R e} \quad (4)$$

bu değerler yerine konduğunda hücum açısı (α) 0° için $K = 0.043$ ve $C_{D0} = 0.018$ değeri elde edilmektedir.

3.4. Kuyruk Denge Hesabı (Tail Balance Calculation)

Kuyruk tasarımında, kuyruğun ağırlık merkezinden uzaklığı öngörülürken, robotik kuşun statik dengesi ve yunuslama momenti dengesi stabil değerlerde korunmalıdır. Kuyruk denge hesabı, robotik kuşun süzülürken (planör mantığı) uçuşunda hali düşünülmüştür.



Şekil 11. Kuyruk denge hesabı (Tail balance calculation)

Şekil 11'de robotik kuşun statik dengesi incelendiğinde, kanadın taşıma kuvveti ağırlık merkezi etrafında burun aşağı bir moment oluşturacağından, bunun dengelenebilmesi için kuyruk yüzeyinin zıt yönde burun yukarı moment oluşturması gerektiği söylenebilir. Bunun için de kuyruk taşıma kuvvetinin aşağı yönde olması için kuyruk hücum açısının negatif olması gerekir. Böylece robotik kuşun statik dengesi;

$$\Sigma F = F_L - W - F_{LK} \quad (5)$$

şeklinde dengelenirken, ağırlık merkezi etrafındaki momenti de

$$M_Y = F_{LK} [MAC - (X_{CG}) + u + (X_{CPk})] \quad (6)$$

şeklinde dengelenecektir.

Yunuslama momenti;

Robotik kuşun ağırlık merkezi (C_G) etrafında takla atmasına sebebiyet verecek momenttir. Kuşa burun aşağı yada burun yukarı hareketi yaptırır. Bu moment istenilen değerlerde olmazsa burun aşağı momentte, düşük negatif hücum açısı değerinde kuş tutunma kaybı yaşayıp düşebilir, ya da, burun yukarı moment oluşması durumunda, kanatta yüksek pozitif hücum açısı oluşumu gözlenir ve yine kuşa tutunma kaybı yaşanıp irtifa kaybetme durumu söz konusu olabilir. Bu moment değerinin istenilen değerlerde olmasını sağlayan kuyruğun aşağı ve yukarı hareketidir.

$$M_Y = C_m 0.5 \delta V t^2 S_w C_h \quad (7)$$

$M_Y = -2 \text{ Nm}$ (7) nolu eşitlikten elde edilen değer (Burun aşağı moment üretmektedir)

Şekil 11'de moment noktası X_{CG} ;

Eşitlik (6)'dan

$$2 = [(MAC - X_{CG}) + 0.31 + (X_{CPk})] F_{LK}$$

$F_{LK} = 3.61 \text{ N}$ bulunur.

Görüldüğü gibi, bu halde kuyruk yüzeyi, robotik kuşun ağırlığını taşıma yönünde bir katkı sağlamadığı gibi, kanadın taşımasının bir kısmı kuyruğun oluşturduğu

kuvveti dengelemek için harcanmaktadır [9]. Kuyruğun taşımaya bir katkısının olmaması, ağırlık merkezinin C_G , C_P noktasından ileride (kuşun +X yönü) olması yunuslama momentinin stabil değerlerde çıkması için ideal olanıdır.

Kuyruğun birincil amacı kanat tarafından oluşturulan momentleri dengelemektir. Bundan dolayı kuyruğun boyutunun kanadın boyutuyla bir şekilde orantılı olması beklenir. Moment denklemlerinden anlaşılacağı gibi bu ikisi arasında direkt bir orantı vardır. Kuyruğun kaldırmasından meydana gelen kuvvet kuyruğun alanıyla orantılıdır. Kuyruğun etkinliği kuyruk alanıyla kuyruk moment kolunun çarpımıyla orantılıdır. Buradan kuyruk boyutunun başlangıç tahminine götüren kuyruk hacim katsayısını metoduna varılır [10].

$$C_{HT} = \frac{L_{HT} S_{HT}}{C_h S_w} \quad (8)$$

(8) eşitliğinde değerler yerine konduğunda yatay kuyruk alanı 0.11 m^2 yeterli gelmektedir.

F_{LK} değeri -3.61 N 'dur. Bu negatif kuvveti üretecek yatay kuyruğun taşıma katsayısı, (1) formülünden bulunan kuyruk için taşıma katsayısı $C_L = -0.28$ çıkmaktadır. Robotik kuşun 0° hücum açısındaki konumu göz önüne alındığında kuyruk için gerekli olan negatif taşıma katsayısına karşılık gelen XFLR5 analizi sonucu -3° lik hücum açısı yeterli geldiği görülmektedir.

Yatay kuyruk, robotik kuşa -3° lik tespit açısıyla monte edildiği takdirde, yunuslama momentini stabil değerlerde tutabilmektedir. İlave yük binmelerde robotik kuş kuyruğunu aşağı yukarı bükerek ilave kuvvetleri karşılayabilmesi mümkündür.

(5) nolu eşitlikten toplam kuvvet;

$$\Sigma F = F_L - W - F_{LK}$$

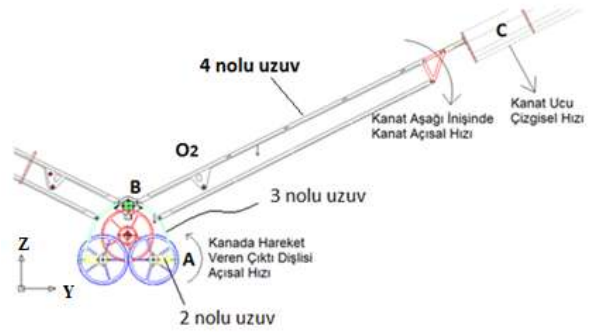
$\Sigma F = 11.47 \text{ N}$ (Faydalı yük değeri, istenildiğinde gerekli parametreler değiştirilerek azaltıla bilinir)

3.5. İtme Kuvveti (Propulsion Force)

Robotik kuşun kanat uçlarındaki servo motorlar sayesinde kanat ucuna kanat eksenine göre negatif hücum açısı verdirerek F_D sürükleme kuvvetini düşürüp, F_L kuvvetini ileri istikamete kanalize ederek her kanat çırpmasında ileri yönde ilerleme sağlanabilmektedir.

XFLR5 programında, seçtiğimiz ch10sm profiline, hücum açısını 0° 'ye ve izafi rüzgâr hızını hesaplayarak belirlediğimiz hücum açısında, ne kadar bir F_L kuvveti oluştururuz ve bunun x eksenindeki (Şekil-14'teki

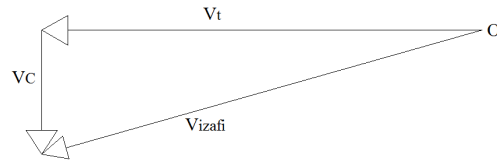
robotik kuş burun istikameti) bileşenini bularak F_L taşıma kuvvetinin itki kuvvetine nasıl dönüştüğünü bulabiliriz.



Şekil 12. Kanat mekanizması (The wing mechanism)

Kanat ucunda en büyük değerde olan çizgisel hız yüksek değerlerde izafi hız vektörüne neden olmaktadır. Bu hız vektörü açısına sıfır derece hücum açısında olacak şekilde kuş kanat uçlarını bükmektedir.

$$\begin{aligned} V_B &= w_4 [BO_2] \\ w_4 &= 4.45 \text{ rad/s} \\ V_C &= w_4 [O_2C] \\ V_C &= 3.89 \text{ m/s} \end{aligned}$$



Şekil 13. İzafi rüzgârın Auto CAD'te vektörel hesaplanması. (The vectorial calculation of relative wind in autocad software)

$$\begin{aligned} V_{izafi}^- &= V_t^- + V_c^- \\ V_{izafi}^- &= 14.34 \text{ m/s} \end{aligned}$$



Şekil 14. Kanat ucu itki kuvvetinin oluşumu (Generation of the wing tip thrust force)

Ch10sm airfoil'inin 0° α açısında kanada göre -4° hücum açısında $V_{izafi} = 14.34 \text{ m/s}$ olduğu bir durumda V_{izafi} hız vektörüne dik doğrultuda üreteceği itki kuvveti F_i ;

$$\begin{aligned} F_i &= C_L 0.5 \delta V_{izafi}^2 [S_w 0.25] \\ F_i &= 9.36 \text{ N} \\ F_i &= F_L \cos 74^\circ = 2.58 \text{ N} \end{aligned}$$

Net itki kuvveti;

$$F_{i.net} = F_i - F_D \cos 16^\circ$$

Elde edilen ileriye doğru kuvvetten, ters istikamette sürüklenme kuvveti çıkarılırsa net itki kuvveti ($F_{i.net}$) kalır.

$$F_D = C_D 0.5 \delta V_{izafi}^2 [Sw 0.25]$$

$$F_D = 0.49 \text{ N}$$

$$F_{i.net} = F_i - F_D \cos 16^\circ$$

$$F_{i.net} = 2.11 \text{ N}$$

Kanat uçlarından elde edilen net itki kuvveti minimum değerdedir.

İki kanadın aileronları (kanat ucu mikro servo motorlar) 0° hücum açısında, 13.8 m/s ilerleme hızında ve kanat çırpma esnasında iken robotik kuşun kanat uçlarından elde edilen net 2.11 N'luk bir itki kuvveti ile ileri doğru ilerleyebilmektedir. Hesaplama kanat alanının %25'i alındığı için itki kuvveti, bu değerden daha fazla çıkmaktadır, bulunan değer minimumdur.

3.6. İtki Kuvveti Arttırılması (Increasing of the Thrust Force)

Tasarımı yapılan robotik kuşun kanat ucu mikro servo motorların kanat çırpma periyodunda dönü hareketi yaparak kanadın sadece uç kısmından elde edilen itki gücü arttırılma yoluna gidilebilir.

Harmonik olarak çırpan bir kanat kesitinden elde edilen itki, periyodik bir davranış sergilemektedir. Dolayısıyla çırpan bir kanat kesitinin itkisi bir çırpma periyodu boyunca ortalama değer alınarak hesaplanır. Bu ortalama itki hesabı, zamana bağlı akış hesaplaması süresi içinde periyodik bir çözüme ulaşılan ilk periyotta yapılır [11].

$$C_t = -\frac{1}{T} \int_0^T C_D dt \quad (9)$$

$$\eta = \frac{C_t U_\infty}{\omega} \quad (10)$$

$$\omega = \frac{1}{T} \int_0^T (C_L V_{dalma} + C_m W_{yunuslama}) dt \quad (11)$$

İtki katsayısı hesabında, kanat çırpma periyodunun süresi ile değişen, toplam sürüklenme katsayısı değerinin interpolasyonu sonucu elde edilen parabolün zamana göre integralinin alınmasıyla, kanat ucu mikro servoların her periyotta belirli değerlerde dönü hareketi yapması sonucu kanat çırpmalı uçuş için itki katsayısı hesaplanabilir. Benzer integral hesabı, (11) nolu formüle tatbik edilirse itki gücü ve itki üretim verimi bulunmuş olunur. Bu çalışma küçük zaman aralıklarında ve kanat ucu profili yunuslama dönüş açısal hızlarında analizlere tabi tutularak en az sürüklenme ve en çok itki parametreleri bulunabilir.

3.7. Güç (Power)

Kanat çırpmalı uçuş hesapları, sabit bir hızla yatay olarak uçuşu için kuşun kanatlarının yapması gereken mekanik işi (mekanik gücü) içerir. Bu seviyede uçan hayvanın bir kuş, ya da yarasa hatta yapay bir robotik kuş olmasının önemi yoktur. Güç, bütün uçan hayvanların sahip olduğu kütle, kanat genişliği, görünüş oranı ve kanatların bağlı olduğu aerodinamik bir gövde gibi birkaç özellik ve hava yoğunluğu ve yerçekimi ivmesi gibi hayvanın uçuğu ortamın özelliklerine bağlıdır [12].

Kuşun havada uçabilmesi için yerçekimine karşı koyması ve ileri doğru gidebilmesi için de itki sağlayabilmesi gerekmektedir. Bu iki kuvveti yenebilirse yukarı doğru yükselir yada havada belirli bir irtifada seviyesini kontrol altında tutar ve ileri doğru yol almaya başlar. Mekanik güç ihtiyacı indüklenmiş güç ihtiyacı, parazit güç ihtiyacı ve profil güç ihtiyacı değerlerinin toplamına eşittir. Toplamda ki mekanik güç kuşun hem yükselmesini hem de ileri gidebilmesini sağlamaktadır.

$$P_{Mech} = P_{ind} + P_{par} + P_{pro}$$

3.8. İndüklenmiş Güç İhtiyacı (The Induced Force Need)

Kanat altındaki yüksek statik basınç bölgesindeki hava firar kenarından arkaya ve kanat ucundan dışarıya doğru kaçarak, kanat üzerine (alçak statik basınç bölgesine) dolaşır. Bu dolanım firar kenarında düşüktür ancak kanat ucunda çok yüksek değerlere ulaşır. Bunun sonucu olarak kanat uçlarında "kanat ucu girdabı" denen, dönen hava akımları oluşur. Girdapların firar kenarı arkasında kalan kısmı burun aşağı (downwash) denilen hava akımını oluşturur [13].

Bu tanım, kanatlarını çırpmadan uçuş için geçerli bir durumdur. Kuşlarda bu durum biraz farklıdır. Kuşlarda kanat çıkararak uçuş esnasında indüklenmiş güç ihtiyacı ve kanat çırpmadan (süzülürken) oluşan indüklenmiş güç ihtiyacı olmak üzere iki durum için ayrı ayrı formül çıkartılmıştır.

Kanat çırpmalı ileri uçuş esnasında;

$$P_{ind} = \frac{2k(mg)^2}{Vt \pi B^2 \delta} \quad (13)$$

Değerler (13) nolu eşitlikte yerine yazıldığında $P_{ind} = 4.52 \text{ W}$ olarak bulunur.

Süzülme esnasında;

$$P_{ind0} = \left[\frac{2(mg)^3}{\pi B^2 \delta} \right]^{1/2} \quad (14)$$

Değerler (14) nolu eşitlikte yerine yazıldığında $P_{ind0} = 31.96 \text{ W}$ olarak bulunur.

Kanat çırparak uçuş esnasında indüklenmiş güç ihtiyacının, süzülürken durumuna göre düşük çıkması, kuşun kanatlarını her çırpma esnasında kanat ucu girdaplarını yüksek oranda azaltmasıdır. Ayrıca kuşlar, kanat ucu teleklerini, uçaklardaki kanat ucu plakalarının işlevi gibi kullanarak P_{ind0} azaltma yoluna gitmektedir.

3.9. Profil Güç İhtiyacı (The Profile Force Need)

Kuşun tüyleri ile üzerinden akan hava arasındaki sürtünme, kuşun gövde yapısı ve bu yapıdan kaynaklanan hava akımına direnç gösteren yüzeylerin arkasında oluşan türbülans gibi parametreler kuşun profilinden kaynaklanan, geri sürüklenme oluşmasına sebebiyet verir. Bunu yenebilmek için profil güç ihtiyacı oluşur. Sistem için gerekli minimum güç ihtiyacı ile profil güç faktörünün çarpılması ile elde edilir [12].

Profil güç faktörü, C_{pro} (profil katsayısı)'nın, aspect ratio (kanat en boy oranı) oranından bulunur. Kuşlar için bu sayı 1.2 olarak alınır [12].

$$X = \frac{C_{pro}}{A_R} = 1.2 \text{ (Kuşlar için)}$$

$$P_{am} = \frac{1.05k^{3/4}m^{3/2}g^{3/2}S_b^{1/4}C_{D0}^{1/4}}{\delta^{1/2}B^{3/2}} \quad (15)$$

$$P_{am} = 4.95$$

$$P_{pro} = X P_{am} \quad (16)$$

$$P_{pro} = 5.94 \text{ W}$$

3.10. Parazit Güç İhtiyacı (The Parasite Force Need)

İndüklenmiş sürüklenme ve profil sürüklenme haricinde kalan sürüklenme kuvvetlerine parazit sürüklenme denir. Kuşun hızı, ön kesit alanı ve parazit sürüklenme parametrelerine bağlıdır. Kuş, parazit sürüklenmeyi yenebilmek için güç harcamaktadır. Bu güç parazit güç ihtiyacı olarak hesaplanır [12].

$$P_{par} = 0.5 \delta V t^3 S_b C_{D0} \quad (17)$$

Değerler (17) nolu eşitlikte yerine yazıldığında $P_{par} = 0.78 \text{ W}$ olarak bulunur.

$$P_{Mech} = P_{ind} + P_{par} + P_{pro}$$

$$P_{Mech} = 11.24 \text{ W}$$

Yapılan hesaplamalarda bulunan mekanik güç, kuşun yükselebilmesi ve ileri yönde mesafe kat etmesi için kanatlara aktarılması gerekmektedir. Bu gücün değişik çevrim oranında redüktörden elde edilen dönü hareketi aktarma organları ile kanatlarda kanat çırpma frekansı elde edilir.

3.11. Kanat Çırpma Frekansı (Wing Flapping Frequency)

Yapılan hesaplamalarda bulunan mekanik güç, kuşun yükselebilmesi ve ileri yönde mesafe kat etmesi için kanatlara aktarılması gerekmektedir. Bu gücün redüktörden elde edilen değişik çevrim oranında dönü hareketi, aktarma organları vasıtası ile kanatlarda kanat çırpma hareketine dönüşmektedir. Kanat çırpma frekansı değeri (18) eşitliğinden hesaplanır [12].

$$f = m^{3/8} g^{1/2} B^{-23/24} S_W^{-1/3} \delta^{-3/8} \quad (18)$$

buradan çıkan sonuç robotik kuşun 1 sn'de kanat çırpma adedi değeridir.

$$f = 2.64 \text{ hertz}$$

3.12. Uçuş Hızı (Flight Velocity)

Maksimum mesafeye gidebilmesi için hız değeri, robotik kuştaki mevcut batarya sisteminde en uzun menzile uçabilmesi için gerekli olan hız değeri V_{mr} (maksimum range) ile ifade edilmektedir. Bu hız değerinde uçarsa, en uzak mesafeye gidebilmektedir. Kuşlarda ise bu hızla seyir halinde olan kuş, vücudundaki mevcut yağları yakarak kaloriye dönüştürüp en uzun menzile uçabilmesini sağlamaktadır [12].

$$V_{mr} = \frac{k^{1/4} m^{1/2} g^{1/2}}{\delta^{1/2} A^{1/4} S_d^{1/4}} \quad (19)$$

$$A = S_b C_{D0}$$

$$A = 4.86 \cdot 10^{-4}$$

$$S_d = \frac{\pi B^2}{4}$$

$$S_d = 3.01 \text{ m}^2$$

Değerler (19) eşitliğinde yerine yazıldığında $V_{mr} = 22.75 \text{ m/s}$ olarak bulunur.

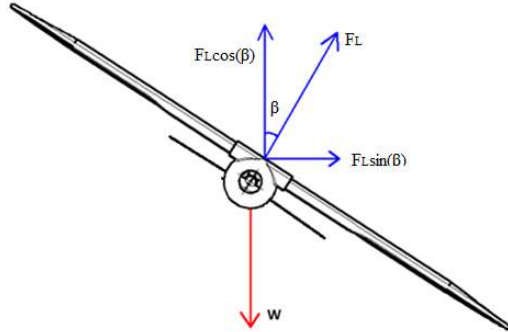
Minimum güç harcaması için hız değeri;

V_{mp} , (minimum power speed) tasarımı yapılan kuşun minimum güç gereksinimiyle uçabilmesi için gerekli hız değeri, bu hızın altında yada üstünde uçtuğunda olması gerekenden fazla güç harcıyor anlamına gelmektedir. Bu değer kuşun ivmelenmesine yada irtifasının artmasına sebebiyet verebilir [12].

$$V_{mp} = \frac{0.807 k^{1/4} m^{3/2} g^{3/2} S_W^{1/4} C_{D0}^{1/4}}{\delta^{1/2} B^{3/2}} \quad (20)$$

Değerler (20) eşitliğinde yerine yazıldığında $V_{mp} = 6.94 \text{ m/s}$ olarak bulunur.

3.13. Emniyetli Dönüş (Safe Turn)



Şekil 15. Robotik kuşun dönüş hesabı (The turning calculation of the robotic bird)

Şekil 15’de görüldüğü üzere robotik kuşun W değerinde ağırlık kuvveti, $F_L \cos(\beta)$ taşıma kuvvetiyle dengelenmelidir.

$F_L \cos(\beta) = W$ olmalı ki robotik kuş düşmeden dönüşünü tamamlayabilsin;

$$\text{Arccos}\left(\frac{W}{F_L}\right) = \beta^\circ \quad (21)$$

$\beta = 56^\circ$ açısıyla dönüşünü tamamlayabilmektedir.

Merkezcil kuvvet yani kuşu ya da uçağı belirli bir yarıçapta savrulmadan dönmesini sağlayan kuvvet $F_L \sin(\beta)$

Bu merkezcil kuvvet;

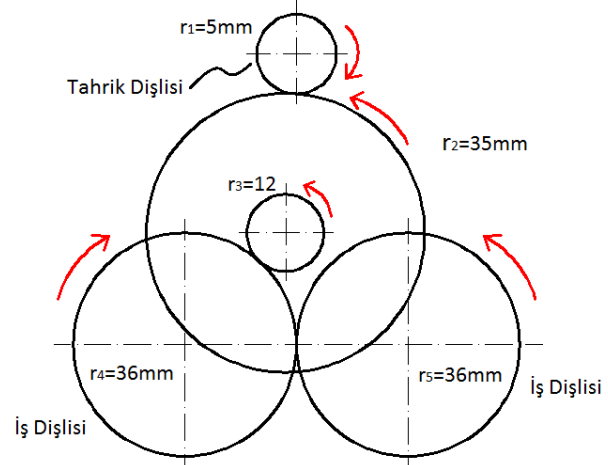
$$F_L \sin(\beta) = \frac{w V_t^2}{r g} \quad \text{şeklinde dengelenmelidir.} \quad (22)$$

$$r = 13.23 \text{ m}$$

Bulunan r değeri, robotik kuşun savrulmadan emniyetli bir şekilde dönüş yarıçapıdır.

3.14. Redüktör (Reductor)

DC motorun rotoru tahrik dişlisine bağlı olup kurulan dişli redüktör sistemiyle torkun artırılması ve açısal hızın düşürülerek kanada istenilen değerlerde iş dişlileri ile hareket verebilmesi sağlanmıştır.



Şekil 16. Robotik kuşun kanadına hareket veren dişli grubu (The gear group which moves the robotic bird's wing)

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

$$\text{Toplam çevrim oranı } i_T = 21$$

$$n_{\text{kanat}} = \frac{30 w}{\pi}$$

$$w = 2 \pi f$$

Değerler yerine yazıldığında $w = 16.58 \text{ rad/s}$

İş dişlisinin devri $n_{\text{kanat}} = 158.3 \text{ d/d}$ bulunur.

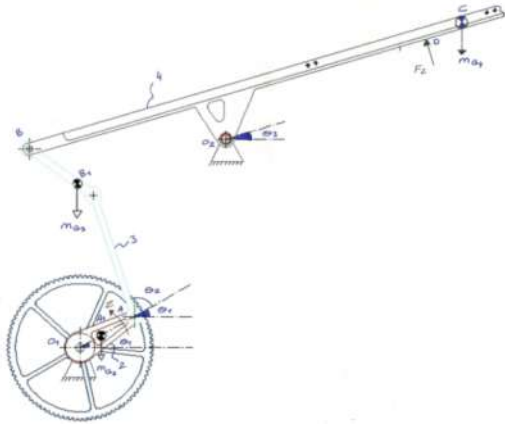
$$n_{\text{motor}} = n_{\text{kanat}} i_T$$

$$n_{\text{motor}} = 3324.3 \text{ d / d}$$

$$P_{\text{mech}} = 11.24 \text{ W}$$

Robotik kuşun ani manevra, irtifa kazanması, rüzgârlı hava şartları vb. etkenlerden dolayı, bu değerlerden %10 daha yüksek bir DC motor seçimi yapılmalıdır. Sistemin elektronik kartına (chip) yüklenen yazılım ile parametrelerin ideal değerlerde olması sağlanır.

4. HAREKET DENKLEMİ (EQUATION OF MOTION)



Şekil 17. Robotik kuş kanat mekanizması hareket denklemleri (The wing mechanism motion equations of the robotic bird)

Sistemin Kinetik Enerjisi;

$$E_{K2} = 0.5 I_{G2} \dot{\Theta}_1'^2$$

$$E_{K3} = 0.5 I_{G3} (\dot{\Theta}_1' + \dot{\Theta}_2')^2 + 0.5 m_{G3} V_{G3}^2$$

$$E_{K4} = 0.5 I_{G4} \dot{\Theta}_3'^2$$

Sistemin Potansiyel Enerjisi;

$$E_{P2} = m_{G2} g \sin\Theta_1 [O_1A_1]$$

$$E_{P3} = m_{G3} g [\sin[180-(\Theta_1+\Theta_2)] AB_1] + [\sin\Theta_1 [O_1A]]$$

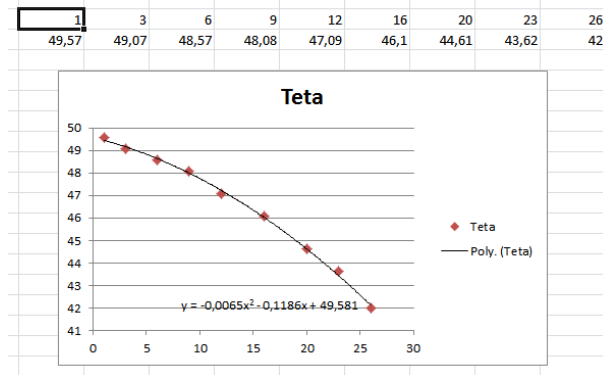
$$E_{P4} = m_{G4} g \sin\Theta_3 [O_2C]$$

$$E_{P_{FL}} = 0.5 k [\sin\Theta_3 [O_2D]]^2$$

$$E_{P_{FL}} = 0.5 [-0.006\Theta_1^2 - 0.118\Theta_1 + 49.58] [\sin\Theta_3 [O_2D]]^2$$

$$E_{P_{FL}} = [-0.003\Theta_1^2 - 0.059\Theta_1 + 24.79] [\sin\Theta_3 [O_2D]]^2$$

$$E_{P_{FL}} = -0.003\Theta_1^2 \sin^2\Theta_3 [O_2D]^2 - 0.059\Theta_1 \sin^2\Theta_3 [O_2D]^2 + 24.79 \sin^2\Theta_3 [O_2D]^2$$



Şekil 18. Θ_1 açılımlarına karşılık gelen F_L kuvvetinin Θ_1 cinsinden denklemi (The equation of F_L force corresponding Θ_1 angle)

$k = -0.006\Theta_1^2 - 0.118\Theta_1 + 49.58$ (potansiyel enerji eşitliğindeki yay sabiti "k" yerine Θ_1 açılımlarına karşılık gelen F_L kuvveti ve bunun sonucunda Θ_1 değişkenine bağlı doğrunun denklemi alınmıştır)

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\Theta}_1'} \right) - \frac{\partial L}{\partial \Theta_1} = \tau \quad (23)$$

$$L = E_K - E_P$$

$$L = E_{K2} + E_{K3} + E_{K4} - [E_{P2} + E_{P3} + E_{P4} + E_{P_{FL}}]$$

$$L = 0.5 I_{G2} \dot{\Theta}_1'^2 + 0.5 I_{G3} (\dot{\Theta}_1' + \dot{\Theta}_2')^2 + 0.5 I_{G3} \dot{\Theta}_2'^2 + 0.5 m_{G3} V_{G3}^2 + 0.5 I_{G4} \dot{\Theta}_3'^2 - m_{G2} g \sin\Theta_1 [O_1A_1] - m_{G3} g \sin\Theta_1 \cos\Theta_2 - m_{G3} g \sin\Theta_2 \cos\Theta_1 + m_{G3} g \sin\Theta_1 [O_1A] + m_{G4} g \sin\Theta_3 [O_2C] + 0.003\Theta_1^2 \sin^2\Theta_3 [O_2D]^2 + 0.059\Theta_1 \sin^2\Theta_3 [O_2D]^2 - 24.79 \sin^2\Theta_3 [O_2D]^2$$

$$\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\Theta}_1'} \right) = I_{G2} \dot{\Theta}_1' + I_{G3} \dot{\Theta}_1' + I_{G3} \dot{\Theta}_2'$$

$$\frac{d}{dt} (I_{G2} \dot{\Theta}_1' + I_{G3} \dot{\Theta}_1' + I_{G3} \dot{\Theta}_2') = I_{G2} \ddot{\Theta}_1'' + I_{G3} \ddot{\Theta}_1'' + I_{G3} \ddot{\Theta}_2''$$

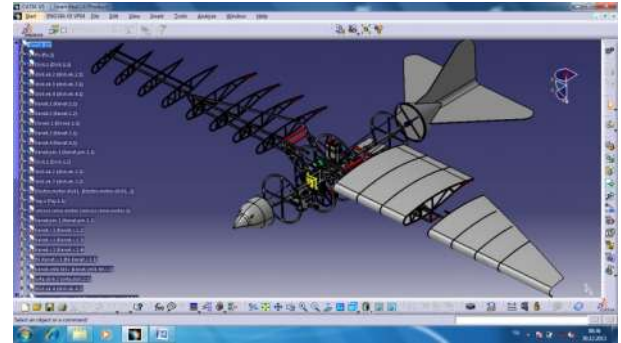
$$\frac{\partial L}{\partial \Theta_1} = -m_{G2} g \cos\Theta_1 [O_1A_1] - m_{G3} g [\cos\Theta_1 \cos\Theta_2] [AB_1] + m_{G3} g [\sin\Theta_1 \sin\Theta_2] + m_{G3} g \cos\Theta_1 [O_1A] + 0.006\Theta_1 \sin^2\Theta_3 [O_2D]^2 + 0.059 \sin^2\Theta_3 [O_2D]^2$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\Theta}_1'} \right) - \frac{\partial L}{\partial \Theta_1} = \tau$$

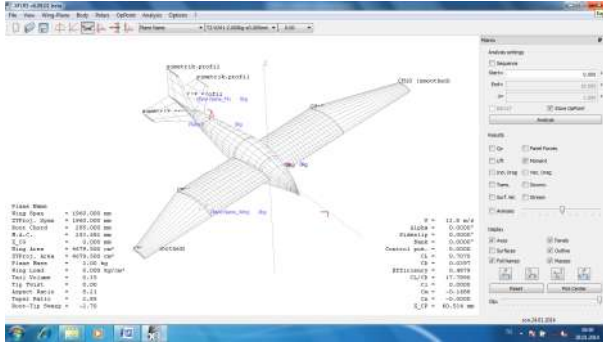
$$I_{G2} \ddot{\Theta}_1'' + I_{G3} \ddot{\Theta}_1'' + I_{G3} \ddot{\Theta}_2'' + m_{G2} g \cos\Theta_1 [O_1A_1] + m_{G3} g \cos\Theta_1 \cos\Theta_2 - m_{G3} g \sin\Theta_1 \sin\Theta_2 - m_{G3} g \cos\Theta_1 [O_1A] - 0.006\Theta_1 \sin^2\Theta_3 [O_2D]^2 - 0.059 \sin^2\Theta_3 [O_2D]^2 = \tau$$

Lagrange – Euler hareket denklemi (24)

5. TASARIM SİMÜLASYONU (SIMULATION)



Şekil 19. Robotik kuşun komple tasarımı (The complete design of the robotic bird)



Şekil 20. Tasarımı yapılan robotik kuşun XFLR5 programında analizi (The analysis of the robotic bird in XFLR5 software)

Robotik kuşun tasarımı Catia V5 R19 programında yapılmıştır. XFLR5 programından elde edilen aerodinamik değerler ışığında tasarım tamamlanmıştır. Tablo 1’de kanada hareket veren iş dişlisinin 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° , 315° , 360° ler de ki konumlarında kanat dihedral ve negatif dihedral açılarında aerodinamik değerler verilmiştir. 0° ’deki değerler hesaplamalarda kullanılmıştır, tablodaki diğer değerlerin yorumları sonuçlar kısmında yapılmıştır.

Tablo 1. Bir tam kanat çırpma hareketinin aerodinamik değerleri (The aerodynamic values of one complete wing flap)

Kanat Dihedral ve negatif dihedral açısı	C_L	C_D	C_{D0}	C_m	X_{Cp} (mm)
$0^\circ - 0^\circ$	0.7	0.039	0.018	-0.16	130
$4^\circ - 13^\circ$	0.69	0.040	0.019	-0.2	144
$17^\circ - 26^\circ$	0.62	0.036	0.019	-0.18	146
$30^\circ - 35^\circ$	0.52	0.031	0.019	-0.15	146
$36^\circ - 18^\circ$	0.56	0.032	0.018	-0.16	142
$35^\circ - 7^\circ$	0.62	0.036	0.019	-0.17	141
$26^\circ - 26^\circ$	0.64	0.040	0.022	-0.19	145
$11^\circ - 11^\circ$	0.7	0.041	0.019	-0.2	143

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yapılan kanat açısı simülasyon çalışmalarında görülüyor ki robotik kuş kanadının dihedral ve negatif dihedral açıları 0° konumundan, dihedral 36° , negatif dihedral 18° konumuna gelene kadar taşıma katsayısı giderek azalmakta fakat dihedral 36° , negatif dihedral 18° den dihedral 0° negatif dihedral 0° açısı konumuna gelişinde taşıma katsayısı giderek artmakta ve kanadın yatay konumunda maksimuma ulaşmaktadır. Kanadın, aşağı doğru gergin ve düz konum süpürüşünde, taşıma katsayısı yükselmekte olup irtifa ve itki kazanabilmesi için arzu edilen bir durum gerçekleşmiş olmaktadır.

Kanat dihedral açıları $0^\circ-0^\circ$ ve $36^\circ-18^\circ$ konumlarında parazit sürükleme katsayısı minimum çıkmaktadır.

Kanatlar tamamen yatay konumdayken ve kanatlar en üst stroğunda (dihedral açısı maksimum) parazit sürüklemenin minimum olduğu gözlenmiştir.

Yunuslama momenti katsayısı -0.15 ile -0.20 değerleri arasında değişmektedir. Bu değerler arası robotik kuş kuyruk dengesi sağlanabilmektedir.

Robotik kuş süzülürken hücum açısı 0° ile 10° arasında kanat X_{Cp} noktaları 80 mm ile 130 mm arasında değişim göstermektedir. Robotik kuşun mevcut C_G noktası bulunduğu takdirde burun aşağı ve burun yukarı momentleri stabil olarak istenilen değerlerde sağlanabilir.

Robotik kuş mevcut konseptiyle mevcut hücum açısında ilave olarak maksimum 1 kg ağırlığında kütleyi taşıyabilme kapasitesine sahiptir. Fakat bu ilave kütleyi taşıyabilmesi için yazılım olarak bazı parametre eklemeleri yapılmalıdır.

Robotik kuş, 56° lik β açısıyla 13.23 m yarı çapında bir dönüşü, savrulmadan ve irtifa kaybetmeden süzülme modunda gerçekleştirebilmektedir.

Robotik kuştaki mevcut batarya sisteminde en uzun menzile uçabilmesi için gerekli olan hız değeri 22.75 m/s’dir. Bu hız değerinde uçarsa mevcut batarya değeriyle en uzak mesafeye gidebilmektedir.

Robotik kuşun minimum güç gereksinimiyle uçabilmesi için gerekli hız değeri 6.94 m/s’dir. Keşif uçuşlarında havada fazla kalabilmesi için bu hız modülü gerektiği kadar kullanılabilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] THY A.O. Eğitim Akademisi Ders Notları, 2011.
- [2] Brosch_SmartBird_en_8s_RZ_300311_lo, Rüterstrasse 82, 73734 Esslingen Germany, www.festo.com/bionic.
- [3] http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wing_Muscles_color.svg
- [4] Micael S. Couceiro, N.M. Fonseca Ferreira, J.A. Tenreiro Machado, Application of fractional algorithms in the control of a robotic bird. 12 May 2009.
- [5] Hui Hu, Anand Gopa Kumar, Gregg Abate, Roberto Albertani, An experimental investigation on the aerodynamic performance of flexible membrane wings in flapping flight. 8 May 2010

- [6] Che-Shu Lin, Chyanbin Hwu, Wen-Bin Young, The thrust and lift of an ornithopter's membrane wings with simple flapping motion. 01 December 2005.
- [7] John M. Dietl, Ephrahim Garcia, Ornithopter optimal trajectory control. 13 April 2012.
- [8] <http://www.geol.umd.edu/~jmerck/bsci392/lecture12/lecture12.html>, Maryland Üniversitesi Jeoloji Bölümü.
- [9] M. Adil YÜKSELEN, Uçak Mühendisliğine Giriş ve Etik Ders Notları 2006.
- [10] Daniel P. Raymer, Aircraft Design: A Conceptual Approach, President, Conceptual Research Corporation Sylmar, California.
- [11] Mustafa KAYA ve İsmail H. TUNCER, Çırpan Kanat Kesitlerinde İtkinin Yapay Zeka ile eniyileştirilmesi. ODTÜ Havacılık ve Uzay Mühendisliği.
- [12] C.J. Pennycuick, Modelling the Flying Bird (Theoretical Ecology Series), Academic Press; 1 edition (July 28, 2008).
- [13] Pooley, Dorothy, ve David Robson. "The Air Pilot's Manual 4: The Aeroplane Technical." 5nci baskı. Cranfield. Pooley's Air Pilot Publishing, 2009.

