
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

ŞEKİL DEĞİŞTİREBİLEN DÖRT ROTORLU İNSANSIZ HAVA ARACININ TASARIMI VE İMALATI

Mustafa Burak GÜNAY

DOKTORA TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KASIM 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Mustafa Burak GÜNAY

20/11/2023

ŞEKİL DEĞİŞTİREBİLEN DÖRT ROTORLU İNSANSIZ HAVA ARACININ TASARIMI VE İMALATI

(Doktora Tezi)

Mustafa Burak GÜNAY

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Kasım 2023

ÖZET

Havacılık sektörünün gelişmesiyle, insansız hava araçlarının önemi günümüzde giderek artmaktadır. Sabit kanatlı ve döner kanatlı, birçok insansız hava aracının değişik versiyonları üretilmekte ve akademik çalışmalarda ele alınmaktadır. Son yıllarda döner kanatlı insansız hava araçları İHA olarak adlandırılmakta ve İHA'ların, farklı boyutlardaki modelleri üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. İHA'lar, sivil havacılıkta, bireysel hobi amaçlı, savunma sanayisinde ve arama kurtarmada sıkça kullanılmaktadır. Ekipler tarafından, farklı boyuttaki İHA'lar, saha şartlarına ve ihtiyaca göre tercih edilmektedir. Bu tez çalışması ile sahada yaşanan olumsuzlukların önüne geçecek, ulaşılması zor olan konumlarda geometrisini küçültebilecek, dar alanlarda görüntü alabilecek, şeklini uçuş esnasında isteğe göre değiştirebilecek İHA tasarımı ve prototip imalatı gerçekleştirilmiştir. TRIZ yöntemi, şase ve hareketli kolların tasarımında kullanılmıştır. Hareketli kolların ve şasenin yapısal analizi ANSYS ile yapılmıştır. Matematiksel modelleme ve tüm hesaplamalar ışığında, seçilen İHA bileşenleri ile prototip imalat gerçekleştirilmiştir. Prototip ile uçuş testleri başarılı bir şekilde tamamlanmıştır.

Bilim Kodu	:	91410
Anahtar Kelimeler	:	Dron, İHA, Dört rotorlu, TRIZ
Sayfa Adedi	:	97
Danışman	:	Prof. Dr. İhsan KORKUT

DESIGN AND MANUFACTURING OF TRANSFORMABLE FOUR-ROTOR UNMANNED AERIAL VEHICLE

(Ph. D. Thesis)

Mustafa Burak GÜNAY

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

November 2023

ABSTRACT

With the development of the aviation industry, the importance of unmanned aerial vehicles is increasing today. Different versions of many fixed-wing and rotary-wing unmanned aerial vehicles are produced and discussed in academic studies. In recent years, rotary wing unmanned aerial vehicles are called UAVs, and studies are being carried out on models of UAVs in different sizes. UAVs are frequently used in civil aviation, individual hobby purposes, the defense industry and search and rescue. UAVs of different sizes are preferred by teams depending on field conditions and needs. With this thesis study, a UAV design and prototype manufacturing has been carried out, which will prevent the negativities in the field, reduce its geometry in hard-to-reach locations, take images in narrow areas, and change its shape as desired during flight. TRIZ method was used in the design of the chassis and moving arms. Structural analysis of the moving arms and chassis was made with ANSYS. In the light of mathematical modeling and all calculations, prototype manufacturing was carried out with the selected UAV components. Flight tests with the prototype have been successfully completed.

Science Code : 91410
Key Words : Drone, UAV, Quadrotor, TRIZ
Page Number : 97
Supervisor : Prof. Dr. İhsan KORKUT

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında, bana yol gösteren, bilgisini, tecrübesini ve en önemlisi zamanını paylaşan kıymetli danışman hocam sayın Prof. Dr. İhsan KORKUT'a sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Çalışmalarım sürecinde, bana sabreden, her zaman destekleyen değerli eşime ve çocuklarıma, minnet dolu teşekkürlerimi sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ viii

ŞEKİLLERİN LİSTESİ ix

RESİMLERİN LİSTESİ x

SİMGELER VE KISALTMALAR xii

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR TARAMASI 2

2.1. İnsansız Hava Araçlarının Tarihsel Gelişimi 3

3. İNSANSIZ HAVA ARAÇLARININ SINIFLANDIRILMASI 8

3.1. İnsansız Hava Araçlarının Uçuş Süresi Ve Kullanım Yeri Sınıflandırması 8

3.2. İnsansız Hava Araçlarının Aerodinamik Sınıflandırması 8

4. DÖRT ROTORLU DİKEY KALKIŞ ve İNİŞ YAPAN İHA'LAR 9

4.1. Dört rotorlu İHA'ların Sınıflandırılması 9

4.2. Dört rotorlu İHA'ların Avantaj ve Dezavantajları 9

5. DÖRT ROTORLU İHA BİLEŞENLERİ 10

5.1. Temel Parçalar 11

5.1.1. Fırçasız DC motor 11

5.1.2. Pervaneler 12

5.1.3. ESC (Elektronik Hız Denetleyici) 13

5.1.4. Pil / Batarya 13

5.1.5. Şase (Gövde) 14

5.1.6. Uçuş kontrol kartı 15

Sayfa

5.1.7. Güç dağıtım kartı 15
5.2. Yardımcı Parçalar 15
5.2.1. Kumanda ve alıcı 15
5.2.2. Jiroskop 16
5.2.3. Telemetri alıcı ve verici 16
5.2.4. Gimbal 16
5.2.5. Kaza önleyici sistem 16
5.2.6. İvme ölçer 17
5.2.7. Barometre 17
5.2.8. Otopilot sistemleri 17
6. KAVRAMSAL TASARIM 18
6.1. Hareket Eksenleri ve Uçuş Kontrolü 18
6.2. DC Motorların Hesabı 19
6.3. Uçuş Süresi Hesabı 20
6.4. Matematiksel Model 20
6.4.1. Euler açıları 22
6.4.2. Güç mekanizmasının modellenmesi 26
6.4.3. Matematiksel modelin sayısal sonuçları 26
6.5. Statik İtki Hesabı 28
6.6. Hareketli Kolların Kinematiği 30
7. ŞEKİL DEĞİŞTİREBİLEN DÖRT ROTORLU İHA 32
7.1. Özgünlük 32
8. MATERYAL VE YÖNTEM 34
8.1. TRIZ Metodu 36
8.2. TRIZ Yaklaşımı ile Şekil Değiştirebilen Dört Rotorlu İHA Tasarımı 40
8.3. TRIZ Yaklaşımıyla Çözüm Önerileri 45

Sayfa

9. ŞEKİL DEĞİŞTİREBİLEN DÖRT ROTORLU İHA TASARIMI 63

10. ŞEKİL DEĞİŞTİREBİLEN DÖRT ROTORLU İHA'NIN YAPISAL ANALİZİ 65

10.1. Malzeme mukavemet değerleri 65

10.2. Sınır Şartları ve Kuvvetler 65

11. ŞEKİL DEĞİŞTİREBİLEN DÖRT ROTORLU İHA İMALATI 69

11.1. Bileşenlerin Seçimi 69

11.2. Kolların Hareketi için Kullanılacak Motor Tipi Seçimi 71

12. TESTLERİNİN YAPILMASI VE DEĞERLENDİRİLMESİ 81

13. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 83

KAYNAKLAR 85

EKLER 89

Ek-1 90

Ek-2 91

Ek-3 92

Ek-4 93

Ek-5 94

Ek-6 95

ÖZGEÇMİŞ 96

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. İHA kullanım alanları 6

Çizelge 5.1. Hücre sayısına göre pil voltaj değerleri 14

Çizelge 6.1. Sayısal değer sonuçları 27

Çizelge 8.1. Tez akış şeması 34

Çizelge 8.2. Mühendislik parametreleri 39

Çizelge 8.3. Yenilikçi prensipler 39

Çizelge 8.3. TRIZ matrisi 43

Çizelge 8.4. Probleme ait çelişkiler matris çizelgesi 43

Çizelge 8.5. Kavramsal tasarım çizelgesi 44

Çizelge 8.6. Malzeme gerilme ve yoğunluk değerleri 45

Çizelge 8.7. Şase ve kol ağırlık karşılaştırması 47

Çizelge 10.1. Malzeme mukavemet değerleri 50

Çizelge 11.1. Servo motor ile step motor karşılaştırılması 56

Çizelge 11.2. İHA malzemeleri teknik özellik tablosu 59

Çizelge 11.3. İHA malzeme ağırlıkları 62

Çizelge 11.4. İmalat aşamaları tablosu 63

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.1. Dört rotorlu İHA şekilleri 9

Şekil 5.1. Dört rotorlu İHA bileşenleri 11

Şekil 5.2. DC fırçasız motor 12

Şekil 5.3. Pervane 13

Şekil 5.4. Elektronik hız denetleyici (ESC) 13

Şekil 5.5. Li-Po pil 14

Şekil 5.6. Şekil değiştirebilen İHA şasesi 3B model 15

Şekil 5.7. Uçuş kontrol kartı 15

Şekil 5.8. 6 Kanallı kumanda 16

Şekil 6.1. Dört rotorlu İHA itki kuvvetleri ve kullanılan koordinat eksen takımları 18

Şekil 6.2. Simulink modeli 22

Şekil 6.3. Hareketli kolun ağırlık merkezine uzaklığı 25

Şekil 6.4. Motor ve pervane modeli 26

Şekil 6.5. İHA kuvvet diyagramı 29

Şekil 6.6. Hareketli kol kinematiği 30

Şekil 7.1. İHA elektronik bağlantı şeması 33

Şekil 8.1. Dört rotorlu İHA gövdesi 35

Şekil 8.2. İHA gövdesinin ilk tasarım 3B model 35

Şekil 8.3. Hareketli kol ilk tasarım 3B model 36

Şekil 8.4. TRIZ mantığı 36

Şekil 8.5. TRIZ S Eğrisi 37

Şekil 8.6. Gövde-kol ilk montaj 3B tasarımı 42

Şekil 8.7. İHA kolu a) İlk tasarım b) Son tasarım 46

Şekil 8.8. İHA 3B model 47

Şekil **Sayfa**

Şekil 9.1. Şase 3B tasarımı ve ölçüleri 48

Şekil 9.2. Hareketli kol 3B tasarım 49

Şekil 9.3. İHA hareket kabiliyeti 49

Şekil 10.1. Mesh görüntüsü 50

Şekil 10.2. Detay mesh görüntüsü 51

Şekil 10.3. Sınır koşulları 51

Şekil 10.4. Toplam deformasyon 52

Şekil 10.5. Eşdeğer gerilme değerleri 52

Şekil 10.6. Eşdeğer gerinim değerleri 53

Şekil 11.1. Servo motor çalışma prensibi 57

Şekil 11.2. Servo motor özellikleri 58

Şekil 11.3. Servo motorun arduino ile bağlantı şeması 59

Şekil 11.4. Arduino kod ekranı 59

Şekil 11.5. Şekil değiştirebilen İHA malzemeleri 61

Şekil 11.6. Şekil değiştirebilen İHA montaj resmi 62

Şekil 12.1. Şekil değiştirme 64

Şekil 12.2. Sabit ayak üzerinde test 65

Şekil 12.3. Uçuş testleri 65

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 2.1. Nicola Tesla' nın ilk askeri insansız hava aracı 3

Resim 2.2. İlk seri üretime geçen İHA 3

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
db	Desibel
hz	Hertz
kg	Kilogram
km	Kilometre
m^2	Metrekare
m^3	Metreküp
m/s	metre / saniye
N	Newton
Nm	Newton x metre
rad/sn	Radyan/saniye
W	Watt

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren
DC	Doğru akım
ESC	Elekronik Hız Denetleyici
İHA	İnsansız Hava Aracı
PWM	Sinyal genişlik modülasyonu
RPV	Uzaktan Kumandalı Hava Aracı
RPM	Dakikadaki tur sayısı
TSK	Türk Silahlı Kuvvetleri

1. GİRİŞ

İnsansız hava araçları (İHA), içinde insan bulunmayan, uzaktan kumanda ile yönlendirilen veya otonom olarak uçabilen hava araçlarıdır. İHA'lar, kullanım amacına göre bütçesi ve faydalı yük taşıma kapasitesi değişkenlik gösterebilir. İHA'lar, hava araçları endüstrisinde ve akademik çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kullanım alanlarına ek olarak, İHA'lar günümüzde çok farklı alanlarda da kullanılmaktadır. Uzaktan kumanda edilebilen veya otonom hareket eden hava araçları, 1950 yıllarında "Drone" adıyla adlandırılırken günümüzde insansız hava aracı (İHA) olarak bilinmektedir. Askeri görevler, tarımsal uygulamalar, gözlemleme gibi birçok uygulamada İHA'lar rahatlıkla kullanılabilmektedir.

1960 ve 1970 yılları arasında Uzaktan Kumandalı Araçlar olarak adlandırılan bu araçlar "İnsansız Uçak Sistemleri" olarak da bilinmektedir. Döner kanatlı ve dikey iniş kalkış yapan hava araçları, alçak irtifada uçan küçük ölçekli, hafif ve pilotsuzdurlar. İHA'lar kontrol yöntemine göre kumanda edilerek uçan ve kendiliğinden belli bir uçuş planı üzerinden otomatik olarak hareket edebilen uçak olarak iki sınıfa ayrılır. İHA'lara, çeşitli sensörler ve kameralar ekleyerek, izleme, haritalama, arama ve kurtarma görevleri için kullanılabilirler. Bu araçlar yakın geçmişte nakliye alanında da kullanılmıştır. Dikey kalkış ve iniş yapan insansız hava araçlarının yapısal olarak küçültme faaliyetleri üzerine çalışmalar gözlenmektedir. Küçültme çalışmaların sebebi, bu araçların küçük alanlarda kullanılmasını elverişli hale getirmektir. Fakat bu amaç için küçültülen araçların faydalı yük taşıma kapasiteleri azalmaktadır. Başka bir deyişle; dar alanda çalışması istenilen bu araçların yapısı küçültülürken, faydalı yük taşıma kapasiteleri ve aerodinamik yapıları olumsuz etkilenmektedir.

İHA'lar üzerine yapılan çalışmalara bakıldığında, ön plana çıkan değişken, ana şasenin geometrisidir. Ana şase geometrisi, kanat sayısına göre belirlenmektedir. Araştırmalar, şase geometrisinin havada kalma süresine etkisi, zorlu hava koşullarında dinamik analize ve aerodinamiğe etkisi üzerinde yoğunlaşmaktadır. Halen devam eden şase şekli çalışmalarında, motor ve kanat sisteminden oluşan Quadrotor (dört pervaneli helikopter) ön plana çıkmıştır.

İHA'ların, genel olarak kullanıldıkları alanlara bakıldığında, yaygın kullanım amacı,

görüntü alma- algılama olduğu görülmektedir. Savunma sanayi ve arama kurtarma için kullanılan İHA'ların, ölçü olarak büyük olmalarından dolayı, küçük dar geçitlerden geçememeleri büyük bir olumsuzluktur. Bu yüzden sahadaki ekipler, sahanın durumuna göre farklı boyutlara sahip İHA'ları beraberlerinde taşımak zorunda kalmaktadır.

İHA'ların kullanım alanlarına bakıldığında;

Arama Kurtarma: Doğal afetler veya kayıp arama kurtarma çalışmalarında, dar geçitlerden geçebilecek, mağaralara girip içerden görüntü alma kabiliyetinden dolayı ön plana çıkmıştır.

Yangın Önleme ve Söndürme: Orman yangınlarının önlenmesi, yüksek metrajlı ağaçlar arasında dolaşarak görüntü alarak yangın tehditlerinin araştırılması ve yangın esnasında, yangın ekiplerini yönlendirme konusunda Şekil Değiştirebilen İHA kullanılması faydalı olacaktır.

İstihbarat: Görüntü alma, ortam dinlemesi için kapalı veya açık alanlarda sessiz bir şekilde dolaşarak, dar geçitlerden geçerek görevi başarıyla tamamlaması düşünülmektedir.

İzleme ve Takip: Güvenlik güçlerinin operasyonlarında, keşif amaçlı önden gönderilebilir veya kaçan hırsız, terörist veya grupların takipleri gerçekleştirilebilir.

Daha güvenli bir dünya ve insanlık için; emniyetli yaşam yerleri, güvenli sınır hatları, yeşil dünya amaçlı tarım, insan ve doğa için temiz su kaynakları gibi yenilikçi kavramlar ön plana çıkmaktadır. Bu yenilikçi kavramları karşılanması amacıyla, son zamanlarda önemi artan insansız hava araçları çözüm kaynağı olmuştur.

Şekil değiştirebilen İHA'nın hızlı hareket etmesi hedeflenen görevi kısa sürede yerine getirmesi planlanmaktadır. İyi bir manevra kabiliyetinin olması sebebiyle dar alanlardan geçerken şeklini küçülterek hareketlerini ve zor geçitlerde sağ sol dönüş hareketlerini hızlı şekilde yapmıştır.

Bu tez çalışmasında tasarlanan şekil değiştirebilen dört rotorlu İHA'nın, ortam şartlarına ve görev tanımına göre geometrisini değiştirerek, verilen görevi yerine getirmesi hedeflenmektedir. Bu sayede sahadaki geometrik yapıdan meydana gelen sorunlar

çözüldüğü gibi dört rotorlu İHA'nın geometrik yapısı değiştirilerek birçok dinamik analiz ve akışkanlar analizi gibi diğer çalışmalar için referans olacaktır. Daha önce tasarımı ve imalatı gerçekleşmemiş, rotorların bağlı olduğu kolların saat yönünde (z ekseninde), senkronize halde servo motorlar ile 180^{o} döndürebilen ve havada iken şeklini değiştirebilen quadrotor prototip imalatı yapılacaktır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. İnsansız Hava Araçlarının Tarihsel Gelişimi

Küresel Hava Trafik Yönetimi Operasyonel Konsepti (The Global Air Traffic Management Operational Concept) İHA tanımını basit olarak; içerisinde pilotu bulunmayan araçlar olarak tanımlanmaktadır.

Hava saldırısında ilk İHA kullanımı, 1849 yılında Avusturyalıların, zaman ayarlı bombaların olduğu 200 balonu İtalya' ya göndermesi olarak kabul edilmektedir.

İlk İHA'lar A. M. Low tarafından 1916 yılında geliştirilmiştir. Uzaktan kumandalı olan bu uçaklarda 1. Dünya savaşı ve sonrasında birçok gelişme yaşanmıştır. 1935 yılında ise model uçak tasarımcısı Reginald Denny ilk ölçekli RPV (Uzaktan Kumandalı Hava Aracı) modelini geliştirmiştir.



Resim 2.1. Nicola Tesla' nın ilk askeri insansız hava aracı [1]

Resim 2.1'de, Nicola Tesla tarafından 1917 tarihinde yapılan, RC (radyo kontrol) ile kontrol edilen, ilk askeri İHA görülmektedir. Sabit kanatlı bir model olan bu İHA'ya bomba atma özelliği olduğundan, halk tarafından "Uçan Bomba" adı verilmiştir.



Resim 2.2. İlk seri üretime geçen İHA [1]

1939 yılında ilk defa Resim 2.2'de görülen insansız hava aracının seri üretimine başlandı. Bu İHA'nın markası Radioplane, modeli QQ2'dir ve 15.000 adet üretilmiştir.

1900' lü yılların başında ilk İHA, A. M. Low tarafından yapılmıştır. Uzaktan kumandalı olan bu uçaklarda 1. Dünya savaşı ve sonrasında birçok gelişme yaşanmıştır. 1935 yılında model uçak tasarımcısı olarak bilinen, Reginald Denny ilk ölçekli uzaktan kumandalı hava aracı modelini geliştirmiştir [2].

1980'li ve 1990'lı yıllarda olgunlaşan ve küçültülen bu hava araçlarının, uçaklara oranla çok daha ucuz olması ayrıca riskli görevlerde yetişmiş mürettebat kaybının olmaması en önemli özelliklerindendir. Genel olarak keşif ve gözetleme amacıyla kullanılan bu araçlar artık günümüzde sivil uygulamalarda da kullanılabilmektedir.

1960 ve 1970 yılları arasında Uzaktan Kumandalı Araçlar olarak adlandırılan bu araçlar, "İnsansız Uçak Sistemleri" olarak da bilinmektedir [3]. İHA'lar kontrol yöntemine göre yerden kumanda ile uçan ve önceden belirlenen uçuş planı üzerinden ya da tam otonom olarak hareket edebilen uçak olarak iki sınıfa ayrılır [4]. İnsansız hava araçları artık sadece askeri amaçlı değil sivil amaçlı olarak da birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır.

Türkiye'de 1980 yılında, İHA'ların Türk Silahlı Kuvvetleri (TSK) envanterine girmesi amacıyla çalışmalar başlamıştır. İlk insansız uçak 1989 yılında TSK envanterine girmiştir. Ayrıca, TUSAŞ tarafından 1990 yılında yerli İHA için çalışmalar başlamıştır [5].

Sabit kanatlı insansız hava araçlarına göre hareketli kanatlara sahip olan İHA'lar, dikey iniş ve kalkış yapabilmekte ve hızlı manevralar yaparak uçmaktadırlar, ayrıca havada asılı kalma özelliklerinden dolayı da ortam görüntülemeleri daha stabil olmaktadır [6].

Mevcut İHA'ların, havada çarpışmayı önleyecek algılama sistemlerine henüz yoktur. İHA'lara eklenen sensörler ile bu sistem geliştirilebilir. Pilotlu olan araçlar, kara taşıtlarında olduğu gibi sürücü marifetiyle kazalardan korunabilir, bir merkezin haberinde uçtukları için uçuş trafik yardımı alabilirler, kendi radar sistemleri ile önlem alabilirler veya uçak üzerinde bulunan uyarı sistemi ile havada çarpışmanın önüne geçebilirler.

Motor sayılarına göre, hareketli kanatlara sahip İHA'larla ilgili çalışmalarda, tri, quad, hexa- ve octocopter'lar gibi birçok İHA modelleri mevcuttur [7].

2000 yıllarda tasarlanan dört rotorlu İHA'lar [8], şuan farklı görevlerde kullanılması için değişime uğramıştır. Bu değişimin başlıca nedenleri, geometri, görev süresi, faydalı yük taşıma kapasitesi ve çalışma ömürleridir [9]. İHA'ların geometrik yapısı, taşıma kapasitesine bağlı olarak, itki kuvvetini ve görev süresini etkilediğinden, verilen göreve göre farklı İHA'lar kullanılmaktadır [10].

ABD'de 2005 yılında meydana gelen kasırgada, ölenlerin tespiti için insansız hava araçları kullanılmıştır. 2010 yılında İngiltere' de, bir hırsızın yeri İHA yardımıyla tespit edilmiş ve hırsız tutuklanmıştır. Bu olay, İnsansız hava aracı ile yapılan ilk tutuklamadır [5].

İnsansız hava araçları, çok tehlikeli görevlerde, personel zayiatını önlemek için kullanılmaktadır. Amerika da birçok tehlikeli görev, 2006 yılından itibaren İHA'lar ile yapılmaktadır.

Avustralya'da insansız hava araçları hava olaylarının önceden belirlenmesi için kullanılmaktadır. Hava olayı öncesi veya sırasında gerçek zamanlı veriyi anlık olarak verebilmektedir [5]. İHA'ların arama ve kurtarma görevlerinde kullanılmasına örnek; 2008 yılında Louisiana ve Texas'ta meydana gelen kasırgalarda olmuştur.

Biyomimetik açıdan İHA'ların ele alındığı bir çalışmada, farklı yapıdaki İHA'ların, uçuş kararlılığı, verimlilik ve kaza-kırım gibi konuları karşılaştırılmış ve biyomimetik açıdan

yapılan ar-ge projelerinin zorluklarından bahsedilmiştir. Ayrıca kuş ve böceklerden ilham alınarak yapılan İHA mekanizmaları da incelenmiştir [11].

15 Ağustos 2011 tarihinde Afganistan'da, ilk defa İHA ile askeri uçak çarpışmıştır. Bu kazada İHA tamamen kullanılamaz hale gelmiş, savaş uçağı ise sol kanadından büyük hasar almıştır.

İHA'nın, yer kontrol sisteminden yönetilmesinin, bazı sorunların oluşmasına sebep olacağı bilinmektedir. Yer kontrol birimi ile İHA arasında haberleşme radyo frekansı üzerinden yapılması, uçuş süresinin uzunluğuna ve irtifaya göre sinyal kopukluğuna neden olabilir. Bu sorun, yeni bir frekans üzerinden yapılmasını gerektirecektir, çünkü ileride haberleşmenin kesilmesi için saldırı da olması mümkündür. Ayrıca İHA'nın görev yaptığı sahada birçok İHA görev yapması halinde frekansların karışması da olasılıktır. Frekans karışması kaza-kırım ile sonuçlanmasa da, İHA'lar görevlerini tamamlayamayacaklardır. Gelişen teknoloji, yer istasyonları ile İHA arasındaki haberleşme kanallarını da geliştirecektir.

COVID-19 salgınında, 2020 yılında tasarlanan İHA modeli ile yeryüzündeki sıcaklık havadan ölçülerek, gerçek zamanlı veri kaynağı sağlanmıştır. Laboratuvar numunelerinin, İHA'larla taşınması, İHA'ların sağlık alanında başka bir kullanım örneğidir [12].

Günümüzde alçak irtifada uçan küçük ölçekli, hafif, düşük maliyetli, pilotsuz hava araçlarına ilgi artarak sürmektedir [13]. Bu hava araçları birçok alanda kullanılabilir hale gelmişlerdir. Bu hava araçlarındaki gelişmiş teknolojinin yardımıyla çok amaçlı endüstriyel ve akademik alanlarda birçok teşvik almaktadır [14]. Askeri görevler, tarımsal uygulamalar, gözlemleme gibi birçok uygulamada İHA'lar rahatlıkla kullanılabilmektedir [15]. İHA'lara, görüntü sensörü eklendiğinde uzaktan algılama, trafik izleme, kaza önleme, yangınları gözlemleme, haritalama, arama ve kurtarma gibi görevlerde kullanılabilmektedir [16]. İHA'ların günümüzde yaygın kullanım alanı uzaktan algılama, keşif ve nakliyedir. Uzaktan algılama için kullanılan İHA'larda elektromanyetik algılayıcılar, biyolojik ve kimyasal tehdit algılayan sensörler bulunmaktadır. İHA'larda ayrıca kızıl ötesi kameraları ile radar sistemleri bulunmaktadır.

Uzay Bilimlerinde İHA'lar yeni gezegenlerin keşfedilmesi için kullanılmaktadır.
Avrupada sınır güvenliğinin korunması amacıyla İHA'ların kullanılması planlanmaktadır.

İHA'ların kullanım yerlerinde öne çıkan bazıları Çizelge 2,1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. İHA kullanım alanları



Taşıma, bir konumdan başka bir konuma yük taşıma ya da yolcu aktarılmasıdır. İHA'lar kullanım alanları doğrultusunda yük taşıyabilirler. Yükler şase boşluğunda veya iniş takımları arasındaki boşlukta taşınabilmektedir.

Sabit kanatlı olan İHA'larda gövde üzerinde yük taşıma, İHA'nın aerodinamik yapısını bozacağından dolayı, gövde dışına montajı yapılan aerodinamik tüpler içerisinde yük taşınmaktadır.

Küçük geometriye sahip quadrotorlar, kolay taşınabilirlik gibi avantajlara sahip olsa da, faydalı yük taşıma kapasitesinin düşük olması ve zor hava koşullarında uçamaması gibi dezavantajlara sahiptir [17]. Küçük geometrideki quadrotorların avantajı, kısıtlı ve kapalı alanlarda uçabilmesidir [18]. Büyük geometrideki quadrotorlar, faydalı yükleri taşıma kapasitesi fazladır ve hava şartlarına karşı dayanımları daha iyidir [19]. Büyük ve küçük geometri arasındaki çelişkinin çözümü, ilk başta büyük boyuta sahip, ancak daha sonra kendi kendine şeklini değiştirerek daha küçük boyuta geçebilen ve bu esnada ilk başta taşıdığı faydalı yükü, şekil değiştirdikten sonra da taşıyabilen İHA'larla olacaktır [20]. Bahsedilen

bu çözüm için çalışmalar yapıldığı görülmektedir.

Şekil değiştirebilen İHA için yapılan çalışmalar ikiye ayrılmakta; ilki havada şekil değiştiren, ikincisi ise yerde şekil değiştirendir. Havada şekil değiştirme işlevi sabit kanatlı insansız hava araçları üzerinde de çalışılmıştır [21-22].

"Folly" isimli quadrotor tasarımını gerçekleştiren Tuna ve arkadaşları, uçuş esnasında şase merkezinde bulunan dişlinin dönmesiyle, dört kolun aynı anda kapanıp açılması, İHA'nın şekil değiştirmesini sağlamaktadır [23].

Dört rotorlu İHA kollarının kesişim açısı ile ilgili yapılan bir çalışmada, kolların açılarının değiştirilmesiyle İHA'nın hareketlerindeki değişim incelenmiştir [24].

Quadrotor tasarımının geliştirilmesinde TRIZ yaklaşımı kullanılan akademik bir çalışmada, şemsiye şeklinde açılıp kapanabilen bir İHA yapılarak taşıma kolaylığı sağlanmıştır [25].

2017 yılında yapılan çalışmada; İHA'nın kollarına hareket kabiliyeti kazandırmak için motor tahrikli bir hareket mekanizması geliştirilmiştir [26].

İHA kumandasının ömrünün uzatılması amacıyla, TRIZ yöntemi ile kullanıcı isteklerine göre yeni bir kumanda tasarlanmıştır [27].

Polislerin kullandığı İHA'lar için, son yıllarda TRIZ metodu ile yeni tasarımlar yapıldığı görülmektedir [28].

2022 yılındaki çalışmada dört rotorlu İHA karşılıklı çalışan rotorları alt-üst olacak şekilde seviye farkı oluşturulmuştur. Bu sayede rotorlar birbirlerine yakınlaştırıp uzaklaştırılmıştır. Bu hareket merkeze yerleştirilen servo motorların Raspberry Pi ile kontrolü ile yapılmıştır [29].

İHA'nın hareketi esnasında pervane açılarını incelemek amacıyla, İHA motorları tilt hareket yapacak şekilde tasarlanmıştır. Bu çalışma ile pervane açısının yörünge takibine etkisi incelenmiştir [30].

Dört adet dört rotorlu İHA'nın, yeni ve büyük bir quadrotor şasesinin rotor yerlerine yerleştirilmesi ile toplam 16 rotorlu bir İHA elde edilen çalışmada, sistemin dengesi üzerine araştırmalar yapılmış ve matematiksel modeli oluşturulmuştur [31].

İHA pervaneleri için bazı çalışmalar yapılmış, bunların birinde 3 farklı pervanenin yapısal analizleri yapılarak sonuçları değerlendirilmiştir [32].

Konum kontrolü için ele alınan bir çalışmada, simulasyon geliştirilerek, quadrotor için sapma kontrolü yapılmıştır [33].

ANSYS 18 ile quadrotor şasesinin yapısal analizlerinin yapıldığı çalışmalar görülmektedir [34].

"XSF" adlı quadrotor çalışmasında, en başta esnek kollara sahip olan "XSF"'ye rijit kollar takılarak ikisi arasındaki manevra kabiliyeti ortaya konulmuştur [35].

3. İNSANSIZ HAVA ARAÇLARININ SINIFLANDIRILMASI

İnsansız hava araçları kullanım yeri ve uçuş süresi, hava şartlarına direnci, boyutsal durumu, faydalı yük taşıma kapasitesi, otonom ve yarı otonom seviyelerine göre sınıflara ayrılmaktadır.

3.1. İnsansız Hava Araçlarının Uçuş Süresi ve Kullanım Yeri Sınıflandırması

Bu alanda İnsansız hava araçları aşağıdaki gibi 7 sınıfa ayrılır.

- Yüksek irtifa ve uzun görev süreli İHA: Bu sınıftaki İHA'lar 15km metre menzil ile tam gün uçabilmektedirler.
- Orta irtifa ve uzun görev süreli İHA: 5km ile 15km metre arasında menzilli ve en fazla 24 saat uçabilen İHA'larıdır.
- Orta menzilli veya taktiksel İHA: Menzili 100 ile 300 km arasında olan İHA'lardır.
- Kısa mesafeli İHA: Menzili 100 km'den küçük olan İHA'dır.
- Mini İHA: 20 kg toplam ağırlığı olan ve yaklaşık menzili 30 km olan İHA'lardır.
- Mikro İHA: Dış ortamda kullanılmasına uygun olmayan, iç ortamlarda askıda kalabilen İHA'lardır.
- Nano İHA: Yaklaşık 10 mm boyutlarına sahip olan hava araçlarıdır.

3.2. İnsansız Hava Araçlarının Aerodinamik Sınıflandırması

İHAlar aerodinamik olarak dört temel kategoride sınıflandırılır.

- Sabit kanatlı İHA: Havaalanına ihtiyaç duyan ve seyrüsefer görevlerini icra eden İHA' larıdır.
- Döner kanatlı İHA: Dikey kalkış ve iniş yapabilen İHA'lardır. Bu İHA'lar kendi içerisinde, tek rotorlu, eş eksenli, quadrotor ve çok rotorlu olmak üzere dört sınıfa ayrılır.
- Zeplinler: Gövdesi helyum gazıyla dolu olan hava aracı türüdür.
- Kanat çırpan İHA: Kanat çırpma hareketiyle uçan insansız hava aracıdır.

4. DÖRT ROTORLU DİKEY KALKIŞ VE İNİŞ YAPAN İHA'LAR

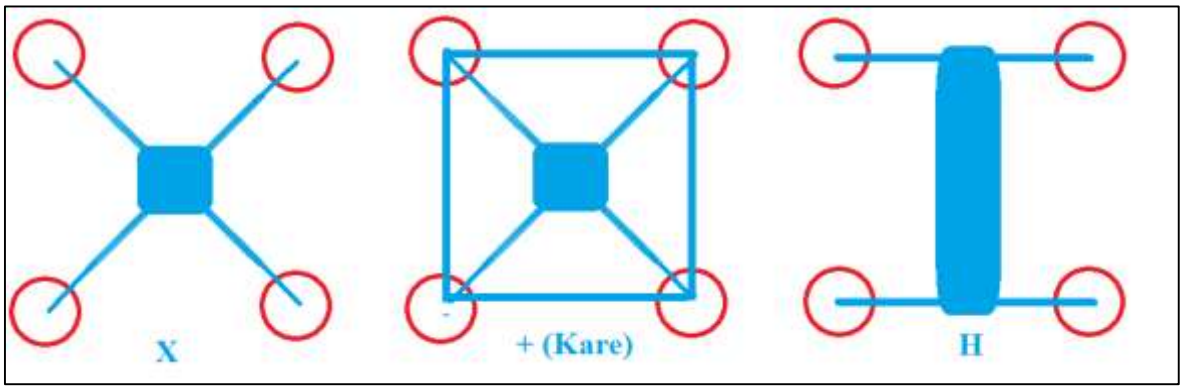
Yakın geçmişteki çalışmalara bakıldığında, İHA'ların tasarımında gövde geometrisi ön plandadır. Gövde geometrisi motor sayısına göre belirlenmektedir.

Quadrotor, dikey kalkış ve iniş yapan, yönlenme hareketlerini ve dengesini karşılıklı rotorların senkron hareketiyle sağlamaktadır. Dört rotorlu İHA gövde geometrisinin, İHA'nın uçuş süresine etkisinin olduğu görülmektedir [36]. İHA gövdesinin, zorlu hava şartlarında, İHA'nın aerodinamiğine etkisi üzerine çalışmalar yapılmaktadır. İncelenen son çalışmalarda, Quadrotor ön plana çıkmıştır [37].

4.1. Dört Rotorlu İHA'ların Sınıflandırılması

İHA'ların adlandırılmaları, motor sayısına ve hareket yönlerine göre yapılmaktadır. 4, 6 ve 8'li motor ve pervanelerin kullanıldığı İHA'lara multikopter denilmektedir.

Dört rotorlu İHA'nın adlandırılması, artı (+), çapraz (x) ve H şekillerinde yapılmıştır. Dört rotorlu İHA'nın şekilleri Şekil 4.1 de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Dört rotorlu İHA şekilleri

4.2. Dört Rotorlu İHA'ların Avantaj ve Dezavantajları

Temel avantajları şunlardır:

- Maliyetinin düşük olması,

- İnsan faktöründen bağımsız uçuş süresi,
- Uçuş esnasında görev değiştirme olanağı,
- İnsansız olmasından dolayı hata olasılığının az olması,
- Çok riskli ve insan sağlığına aykırı ortamlarda çalışma imkânı,
- Kaza-kırım olduğunda insan zayiatının olmaması.

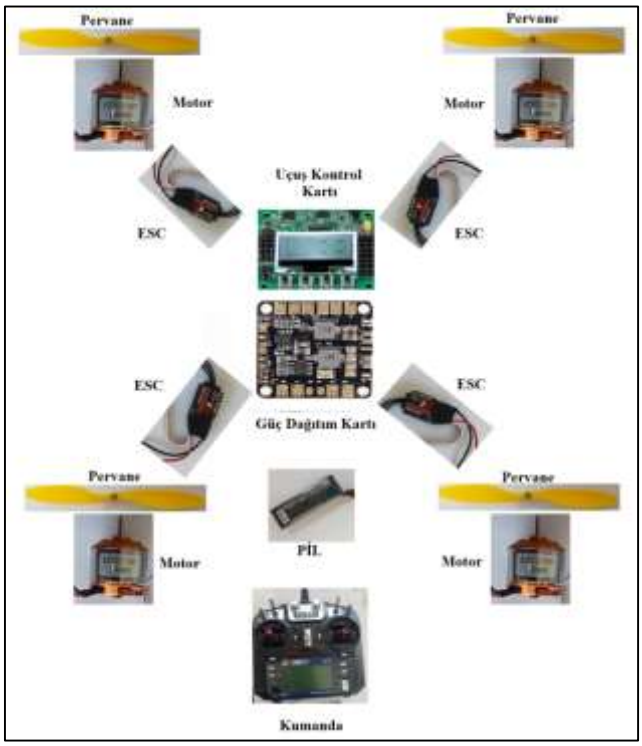
Genel dezavantajları şunlardır:

- Hava koşullarından olumsuz etkilenmelerinden dolayı, şiddetli rüzgâr ve turbülans olması durumunda görev iptallerinin olmasıdır.

5. DÖRT ROTORLU İHA BİLEŞENLERİ

İnsansız hava araçlarının ağırlığı, tasarım esnasında tüm hesaplamaları değiştirdiği gibi, tüm malzeme seçimini ve buna bağlıı olarak maliyeti de değiştirmektedir. Tasarımcı maliyetin düşük olması için İHA'nın toplam ağırlığının az olmasını isterken, kullanıcı, İHA'nın faydalı yük taşıma kapasitesinin fazla olmasını istemektedir.

Dört rotorlu İHA ağırlığı, motor gücü, gövde malzemesi ve uçuş kontrolü, İHA'nın uçuş süresini ve kararlı olarak uçmasını büyük ölçüde etkiler. Motorun yeterli torku üretebilmesi için, motoru sürecek olan, ESC (Elekronik Hız Denetleyici)'nin motor ile uyumlu olmasıdır. Dört rotorlu hava aracının uçuş görevini başarılı bir şekilde yapabilmesi için uygun bileşen seçimi gerçekleştirilmelidir. Dört rotorlu İHA'nın bileşenleri şematik olarak Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1. Dört rotorlu İHA bileşenleri

İHA bileşenleri aşağıda verilmiştir.

- Gövde

- Motorlar
- Pervaneler
- Batarya
- Elektronik Hız Denetleyicisi
- Uçuş Denetleyicileri
- Güç Dağıtım Kartları
- Algılayıcı

5.1. Temel Parçalar

5.1.1. Fırçasız DC motor

Fırçasız motorlarda, sargılar sabittir, mıknatıslar motorun milindedir. Rotor üzerindeki sabit sargılar farklı fazlardadır. Milde bulunan mıknatısların farklı salgılarına sıralı akım verilerek, ters manyetik alan oluşturulur. Ters manyetik alana maruz kalan mil mıknatıslar sayesinde döner. Bu motorlar fırçasız olduğu için verimleri yüksektir. Fırçasız DC motorlar, rotor tiplerine göre iç rotorlu (inrunner) ve dış rotorlu (outrunner) olarak ikiye ayrılırlar. İHA'lar için yüksek tork üreten Outrunner tipi motorlar kullanılır. Şekil 5.2'de A2212 1400KV fırçasız motor görülmektedir.



Şekil 5.2. DC fırçasız motor

İHA'larda itki kuvvetini motorlar oluşturur ancak, bu itki kuvveti için uygun ölçüde pervaneler kullanılması gerekir. İHA için motor-pervane uyumunu sağlanmazsa, düzgün ve verimli bir uçuş gerçekleştirilmez. Pervaneler dönme hareketiyle itki kuvvetiniüretirler. Pervaneler ne kadar hızlı dönerse o kadar itki kuvveti üretilir. Pervanenin tam bir turda ileriye doğru aldığı yolu (pitch değerini) ve uzunluğunu arttırarak, daha fazla itme elde

edebilir. Bunun sonucunda daha fazla hava itilecektir, fakat motoru döndürmek için daha fazla enerjiye ihtiyaç duyulacaktır.

5.1.2. Pervaneler

Malzeme yapılarına göre pervaneler plastik, ahşap, fiberglas-sertleştirilmiş plastik ve karbon fiber olabilir. Fiberglas ve karbon fiber malzemeden yapılan pervaneler yüksek performans sağlayabilirler. Plastik malzemeden yapılan pervaneler ise esnektir ve ucuzdur, dezavantajı ise titreşim yaptıklarından dolayı güç kaybına neden olurlar.

Pervaneler, standartlarda iki numara ile ifade edilirler. Bu iki numara için örnek olarak, 10x4.5 diye adlandırılan pervanelerde; 10 sayısı pervanenin çapı (inç olarak), 4.5 sayısı ise pitch katsayısı olmaktadır. Pitch sayısı, pervanenin ileriye doğru tam tur dönerek aldığı mesafe olarak tanımlanmaktadır. 4,5 sayısı inç olarak pervanenin 360^o dönmesiyle aldığı yolu göstermektedir. Pitch değeri yüksek ise; yüksek hızda uçuş, düşük hızlanma, yavaş yükselme gibi özelliklere sahiptir. Pitch değeri düşük ise; düşük hızda uçuş, iyi hızlanma, iyi yükselme, hız kontrolü iyi gibi özellikleri sahiptir. Şekil 5.3'de quadrotorlar için kullanılan bir pervane görülmektedir.



Şekil 5.3. Pervane

Fiberglas plastik pervaneler ağırdırlar ancak en sağlam pervanelerdirler. Karbon fiber pervaneler maliyetlidir, fakat verimlidirler. Pervanelerin kanat sayısı da çok önemlidir. Quadrotor için yüksek devirli motor tercih edildiğinde küçük pervane, düşük devirli motor tercih edildiğinde ise büyük pervane kullanılması gerekmektedir.

5.1.3. ESC (Elektronik Hız Denetleyici)

ESC' ler motor devrini kontrol eden elektronik cihazlardır. ESC'ler, motor devrini, uçuş kontrol kartından aldığı sinyale göre ayarlar. Herhangi bir sebepten dolayı motora fazla akım gelmesi durumunda, motorun zarar görmemesi için ESC akımı keserek motoru durdurur.

Aynı şekilde pilin zarar görmemesi için, sistem belli bir voltajın altına düşerse yine motor akımını ESC keser. Şekil 5.4'de ESC görülmektedir.



Şekil 5.4. Elektronik hız denetleyici (ESC)

ESC seçimi akım değerine ve voltaj verimliliğine göre yapılır. ESC doğru gerilim değerini sağlamalı ve motorların kapasitesine göre akımı vermelidir. Bundan dolayı ESC seçiminde motorların çekeceği maksimum akım dikkate alınır ve bu akımdan daha yüksek amper değeri sağlayan bir ESC seçilir.

5.1.4. Pil / Batarya

Dönme hızı yüksek olan fırçasız motorlar aynı zamanda yüksek akım ile çalıştıklarından dolayı, yüksek kapasiteli piller ile kullanılmalıdır. Bu ihtiyacı günümüzde karşılayabilen pil tipi; Li-po (lityum-polimer) pillerdir. Şekil 5.5'de 11.1V 2200mAh bir Li-Po pil görülmektedir.



Şekil 5.5. Li-Po pil

Uçuş süresini doğrudan etkileyen faktör pillerdir. Bu yüzden yüksek kapasiteli pil veya birden fazla pil kullanılmak istenebilir, ancak uçuş süresini belirleyen diğer durum ise toplam ağırlık olduğu için orantıyı iyi bir şekilde ayarlamak gerekmektedir.

Li-po pil teknolojisi incelendiğinde, pil yapısı hücre veya hücrelerden oluşmaktadır. Her bir hücre yaklaşık olarak 3,7V değerindedir. Hücre sayısına göre pillerin voltajları, Çizelge 5,1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Hücre sayısına göre pil voltaj değerleri

Hücre gösterimi	Hücre sayısı	Toplam Voltaj
1S	1 hücre	3,7V
2S	2 hücre	7,4V
3S	3 hücre	11,1V
4S	4 hücre	14,8V
5S	5 hücre	18,5V
6S	6 hücre	22,2V

Pil seçimi motorların akım durumuna ve uçuş süresine göre yapıldığından, istenilen voltaja uygun gelecek şekilde hücre sayısı belirlenmelidir.

Deşarj oranı

Pil seçiminde dikkat edilmesi geren özellik, C değeridir. Pilin anlık olarak verebileceği akım değerini bulmak için, C değeri ile pilin akımı çarpılır.

Pillerin üzerinde 10C, 20C, 25C değerleri vardır. Bu değerler ile örnek olarak, 1200mAh akım çeken ve üzerinde 20C değeri yazan bir pilin anlık akım kapasitesini bulmak için bu iki değer çarpılır: 1200 x 20 = 24000 mA = 24 A'dır. Motor ve ESC 20A olarak seçilmişse pil 24A verdiği için uçuş sırasında ısınmadan besleme yapacaktır. Eğer C değeri ESC ve motor akımından daha düşük pil seçimi yapılırsa; pil ısınacağından pilin ömrü azalacaktır.

5.1.5. Şase (Gövde)

Dört rotorlu İHA'ların, taşıyacakları tüm malzemelerin ve faydalı yüklerin ağırlıkları önemlidir. Dört rotorlu İHA'ların şasesi için yaygın olarak; alüminyum ve karbonfiber gövdeler kullanılmaktadır. Bu iki tür malzeme aynı mukavemet değerleri için ağırlık olarak hemen hemen aynıdır. Alüminyum ince kesit kullanılarak, karbonfiber ise kalın kesit kullanarak mukavemet dengesi sağlanmaktadır. Şekil 5.6'da şekil değiştirebilen İHA

şasesinin 3B modeli görülmektedir.



Şekil 5.6. Şekil değiştirebilen İHA şasesi 3B model

5.1.6. Uçuş kontrol kartı

İHA'nın bu parçası tam olarak beyin gibi çalışmaktadır. Tüm giriş ve çıkışlar bu kart üzerinden yönetilir. Bataryadan gelen akım bu kart üzerinden ESC lere iletilir. Kumandadan gelen sinyal bu kart sayesinde eyleme dönüştürülür. İHA bu kartın komutu ile havada askıda kalır ve yön hareketlerini sağlar. Kısaca belirtmek gerekirse sistemin en kritik parçasıdır. Kontrol kartı üzerinde bulunan bazı parçalar ile İHA'ya bazı kabiliyetler de kazandırılabilir.



Şekil 5.7. Uçuş kontrol kartı

5.1.7. Güç dağıtım kartı

Adından da anlaşılacağı üzere İHA güç dağıtım kartı, pilden gelen gücü bir İHA'nın tüm bileşenlerine dağıtmak için kullanılan bir baskılı devre kartıdır.

Çok sayıda bileşen için çok fazla regüle edilmiş voltaj beslemesine ihtiyaç vardır. Bu yüzden kart üreticileri, kararlı, güvenilir ve temiz güçle beslenebilmesi için güç dağıtım kartlarına

voltaj regulatörü dâhil etmişlerdir.

5.2. Yardımcı Parçalar

5.2.1. Kumanda ve alıcı

Kumanda, insansız hava aracının uçuş kartına komutlar gönderildiği, yönlendirici bir ekipmandır. Bu komut gönderme işlemi radyo dalgaları ile gerçekleşmektedir. Herhangi bir sebepten dolayı kumanda ile iletişimin kesilmesi durumunda, eğer İHA bileşenleri içinde tehlike anında kalkış yerine iniş yap yazılımı mevcut ise; İHA güvenli bir şekilde kalkış yerine iniş yapacaktır. Güvenlik açısından kumandaların İHA bileşenleri ile uyumlu ve yüksek kalitede sinyal gönderme kabiliyetine sahip olması gerekmektedir. Ayrıca kumanda üzerinden sinyal durumu ve batarya şarj durumu görülebilmektedir.



Şekil 5.8. 6 Kanallı kumanda

5.2.2. Jiroskop

İHA'larda açısal dengenin sağlanması için kullanılmaktadır. Quadrotorlarda üç eksende dönüş hızının ve yatış açısının ölçülmesinde kullanılır. Jiroskoplar çok hassas cihazlar oldukları için, kullanılmadan önce kalibre edilmelidir.

5.2.3. Telemetri alıcı ve verici

İHA uçuş sisteminde; batarya durumu, irtifası, hızı gibi verilere telemetri verileri denir.

Telemetri verilerinin sağlıklı bir şekilde alınabilmesi için tüm bileşenlerin birbiri ile uyumlu olması gerekmektedir. Bu veriler sayesinde anlık rüzgâr hızında ve yerden farklı yüksekliklerde, İHA'nın pozisyon verileri alınabilir.

5.2.4. Gimbal

Gimballer, İHA manevra yaparken kameranın sabit kalmasını ve titreşimsiz net görüntü almasını sağlar. Kamera sisteminden ayrı olarak temin edilir ve tüm kameralara uygun şekilde çalışırlar.

5.2.5. Kaza önleyici sistem

Hava araçları, birçok sebepten dolayı düşebilir. Bu sebepler, yazılım, donanım ve çevresel faktörler olabilir. İHA üreticileri kaza öncesi ve sonrası olarak farklı önlemler almışlardır.
Sensörler: İHA'ların açık veya kapalı alanlardaki uçuşlarında yere olan ve etrafındaki nesnelere karşı olan uzaklıkları anlık olarak ölçerek çarpışma riskini azaltırlar. Çok karanlık ortamlarda ve sensör gözlerinde oluşan tozlanma durumunda görevini yapamayabilir.

Kaybolma Durumu: İHA'larda uçuş esnasında veya kaza kırım yaşandığında İHA'nın son konumunu aktaracak yazılımsal ve donanımsal özellikler mevcuttur. En çok kullanılan sistemler sesli ve konum bilgisi aktarmaya devam eden sistemlerdir.

Uçuş Esnasında Düşmesi: İHA'ların önceden belirlenen ivmelenmesi belirli bir değeri geçtiğinde otomatik olarak paraşüt sistemi açılmakta ve daha yumuşak bir düşüş sağlanarak olası maddi manevi hasarların önüne geçilmektedir. Bu sistem İHA'ya ek ağırlık ve maliyetli olmasından dolayı kullanımı yaygın değildir.

5.2.6. İvme ölçer

Dengeli ve kontrollü bir uçuş için, hava aracının 3 eksende ivme ölçümü yapılması gerekmektedir. İHA gövdesine montaj edilen ivme sensörleri ile anlık olarak ölçümler kullanıcıya gönderilir.

5.2.7. Barometre

İHA'larda dijital barometreler kullanılır. Atmosfer basıncının ölçülmesi ile İHA'nın yüksekliği hesaplanarak, kullanıcı ile paylaşılır.

5.2.8. Otopilot sistemleri

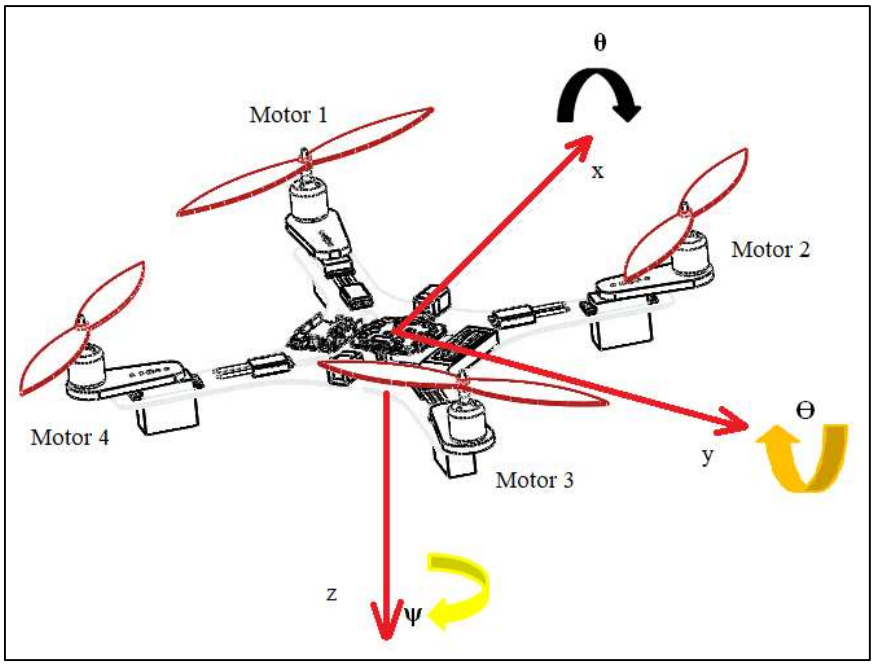
Otopilot, hava araçlarının insan tarafından yönlendirilmesine gerek kalmadan uçuş görevini otonom olarak güvenli şekilde yapmasını, ayrıca otomatik iniş ve kalkış yapmasını da sağlayan sistem olarak tanımlanmaktadır. Bu sistem sayesinde insan faktöründen kaynaklanan olumsuzluklar ortadan kalkmıştır.

6. KAVRAMSAL TASARIM

6.1. Hareket Eksenleri ve Uçuş Kontrolü

İHA uçuş kontrolü, kumanda vericisinden hava aracının alıcısına gönderilen radyo sinyalleri aracılığıyla çalışır. Uçuş kontrol kartı, sinyal şeklinde gelen komutları yürütür.
İHA uçuş kontrolü çalışmasında kullanılan iki ana cihaz vardır. Verici, pilot tarafından girilen komutları radyo sinyallerine dönüştürür ve alıcı bu sinyalleri elektronik veri elde etmek için kullanır.

Hareket eksenleri:



Şekil 6.1. Dört rotorlu İHA itki kuvvetleri ve kullanılan koordinat eksen takımları

Şekil 6.1'de dört rotorlu İHA itki kuvvetleri ve kullanılan koordinat eksen takımları verilmiştir.

Yunuslama (Pitch)

Şekil 6.1'de gösterilen yanal eksen etrafında İHA'nın yaptığı harekete yunuslama denir. Yunuslama hareketi ile quadrotor ileri ve geri hareketi sağlanmış olur.

Sapma (Yaw)

Dikey eksen etrafında İHA'nın yönünü değiştirme hareketine sapma denir. Sapma hareketi ile quadrotor kendi etrafında saat yönünde veya saat yönünün tersi yönünde hareket edebilir.

Yuvarlanma (Roll)

Dört rotorlu İHA'nın ön kısmından arkaya doğru uzanan eksen üzerinde yaptığı harekete yuvarlanma adı verilir. Bu hareket sayesinde quadrotor sağa ve sola dönüş yönünü değiştirebilir.

Şekil 6.1'de yukarıda bahsedilen üç hareketin quadrotor ekseni üzerindeki durumu görülmektedir.

Quadrotorlarda bulunan motorlar, itme gücü ve tork üretir, aynı zamanda İHA'nın uçuş yönünün tersine bir sürükleme kuvveti de oluştururlar. Quadrotordaki tüm motorlar eşit açısal hızda ve bu motorlar karşılıklı olarak zıt yönlerde dönüyorsa, İHA, yeryüzüne paralel şekilde yalpa yapmadan havada durabilir. Bu sayede, quadrotorlar, helikopter sisteminde bulunan, sapmayı engelleyen motora ihtiyaç duymazlar.

Yunuslama (Pitch) ve yuvarlanma (roll) eksenlerine etki eden bir açısal ivme, yuvarlanma eksenini etkilemeden uygulanabilir. Aynı yönde dönen her bir pervane, pitch veya roll eksenlerinden birini kontrol eder, bir motordan gelen itişi artırırken diğerini azaltır, dönüş veya yunuslama eksenine tork uygulanmasına izin verir.

Üç, altı veya başka sayıda motor yerine dört motorun kullanılmasının nedeni, dört motorun iki uygun dönüş simetrisine sahip olmasıdır. Dört motorla roll hareketi yapmak kolaydır. Dönen iki motordan birinin hızı artarken diğerinin hızı azaldığında toplam tork ve sapmaya uygulanan güç sıfır olur.

6.2. DC Motorların Hesabı

DC fırçasız motorlar, bulunabilirliği, fiyatı ve performansı nedeniyle en yaygın kullanılan motorlardır. DC motorlara bakıldığında farklı özelliklere sahip birçok seçenek vardır.

DC motorlar en iyi performansı en fazla mekanik gücü üretirken gösterirler. Güç, Denklem 6.1'de verilen tork ve açısal hızın çarpımıdır.

$$Güç = Tork * Açısal\ Hız \tag{6.1}$$

Bir DC motorun maksimum gücünü bulmak için maksimum gücün meydana geldiği dönüş hızı hesaplanmalıdır. Maksimum güç çıkışı ile İHA'nın en uygun uçuş durumu belirlenir. Bir pervane/motor seti, uçağın ağırlığına eşit bir itki ürettiğinde havada asılı kalır. Gezinme, motorun maksimum kapasitesinin %50'sinde gerçekleşmelidir ve bu, doğrudan pilin voltajının yarısına eşdeğerdir.

DC motorlar Kv (rpm/v) olarak derecelendirildiğinden, maksimum gücün elde edildiği dönüş hızı, Kv motorlarının akü voltajının yarısı ile çarpılıp sonuçları 2'ye bölerek bulunur. Bu işlem aşağıdaki Denklem 6,2'de gösterilmektedir.

$$rpm_{maks\ güç} = \frac{K.0{,}5.Batarya\ Gerilimi}{2} \tag{6.2}$$

Elde edilen devir, tam voltajda motorun maksimum devrinin 1/4'ünde gerçekleşir. Bu istenen devir, pervane ve motor seçimi için gereklidir. Ancak uygun bir pervane ve motor seçilmeden önce insansız hava aracının kütlesi tahmin edilmelidir.

6.3. Uçuş Süresi Hesabı

Günümüzde dört rotorlu İHA'larda en çok kullanılan pil tipi Lityum Polimer (LiPo) ' dir. LiPo pillerin yaygın olarak kullanılmasının sebebi, büyük kapasiteleri, hafiflikleri ve mükemmel deşarj yeteneklerinden kaynaklanmaktadır. Aşağıda LiPo piller hakkında genel bilgiler verilmiştir:

- Bir LiPo pilin her hücresinin nominal voltajı 3,6 volttur ve her hücre 3,0 volta ulaştığında tamamen boşalır.
- Akım, bir pilin maksimum deşarj oranı olan C cinsinden derecelendirilir. Örneğin, 1C pil tamamen boşalması bir saat sürecek bir akımı kaldırabilir ve 2C pil ½ saatte boşalma yeteneğine sahiptir.

- Bir pilin kapasitesi miliamper-saat (mAh) olarak derecelendirilmektedir.

Uygun pili belirlemek için uçuş süresinin analiz edilmesi gerekir. Batarya kapasitesi ile doğru orantılı olan uçuş süresi, batarya kapasitesinin bataryadan çekilen akım miktarına bölünmesiyle bulunabilir. Uçuş süresi aşağıda Denklem 6.3'de verilmiştir.

$$Uçuş\ Zamanı = Batarya\ Kapasitesi / Amper \tag{6.3}$$

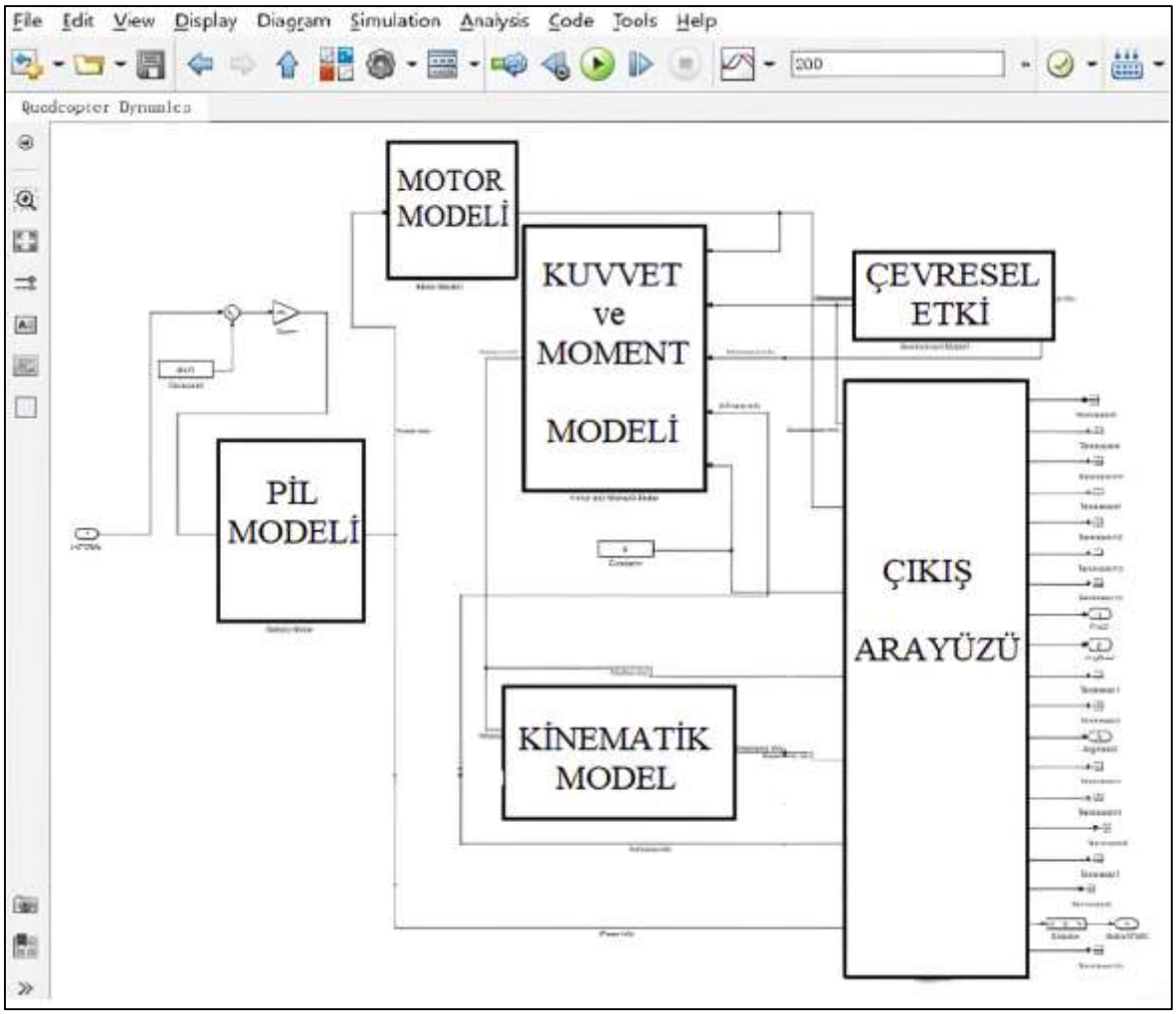
6.4. Matematiksel Model

Şekil değiştirebilen dört rotorlu İHA'da, şekil değişimi nedeniyle mekanik yapının dengesi etkilenmektedir. Dört rotorlu İHA'nın kollarının katlanmasıyla aracın ağırlık merkezi ve kolların açısal hızları, pervaneler tarafından üretilen itki kuvvetinin kolların merkeze olan mesafesindeki değişimden dolayı farklılaşmaktadır. Bu durum, motorların tork ve devir hızlarının belirlenmesinde doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, şekil değiştirebilen dört rotorlu İHA'larda bu değişimin neden olduğu yapısal değişiklikler dikkate alınarak yeni bir kontrol stratejisi geliştirilmiştir.

Şekil değiştirebilen İHA'nın matematiksel modeli oluşturulurken kullanılan değişkenler aşağıda sıralanmıştır.

m: dört rotorlu İHA kütlesi (kg).
g: yer çekimi (m/s2).
Jxx, Jyy, Jzz: atalet momentleri (kg.m2).
d: gövde merkezi ile rotor arasındaki mesafe (m).
Ct: itki katsayısı (N/(rad/s)2).
Cm: tork katsayısı (N.m/(rad/s)2).
CR: motor eğim parametresi (rad/s
$\dot{\omega}_b$: motor eğrisi sabiti (rad/s).
Jm: tüm motorların eylemsizlik momentleri (kg.m2).
Tm: zaman sabiti (s).
Cd: sürüklenme
Cdm: sürüklenme momenti katsayısı (N.m/(rad/s)2).

Şekil değiştirebilen dört rotorlu İHA'nın matematiksel modeli, Matlab Simulink'te Şekil 6,2'deki gibi oluşturulmuştur. Giriş değerlerine göre çıkış değerleri matematiksel model yardımıyla sayısal olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar bölüm sonunda sırasıyla verilmiştir.



Şekil 6.2. Simulink modeli [38]

Serbestlik derecesi 6 olan bir sistemin durumunu tanımlamak için kullanılan en yaygın yöntemlerden biri, açısal hız ve doğrusal hız vektörlerini kullanmaktır. Bu yöntem, sistemin konumunu ve yönünü tam olarak ve anlaşılır bir şekilde tanımlamak için kullanılır.

$^{b}\omega$, temel değişken açısal hız (ω)'dır. Açısal hız değişkeninde bulunan üst simge, b, hızın vektör bileşenleri cinsinden verildiğini göstermektedir.

^{e}v, temel değişken olan doğrusal hız (v)'dir. Doğrusal hız değişkeninden bulunan üst simge,

e, hızın, yeryüzüne göre vektör bileşenleri cinsinden verildiğini ifade etmektedir.

6.4.1. Euler açıları

Euler teoremine göre, katı bir cismin bir sabit nokta etrafındaki dönüşü, sabit nokta etrafındaki üç sonlu dönüşün bileşimi olarak kabul edilebilir. Bu dönüşümler sırasında, her bir dönüş ekseni, dönen koordinat çerçevesinin koordinat eksenlerinden biridir ve her bir dönüş açısı Euler açılarından biridir. Bu nedenle, oluşturulacak matris, üç temel rotasyon dizisiyle yakından ilişkilidir ve üç temel rotasyon matrisinin çarpımıyla temsil edilebilir [38].

Rotasyon matrisi eşitsizlik 6.4'de verilmiştir.

$$\mathbf{R}_{\mathrm{b}}^{\mathrm{e}}\begin{bmatrix}\cos\theta\cos\psi & \cos\psi\sin\theta\sin\phi-\sin\psi\cos\phi & \cos\psi\sin\theta\cos\phi+\sin\psi\sin\phi\\ \cos\theta\sin\psi & \sin\psi\sin\theta\sin\phi+\cos\psi\cos\phi & \sin\psi\sin\theta\cos\phi-\cos\psi\sin\phi\\ -\sin\theta & \sin\phi\cos\theta & \cos\phi\cos\theta\end{bmatrix} \quad (6.4)$$

Eylemsizlik momenti eşitsizlik 6.5'de ifade edilmiştir.

$$\mathbf{J}=\begin{bmatrix}J_{xx} & 0 & 0\\ 0 & J_{yy} & 0\\ 0 & 0 & J_{zz}\end{bmatrix} \quad (6.5)$$

Motorların itki gücü, dört rotorun manevralarını sağlayan itici güçtür. Bu itme gücü, matematiksel modelin temel bir parçasıdır. Tek bir pervane tarafından sağlanan itki kuvveti, F_{itki}, denklem 6.6'daki gibi formülle ifade edilmiştir.

$$F_{\text{itki}} = C_t \cdot \varpi^2 \quad (6.6)$$

Motorun yuvarlanma üzerindeki etkisini anlamak için pervanelerin oluşturduğu karşı torkun da belirlenmesi için eşitsizlik 6.7 kullanılmıştır.

$$\tau = C_{\mathrm{m}} \cdot \varpi^2 \quad (6.7)$$

Jiroskopik moment, dönen bir cismin dönme ekseni değiştirildiğinde ortaya çıkan bir

kuvvettir. Gövde üzerinde ortaya çıkan jiroskopik kuvvetler, tüm rotor ve pervanenin dönme ekseni etrafındaki toplam eylemsizlik momentleri (Jm ∈ ℝ +), yuvarlanma ve yunuslama oranları (ωx ve ωy) ve her bir rotorun hızı eşitsizlik 6.8'de tanımlanmaktadır.

$$\begin{aligned} G_{\mathrm{a},\phi} &= \sum_{i=1}^{n_t} J_m \omega_{y_\mathrm{b}} (-1)^{i+1} \varpi_i \\ G_{\mathrm{a},\theta} &= \sum_{i=1}^{n_s} J_m \omega_{x_\mathrm{b}} (-1)^{i} \varpi_i \\ G_{\mathrm{a},\psi} &= 0. \end{aligned} \tag{6.8}$$

Dört rotorlu İHA'nın pervanelerinin açısal hızı, pervanelerin ne kadar hızlı döndüğünü belirler. Pervanelerin açısal hızı arttıkça, ürettikleri itmki kuvveti ve moment de artar. İstenilen itki kuvveti (df) ve istenen momentler (dτ), öncelikle konum ve durum kontrolüne göre eşitsizlik 6.9'da belirlenmiştir.

$$\begin{bmatrix} f \\ \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} C_\mathrm{t} & C_\mathrm{t} & \cdots & C_\mathrm{t} \\ -d_1 C_\mathrm{t} \sin\varphi_1 & -d_2 C_\mathrm{t} \sin\varphi_2 & \cdots & -d_{n_r} C_\mathrm{t} \sin\varphi_{n_\mathrm{t}} \\ d_1 C_\mathrm{t} \cos\varphi_1 & d_2 C_\mathrm{t} \cos\varphi_2 & \cdots & d_{n_r} C_\mathrm{t} \cos\varphi_{n_\mathrm{t}} \\ C_\mathrm{m}\delta_1 & C_\mathrm{m}\delta_2 & \cdots & C_\mathrm{m}\delta_{n_\mathrm{t}} \end{bmatrix}}_{\mathbf{M}_{n_{ry}}} \begin{bmatrix} \varpi_1^2 \\ \varpi_2^2 \\ \vdots \\ \varpi_{n_\mathrm{r}}^2 \end{bmatrix} \tag{6.9}$$

$\mathrm{M}_{n_t} \in \mathbb{R}^{4\times n_r}, \delta_i = (-1)^{i+1}, i = 1, \cdots, n_\mathrm{r}.$

X şeklindeki dört rotorlu İHA için itki kuvveti ve momentler eşitsizlik 6.10'da ifade edilmiştir.

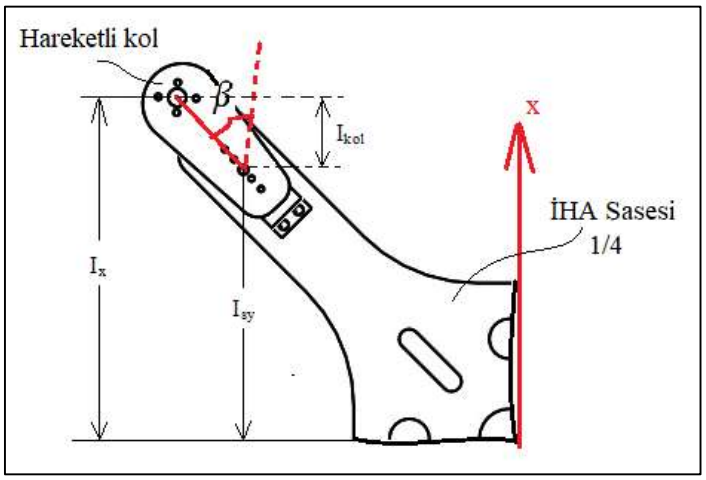
$$\begin{bmatrix} f \\ \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_\mathrm{t} & C_\mathrm{t} & C_\mathrm{t} & C_\mathrm{t} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} dC_\mathrm{t} & -\frac{\sqrt{2}}{2} dC_\mathrm{t} & -\frac{\sqrt{2}}{2} dC_\mathrm{t} & \frac{\sqrt{2}}{2} dC_\mathrm{t} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} dC_\mathrm{t} & \frac{\sqrt{2}}{2} dC_\mathrm{t} & -\frac{\sqrt{2}}{2} dC_\mathrm{t} & -\frac{\sqrt{2}}{2} dC_\mathrm{t} \\ C_\mathrm{m} & -C_\mathrm{m} & C_\mathrm{m} & -C_\mathrm{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varpi_1^2 \\ \varpi_2^2 \\ \varpi_3^2 \\ \varpi_4^2 \end{bmatrix} \tag{6.10}$$

Şekil değiştirebilen dört rotorlu İHA için yunuslama momentini gösteren eşitsizlik 6.11'de verilmiştir.

$$\tau_\theta = b l_x (\varpi_1^2 - \varpi_2^2 - \varpi_3^2 + \varpi_4^2) \tag{6.11}$$

Burada;

l_x : rotor merkezinin ağırlık merkezine x eksenine göre dik uzaklığını ifade etmektedir. Bu uzaklık Şekil 6.3'de gösterilmiştir.



Şekil 6.3. Hareketli Kolun Ağırlık Merkezine Uzaklığı

Şekil değiştirebilen dört rotorlu İHA için l_x formülü 6.12'de verilmiştir.

$$l_x = l_{sy} + \sin(45 + \beta) \,.\, l_{kol} \tag{6.12}$$

l_x Formülünü, eşitsizlik 6.11'de ifade ederek, 6.13'deki eşitsizlik elde edilmiştir.

$$\tau_\theta = \{b.\varpi_1^2[l_{sy} + \sin(45 + \beta) \,.\, l_{kol}]\} - \{b.\varpi_2^2[l_{sy} + \sin(45 + \beta) \,.\, l_{kol}]\} - \{b.\varpi_3^2[l_{sy} + \sin(45 + \beta) \,.\, l_{kol}]\} + \{b.\varpi_4^2[l_{sy} + \sin(45 + \beta) \,.\, l_{kol}]\} \tag{6.13}$$

Şekil değiştirebilen dört rotorlu İHA için yuvarlanma momentini gösteren eşitsizlik 6.14'de verilmiştir.

$$\tau_\varphi = bl_y(-\varpi_1^2 - \varpi_2^2 + \varpi_3^2 + \varpi_4^2) \tag{6.14}$$

l_y : rotor merkezinin ağırlık merkezine y eksenine göre dik uzaklığını ifade etmektedir.

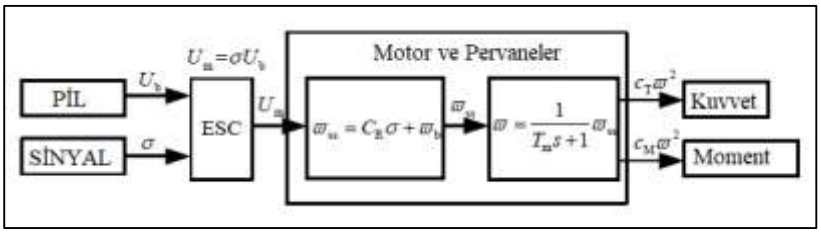
$$l_y = l_{sx} + \sin(45 + \beta) \,.\, l_{kol} \tag{6.15}$$

Eşitsizlik 6.13'ün elde edilmesine benzer şekilde yuvarlanma momenti 6.16'da verilmiştir.

$$\tau_{\varphi} = \{b.\varpi_1^2[l_{sx} + \ cos(45+\beta).l_{kol}]\} - \{b.\varpi_2^2[l_{sx} + \ cos(45+\beta).l_{kol}]\} - \{b.\varpi_3^2[l_{sx} + \ cos(45+\beta).l_{kol}]\} + \{b.\varpi_4^2[l_{sx} + \ cos(45+\beta).l_{kol}]\} \quad (6.16)$$

6.4.2. Güç mekanizmasının modellenmesi

Motor - pervane modeli, fırçasız Doğru Akım (DC) motorunu, Elektronik Hız Denetleyicisi (ESC) ve kumanda sinyalini içeren bütün bir güç mekanizması Şekil 6.4'de gösterilmiştir.



Şekil 6.4. Motor ve Pervane Modeli [38]

Motor-pervane modelinin sinyal iletimi, eşitsizlik 6.11'de ifade edilmiştir.

$$\varpi = \frac{1}{T_{\mathrm{m}}s+1}(C_{\mathrm{R}}\sigma + \varpi_{\mathrm{b}}) \quad (6.11)$$

T_{m} zaman sabitini temsil ederken, s Laplace sabiti, $C_{\mathrm{R}}\ ve\ \varpi_{\mathrm{b}}$ sabit parametrelerdir. Bu modelin girişi kumanda sinyali σ, çıkışı ise motor hızı ϖ'dir.

6.4.3. Matematiksel modelin sayısal sonuçları

Matlab Simulink ortamında tasarlanan matematiksel modelin sayısal sonuçlarını görmek için giriş değerlerinin belirlenmesi gerekir [38].

Dört rotorlu İHA toplam ağırlığı:1,5kg

Uçuş yüksekliği: 250 m

Hava sıcaklığı: 25 ºC

DC motor, Kv değeri: 1400Kv - Gerilimi:10V - Akımı:20A

Pervanenin, çapı:10inç - pitch:4,5 inç

ESC, akımı: 20A - Hücre sayısı: 3S

Li-po Pil, kapasite: 4000mAh - C değeri: 25

Simulink ile oluşturulan modele göre sayısal değerlerle yapılan hesaplamaların sonuçları, çizelge 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Sayısal değer sonuçları

Tam gaz uçuş süresi	: 4,83 dk.	Normal operasyon süresi	: 9,6 dk.
Verim yüzdesi	: 69,7 %	Toplam ağırlık	: 1,5 kg
ESC akımı	: 9,19 A	Faydalı yük	: 0,26 kg
Motor hızı	: 5.297,2 rpm	Maks. kalkış yüksekliği	: 0,58 km
Motor gücü	: 27,3 W	Maks. eğim açısı	: 31,7 °
Batarya voltajı	: 11,6 V	Maks. ileri hız	: 10,8 m/s
Pil akımı	: 37,3 A	Maks. uçuş menzili	: 2,56 km
Güç verimliliği	: 24,1 %	Rüzgâr direnci	: 4 Derece

Dört rotorlu İHA ağırlığı	: M	= 1,5 kg
Yerçekimi ivmesi	: G	= 9.8 m/s²
Multikopter Atalet Matrisi	: J_{xx}	= $1.237e^{-2}$ kg.m²
J=diag(J xx, J yy, J zz)	J_{yy}	= $1.237e^{-2}$ kg.m²
	J_{zz}	= $1.237e^{-2}$ kg.m²
Pervane İtki Katsayısı	: C_t	= $1.194e^{-5}$ N/(rad/s)²
Pervane Moment Katsayısı	: C_m	= $1.598e^{-7}$ Nm/(rad/s)²
Motor-Pervane Ataleti	: J_m	= $4.89e^{-5}$ kg.m²
Motor Tepki Süresi Sabiti	: T_m	= 0,0141 s
Hava Sürtünme Katsayısı	: C_d	= $6.543e^{-2}$ N/(m/s)²
Hava Torku Katsayısı.	: C_{dm}	= $8.963e^{-3}$ Nm/(rad/s)²

Şekil değiştirebilen İHA'nın kuvvet ve eksenlere göre tork değerlerini eşitsizlik 6.10'na

girilen sayısal değerler ile bulunmuştur.

$$\begin{bmatrix} f \\ \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_\mathrm{t} & C_\mathrm{t} & C_\mathrm{t} & C_\mathrm{t} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} dC_\mathrm{t} & -\frac{\sqrt{2}}{2} dC_\mathrm{t} & -\frac{\sqrt{2}}{2} dC_\mathrm{t} & \frac{\sqrt{2}}{2} dC_\mathrm{t} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} dC_\mathrm{t} & \frac{\sqrt{2}}{2} dC_\mathrm{t} & -\frac{\sqrt{2}}{2} dC_\mathrm{t} & -\frac{\sqrt{2}}{2} dC_\mathrm{t} \\ C_\mathrm{m} & -C_\mathrm{m} & C_\mathrm{m} & -C_\mathrm{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \end{bmatrix} \tag{6.10}$$

$$\begin{bmatrix} f \\ \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.194e^{-5} & 1.194e^{-5} & 1.194e^{-5} & 1.194e^{-5} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} 0{,}25\ 1.194e^{-5} & -\frac{\sqrt{2}}{2} 0{,}25\ 1.194e^{-5} & -\frac{\sqrt{2}}{2} 0{,}25\ 1.194e^{-5} & \frac{\sqrt{2}}{2}\frac{\sqrt{2}}{2} 0{,}25\ 1.194e^{-5} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} 0{,}25\ 1.194e^{-5} & \frac{\sqrt{2}}{2} 0{,}25\ 1.194e^{-5} & -\frac{\sqrt{2}}{2} 0{,}25\ 1.194e^{-5} & -\frac{\sqrt{2}}{2} 0{,}25\ 1.194e^{-5} \\ 1.598e^{-7} & -1.598e^{-7} & 1.598e^{-7} & -1.598e^{-7} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 146{,}6^2 \\ 146{,}6^2 \\ 146{,}6^2 \\ 146{,}6^2 \end{bmatrix}$$

Eşitsizlik 6.10 çözümünde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir;

f : 6,9168 N

τ_x: 0,4496 Nm

τ_y: 0.4496 Nm

τ_z: 0,1246 Nm

6.5. Statik İtki Hesabı

Uygun pervane ve motorların seçimi için statik itki hesaplamalarına ihtiyaç vardır. Statik itme, yere sabit olarak yerleştirilmiş bir pervane tarafından üretilen itme miktarı olarak tanımlanır. Düşük hız performansını değerlendirmek için statik itki hesaplamaları kullanılabilir. Ayrıca, statik itki hesaplamalarının gerçek değerler değil, tahminler olduğuna dikkat etmek önemlidir. Statik itki kuvvetinin hesaplanmasında ilk adım, motorların pervanelere ilettiği gücün rpm cinsinden belirlenmesidir. Gücü hesaplamak için kullanılan formül Denklem 6.12'de verilmiştir.

$$\text{Güç} = Sabit * devirsayısı^{\text{güç}faktörü} \tag{6.12}$$

Bir sonraki adım, bir motor pervane çifti tarafından üretilen itki gücünü belirlemektir.

Denklem 6.13, Momentum Teorisine dayalı olarak itme sağlar.

$$T = \frac{\pi}{4} D^2 \rho v \Delta v \tag{6.13}$$

$T = itki[N]$

$D = pervane\ çapı[m]$

$v = pervane\ hava\ hızı[m/s]$

$\Delta v = pervanenin\ ürettiği\ havanın\ hızı[m/s]$

$\rho = hava\ yoğunluğu[1.225 kg/m^3]$

Pervanedeki hava hızı, hava hızındaki toplam değişimin yarısı kadar olduğundan, denklem 6.14 türetilmiştir..

$$T = \frac{\pi}{8} D^2 \rho (\Delta v)^2 \tag{6.14}$$

Denklem 6.15, pervane tarafından motordan emilen gücü verir. Denklem 6.16, Δv için denklem 6.14'ü çözmenin ve bunu denklem 6.13'de ifadesinin sonucunu gösterir. Bunu yaparken, Δv elimine edilir ve tork hesaplanabilir.

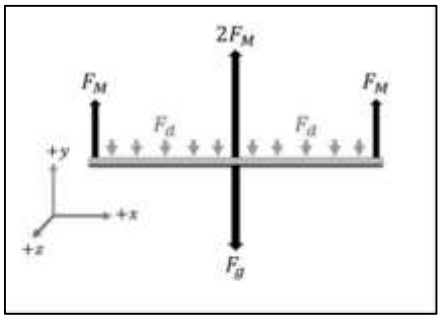
$$P = \frac{T \Delta v}{2} \Longrightarrow \Delta v = \frac{2P}{T} \tag{6.15}$$

$$T = \left[\frac{\pi}{2} D^2 \rho P^2\right]^{1/3} \tag{6.16}$$

Son olarak, Denklem 6.13'ün sonuçlarını kütle cinsinden ifade etmek gerekir. Newton Yasası, F= m.a, Denklem 6.17'yi elde etmek için kullanılır.

$$m = \frac{\left[\frac{\pi}{2} D^2 \rho P^2\right]^{1/3}}{g} \tag{6.17}$$

$(g = 9.81\, m/s^2)$



Şekil 6.5. İHA kuvvet diyagramı

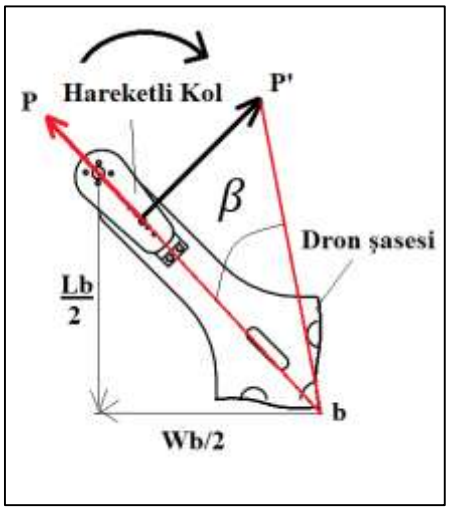
Basit anlamda itki gücünü hesaplamak için, Şekil 6.5'deki kuvvet diyagramına bakarak ve İHA'nın toplam ağırlığını yaklaşık olarak tahmin ederek her bir motorun itki gücü 6.18'deki gibi hesaplanır.

$$1\,motorun\ tam\ gazda\ iken\ vermesi\ gereken\ max.itiş\ gücü = (Ağırlık * 2)/Motor\ sayısı \quad (6.18)$$

6.6. Hareketli Kolların Kinematiği

Hareketli kollar, 180 derece dönebilme kabiliyetine sahiptir. Üç istasyon olarak -90, 0, +90 olarak 180 derecelik dönme hareketinni yaparak, şekil değiştirme işlevini sağlayacaklardır. Bu işlevi servo motorun sürülmesi ile olacaktır.

Her bir kolun konum bilgisini belirlemek için değişik koordinat noktaları belirlenir. Şekil 6.6'daki gibi;



Şekil 6.6. Hareketli kol kinematiği

- $b_0[x_0, y_0]$ Koordinatı gövdenin orijinini bağlı sabit bir noktayı,
- $b_1[x_1, y_1]$ Kolun X yönündeki değişime bağlı noktayı gösterirken,
- $b'_1[x'_1, y'_1]$ ise $b_1[x_1, y_1]$ in bir $\beta\left(i.e., \beta = 0, \ldots\ldots\ldots, \frac{\pi}{4}\right)$ açısı ile döndüğü noktayı gösterir.
- $p[x_1, y_1]^T$ Vektörü b_1 noktasına göre kolun pozisyonunu,
- $p'[x_0, y_0]^T$ ise b_0 gövde noktasına göre kolun aldığı pozisyonu gösterir.

Kol, b_1 ve b'_1 noktalarının "Z_1 ve Z'_1" eksenlerine göre döndürülür, böylece kola bağlı "P" sabit noktası, Şekil 6.4'de gösterilen servo motorun sağladığı "β" giriş dönme açısına bağlı olarak "P'" yeni pozisyonuna dönüşür.

Sabit gövdenin referans noktası b_0 a bağlı "P" rijit noktasının yeni konumunu gösteren bir dönüş dönüşüm matrisi formüle elde edilir.

L_{kol} Kolun toplam boyu, W_b şasenin genişliği, P kola bağlı sabit nokta ve P' β açısı ile döndürüldükten sonraki yeni dönüşüm noktasını göstermektedir.

b_1 Referans noktasına bağlı olarak P sabit noktanın konumu;

$$P[x'_1, y'_1]^T = \left[L_{kol} sin\left(\frac{\pi}{4}\right) - \left(L_{kol} cos\left(\frac{\pi}{4}\right)\right)\right]^T \quad \text{ile bulunur} \tag{6.19}$$

Kol, P'den P''e β açısı ile döndürüldüğünde aşağıdaki ifade kullanılır:

$$P'[x'_1, y'_1]^T = R_z * P[x'_1, y'_1]^T \tag{6.20}$$

Kolun dönmesini gerçekleştirdikten sonraki konum vektörü aşağıdaki ifade ile gösterilir.

$$P' = \begin{bmatrix} L_{kol} sin\left(\frac{\pi}{4} + \beta\right) \\ L_{kol} cos\left(\frac{\pi}{4} + \beta\right) \\ 0 \end{bmatrix} \tag{6.21}$$

Şekil 6.4'den , b_0 ve b'_1 koordinat noktalarının paralel olduğu görülmektedir. Böylece, P''in konumu, b_0 gövde-sabit noktasına bağlı olarak aşağıdaki ifade elde edilir.

$$P'[x_0, y_0, z_0]^T = P'[x_1, y_1, z_1] + \left[\frac{L_b}{2}, \frac{W_b}{2}\right]^T = \begin{bmatrix} L_{kol} sin\left(\frac{\pi}{4} + \beta\right) + \frac{L_b}{2} \\ L_{kol} cos\left(\frac{\pi}{4} + \beta\right) + \frac{W_b}{2} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.22)$$

6.6.4 numaralı eşitlik sabit-gövde referans noktasına göre dönen bir kolun üzerindeki rijit noktanın aldığı yeni konumu belirlemek için de kullanılabilir.

7. ŞEKİL DEĞİŞTİREBİLEN DÖRT ROTORLU İHA

7.1. Özgünlük

2014 yılında Christoph Hintz ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada dört motorlu bir İHA için H tipi gövde şekli kullanılmış ve motorların hem altına hem de üst tarafına pervane takılmıştır. Şekil değiştirme hareketi, hava aracının yeryüzüne paralel olan gövdesinin, yeryüzüne dik hale getirilmesi ile sağlanmıştır. Bu çalışma ile kalkış esnasında pil tasarrufu yapılması hedeflenmiştir [41].

Davide Falanga ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, şekil değiştirebilen İHA kullanılmıştır. Faklı yörüngeler ile dar geçitten geçmesi düşünülen, kendi gövdesi etrafında kollarını katlayan bir İHA ile deneyler yapıldığı anlaşılmaktadır. Bu çalışmada, eğimli dikdörtgen şeklinde bir boşluk oluşturularak, eğim açısı değiştirilip, İHA ile 35 adet yörünge oluşturulmuştur. Yörüngenin açılarına göre İHA'nın uçuş hızı tespiti yapıldığı görülmüştür [42].

Bucki ve Mueller 2019 yılında yaptıkları çalışmada dört pervaneli İHA'nın dik eksende katlanması ile pervaneler arası uzaklığı düşürmeyi hedeflemişlerdir. Tasarımı yapılan İHA'nın normal haldeki pervaneler arası ölçü 54 cm iken, dik eksende katlandıktan sonra 28 cm düşürülmüştür. Rüzgâr gücüne göre İHA katlanarak farklı itki güçleri üreterek havada daha güvenli kalacaktır [43].

Zurih Üniversitesindeki araştırmacılar tarafından tasarlanan İHA, ana gövde etrafında kollarını katlayabilen şekildedir. Kolların ana gövde etrafında katlaması ile dar geçitlerden geçilmesi planlanmaktadır. Ana gövde ve kollar üç boyutlu yazıcıyla plastik malzemeden üretilmiştir. Ürettikleri İHA ile yaptıkları testlerde, havada şekil değiştirme hedefine ulaşmışlardır [44].

Hindistan da yapılan bir çalışmada, kollarının katlanması ile şekil değiştirebilen bir İHA'nın, kollarında bulunan servo motorları hassas bir şekilde çalıştırarak, şekil değiştirme esnasında kolların kinematik analizi deneylerle ortaya konulduğu görülmüştür [45].

Chanyoung Kim ve arkadaşları, 2021 yılında dört rotorlu İHA ve gövde ekseninde kolları katlanıp açılabilen bir İHA geliştirmişlerdir. Bu İHA ile taşımacılık hedeflendi. Taşınacak cisim iki kol arasında sıkıştırılarak bir noktadan bir noktaya götürülmesi planlamışlar ve başarılı olmuşlardır [46].

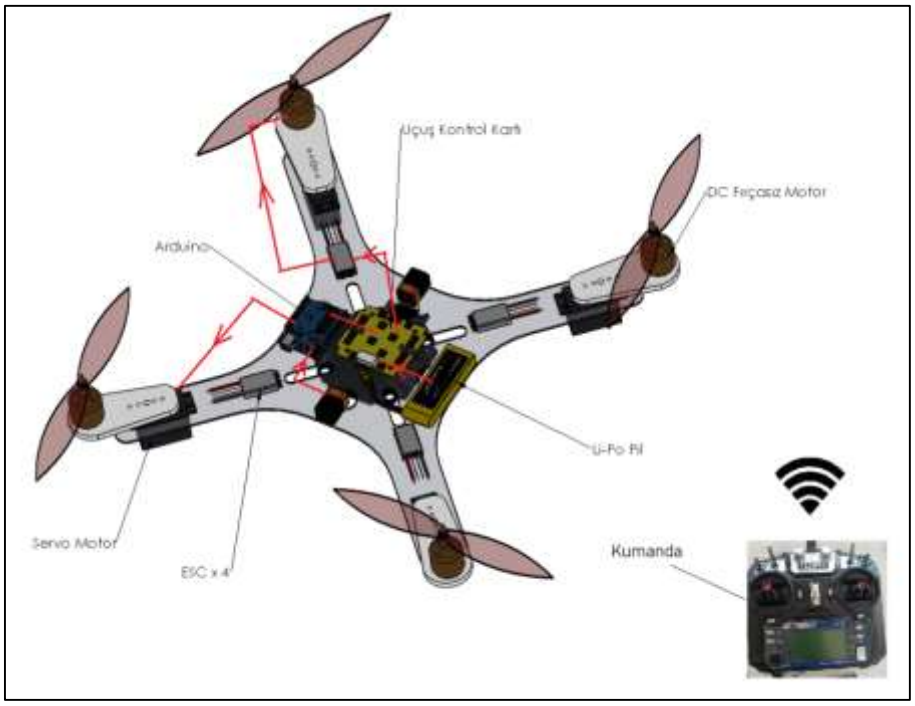
Yapılan bu çalışmalar doğrultusunda İHA'ların uçuş esnasında morfolojik yapısının değiştirilebileceği görülmüştür.

Dört rotorlu İHA çalışmalarında son beş yılda, şekil değiştirme kabiliyeti üzerine çalışmalar yapıldığı görülmektedir. Bu tez çalışması ile şase malzemesi olarak plastik malzeme yerine alüminyum kullanılması ve kolların uçuş sırasında katlanma hareketini dirsek mantığı ile yapacak olması ile yapılan tüm çalışmalardan farklı bir yapı ortaya koymaktadır. Şase malzemesinin alüminyum olması ile mukavemet değeri ve faydalı yük taşıma kapasitesi, plastik malzemeden üretilen şaseye göre arttırılmıştır. Diğer bir şase malzemesi olarak yaygın kullanılan karbon fiber malzemeye göre alüminyum şase maliyet açısından daha düşük olmuştur. Kolların katlanması, diğer çalışmalarda el ile yapılırken, bu çalışmada servo motorlar ile sağlanmıştır.

Şekil değiştirebilen dört rotorlu İHA, kalkış yaptığı noktadan 200 metre yüksekte ve maksimum 10 m/s hızda çalışmaktadır. Uçuş süresi 10 dakikadır. İHA konum belirleme amacıyla GPS kullanılmıştır.

- İHA -5 ile +50 santigrad derece aralığında çalışacak sisteme sahip olacaktır.
- İHA motorlarının birinin bozulması durumunda güvenli iniş yapacak yazılıma sahip olacaktır.
- Şekil Değiştirebilen İHA dış ortamlarda bulunan sinyal kesicilerden etkilendiği anda otomatik olarak kalkış yapılan noktaya geri dönebilecek ve iniş yapabilecektir.

İHA için hazırlanan elektronik şema Şekil 7.1' de verilmiştir.

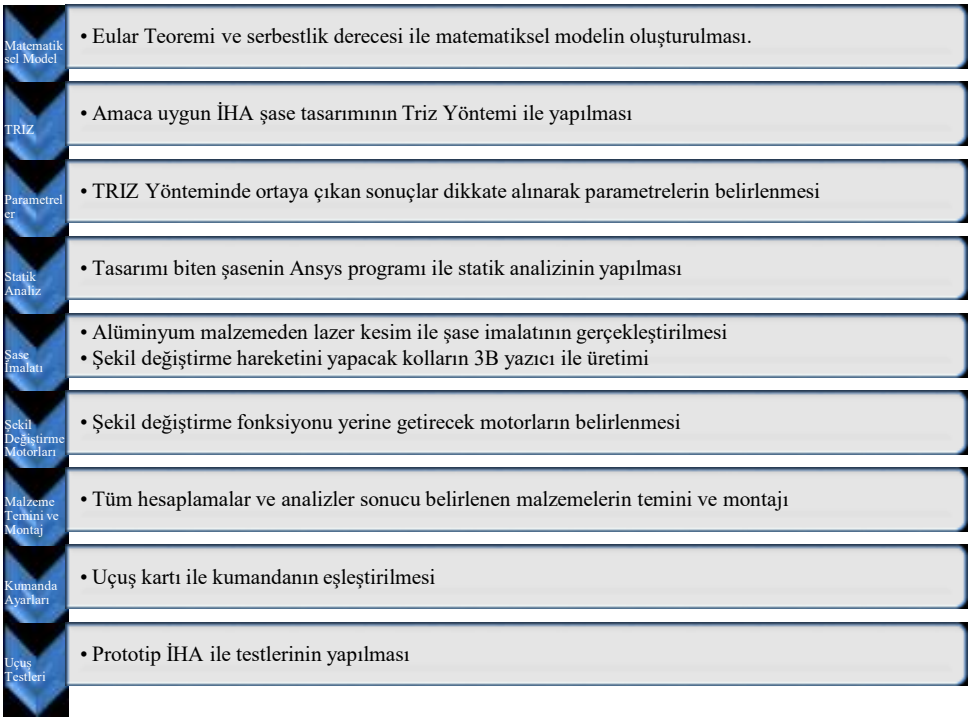


Şekil 7.1. İHA elektronik bağlantı şeması

8. MATERYAL VE YÖNTEM

Tez çalışmasında izlenen akış şeması aşağıda verilmiştir. Bu akışa göre tez çalışması planlanmıştır.

Çizelge 8.1. Tez akış şeması



İnsansız hava araçlarının tasarımı için yapılan son çalışmalar incelendiğinde, ele alınan ana konu gövdenin şeklidir. Ana gövde şekli motor ve pervane sayısına göre belirlenmektedir.

Bu tez çalışması ile dört rotorlu İHA gövdesi, alüminyum malzemeden üretilecek ve şekil değiştirme kabiliyeti kazandırılacaktır. Gövde tasarımı yapılırken, oluşabilecek çelişkiler, TRIZ yaklaşımı ile iyileştirilmiştir.

Şekil 15'de prototip imalat için kullanılan ABS (Akrilonitril Bütadien Stiren) plastikten üretilmiş dört rotorlu İHA gövdesidir.



Şekil 8.1. Dört rotorlu İHA gövdesi

Bu tez çalışmasında, dört rotorlu İHA gövde modeli olarak (X) kullanılmıştır. Dört adet rotorun bağlandığı kolların gövde ile birleşim yerlerine eklenecek olan motorlar ile kollar kendi etraflarında dönebilecektir. Kollar ile gövde arasında olacak olan dört adet servo motorun sürülmesi ile bu dönme hareketi yapması sağlanmıştır.

Şekil 8.2'de şekil değiştirebilen dört rotorlu İHA'nın şasesinin ilk hali görülmektedir. Gövdenin ilk tasarımına hareket eden kolların eklenmesiyle, İHA tasarımı son haline getirilmiştir.



Şekil 8.2. İHA gövdesinin ilk tasarım 3B model

Gövde tasarımının ilk haline montaj edilecek hareketli kollar Şekil 8.3'te yer almaktadır. Hareketli kolların bir ucuna İHA'nın ana rotoru, diğer ucuna ise kol hareketini yapacak olan servo motor montaj edilcektir.

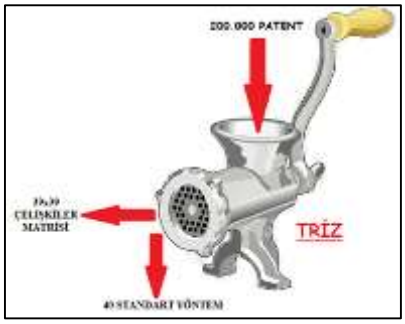


Şekil 8.3. Hareketli kol ilk tasarım 3B model

Karşılıklı motorların pervanelerin aynı yöne dönmesi ile dinamik bir denge sağlanmaktadır. Bu denge bozulmadan kollara yapılacak olan mafsala yerleştirilen motor sayesinde, kolların hareket etmesi ile İHA'nın geometrisi değiştirilecektir.

8.1. TRIZ Metodu

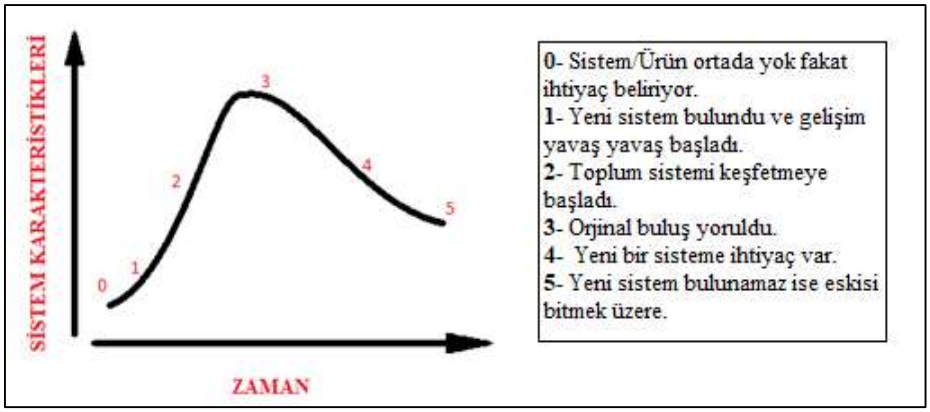
TRIZ yönteminin kurucusu olan Genrich Altshuller, mucitlerin en büyük çıkmazının deneme yanılma olduğunu söylemiştir. Bir çalışmada esnasında problemler çıkar ve bu problemler büyürse, deneme-yanılma sayısı ve doğal olarak iş üzerinde çalışan sayısı da artmaktadır. İnsanlar her buluşun tecrübeye dayandığını düşünmelerinden dolayı, işler çıkmaza girmekte ve buluş süresi uzamaktadır. TRIZ yöntemi ile problem çözümünde deneme yanılma yapmadan, sistemin tamamı ele alınıp, çözüme gidilmeye çalışılır [47].



Şekil 8.4. TRIZ mantığı

Şekil 8.4'de TRIZ Mantığı şekilsel olarak ifade edilmiştir. Bu yöntem ile problem çözümünün önündeki çelişkilerin ortadan kaldırılması hedeflenmektedir. TRIZ'in kurucusu Altshuller, yıllarca incelediği patentler sonucunda, bulduğu birçok çelişkiden 39 âdetini

belirlemiş ve bunlara mühendislik değişkeni adını vermiştir. Bulduğu bu 39 mühendislik değişkeni de 40 adet yenilikçi prensip ile çözülebileceğini ortaya koymuştur [48]. TRIZ yöntemi, tasarım yapan veya tasarımını geliştirmek isteyenler için zaman kaybını ortadan kaldırmaktadır. Deneme yanılma yerine mevcut çelişkiye göre yenilikçi prensip uygulanarak sonuca daha hızlı ulaşılmaktadır. Bu yöntem, problem ile karşılaşan kişilerin, probleme bakış açısını değiştirerek, çözüme hızlı şekilde ulaşmasını sağlamaktadır.TRIZ yöntemi teknik problemlerin dışındaki problemler için de kullanılabilmektedir [49]. TRIZ birçok alanda kullanıldığı gibi havacılık alanında kullanılmış ve F-16 uçaklarının bakım için ayrılan zamanından tasarruf edilmiştir [50].



Şekil 8.5. TRIZ S Eğrisi

Altshuller, patentleri incelerken, teknolojinin doğrusal olarak gelişmediğini S-eğrisi mantığı ile ilerlediğini fark etti. Şekil 8.5'de TRIZ S Eğrisinde görüldüğü gibi; teknoloji 0 noktasında doğarken ilk safhalarda yavaş yavaş gelişirken daha sonra hızlı bir gelişim evresine girmekte daha sonrada 3 noktasında olgunlaşmaktadır. 3 noktasına ulaşan bir çalışma teknolojisinin daha da geliştirilmesi için yeni bir yaklaşım bulması gerekecektir. İlk ürün geliştirme sürecinde geliştirilen prototipler de aynı S-eğrisi mantığı ile gelişecektir. Prototip gelişerek olgunlaşacak ve sonunda imalat aşamasına getirilecektir. İmalat süreci ideal prototipi daha da geliştirecek ve imalat ve ürün geliştirme süreci de kendi S-eğrisini çizecektir.

S-eğrisi aşağıdaki durumların tespiti için kullanılır:

- Zaman içinde ana sistemin parametrelerinin gelişimini analiz etme,
- Alt sistemlerin gelişimini zaman içinde analiz etme,

- S-eğrisinde, patent sayısına göre sistemin konumunu inceleme,
- Arz-talep durumuna göre S-eğrisinde sistemin konumunu tahmin etme,
- Gelişimin yönünü tanımlamak için hataları tahmin etme ve gelişimin yapısını anlama,
- Gelişme sürecinde tıkanılan yönü önceden görmek ve ona göre tedbir almak.

Yenilikçilik seviyeleri

Altshuller incelediği patent çalışmalarında, patent alan kişilerin hep aynı yollardan geçtiğini fark ettiğinden, geliştirilen çözümleri 5 seviyeye ayırmıştır.

Seviye 1: Kişisel bilgi birikimleri ile problem çözümleri kolaylıkla bulunabilen çalışmalar bu sınıfı oluşturur. %32 si bu sınıfı oluşturmaktadır.

Seviye 2: Mevcut yapıyı küçük değişiklikler ile iyileştiren çözümler bu sınıfı oluşturur. Yaklaşık % 45.

Seviye 3: Problemin yer aldığı alandaki bilgiler araştırılarak sorun çözülür. Bu seviye %18 lik kısmı oluşturmaktadır.

Seviye 4: Problemi çözmek için sorunun ait olduğu alan dışındaki alanlardan yararlanılır. Bu seviye %4 lük kısmı oluşturur.

Seviye 5: Tamamen yeni buluşların olduğu kısımdır. %1 lik dilimi oluşturur.

TRIZ ile çözüm için bazı yollar kullanılmaktadır. Bunlardan başlıcaları;

- "İdeal Sonuç",
- "Teknik Sistemlerin Evrimi",
- "Çelişkiler ve Çelişkiler Matrisi",
- "ARIZ (Yaratıcı Problem Çözme Algoritması)",
- "Kaynaklar ve Madde Alan Analizi"
- "Standart Çözümler"

olarak sayılabilir.

Çelişkiler matrisi

Çelişkiler Matrisi, TRIZ metodunda en yaygın kullanılan çözüm yoludur. Çelişkiler matrisi ile problemlere çözüm aranırken, bir durum için yapılan iyileştirme yapılırken başka bir durum kötüye gidebilir. Kötüye giden durum önceden görüldüğü için hemen tedbir alınabilir.

TRIZ çelişkiler matrisi, sadece parça olarak ürün tasarlarken değil, montajlı bir ürünün, parçalarına veya tümüne de uygulanabilir [50].

TRIZ metoduna göre; problemin çözümü için, benzer buluşlar incelenerek çözüm üretilebilir. Çözüm üretirken çelişkiler çoğaltılıp karmaşıklık artırılmamalıdır. Çelişki artarsa çözümden uzaklaşılır.

Mühendislik değişkenleri

Altshuller TRIZ metodunu oluştururken, iki yüz binin üzerinde incelediği patentlerde, bir problemi çözerken yeni problemlerinde oluşabildiğini gözlemlemiştir [48].

Örnek olarak; bir İHA'nın şasesinin mukavemetinin artırılması için parça kalınlığını artırılması veya malzeme değişimi sonucu İHA ağırlığı artacağından, taşıyabileceği faydalı yük ve uçuş süresi azalacaktır. İncelenen patentler sonunda sorunlar, toplam 39 adede indirgenmiştir.

TRIZ yöntemi bu 39 sorunu, "Mühendislik Parametreleri" olarak adlandırmıştır. Bu parametreler, Çizelge 8.2'de verilmiştir.

Çizelge 8.2. Mühendislik parametreleri

MÜHENDİSLİK PARAMETRELERİ			
1	Hareketli Cismin Ağırlığı	21	Güç
2	Hareketsiz Cismin Ağırlığı	22	Enerji Kaybı
3	Hareketli Cismin Uzunluğu	23	Madde Kaybı
4	Hareketsiz Cismin Uzunluğu	24	Bilgi Kaybı
5	Hareketli Cismin Alanı	25	Zaman Kaybı
6	Hareketsiz Cismin Alanı	26	Madde Miktarı
7	Hareketli Cismin Hacmi	27	Güvenilirlik
8	Hareketsiz Cismin Hacmi	28	Ölçüm Güvenilirliği
9	Hız	29	İmalat Güvenilirliği
10	Kuvvet	30	Cisme Zarar Verici Faktörler
11	Gerilme / Basınç	31	Zarar Verici Yan Etkiler
12	Şekil	32	İmalat Kolaylığı
13	Cismin Değişmezliği	33	Kullanım Kolaylığı
14	Mukavemet	34	Onarım Kolaylığı
15	Hareketli Cismin Dayanımı	35	Adapte Edilebilirlik
16	Hareketsiz Cismin Dayanımı	36	Cihaz Karmaşıklığı
17	Isı	37	Kontrol Karmaşıklığı
18	Parlaklık	38	Otomasyon Düzeyi
19	Hareketli Cismin Harcadığı Enerji	39	Verimlilik
20	Hareketsiz Cismin Harcadığı Enerji		

Yenilikçi prensipler

Altshuller, Mühendislik Parametrelerine karşılık 40 adet yenilikçi prensipleri ortaya koymuştur. Bu prensipler, Çizelge 8.3'te verilmiştir.

Çizelge 8.3. Yenilikçi prensipler

YENİLİKÇİ PRENSİPLER			
1	Bölümleme	21	Hızlı Hareket
2	Ayırma	22	Zararı Faydaya Çevirme
3	Kısmi Kalite	23	Geri Besleme
4	Asimetri	24	Aracılık
5	Kombinasyon	25	Self-Servis
6	Evrensellik	26	Kopyalama
7	Yuvarlama	27	Ucuz ve Kısa Ömürlü Cisimler Kullanma
8	Karşı Ağırlık	28	Mekanik Sistemin Yerine Koyma
9	Öncü Karşıt Eylem	29	Pnömatik ve Hidrolik Yapılar Kullanma
10	Öncü Eylem	30	İnce Film ya da Zar
11	Öncü Önlem	31	Gözenekli Malzeme
12	Eşit Potansiyel	32	Renk Değiştirme
13	Ters Eylem	33	Homojenlik
14	Yuvarlama	34	Atılan ya da Değiştirilen Parçalar
15	Dinamiklik	35	Fiziksel ya da Kimyasal Durum Değişikliği
16	Kısmi Fazlalık	36	Faz Dönüşümü
17	Yeniden Boyutlama	37	Isıl Genleşme
18	Mekanik Titreşim	38	Güçlü Okside Ediciler Kullanma
19	Periyodik Eylem	39	Durağan Çevre
20	Yararlı Bir Eylemin Sürekliliği	40	Kompozit Malzeme

Altshuller, çelişkiler matrisini oluşturmuş ve bu matristen çıkan prensiplere göre çözüm önerileri sunmuştur. TRIZ yöntemi, uzun yıllardır birçok tasarımcı tarafından kullanılmış ve tasarımcılara zamandan tasarruf sağlamıştır.

Bu parametreler, 39x39 boyutunda matris halinde düzenlenmiştir. Bu matrise, "Çelişkiler Matrisi" denilmektedir. Matriste 1482 kutucuk ve prensip yer almaktadır.

8.2. TRIZ Yaklaşımı ile Şekil Değiştirebilen Dört rotorlu İHA Tasarımı

TRIZ, çözümü direk sunmamakta; çözüme giden yolları göstermekte, problemleri sistematik hale dönüştürmektedir. Sonuç odaklı düşünme yeteneğini geliştiren bir yöntemdir. TRIZ, problem için bir çözüm yerine birden fazla çözüm bulunması için yol gösteren bir sistem olduğundan, kullanıcının bakış açısına göre sonuçlar değişebilir.

İHA tasarımında ön plana çıkan problemler genel anlamda aynıdır. Öncelikle İHA'nın hangi amaç için kullanılacağı belirlenmelidir. Amaç belirlendikten sonra İHA'nın yapısal özellikleri de şekil almaya başlayacaktır. Önemli olan iki eksen arası mesafenin belirlenmesidir. Bu mesafenin belirlenmesiyle, İHA'nın, mikro yapıda mı yoksa normal boyutlarda olacağı ortaya çıkacaktır. Daha sonra İHA'nın toplam ağırlığın belirlenmesi gerekir. Bu sayede motor gücü, pervane tipi, pil modeli ve ağırlığı belirlenmiş olacaktır.

Bu parametreler ışığında, maliyet de göz önünde bulundurularak motor ve pil markası belirlenecektir. Seçilen pil ile uyumlu çalışan ESC'nin belirlenmesi ile artık İHA'nın ne kadar yüksekliğe çıkabileceği ve uçuş süresi tespit edilmiş olacaktır.

Seçilen tüm ekipmanın ağırlığı toplanıp en başta belirlenen toplam ağırlıktan çıkarılarak, İHA'nın taşıyabileceği faydalı yük miktarı bulunmuş olacaktır.

İHA tasarımında en büyük etkenin ağırlık olduğu bilinmektedir. Ağırlığın durumuna göre motor ve pervane seçimi yapılacağından, öncelikle tahmini yük belirlenmeli ve ona göre matematiksel olarak tasarımın yapılması gerekmektedir.

Tahmini yük seçiminde en fazla ağırlık şüphesiz batarya olacaktır. Bataryanın ağırlığı aynı zamanda İHA'nın havada kalma süresini de belirleyecektir. Faydalı yük olarak kamera

seçimi görüntü kalitesine ve kullandığı enerjiye göre belirlendikten sonra, ağırlığı ele alınacaktır.

İHA ağırlığın birçok etkeni olduğu gibi; tasarımcıyı ve kullanıcıyı aynı şekilde etkileyecek ve belki de projenin en başa dönülmesini gerektirecek durum, maliyettir.

İHA seçiminde bakılan ilk özellik uçuş süresi ve şarj süresi olduğundan öncelikle batarya seçimi yapmak doğru olacaktır. Çünkü uçuş süresini belirlerken bataryanın ağırlığı önem arz edecek ve daha sonrasında ağırlık durumuna göre motor seçimi zincir halkası gibi önümüze çıkacaktır.

İHA'nın toplam ağırlığını oluşturan bileşenler; şase, pervaneler, bataryalar, kartlar, ESC' ler, kamera, kablolar ve motorlardır. Yapılan çalışmada, kol hareketlerini sağlayacak toplam 4 adet servo motor kullanılmıştır.

Motorlar kadar önemli ikinci hususta pervanelerdir. Pervanelerin birbirine çarpmayacak şekilde boyutlandırılması gerekmektedir.

Pervane seçimi yapılırken, sportif faaliyetler için az devirli motor ve büyük pervaneler, hızlı hareketler için yüksek devirli motor ve küçük pervaneler seçilmektedir.

İHA'nın uçabilmesi için, yerçekiminin ve kendi ağırlığının üstünde bir itiş yüküne sahip olması gerekir. Bu toplam itiş gücü değerini hesaplamak için motorların tam gazdaki kuvveti hesaba alınır. Burada önemli olan İHA ağırlığı ve yerçekimidir.

İHA'nın tüm bileşenlerinin birbiriyle uyumlu olması durumunda uçması mümkün olacaktır. Bu çalışmada İHA'nın tüm bileşenlerini taşıyacak olan gövdenin tasarımı TRIZ yaklaşımı ile ele alınmıştır.



Şekil 8.6. Gövde-kol ilk montaj 3B tasarımı

Şekil 8.6'da şekil değiştirebilen İHA gövdesinin kolları ile birlikte ilk montajı görülmektedir. İlk montajın malzemesi 6063 alüminyumdur. Şase ve kolların toplam ağırlığı 380 gr gelmektedir.

Problemin tanımı

Bu çalışma ile dört rotorlu İHA'ya yeni eklenecek görev olan şekil değiştirme için ortaya çıkabilecek problemler;

- Kolların hareket etmesinden dolayı pervanelerin birbirine çarpma tehlikesi,
- Kolların hareketi esnasında hızın değişimi,
- Kolların hareketi esnasında fazladan harcanacak olan enerji,
- Tasarımın imalat için uygunluğudur,

Yukarıda maddeler halinde verilen durumlar göz önünde bulundurarak, TRIZ' deki 39 adet Mühendislik Parametrelerinden problemlere uygun seçilen parametreler aşağıdadır.

'2' - Hareketli Cismin Uzunluğu
'9' - Hız
'12' - Şekil
'19' - Hareketli Cismin Harcadığı Enerji

Şekil değiştirme esnasında İHA kolu uzayacağından ve bir mafsal etrafında döneceğinden dolayı; "Hareketli Cismin Uzunluğu" tasarım için önemli parametredir. Ayrıca şekil

değiştirme esnasında “Hareketli Cismin Harcadığı Enerji”, buna bağlı olarak “Hız” sistem yapısını etkileyecektir. Bahsettiğimiz bu parametrelerin soncunda gövdenin “Şekil” durumu, tasarımı önem arz etmektedir. Bu parametreler birbirlerini olumlu yönde veya olumsuz yönde etkileyeceği matriste görülecektir.

Şekil değiştirme görevi için, kolların hareket etmesi, enerji tüketimini artıracağından; uçuş süresini azaltacaktır. Çelişkiler matrisinin sonucuna göre tasarımda ve malzeme cinsinde değişiklik yapılabilir.

Teknik çelişki

Önceden belirlediğimiz mühendislik parametreleri ışığında Çelişkiler Matrisi Çizelge 8.3’ deki gibi oluşturulmuştur.

Çizelge 8.3. TRIZ matrisi

		2	9	12	19
2	Hareketli Cismin Uzunluğu	+		13, 10, 29, 14	
9	Hız		+	35, 15, 18, 34	8, 15, 35, 38
12	Şekil	15, 10, 26, 3	35, 15, 34, 18	+	2, 6, 34, 14
19	Hareketli Cismin Harcadığı Enerji		8, 35, 35	12, 2, 29	+

TRIZ matrisi oluşturulurken, tasarım için iyiliştirmeye çalışılan parametreler yukarıdan aşağıya doğru sıralanmaktadır. Tasarımda iyileştirme yapılan parametrelerle teknik çelişki oluşturan parametreler sağdan sola doğru verilmiştir. İyileştirilmeye çalışılan parametre ile çakışan koyu renkle belirtilen hücrede yazan öneriler ile teknik çelişki ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır.

Çizelge 8.3’teki matriste; iyileştirmeye çalıştığımız özelliklere karşı olumsuz etkilenen özelliklere göre iki kısmın matriste kesiştiği kutucukta belirtilen yenilikçi fikir numaralarına bakarak tasarım geliştirilecektir.

İHA’nın havada iken şekli değişirken, İHA’nın hızı azalacaktır ve kolların hareket etmesinden dolayı harcanan enerji artacaktır.

Çizelge 8.4. Probleme ait çelişkiler matris çizelgesi

Gelişen Özellik	Kötüleşen Özellik	TRIZ Yenilikçi Prensipleri
12- Şekil	9-Hız 19-Hareketli Cismin Harcadığı Enerji	35 Parametre değişikliği 15 Dinamiklik 34 Atılan veya değiştirilen parçalar 18 Mekanik titreşim 2 Ayırma 6 Evrensellik 14 Yuvarlama

Çizelge 8.4'de iyileşen özellik olarak "Şekil" seçilmesine karşılık kötüleşen özellikler olarak "Hız" ve "Hareketli Cismin Harcadığı Enerji" seçildiğinde; Yenilikçi Prensip olarak 35 Parametre Değişikliği ile cismin fiziksel olarak değişimi gerekmektedir. Esas olan hal değişimi yapılmasıdır, ancak gövde malzemesinin hal değişimi mümkün olmadığından yoğunluk değişimi yapılabilir. Yoğunluk değişimi malzeme cinsi değiştirilerek sağlanabilir. Diğer prensip Dinamiklik için, dış çevreye uygun ve hareket için bölünebilir parçaların olduğu tasarım yapılması uygun olacaktır. Dış çevre için korozyon direnci olan malzeme kullanımı, hareket için de mafsallı yapılar tercih edilmelidir. Bir sonraki prensip "Atılan veya Değiştirilen Parçalar", bu prensip için aşınan veya dış ortamdan hızlı etkilenen motor pervanelerinin yıpranması durumunda değiştirilmesi ile uygulanabilir. Sonraki prensip "Mekanik Titreşim", İHA'nın kalkışında ve uçuş esnasında oluşan titreşimler, İHA'yı olumsuz etkileyeceğinden, pervane balans ayarlarının iyi yapılması gerekmektedir. Bir sonraki prensip Ayırma, İHA'nın çalışmasını olumsuz etkileyen parçaların kullanılmaması veya değiştirilmesi olarak yorumlanabilir. Evrensellik, aynı görevde olan birden fazla parça var ise eş olarak tasarım yapılabilir ve birbirlerinin yerine kullanılabilirliği içeren prensiptir. Evrensellik prensibinin tasarımda uygulanması için, dört adet hareket eden kollar ve bunları tahrik eden servo motorlar birbirlerinin yerine kullanılabilir. Son prensip Yuvarlama, köşeli tasarımlar yerine estetik ve dayanım için gövdenin genelinde yuvarlama işlemi yapılabilir. Tüm bu değişimler Çizelge 8.5' de verildi.

Çizelge 8.5. Kavramsal tasarım çizelgesi

Yenilikçi Prensipler	Tasarımdaki Yapılacak Değişimler
35 Parametre değişikliği	Fiziksel durumun değiştirilmesi için hareket eden kol malzemesi hafif malzemeden yapılabilir.
15 Dinamiklik	Dinamiklik için hareketli kolların ucunda bulunan pervanelerin hareket esnasında birbirine çarpmasını engellemek.
18 Mekanik titreşim	Şekil değiştirme esnasında kolların hareketinde oluşan titreşimin İHA hareketine etkisi.
6 Evrensellik	Dört adet motorun ve kolların gerektiğinde birbirleriyle yer değiştirmesi.
14 Yuvarlama	Tasarımda keskin köşe bırakılmaması ve yükün hafifletilmesi.

8.3. TRIZ Yaklaşımıyla Çözüm Önerileri

Çözüm 1

İyileştirmeye çalıştırdığımız "Şekil"'e karşılık çelişki oluşturan "Hız" için TRIZ'in öngörüsü "Parametre Değişikliği"'dir. Parametre değişikliği çözüm önerisinde esas olan hal (katı, sıvı ve gaz) değişimidir. İHA tasarımı için hal değişimi mümkün olmayacağından, yoğunluk veya özgül kütlede değişimler gerçekleştirilebilir. Parametre değişikliği için kol malzemesi hafifletilerek hızın iyileştirilmesi mümkün olmuştur. Ağırlıktan dolayı şase malzemesi yerine hareketli kolların malzemesinin daha hafif malzeme kullanımı ile kötüleşen özellik "Hız" için sonuç iyileşmiştir.

Çizelge 8.6. Malzeme gerilme ve yoğunluk değerleri

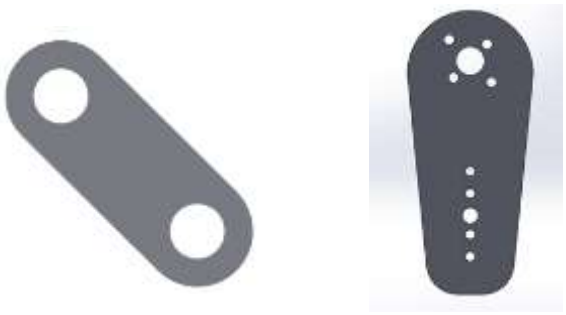
Malzeme	Gerilme Direnci (MPa)	Yoğunluk (g/cm^3)
Alüminyum	310	2.70
Karbon Fiber	1.367	1.75
ABS Plastik	45	1.05

Çizelge 8.6' da verilen değerlere bakıldığında, ağırlığı diğerlerine göre düşük olan malzeme ABS plastiktir. Dayanım açısından incelendiğinde karbon fiber ön plana çıkmaktadır. Ekonomik yönden bakılarak ABS plastik kullanılmıştır.

Çözüm 2

Şekil parametresi iyileşirken, kötüleşen parametre hareketli cismin harcadığı enerjidir. Harcanan enerji için matristeki öneri "yuvarlama" olduğunu görmekteyiz. Bu prensibe göre keskin köşeler yerine yuvarlanmış köşeler tercih edilmelidir. Yuvarlama işlemi ile dayanıklılık artar ve aerodinamik yapı iyileşir. Bu sayede harcanan enerji azalabilmektedir.

Şekil değiştirebilen dört rotorlu İHA'nın kollarının hareket etmesi için dört adet servo motor kullanıldığından toplam ağırlık artmıştır. İHA'ya eklenecek olan hareketli kollar, TRIZ Çelişkiler Matrisi sonucu "Yuvarlama" prensibinin çıkmasıyla Şekil 8,7'deki gibi tasarım dikdörtgen formdan biraz daha dairesel forma dönüşmüş ve malzeme olarak ABS plastik seçilmiştir. Bu sayede; kolların hareket etmesini sağlayacak olan motor montaj yerlerinin mukavemetli olması için mevcut genişliğin korunması, diğer yandan artan toplam ağırlık miktarının azaltılması ve hareket kabiliyetinin sağlanması için, kol tasarımı Şekil 8.7'deki gibi değiştirilmiştir.



a) **b)**

Şekil 8.7. İHA kolu a) İlk tasarım b) Son tasarım

TRIZ ışığında tasarımda yapılan değişikliklerle; fazla malzeme kullanımı, harcanan fazla enerji, azalmış ve imalat kolaylığı sağlanmıştır. TRIZ ile iyileştirmeler yapılırken, yeni çelişkiler ortaya çıkmaması için, çıkan sonuçların karmaşık hal almadan yalın halde uygulanması gerekmektedir. Yenilikçi fikirler, tasarımcının bakış açısına göre şekilleneceğinden, tasarımda sürekli iyileştirme yapılabilir.

Sonuç olarak; TRIZ, tasarımcının, tasarımın iyi ve kötü yönlerini belirleyip, bunu çelişkiler matrisinde yorumlayarak, çözüm yolu bulmasına ve tasarımı geliştirirken malzeme

çeşitliliğine başvurmasını sağlamaktadır. Bu yöntem ile Ar-Ge süreleri azalacak, tasarımın hatasız olmasından dolayı imalat süresi azalmıştır. Bunların sonucunda maliyet düşmüştür. TRIZ' in öngörüsü, tasarımcıyı kaliteli düşünmeye sevk ederek kaliteli ürünler üretilmesidir [48].

Unutulmaması gereken, TRIZ kendi kendine tasarım yapan veya iyileştirmeleri bir bütün halinde sunan bir metot değildir. Yöntemin işleyişi iyice anlaşılmalı ve devamlı olarak geliştirilmesi gerekmektedir.

Yapılan bu çalışmada; şekil değiştirebilen İHA'nın kollarının ABS plastik malzemeden yapılarak harcanan enerjinin azaltılması sağlanmıştır. Bu sayede İHA'nın uçuş süresi artacaktır. Ergonomik olarak, hareketli kolların yuvarlama prensibiyle uygun hale gelmiştir. Simetrik olarak tasarlanan malzemelerin, birbirlerinin yerine kullanılması sağlanmıştır. İHA'yı uçuş esnasında etkileyen hava akımı ve kolların hareket etmesinden dolayı yeni dinamikler oluşmuştur ve bunların titreşime neden olması beklenmektedir. Titreşimleri en aza indirmek için dönme hareketi yapan tüm parçaların balans ayarlarının yapılması gerekmektedir.



Şekil 8.8. İHA 3B model

Çizelge 8.7. Şase ve kol ağırlık karşılaştırması

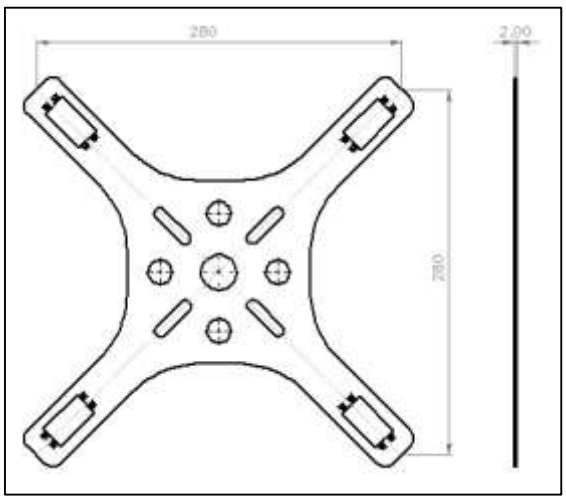
TASARIM	AĞIRLIK (g)
İlk şase+kol	450
Son şase+kol	272

Çizelge 8.7 ' de ilk ve son tasarımın şase+kol ağırlıkları verilmektedir. İlk tasarımda şase ve kol malzemesi alüminyum olarak tasarlandığından, toplam ağırlık 450gram olmuştur. TRIZ

metodu ile yapılan iyileştirmeler sonucunda kol tasarımı ve malzemesi değişmiştir. Bu değişimler ile toplam ağırlık 272 grama düşürülmüştür.

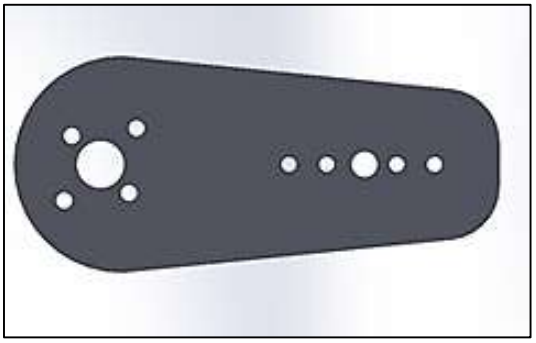
9. ŞEKİL DEĞİŞTİREBİLEN DÖRT ROTORLU İHA TASARIMI

Tasarım için 3 boyutlu tasarım programı olan Solidworks programı kullanılmıştır. Öncelikle şase tasarımı yapılmıştır. Şase tasarımı için "X" geometrisine sahip, dört rotorlu İHA modeli, özgün tasarım için kullanılmıştır. Şase, 2 mm kalınlığında 6063 alüminyum alaşımlı malzeme olarak seçilmiştir ve bu malzemeye göre şase tasarımı tamamlanmıştır. Yapısal analizde malzemenin dayanımına göre malzeme kalınlığı değiştirilebilecektir. Tasarım yapılırken servo motor bağlantı yerleri ve şaseye bağlanacak elektronik malzemelerin sabitlenmesi için simetrik boşluklar bırakılmış ve bu sayede şase ağırlığı azaltılmıştır. Şasenin Solidworks programı ile yapılan tasarımı ve ölçüleri Şekil 9.1'de verilmiştir.



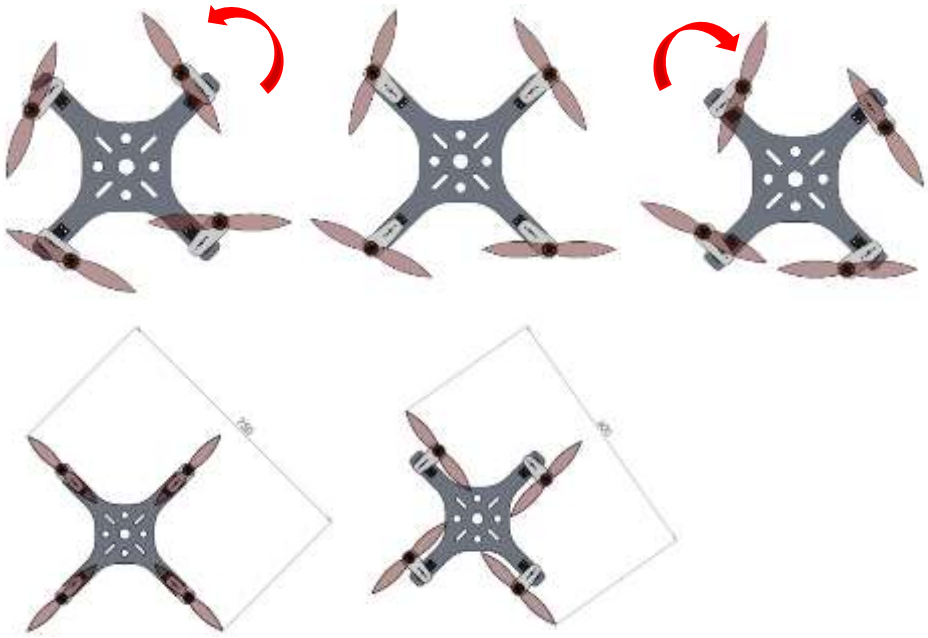
Şekil 9.1. Şase 3B tasarımı ve ölçüleri

Hareketli kolların tasarımı için servo motor ve İHA motorlarının bağlantı yerleri göz önünde bulundurularak yapılan tasarım Şekil 9.2'de verilmiştir.



Şekil 9.2. Hareketli kol 3B tasarım

TRIZ ışığında İHA şase ve kol tasarımları en son halini almıştır. Şekil 9.3’ de İHA’nın montaj görüntüsü ve hareketli kolların dönme hareketleri verilmiştir.



Şekil 9.3. İHA hareket kabiliyeti

10. ŞEKİL DEĞİŞTİREBİLEN DÖRT ROTORLU İHA'NIN YAPISAL ANALİZİ

Yapısal analiz, şekil değiştirebilen dört rotorlu İHA'nın, montajlı haline uygulanmıştır. Motor kaldırma kuvvetleri taşınan yükten fazla olması ve sistemin yaklaşık statik karakter sergilemesi dolayısıyla Ansys Static Structural modülünde atalet giderme (İng. inertia relief) yapılmıştır.

10.1. Malzeme mukavemet değerleri

Çizelge 10.1. Malzeme mukavemet değerleri

Malzeme	Akma Mukavemeti (Mpa) min-max	Çekme Mukavemeti (Mpa) min-max	Uzama (%50) min-max	Sertlik(Brinel) min-max
6063 Alüminyum	50	100	26	25
ABS	45	40	17	20

İHA'nın şase malzemesi 6063 Alüminyum, hareketli kolların malzemesi ABS plastik olarak belirlenmiştir. Çizelge 10.1.' de seçilen malzemelerin mukavemet değerleri verilmiştir.

10.2. Sınır Şartları ve Kuvvetler

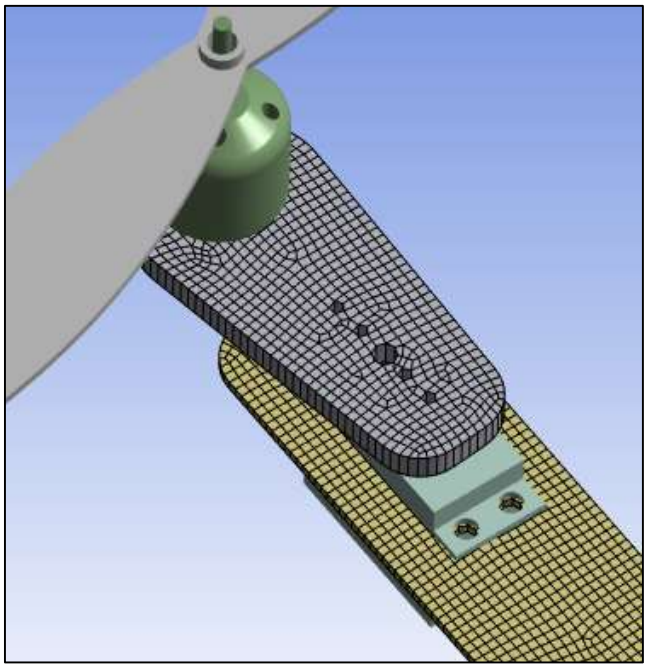
İHA'nın toplam ağırlığı: 1500g

Her bir motor itki kuvveti: 8.927N

Mesh yapısının genel görünümü Şekil 10,1'de verilmiştir.

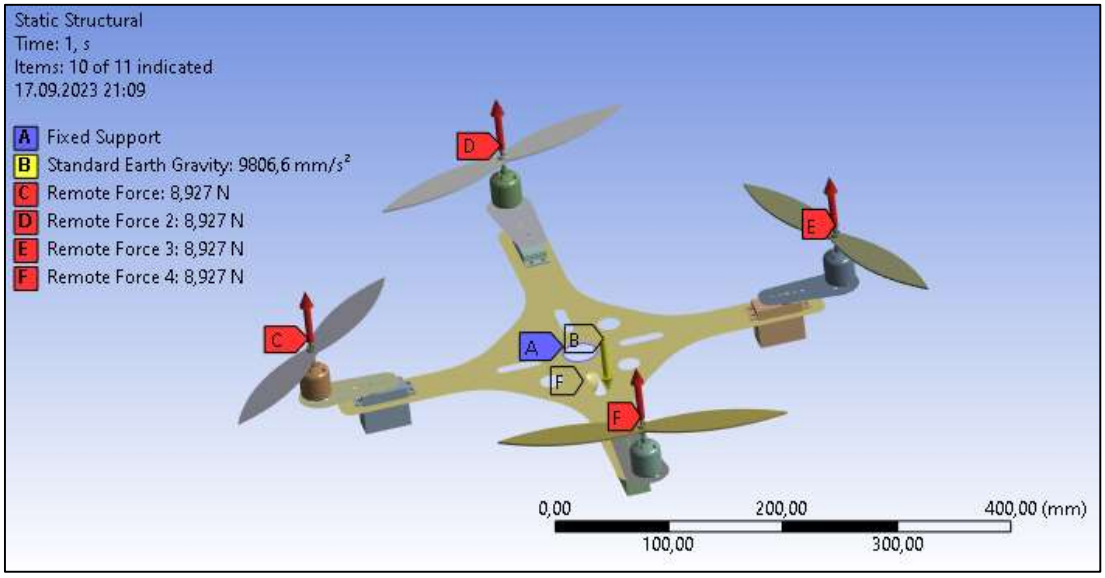


Şekil 10.1. Mesh görüntüsü



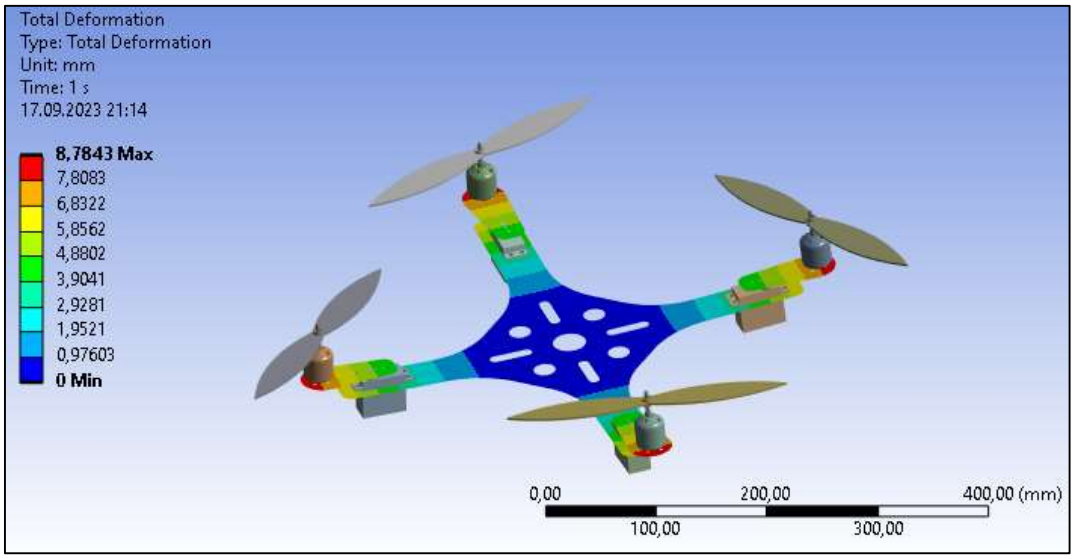
Şekil 10.2. Detay mesh görüntüsü

İHA gövdesinin ve hareketli kollara uygulanan mesh detayı Şekil10.2'de görülmektedir.



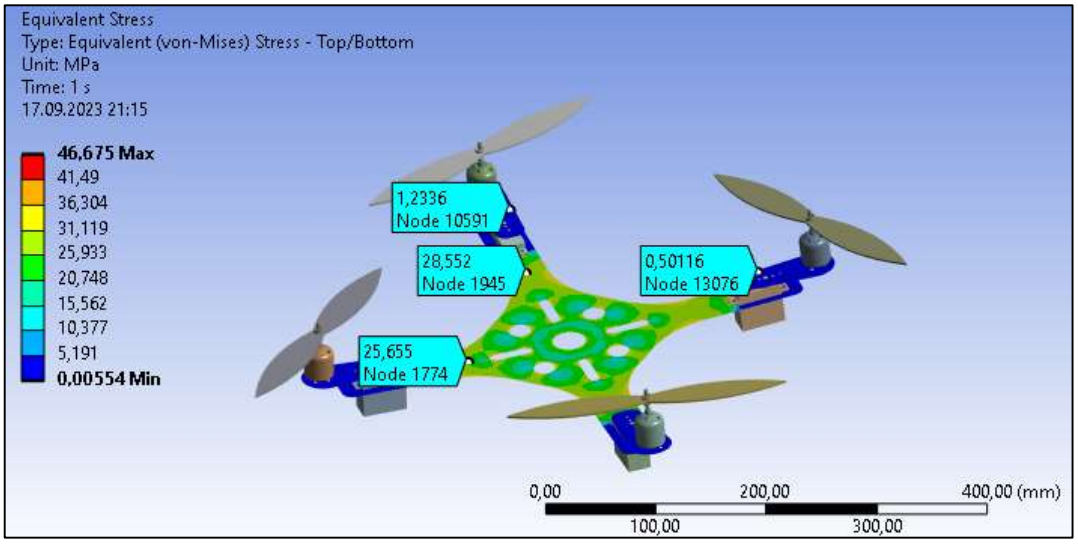
Şekil 10.3. Sınır koşulları

İHA gövdesi, A noktasından sabitlenip dört motordan yukarı yönlü 8.927N itki kuvveti uygulanması Şekil 10.3'de ifade edilmektedir.



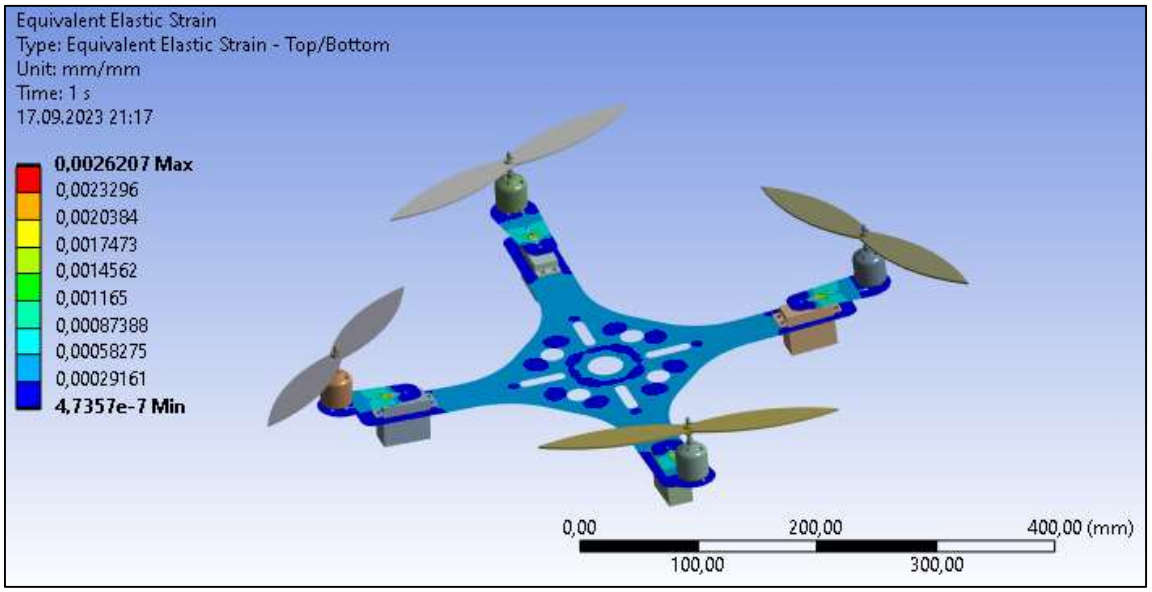
Şekil 10.4. Toplam Deformasyon

Toplam deformasyon değeri şekil 10.4'de verilmiştir. A noktasından sabitlenmiş kabul edilmesi nedeniyle hareketli kolların motor bağlantı kısımlarında toplam deformasyon değerinin en yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 10.5. Eşdeğer gerilme değerleri

Eşdeğer gerilme değeri Şekil 10.5'de görüldüğü üzere 46,675MPa'dır. Şase malzemesinin akma dayanımı 50MPa olduğundan, şase emniyetlidir. Bu sonuca göre şase, 1,5kg yükü kolaylıkla taşıyabilmektedir ve motorların itki gücüne de dayanabilmektedir.



Şekil 10.6. Eşdeğer gerinim değerleri

Analiz sonuçlarından görüldüğü üzere şase akma gerilmesi/gerinimini geçmemiş ayrıca kayda değer büyüklükte bir deformasyona uğramamıştır.

11. ŞEKİL DEĞİŞTİREBİLEN DÖRT ROTORLU İHA İMALATI

11.1. Bileşenlerin Seçimi

Tasarıma başlamadan önce belirlenen parametreler göz önünde bulundurularak, şekil değiştirebilen İHA'nın malzemeleri tedarik edilmiştir. İHA'nın toplam ağırlığı, motor eksenleri arası uzaklığı ve uçuş süresinin ne kadar olacağına göre, motor kapasitesi, pervane şekli ve boyutu, ESC modeli ve en son olarak pil kapasitesi belirlenmektedir. İHA'nın bütün verileri belirlendikten sonra marka ve maliyete göre malzeme seçimi yapılır.

Öncelikle toplam ağırlığa göre motor seçimi için 11.1.1 nolu formül uygulanır.

$$Fm = \frac{m_{toplam}.S.g}{4} \Longrightarrow Fm = \frac{1500.2.9,81}{4} = 7.357,5N \quad (11.1)$$

$F_{m:}$ Herbir motorun itki kuvveti
m_{toplam}: İHA toplam ağırlığı
S: Emniyet katsayısı
Bu sonuca göre bir motorun uygulaması gereken itki kuvveti, 7.358 N
Tezde kullanılan motorun, kaldırma gücü 910g olduğundan,

$$F_{kaldırma} = m_{motorkaldırma} * g = 910 * 9,81 = 8,927N \quad (11.2)$$

Her bir motor için itki kuvveti 7,358N hesaplanmıştı. Bu hesaplama, emniyet katsayısı 2 alınarak yapılmıştı. Motorun performans değerlerinden yola çıkarak yapılan hesaplamayla 8,927N sonucuna ulaşılmıştır. Görülüyor ki motor seçimi itki kuvvetini fazlasıyla karşılayacak şekildedir.

Motor gücü belli olduktan sonra seçilen motorun teknik verilerine göre uygun ESC seçimi yapılır.

Pervane Güç Hesabı

$$\dot{W} = W\sqrt{\frac{2.W}{\pi.\rho.d^2}} \quad (11.3)$$

W:Toplam İHA ağırlığı = m_{toplam} . g = 1500.9,81 =14.715N
d :İHA pervane çapı = 254mm = 0,254m
ρ : havanın yoğunluğu = 1,225kg/m^3

$$\dot{W} = 14.715\sqrt{\frac{2.14.715}{\pi.1.225.0{,}254^2}} = 160{,}244Watt \quad (11.4)$$

Bu değer 4 adet pervane için hesaplandığından bir pervanenin gücünü bulmak için bulunan değeri 4'e böleceğiz:

Pervanenin ürettiği güç:160,244 / 4 =40 Watt

Pil hesabı

ESC'ler ile uyumlu çalışacak ve motor kapasitesini besleyecek, aynı zamanda da 10dk uçuş süresini sağlayacak pil seçimi için aşağıdaki formül ile hesaplama yapılmıştır.

3 Hücreli 4.000mAh 3S 25C 11,1V Li-Po bataryanın hesaplamaları:

4.000mAh=4 Amper (pilin sağladığı amper değeri)

4 (A) x 60 (dk) = 240 (Adk) pilin 1 dakikada vereceği akımı bulunmuştur ancak, deşarj oranı %80 olduğundan dolayı, 240 x %80 = 192 A dk' ya göre hesaplama yapılmıştır.

Motor teknik özelliklerinde en yüksek akım değeri 10A olduğu yazmaktadır. 4 adet motorun en yüksek akım değeri 10 x 4 = 40 A'dir.

$$Uçuş\ Süresı = \frac{pilin\ 1dkda\ verebildiği\ akım}{motorların\ talep\ ettiği\ akım} = \frac{192}{40} = 4{,}8dk \quad (11.5)$$

Bulunan bu değer İHA'nın, tam gazda ve en yüksek rakımda 4,8dk uçuş yapabileceğini göstermektedir. İdeal kalkış ve düşük irtifada uçuş süresi 10dk olacaktır.

ESC, motorlar ve pilin teknik özelliklerine uygun uçuş kontrol kartı seçilir. Ardından, uçuş kontrol kartı üzerindeki alıcı ile uyumlu kumanda seçilir. Şekil değiştirebilen İHA'nın kol

hareketini sağlayacak motorların kumandadan kontrolü için 6 kanallı kumanda tercih edilmiştir.

11.2. Kolların Hareketi için Kullanılacak Motor Tipi Seçimi

Step motorlar, servo motorlara göre düşük maliyetlidir ve düşük tork seçenekleri sunarlar. Step motorların, açık döngü hareket kontrolü bulunmaktadır. Bu motorların, kablolama maliyetleri düşüktür, montajı ve işletimi basittir.

Tasarımlarda step veya servo motor kullanımı, uygulama alanına göre belirlenir. Step motorlar genellikle, ek hızlanma ve yavaşlama için tercih edilir. Bunun aksine servo motorlar genellikle uygulamanın spesifik hızlarına ve torklarına, maksimum aralıklı hızlanması/yavaşlaması için seçilmektedir.

Yüksek verim, yüksek hız ve yüksek bant genişliği ve eksenler arasında yüksek hız için servo motorlar tercih edilmektedir. Noktadan noktaya konum performansı ve hız gereksinimleri orta düzeydeyse, step motorlar daha iyi bir çözüm olabilir. Ayrıca, yükün düşük olması halinde, step motorun pozisyonu tutma becerisi daha iyidir. Step motorların, İlk kurulum maliyetleri düşüktür, kolay bir şekilde sürülebilmektedir.

Servo motorlarının step motor sistemlerine göre bazı avantajları vardır. Servo motorlar geniş bir hız aralığında yüksek tork oluşturabilir ve daha geniş tork aralıklarında ve daha yüksek gerilimlerde kullanılabilirler. Boyutsal olarak kompakt bir yapıları vardır.

Step motor çalışmadığı durumda da enerji kullanır ve aşırı yük olmadıkça herhangi bir hareket olmaz.

Servo motor ise, etkin olduğunda, sürekli kapalı döngü hata düzeltmesi nedeniyle hiçbir zaman hareketsiz kalmaz, bu düzeltme sırasında yalnızca komut verilen konumda kalmak için gereken enerjiyi kullanır. Sürekli geri-ileri hareketine "salınım" adı verilir. Salınım hareketi gözle görülmeyecek kadar küçüktür ancak birden fazla servo motorun konumlarını sabit tutmak için yaptıkları bu salınım hareketi, toplamda bir mekanik titreşim hareketine dönüşebilir.

Çizelge 11.1. Servo motor ile step motor karşılaştırılması

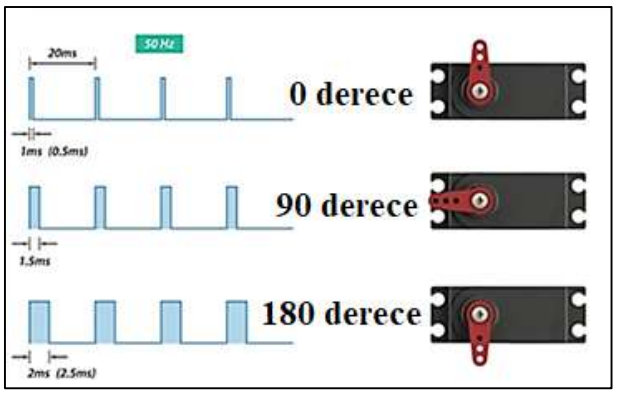
UYGULAMA	STEP MOTOR	SERVO MOTOR
En Yüksek Tork Yoğunluğu	✔	
En Geniş Tork ve Hız Aralığı		✔
Yüksek Voltaj(400-480+ Volt)		✔
Noktadan Noktaya (basit / yalın)	✔	✔
En Yüksek Hızlanma / Yavaşlama		✔
"Salınım" Olmadan Konumu Tutma	✔	
Kilit Torku	✔	
Bozulmalara / Komutlara Karşı Hızlı Düzeltmeler		✔
Kullanılabilir Pik Tork > Sürekli Kapasite		✔
En Yüksek Çözünürlük		✔
En Yüksek Giriş Voltajı Aralığı		✔
En Basit Entegrasyon	✔	
Sabit Yükler için İdeal	✔	
En Yüksek Ürün Verimi		✔

Servo motorlarda, enkoder bulunmaktadır. Bu sayede motor milinin konumu ölçülür. Servo motorlarda üç adet bağlantı kablosu vardır. İki kablo motoru çalıştırırken diğer kablo ise kontrol sistemine motor şaftının konumunu bildirir. Servo motorların en temel özelliği, motorun açısal olarak hareket etmesi için elektronik bir devreyi üzerlerinde barındırmasıdır. Bu devre sayesinde titreşimin düşük olması ile hassas olarak çalışırlar. Ayrıca bu devre ile moment gücünün yüksek olması da sağlanır. Servo motorun miline bağlı bir encoder (kodlayıcı) vardır. Bu encoder servo motorun dönüş yönünü, hızını ve dönüş açısını sürekli kontrol etmek için Servo sürücüsüne sinyal gönderir, sürücüye gelen sinyallere göre Servo motora komut verir ve geri besleme sinyali ile kontrol edilir. Normal Servo motorlar 0 ile 180 ve 0 ile 360 derece arasında açısal hareketleri kontrol eder. Bu çalışmada, 180^{o} hareket eden servo motorlar kullanılmıştır.

DC Servo motorun, çıkış dişlisinin mili mekanik olarak kısıtlaması sebebiyle daha büyük bir açı ile hareket ettirilemez.

Motora yazılımsal olarak dönme miktarı PWM sinyali ile belirlenir. PWM modülü, kare dalgalardan oluşur.

Kare dalga “1”konumunda iken motora güç gider. “0” konumuna geldiğinde ise motora güç gitmez. Servo motorlarda açısal hareketin gerçekleşmesi için bir kare dalga 20 ms’ den oluşan puls şeklinde gönderilmesi gerekir, aksi takdirde çalışmaz. PWM sinyali 1 ms süreyle “1” konumunda kaldığında Servo “0” dereceye gelir, 2 ms “1” konumunda kaldığında Servo 180 dereceye gelir. Periyodu tamamlayana kadar “0” konumunda kalır.



Şekil 11.1. Servo motor çalışma prensibi

Servo motorun sürülmesi

Servo motorlar 180^{o} derece, 270^{o} derece ve 360^{o} derece olarak ayrılmaktadır. Çalışma voltajı aralığı ise genellikle 4.8V ile 6V arasındadır servo motorları kontrol etmek için harici bir motor sürücüye ihtiyaç duyulmamaktadır. Servo motorların eş zamanlı sürülmesi ve sinyallere tepki vermeleri denge açısından olmazsa olmazdır. Uçuş kontrol kartındaki jiroskop, servoların eş zamanlı tepkilerine göre dengeyi sağlayabilecektir. Bu dengeyi sağlama işlemi sadece buradaki toleransla alakalı olmamakla birlikte aslında birçok duruma bağlıdır.

- Kullanılan ekipmanların imal edilirken olan hata toleransları,
- Montaj uygulamasında, montaj ekipmanlarından kaynaklanan sapmalar,
- Şasenin ve kolların imal edilirken olan hata toleransları,
- Jumper, lehim vb. elektronik ara bağlantıların hata toleransları,
- Servolardaki dişlilerin, diş boşlukları,

- ESC bağlantılarındaki hata toleransları,
- Kumanda bağlantısının tepki süresi,

Tolere edilmesi gereken bu durumlar, dengeyi bozan unsurlardan bazılarıdır. Bu durumların hepsinin üstüne 4 uzuvun eş zamanlı hareket ettirilmesi, jiroskopun üzerindeki yükü arttırmaktadır. Bu yüzden servoların eş zamanlı halde sürülmesi zorunludur. Bu tezin en önemli unsurlarından bir tanesi servoların eş zamanlı sürülmesi ve motorların güç kaybetmeden çalışmasıdır. Servoları sürerken hem yazılımsal olarak, hem de ağır çekim ile eş zamanlı hareketi test edilmiştir. Yazılımsal olarak, 4 adet servo da kalibre edilmiş, 0, 90, 180 derecedeki noktaları eşitlenmiştir. Daha sonrasında, 240 fps ile çekilen ağır çekim videolarında eş hareket yakalanmıştır ve çift taraflı doğrulama yapılmıştır.

Ayrıca bu kalibrasyonun zamana, çevresel koşullara ve yıpranmayla bozulabileceği düşüncesi ile, mekanik bir kalibrasyon aparatının yapılması gerekmektedir.

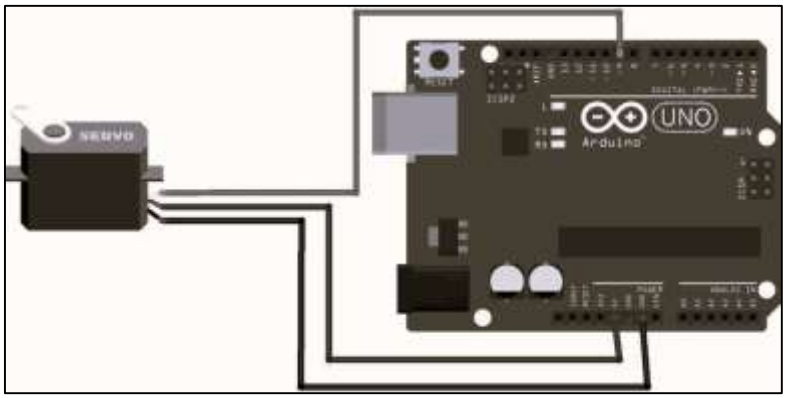
Tez konusu için iki farklı servo motor seçilmiştir. Arduino ile sürülerek testleri yapılan servo motorlardan SG5010 hassas konumlandırılmıştır. Test sonucu senkronize hareket sağlanmıştır. Şekil değiştirme hareketi için SG5010 Servo motorlar İHA gövdesine montajı gerçekleştirilmiştir.



Büyüklük:	40,1 x 20,3 x 43,2 mm
Ağırlık:	38 g
Hız @4.8V:	0.14 sn/60°
Zorlanma Torku @4.8V:	8 kg•cm
Zorlanma Torku @6V:	11 kg•cm

Şekil 11.2. Servo motor özellikleri

Arduino Uno kart ile dört adet servo motor senkronize halde sürülmesi gerçekleştirilmiştir. Dört adet servo motorun senkronize çalıştığı ağır çekim video kaydı ile doğrulaması yapılmıştır.



Şekil 11.3. Servo motorun arduino ile bağlantı şeması

drone-final | Arduino IDE 2.0.3

File Edit Sketch Tools Help

Select Board

drone-final.ino

```
#include <Servo.h>

#define inpin 9
#define outpin 10

long reactionTime = 2000;
long startTime,currTime;
int rcval,pos,target,delta,lastpos = 0;
Servo servo;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(inpin,INPUT);
  pinMode(outpin,OUTPUT);
  servo.attach(outpin);
}

void loop() {
  rcval = pulseIn(inpin, HIGH);

  if (rcval < 1250) target = 0;
  else if (rcval < 1750) target = 90;
  else if (rcval < 2250) target = 180;

  delta = abs(target - pos);
  delta = min(delta , 14 );
  pos = pos + (target > pos ? 1 : -1) * delta;
  servo.write(pos);
  Serial.print("pos: ");
  Serial.println(pos);

  delay(333);
}
```

Şekil 11.4. Arduino kod ekranı

Şekil 11.4'de dört adet servo motoru senkronize harekete ait Arduino kod sayfasının ekran görüntüsüdür.

Çizelge 11.2'de çalışmada kullanılan malzemelerinin teknik özellikleri ayrıntılı olarak verilmiştir.

Çizelge 11.2. İHA malzemeleri teknik özellik tablosu

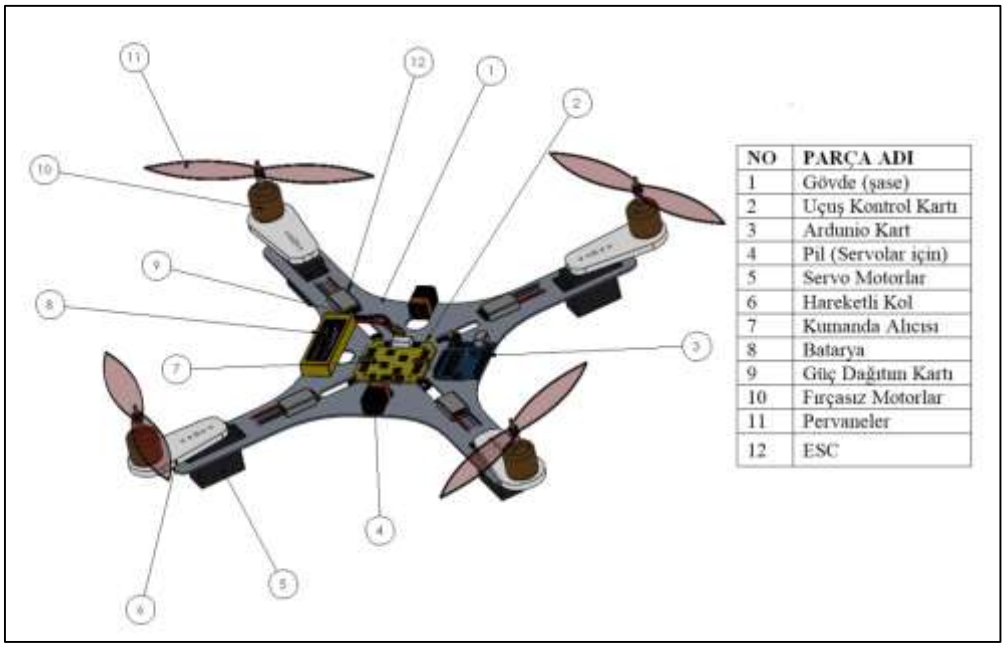
Malzeme Adı	Teknik Özellikleri
Flysky FS-İ6 2.4GHz 6 Kanal Kumanda	Kanallar: 6 Kanal Model Tipi: Planör / Helikopter / Uçak RF Aralığı: 2.40-2.48GHz / Bant Genişliği: 500KHz Bant: 142 RF Güç: 20dBm 4ghz'den Az Sistem: AFHDS 2A ve AFHDS Kod Türü: GFSK Hassasiyet: 1024 Düşük Voltaj Uyarısı: 4.2V'den az DSC Bağlantı Noktası: PS2; Çıkış: PPM Şarj Cihazı Bağlantı Noktası: Yok ANT uzunluğu: 26mm * 2 (çift anten) Ağırlık: 392g Güç: 6V 1.5AA * 4 Görüntü modu: Transflektif STN pozitif tip, 128 * 64 nokta matris / VA73 * 39mm, beyaz arka ışık. Boyut: 174x89x190mm Çevrimiçi güncelleme: evet Sertifika: CE0678, FCC
FS-İA6 Kumanda Alıcısı	Çalışma voltajı: 4 - 6V DC Anten uzunluğu: 26mm Boyut: 40x21x7mm Ağırlık: 6.4g Gücü: 20dBm
İHA Gövdesi (Frame)	Alüminyum malzemeden üretilmiştir. Ağırlığı:200g
Hareketli Kollar	ABS malzemden üretilmiştir. Ağırlığı: 4x17=72g
KK2 Ekranlı Uçuş Kontrol Kartı	Giriş Voltajı (V): 4,8V-6,0V Sensörler: 6050 MCU İşlemci: Atmel 644PA Boyutlar: 52 x 52 x 12 mm Ağırlık : 22 gr
A2212 1400KV Brushless (Fırçasız) Motor	Giriş Gerilimi: 2-3 Li-Po, Ion Batarya Maksimum: 12.6V Maksimum Verim: %80 Maksimum Verim Akımı: 4-10A Akım Kapasitesi: 12A/60s Hücre Sayısı: 2-3 Boyutlar: 27.8x27 mm Şaft Kalınlığı: 3.17 mm Ağırlığı:52g
Skywalker 20A ESC - Fırçasız Motor Sürücü Modülü	Giriş Gerilimi: 2-3S Lipo, 5~9 hücre NiMH BEC: 2A / 5V lineer mod BEC Gaz Kolu Sinyali Yenileme Hızı: 50Hz~432Hz Max Hız: 2 Kutuplu BLM için 210000 Rpm, 6 Kutuplu BLM için 70000 Rpm, 12 Kutuplu BLM için 35000 Rpm (BLM=BrushLess Motor, Fırçasız Motor) Ebatları: 42*25*8 mm Ağırlık: 19 gr

Çizelge 11.2. (devam) İHA malzemeleri teknik özellik tablosu

10x4.5 1045 Prop Pervane CW - CCW	Uzunluk: 254 mm Ağırlık: 10.5 gr/adet Açıklık: 5 mm
T-PLUG Lipo Pil Konnektörü	soket çapı 3.5 mm
11.1v 4000 mAH Lipo Pil	Voltaj: 11,1V Kapasite: 4000mAh 25C Ağırlık: 291,5 gr Boyutları: 136x43x25mm 3 Hücreli
Arduino Uno	Mikrodenetleyici: ATmega328 Çalışma Gerilimi: 5V Flash Hafıza: 32 KB EEPROM: 1 KB (ATmega328) Saat Hızı: 16 MHz Uzunluk: 68.6 mm Genişlik: 53.4 mm Ağırlık: 25 g
SG-5010 Servo Motor	Hareket Hızı: 0.14sn - 60o 4.8V Zorlanma Torku: 8 kg/cm 6V Zorlanma Torku: 11kg/cm Ağırlık: 40gr Ölçüler: 40.1 x 20.3 x 43.2 mm
Pil (Servolar için)	Kapasite: 9 Volt Ağırlık: 45g



Şekil 11.5. Şekil değiştirebilen İHA malzemeleri



NO	PARÇA ADI
1	Gövde (şase)
2	Uçuş Kontrol Kartı
3	Ardunio Kart
4	Pil (Servolar için)
5	Servo Motorlar
6	Hareketli Kol
7	Kumanda Alıcısı
8	Batarya
9	Güç Dağıtım Kartı
10	Fırçasız Motorlar
11	Pervaneler
12	ESC

Şekil 11.6. Şekil değiştirebilen İHA montaj resmi

Çizelge 11.3. İHA malzeme ağırlıkları

BİLEŞENLER	AĞIRLIĞI(g)	ADET	T. AĞIRLIK (g)
Gövde (şase)	200	1	200
Hareketli Kol	17	4	72
Fırçasız Motorlar	52	4	208
Servo Motorlar	40	4	160
Pervaneler	10,5	4	42
Batarya	291,5	1	291,5
Pil (Servolar için)	45	2	90
ESC	19	4	76
Kumanda Alıcısı	6,4	1	6,4
Uçuş Kontrol Kartı	22	1	22
Güç Dağıtım Kartı	11	1	11
Ardunio Kart	37	1	37
Kablolar ve Klipsler	100	-	100
TOPLAM AĞIRLIK			1.316

Şekil değiştirebilen İHA'da kullanılan tüm malzemlerin ağırlıkları Çizelge 11.3'te verilmiştir. Şekil değiştirebilen İHA toplamda 1.500g taşıyacak şekilde tasarlanmıştır. Çizelge 11.3'te toplam ağırlığın 1.316g olduğu görülmektedir. Tasarım ağırlığından, toplam

ağırlığı çıkartıldığında 1.500 – 1.316 = 184g faydalı yük taşıyacağı görülmüştür.

Çizelge 11.4. İmalat aşamaları tablosu

İmalat Aşamaları			
Bölüm	No	İşlem Maddeleri	Araç
Tasarım	1	3D Cad Tasarımının Yapılması	Solidworks
Tedarik	2	İhtiyaçların Belirlenmesi	
	3	Teçhizatların Tedariği	
	4	Parçaların Tedariği	
	5	Temel montajların yapılması	
İmalat	6	Yardımcı parçaların üretimi	3 boyutlu yazıcı
	7	Aluminyum şase üretimi	Lazer Kesim
	8	Kablo bağlantıların lehimlenmesi	Havya+lehim
Montaj	9	Batarya Sisteminin entegresi	
	10	Servo Montajları ve montaj üzerinde servoların testleri	
Yazılım	11	Yazılımın oluşturulması (Servo)	Ardunio
	12	Yazılımın test süreçleri	Ardunio
Elektronik	13	Kablo bağlantılarının toparlanması	
	14	Kumanda kanal bağlantılarının eşleştirilmesi	
	15	Uçuş kontrol kartının bağlantısının yapılması, kalibrasyon ve optimizasyonunun yapılması	
İmalat	16	Şase ve kol malzemelerinin montajı için gerekli olan kılavuz deliklerinin açılması ve diş çekilmesi	Şarjlı Matkap
Test	17	Mikrodenetleyici bağlantılarının yapılması ve kontrol-güç testleri.	
	18	Şekil Değiştirme Testleri Test düzeneği testleri Uçuş testleri	

Malzeme seçimleri ve tedariki tamamlandıktan sonra, alüminyum şaşe malzemesi, yapılan tasarıma göre lazer tezgâhında kestirilmiştir. Bu şase üzerinde servoları monte edebilecek servo yuvaları ve civata delikleri açılmıştır. Servoların sıkı geçme ve esnememesi için 0,1 mm pay bırakılmıştır. Bu payın kesim ve çevresel faktörlerden kaynaklanan sorunları için, zımpara ile servo motor bağlantı yerleri alıştırılmıştır. Aynı zımpara ile alüminyumun kesiminden kaynaklı, eli kesebilecek pürüzlü yüzeyler tesviye edilmiştir. Servolar 4 adet cıvata somun çifti ile sabitlenmiştir. Servoların tahrik milinin yıldız bağlantısına 3 adet ve 3B yazıcı ile üretilen hareketli kola da, delikler açılmıştır. Bu 3 delik cıvata somunla sabitlendi, ayrıca servo tahrik mil yuvasının metal diş açılan modelinden tedarik edilerek tüm cıvata bağlantılarının dayanımı artırılmıştır. DC motor millerinin kanat bağlantıları 2 adet kontra somun ile sıkılarak sağlamlaştırılmıştır. Kanat arası bağlantılar 3B yazıcıdan

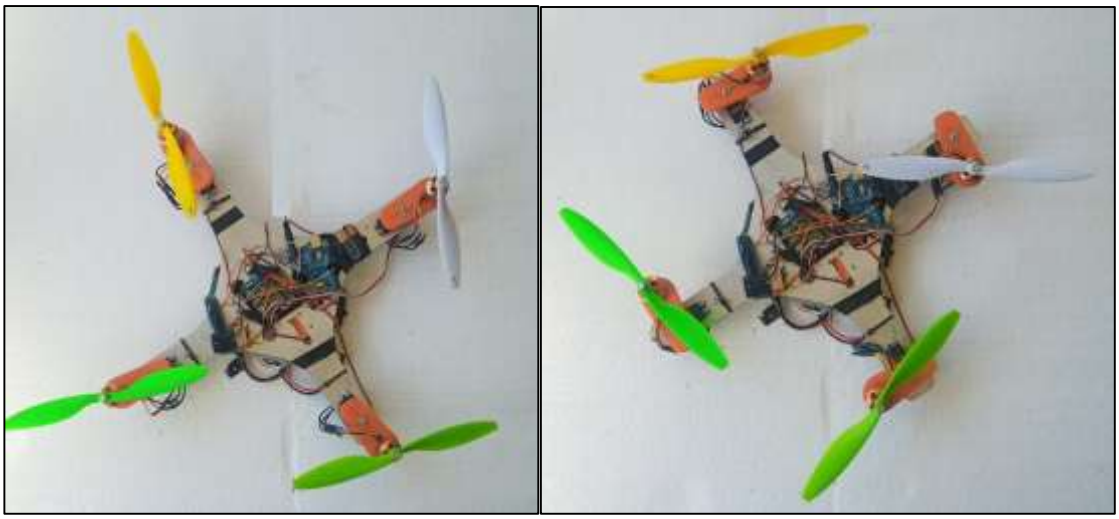
%60 dolu olarak yüksek mukavemetli üretilmiştir. Delikleri toleranslara uygun olarak delinip diş açılmıştır. Diş açma işlemi, cıvatayı plastik malzemeye alıştırarak gerçekleştirilmiştir.

Cam elyaf devre üzerine ESC'ler, devre kartı üzerine lipo pil bağlantı kabloları, bu kabloların diğer ucuna xt 90 konnektör lehimlenmiştir. Lipo pilin bağlantı kablolarına (+,-) da aynı şekilde xt 90 konektör lehimlenerek dişi erkek bağlantı prizi oluşturulmuştur. Bu sayede lipoyu şarj ettikten sonra bağlaması ve şarj etmek için çıkarması daha kolaylaşmıştır.

12. TESTLERİNİN YAPILMASI ve DEĞERLENDİRİLMESİ

Elektronik ve mekanik montajların tamamlanmasından sonra, kumanda ile uçuş kontrol kartının eşleştirmesi yapılarak, kumanda düğmelerinin ayarlanması gerçekleştirilmiştir. Motorların yönlerinin doğrulanması için pervaneler montaj edilmeden, yön testleri tamamlanmıştır. İç ortamda pervaneler takılmadan servo motorların hareketleri gözlemlenmiş ve şekil değiştirme işlevinin tam olarak yapıldığından emin olunulmuştur.

Ağırlığı ve imalat maliyetini azaltmak için aynı görevi aynı performansla gösterdiği gözlenen Arduino Uno Kart, testler sonrasında Arduino Mega Kart'ın yerine monte edilmiştir.



Şekil 12.1. Şekil değiştirme (düz ve kapalı)

Şekil değiştirebilen İHA dış ortamda metal ayak ile yere sabitlenmiştir. Pervane montajı yapılmış ve motorlar çalıştırılmıştır. İHA tam gaz testi yapılmıştır. Daha sonra servo motorlara güç verilerek şekil değiştirme işlevi pervaneler dönerken gerçekleştirilmiştir. Şekil 12.2'de sabit ayak üzerinde yapılan test gösterilmiştir.



Şekil 12.2. Sabit ayak üzerinde test

Yapılan testler ile motorların ve servo motorların çalıştığı, şekil değiştirme işlevinin gerçekleştiği ve bu esnada pervaneleri birbirine çarpmadığı, İHA'nın dengede kaldığı görülmüştür.

İç ortamda pervanesiz, dış ortamda sabit test düzeneği üzerinde yapılan testlerden sonra, mekanik ve yazılım olarak herhangi bir eksik olmadığı doğrulanmış ve uçuş testlerine geçilmiştir. Öncelikle yarım gaz ile şekil değiştirebilen İHA yerden 40 cm yükseldiği gözlemlenmiştir. 40 cm olan irtifada istikrarlı olarak havada kalma testi yapılmıştır. Daha sonra şekil değiştirme işlevi gerçekleştirilerek havada sabit kalma testi yinelenmiştir. Son test olarak tam gazda şekil değiştirebilen İHA, yüksek irtifadaki durumu test edilmiştir. Tam gazdaki istikrarı gözlemlenmiştir ve uçuş testi sonlandırılmıştır.



Şekil 12.3. Uçuş testleri

13. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

TRIZ, tasarımcının zaman kaybını en aza indirir ve tasarımcıya tasarımın iyileşen yönlerine karşı kötüleşen yönlerini de göstererek, tasarım esnasında önlem alınması gereken noktalara dikkat çeken, sistematik bir metottur. Bu yöntem için öncelikle, tasarımın hangi yönlerini geliştirmek istediğimiz belirtilmeli ve çıkan sonuçlara göre değişiklikler yapılmalıdır. Tasarımda iyileştirme süreklilik arz edeceğinden, tasarımcının bakış açısına ve tecrübesine göre iyileştirmeler devam edebilecektir. TRIZ yöntemi, bu çalışmada, şasenin ve hareketli kolların tasarımında kullanılmıştır. Bu yöntem ile şekil değiştirebilen dört rotorlu İHA'nın toplam ağırlığı, kol malzemesinin ABS plastik ile değiştirilmesiyle azaltılmıştır. İlk tasarımda tüm parçalar alüminyum olarak tasarlandığından, şase ve kol ağırlıkları toplamı 450 gram olmuştur. TRIZ yönteminin uygulanmasından sonra hareketli kol malzemesinin tasarımı ve malzemesi değiştirilerek, şase ve kol toplam ağırlığı 272 grama düşürülmüştür. Toplam ağırlığın azalmasıyla, uçuş süresi artmıştır. Hareketli kolların tasarımı değişmiş ve daha ergonomik bir yapı sağlanmıştır. Simetrik parçalar, birbirlerinin yerine kullanılması için uyumlu hale getirilmiştir. Şekil değiştirebilen dört rotorlu İHA'nın, uçuş esnasında oluşabilecek titreşimlere karşı tüm dönen parçaların balans ayarları yapılmıştır.

Şekil değiştirebilen İHA, farklı geometrilere dönüşmesiyle, her şekil için ayrı bir akademik çalışma yapılacağı öngörülmektedir. Bu çalışmalarda, akışkanlar analizi yapılarak, hava şartlarına en uygun geometri belirlenebilecektir. TRIZ yöntemi şekil değiştirebilen İHA için farklı çelişkiler matrisi oluşturularak daha farklı tasarımlar yapılabilecektir. Şekil değiştirebilen İHA üzerinde aerodinamik ve ergonomi alanlarında çalışmalar yapılacağı düşünülmektedir. Şekil değiştirme işlevi arduino ile sürülen, +90 ve -90 derece arasında yapılan, 180^{o} hareket eden kollar ile sağlanmıştır. Bu yazılım geliştirilerek ve kumanda üzerinde boş olan tuşlarla eşleştirme yapılarak farklı şekil değiştirme pozisyonlarını üretmek mümkün olacaktır. İleri teknoloji bir uçuş kartı kullanımı ile uçuş kontrol yazılımında değişikliler yapılabilir ve şekil değiştirme esnasında rotorlara farklı güç dağılımı uygulanarak, şekil değiştirebilen İHA daha kararlı hale getirilebilir. Gelişen teknoloji ile şekil değiştirebilen İHA'ya eklenecek sensörler ile otonom sürüş kabiliyeti kazandırılabilir ve sahadaki operasyonel zorluklar aşılabilir. Otonom sürüş ile işbirlikçi sürüler oluşturularak, verilen birden fazla görev eş zamanlı yapılabileceği düşünülmektedir.

Tez çalışmasının sonunda aşağıdaki çıkarımlar elde edilmiştir:

- Şekil değiştirme işlemi ile kollar 90 derece döndüğünde, İHA ilk haline göre %20 boyutsal olarak küçülmüştür.
- İHA'nın hava koşullarına karşı dirençli olması buna karşın da hafif olması için farklı malzemelerin İHA üretiminde kullanılması gerektiği belirlenmiştir. Farklı malzemeler kullanılarak kaza-kırım oranı düşürülebileceği düşünülmektedir.
- İHA uçuş kartı yazılımlarının geliştirilerek, şekil değiştirme hareketinin daha istikrarlı hale getirilmesi gerekmektedir.
- Planlanan İHA toplam ağırlığı 1.5 kg'dır ve hedefine ulaşılmıştır. 184gr faydalı yük taşıma kapasitesi ortaya çıkmıştır.
- Yapılan statik analizlerde şasenin ve kolların dayanımın akma sınırının altında olmasından dolayı, faydalı yükün artırma imkânı sağlamaktadır. Ayrıca mukavemet değerlerinin sınırlar içinde olması sebebiyle pil kapasitesi artırılabilir ve bu sayede uçuş süresi 10dk'nın üstüne yükseltilebilir.
- Bundan sonraki akademik çalışmalarda karbon fiber şase malzemesi seçilerek, faydalı yük miktarı ve uçuş süresi artırılabilir, ayrıca alüminyum ve karbon fiber şaselerin statik analiz sonuçları karşılaştırılabilir.
- İleride yapılacak akademik çalışmalarda Şekil değiştirebilen dört rotorlu İHA'nın hareketli kolları mevcuttan daha uzun yapılarak, boyutsal küçülme oranı artırılabilir ve statik analizler ve uçuş testleri karşılaştırılabilir.

KAYNAKLAR

1. İnternet: Nicola Tesla'nın ilk askeri insansız hava aracı." URL: https://avdesoİHAe.com/İHAlarin-ve-model-ucaklarin-tarihi/ Son Erişim Tarihi: 30.08.2023.

2. Sifton, J. (2012). A brief history of drones. *The Nation,* 7, 325-35.

3. Sullivan, J.M. (2005). *Revolution or evolution? the rise of the UAVs",* IEEE, Los Angeles, 43-49.

4. Chiu, C. C., ve Lo, C. T. (2011). Vision-only automatic flight control for small UAVs. IEEE *Transactions on Vehicular Technology,* 60(6), 2425-2437.

5. Karaağaç, C. (2014). Civil and commercial UAV applications in the 21st century. *Journal of National Security and Military Sciences*, 1, (3), 181-211.

6. Radmanesh, M., Nematollahi, O., Nili-Ahmadabadi, M., Hassanalian, M. (2014). A novel strategy for designing and manufacturing a fixed wing MAV for the purpose of increasing maneuverability and stability in longitudinal axis. *Journal of Applied Fluid Mechanics,* 7(3), 435-446.

7. Stokkermans, T., Veldhuis, L., Soemarwoto, B., Fukari, R., Eglin, P. (2020). Breakdown of aerodynamic interactions for the lateral rotors on a compound helicopter. *Aerospace Science and Technology*, 101, 105845.

8. Pounds, P., Mahony, R., Corke, P. (2006). *Modelling and control of a quad-rotor robot.* Australian Robotics and Automation Association (ARAA), Auckland, 1-10.

9. Hassanalian, M., Throneberry, G., Abdelkefi, A. (2017). Wing shape and dynamic twist design of bio-inspired nano air vehicles for forward flight purposes. *Aerospace Science and Technology*, 68, 518-529.

10. Sinha, P., Esden-Tempski, P., Forrette, C. A., Gibboney, J. K., Horn, G. M. (2012, March). *Versatile, modular, extensible vtol aerial platform with autonomous flight mode transitions*. In 2012 IEEE aerospace conference, Big Sky, 1-17.

11. Tanaka, S., Asignacion, A., Nakata, T., Suzuki, S., Liu, H. (2022). Review of biomimetic approaches for drones. *Drones*, 6(11), 320.

12. Mohammed, M., Hazairin, N. A., Al-Zubaidi, S., AK, S., Mustapha, S., Yusuf, E. (2020). Toward a novel design for coronavirus detection and diagnosis system using IoT based drone technology. *International Journal of Psychosocial Rehabilitation*, 24(7), 2287-2295.

13. Chiu, C. C., Lo, C. T. (2011). Vision-only automatic flight control for small UAVs. *IEEE transactions on vehicular technology*, 60(6), 2425-2437.

14. Azfar, A. Z., Hazry, D. (2011, March). *Simple GUI design for monitoring of a remotely operated quadrotor unmanned aerial vehicle (UAV)*. In 2011 IEEE 7th international colloquium on signal processing and its applications, Penang, 23-27.

15. Feng, L., Ben, M. C., Yew, L. K. (2007, July). *Integration and ımplementation of a low-cost and vision-based uav tracking system*. In 2007 Chinese Control Conference IEEE, Zhangjiajie, 731-736.

16. Zhou, G., Zang, D. (2007, July). *Civil UAV system for earth observation*. In 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Barcelona, 5319-5322.

17. Floreano, D., Wood, R. J. (2015). Science, technology and the future of small autonomous drones. *Nature*, 521(7553), 460-466.

18. Joshi, P. M. (2015). wing analysis of a flapping wing Unmanned aerial vehicle using CFD. *Development*, 2(5).

19. Kardasz, P., Doskocz, J., Hejduk, M., Wiejkut, P., Zarzycki, H. (2016). Drones and possibilities of their using. *Journal of Civil & Environmental Engineering*, 6(3), 1-7.

20. Dufour, L., Owen, K., Mintchev, S., Floreano, D. (2016, October). *A drone with insect-inspired folding wings.* In 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Daejeon, 1576-1581.

21. Nicassio, F., Scarselli, G., Pinto, F., Ciampa, F., Iervolino, O., Meo, M. (2018). Low energy actuation technique of bistable composites for aircraft morphing. *Aerospace Science and Technology*, 75, 35-46.

22. Tsushima, N., Yokozeki, T., Su, W., Arizono, H. (2019). Geometrically nonlinear static aeroelastic analysis of composite morphing wing with corrugated structures. *Aerospace Science and Technology*, 88, 244-257.

23. Tuna, T., Ovur, S. E., Gokbel, E., Kumbasar, T. (2020). Design and development of FOLLY: A self-foldable and self-deployable quadcopter. *Aerospace Science and Technology*, 100, 105807.

24. Oktay, T., Enes, Ö. (2021). Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracının Sistem Tasarımı ve Kontrolü." *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (27), 318-324.

25. Kim, J. H., Kim, H. J., Jung, J. N., Jang, D. H., Kwon, H. D. (2017). Portable-size drone design using TRIZ method. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers,* 26(2), 230-237.

26. Xiu, H., Xu, T., Jones, A. H., Wei, G., Ren, L. (2017, December). *A reconfigurable quadrotor with foldable rotor arms and a deployed carrier*. In Proceedings of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics, Macao, 1412-1417.

27. Tan, J. X., Effendi, M. S. M., Radhwan, H. (2019, July). *Analysis of drone remote control to improve end of life (EOL) performance using QFD, TRIZ, and DFMA methods*. In AIP Conference Proceedings, Shanghai, 2129, 020162.

28. Yuan-wu, S. H. I., Xiao-cheng, Z. H. E. N. G. (2019). Application research on GQFD-TRIZ integration method in police UAV design. *Journal of Graphics*, 40(2), 296.

29. Kumar, R., Wells, J. Z., Jhawar, D., Ranjan, K., Kumar, M. (2022). Prototype development and flight controller ımplementation of the sliding-arm quadcopter. *IFAC-PapersOnLine*, 55(37), 542-547.

30. Nikhilraj, A., Simha, H., Priyadarshan, H. (2022). Modeling and Control of port dynamics of a tilt-rotor quadcopter. *IFAC-PapersOnLine*, 55(1), 746-751.

31. Ruan, L., Pi, C. H., Su, Y., Yu, P., Cheng, S., Tsao, T. C. (2023). Control and experiments of a novel tiltable-rotor aerial platform comprising quadcopters and passive hinges. *Mechatronics*, 89, 102927.

32. Ahmad, F., Kumar, P., Patil, P. P., Kumar, V. (2021). Design and modal analysis of a quadcopter propeller through finite element analysis. *Materials today: proceedings*, 46, 10322-10328.

33. Ahmad, F., Kumar, P., Bhandari, A., Patil, P. P. (2020). Simulation of the Quadcopter Dynamics with LQR based Control. *Materials Today: Proceedings*, 24, 326-332.

34. Singh, R., Kumar, R., Mishra, A., Agarwal, A. (2020). Structural analysis of quadcopter frame. *Materials Today: Proceedings*, 22, 3320-3329.

35. Bennaceur, S., Azouz, N. (2023). Modelling and control of a quadrotor with flexible arms. *Alexandria Engineering Journal*, 65, 209-231.

36. Shukla, D., Komerath, N. (2018). Multirotor drone aerodynamic interaction investigation. *Drones,* 2(4), 43.

37. Musa, S. (2018). Techniques for quadcopter modeling and design: A review. *Journal of unmanned system Technology*, 5(3), 66-75.

38. Quan, Q., Dai, X., Wang, S. (2020). Multicopter design and control practice: a series experiments based on MATLAB and Pixhawk. Springer *Nature*, 51.

39. Faessler, M., Franchi, A., Scaramuzza, D. (2017). Differential flatness of quadrotor dynamics subject to rotor drag for accurate tracking of high-speed trajectories. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3(2), 620-626.

40. Faessler, M., Falanga, D., Scaramuzza, D. (2016). Thrust mixing, saturation, and body-rate control for accurate aggressive quadrotor flight. *IEEE Robotics and Automation Letters,* 2(2), 476-482.

41. Hintz, C., Torno, C., Carrillo, L. R. G. (2014, May). *Design and dynamic modeling of a rotary wing aircraft with morphing capabilities*. In 2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Orlando, 492-498.

42. Falanga, D., Mueggler, E., Faessler, M., Scaramuzza, D. (2017, May). *Aggressive quadrotor flight through narrow gaps with onboard sensing and computing using active vision*. In 2017 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA), Singapore, 5774-5781.

43. Bucki, N., Mueller, M. W. (2019, May). *Design and control of a passively morphing quadcopter*. In 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Montreal, 9116-9122.

44. Fabris, A., Kleber, K., Falanga, D., Scaramuzza, D. (2021, May). *Geometry-aware compensation scheme for morphing drones*. In 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Xi'an, 592-598.

45. Shiferaw, A. Y., Esakki, B., Pari, T., Elumalai, E., Mobayen, S., Bartoszewicz, A. (2021). Design and ımplementation of morphed multi-rotor vehicles with real-time obstacle detection and sensing system. *Sensors*, 21(18), 6192.

46. Kim, C., Lee, H., Jeong, M., Myung, H. (2021, September). *A morphing quadrotor that can optimize morphology for transportation.* In 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Prague, 9683-9689.

47. Orloff, M. A. (2006). Grundlagen der klassischen TRIZ: Ein praktisches Lehrbuch des erfinderischen Denkens für Ingenieure. *Entwicklung der TRIZ*, 310-338.

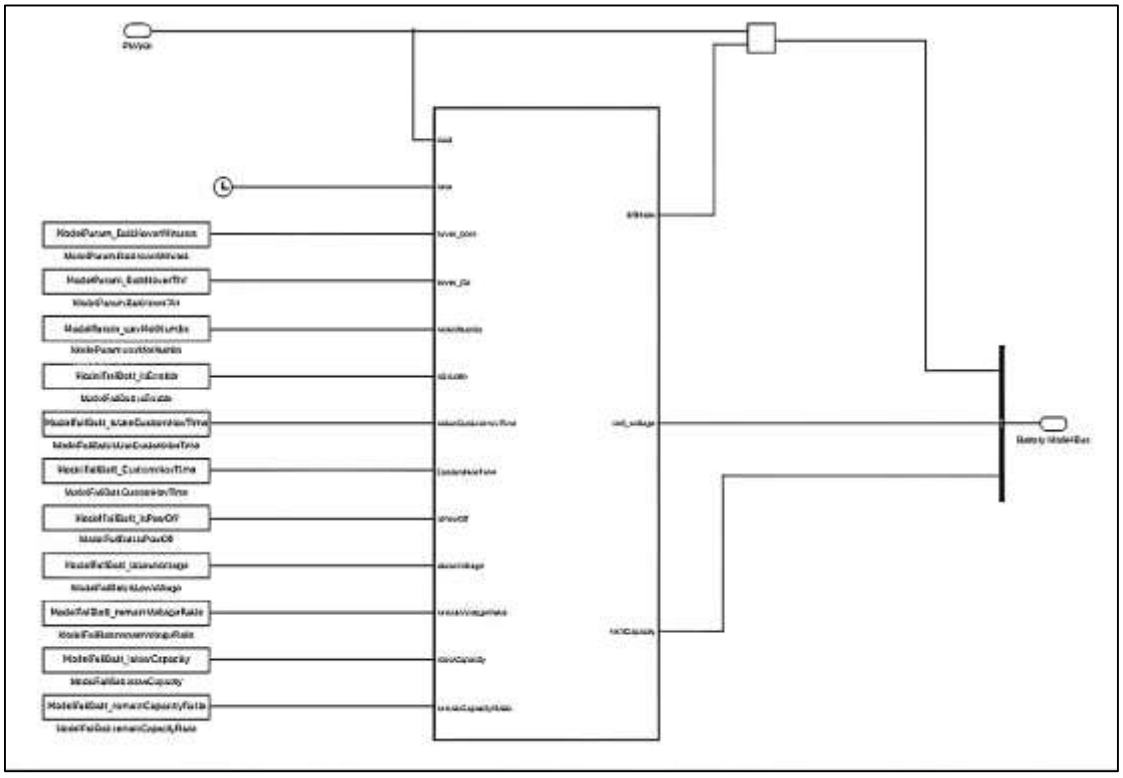
48. Güneş, S. (2008). Ürün tasarımı ve TRIZ. *Sanat ve Tasarım Dergisi*, 1(2).

49. Altuntaş, S., Dereli, T., YILMAZ, M. K., Ertürk, B., Demirbaş, A. (2017). Havacılık sektöründe bakım kolaylığı için yaratıcı problem çözme teorisi uygulamaları. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 19(55), 211-228.

50. Ilevbare, I. M., Probert, D., Phaal, R. (2013). A review of TRIZ, and its benefits and challenges in practice. *Technovation*, 33(2-3), 30-37

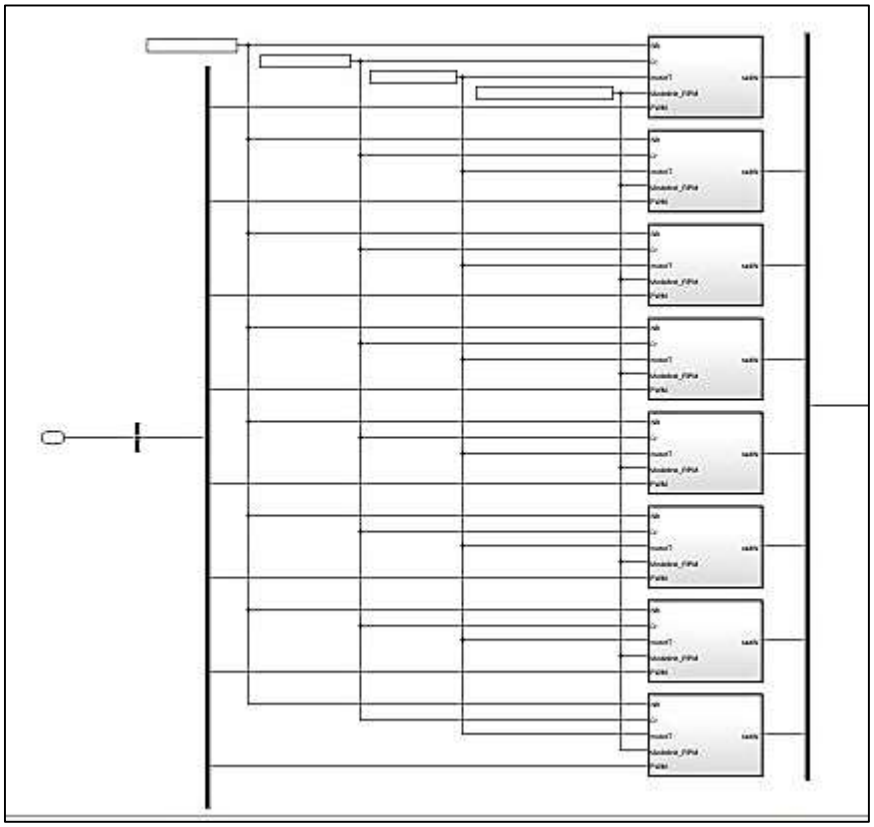
EKLER

EK-1. Simulink pil modeli



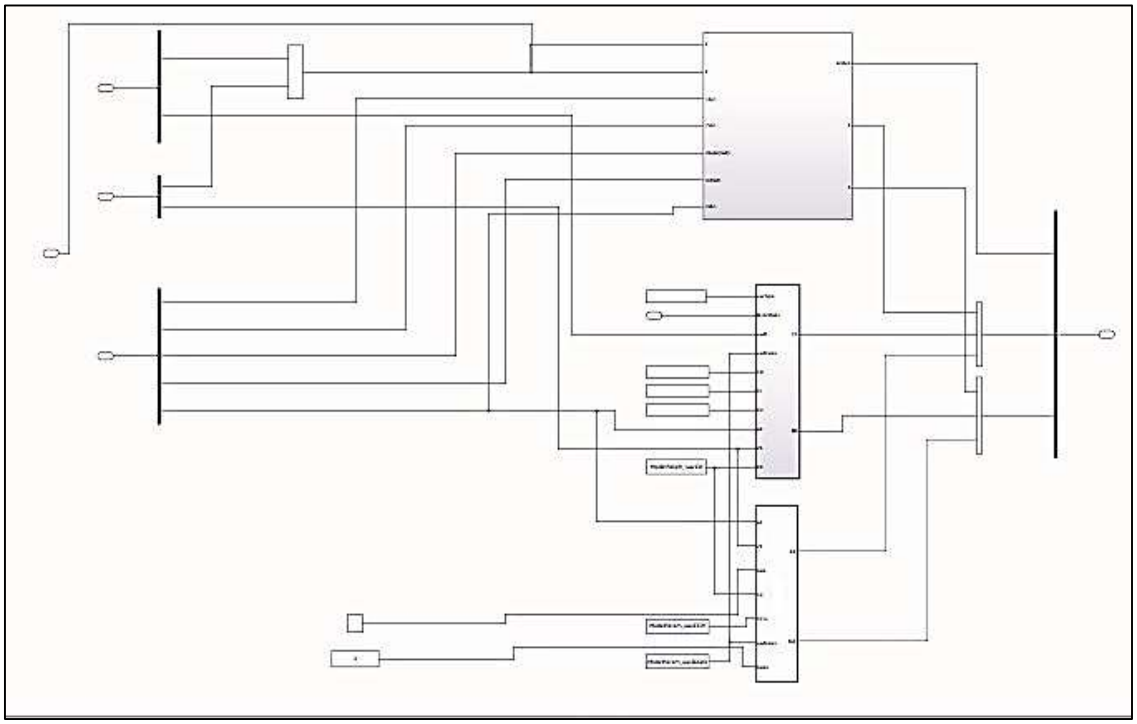
Şekil 1.1. Simulink pil modeli

EK-2. Simulink motor modeli



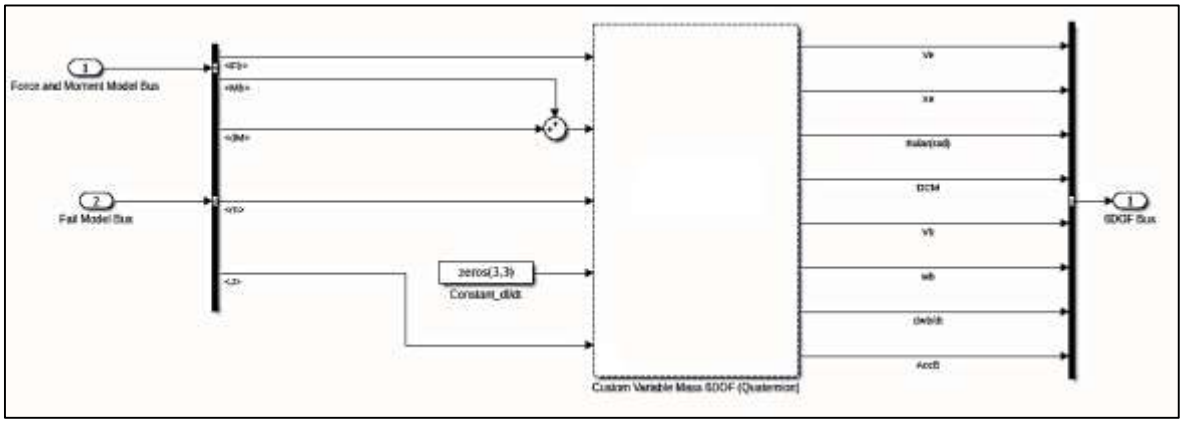
Şekil 2.1. Simulink motor modeli

EK-3. Simulink kuvvet ve moment modeli



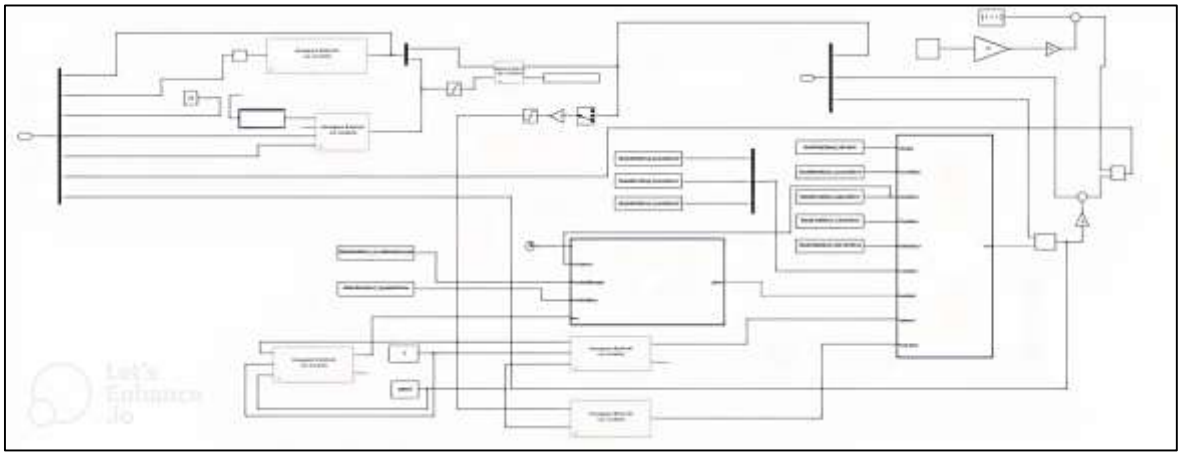
Şekil 3.1. Simulink kuvvet ve moment modeli

EK-4. Simulink kinematik modeli



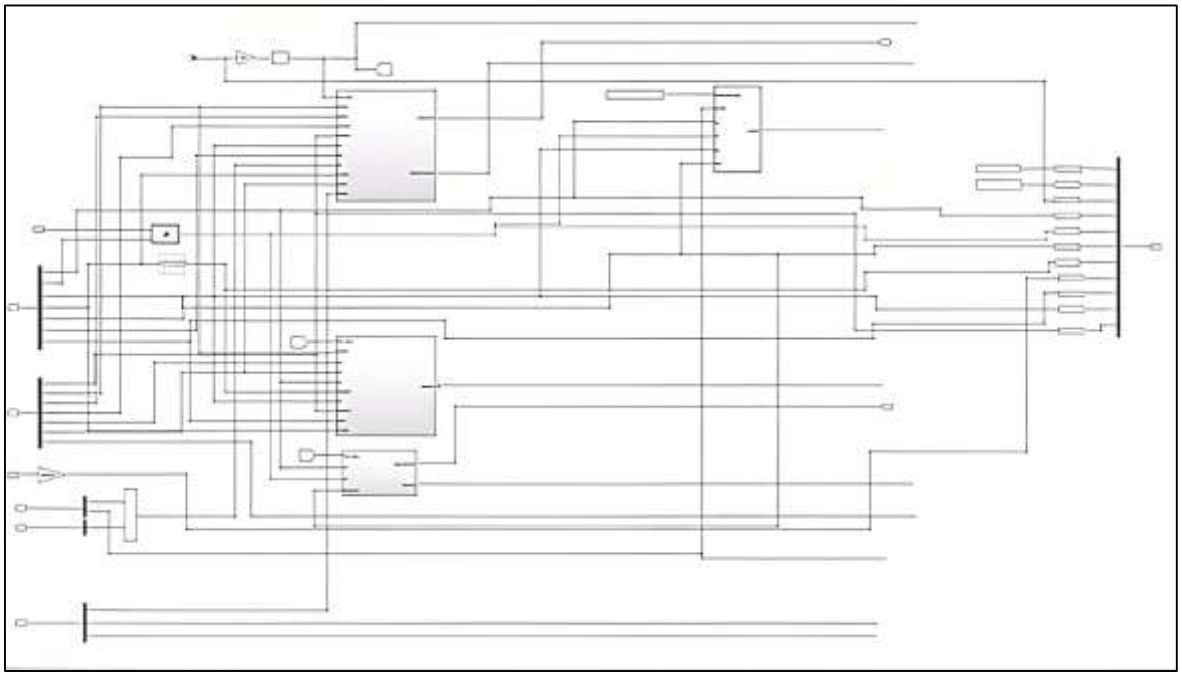
Şekil 4.1. Simulink kinematik modeli

EK-5. Simulink çevresel etki modeli



Şekil 5.1. Simulink çevresel etki modeli

EK-6. Simulink çıkış arayüzü modeli



Şekil 6.1. Simulink çıkış arayüzü modeli



Gazili olmak ayrıcalıktır