T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DEĞİŞKEN HATVE VE DEĞİŞKEN HIZ KONTROLLÜ DÖRT ROTORLU İNSANSIZ HAVA ARACI TASARIMI VE ÜRETİMİ

YAVUZ SELİM ÖNGÜL
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2017

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DEĞİŞKEN HATVE VE DEĞİŞKEN DEVİR KONTROLLÜ DÖRT ROTORLU İNSANSIZ HAVA ARACI TASARIMI VE ÜRETİMİ

YAVUZ SELİM ÖNGÜL
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
DOÇ. DR. İLYAS KANDEMİR

GEBZE
2017

T.R.

GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

VARIABLE PITCH AND VARIABLE SPEED CONTROLLED FOUR ROTARY UNMANNED AIR VEHICLHE DESIGN AND PRODUCTION

YAVUZ SELİM ÖNGÜL

A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR

ASSOC. PROF. DR. İLYAS KANDEMİR

GEBZE

2017

GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ	**YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU**

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 21/06/2017 tarih ve 2017/33 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 29/06/2017 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Yavuz Selim ÖNGÜL'ün tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE
(TEZ DANIŞMANI) : Doç. Dr. İLYAS KANDEMİR

ÜYE : Doç. Dr. AHMET ZAFER ŞENALP

ÜYE : Yrd. Doç. Dr. AHMET ZİYA SAYDAM

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../..... tarih ve ...../..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

Doç. Dr. Arif Çağdaş AYDINOĞLU
Gebze Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

Gelişen teknoloji ile beraber insansız hava araçları da birçok alanda çokça kullanılmaya başlanmıştır. İnsansız hava araçlarının kullanım alanları genişledikçe, insansız hava araçlarındaki gelişmeler de kaçınılmaz olmaktadır. Şuana kadar insansız hava araçlarında önemli derecede yol alınmıştır. İlk çalışmalar ile kıyaslanır ise, bikaç dakikalık uçuş süreleri 1 saatlere çıkmış, 50-100 gramlık taşıma kapasiteleri 50 kilogramlara çıkmış ve maliyetleri birkaç bin dolardan birkaç yüz dolara düşmüş durumdadır. Ancak şuana kadar bu tez kapsamına paralel bir proje ile karşılaşılmamıştır.

Bu tez kapsamında, insansız hava araçlarında motor hızlarının değişken olmasının yanında pervane hatve açısının da değişken olması üzerine çalışılmıştır. Bu çalışma asıl olarak motor ve pervane verimini artırmayı hedeflemektedir. Bunun yanında uçuş kabiliyetlerinde de ciddi bir artış gözlemlenmiştir. Motor ver pervane veriminin artması ile insansız hava aracının aynı pil kapasitesi ile daha uzun süre havada kalabilmesi sağlanmaktadır. Motor ve pervane veriminin artması, motorun daha az akım çekmesi anlamına da gelmektedir. Daha az akım çekmesi ise motorun, elektronik hız kontrol devresinin ve pillerin de daha az zorlanması ve daha az ısınması demektir. Böylelikle daha uzun ömürlü kullanımı mümkün olmaktadır.

Bu tez çalışmasında statik değerler ile çalışılmıştır. Bu tezin devamı niteliğinde doktora tezi seviyesinde dinamik değerler altında verim artırma çalışmaları yapılması düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: İHA, Dört Rotorlu Döner Kanatlı Hava Aracı, Değişken Hatve Kontrolü, Dört Rotorlu Kopter, Değişken Hız ve Değişken Hatve Algoritması.

SUMMARY

Along with the developing technology, unmanned aerial vehicles have started to be used in many places. As unmanned aerial vehicles become more widespread, developments in unmanned aerial vehicles are inevitable. Until now, unmanned aerial vehicles have been progressed to a significant level. Compared to the first studies, flight times of a few minutes have been increased by 1 hour, transport capacities of 50-100 grams have increased to 50 kilograms, and costs have fallen from several thousand dollars to several hundred dollars. However, a project parallel to the scope of this thesis has not been encountered.

In this thesis, it has been studied that the speed of the propeller is variable in unmanned aerial vehicles as well as the engine speeds are variable. This work mainly aims to increase engine and propeller efficiency. In addition, a significant increase in flight capabilities has also been observed. With the increase of engine and propeller efficiency, it is ensured that the unmanned aerial vehicle can stay in the air longer with the same battery capacity. The increase in engine and propeller efficiency also means that the engine draws less current. Less current draw means less stress on the motor, electronic speed control circuit and the batteries and less heat. Thus, a longer life span is possible.

In this thesis study, static values are used. As a continuation of this thesis, it is planned to carry out studies to increase the efficiency under dynamic values at doctoral level.

Key Words: UAV, Quadcopter, Quadrotor, Variable Pitch Control, Variable Speed and Pitch Algorithm.

TEŞEKKÜR

Bu tezi yazmamda bana yol gösteren ve yardım eden danışmanım Doç. Dr. İlyas KANDEMİR'e, bugünlere gelebilmemde büyük emeği geçen ve manevi desteklerini hiç esirgemeyen eşim Buket Selen ÖNGÜL'e, çalışmalarımda her zaman yardımcı olan abim Fahreddin Fatih ÖNGÜL'e ve tabii ki başarılarımızın asıl kaynağı olan aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa:
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
TABLOLAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	3
3. DÖRT ROTORLU İNSANSIZ HAVA ARAÇLARINDA HAREKETLER	12
4. DÖRT ROTORLU İNSANSIZ HAVA ARACININ TEMEL PARÇALARI	14
4.1. Motor	14
4.2. Pervane	17
4.3. Elektronik Hız Kontrolcü	21
4.4. Uçuş Kontrol Kartı	23
4.5. Radyo Kontrol Sistemi	27
4.6. Pil	28
4.7. Gövde	28
4.8. İniş Takımları	30
4.9. Gövdenin Montajı	32
5. DEĞİŞKEN HATVE VE DEĞİŞKEN HIZ KONTROL ALGORTİMASI	35
6. DENEY VE GÖZLEM	39
6.1. Deney Düzeneği	39
6.2. Gözlemler	43
7. TARTIŞMA	44
KAYNAKLAR	51
ÖZGEÇMİŞ	53

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Kısaltmalar		**Açıklamalar**
Θ	:	Hatve Açısı
Φ	:	Eğim Açısı
ψ	:	Sapma Açısı
BLDC	:	Fırçasız Doğru Akım Motoru
DC	:	Doğru Akım
HZ	:	Herz
İHA	:	İnsansız Hava Aracı
Mah	:	Mili Amper
Mhz	:	Mega Herz
Mm	:	Mili Metre
Ms	:	Mili Saniye
N	:	Newton
PWM	:	Sinyal Genişlik Modülasyonu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No:		Sayfa
1.1:	Drone Sektörünün Pazardaki Yeri.	2
2.1:	Dört Rotorlu İHA'nın dinamik modeli.	4
2.2:	Değişkan Hatveli İHA'nın Hareket Dataları.	5
2.3:	Pervane Basınç ve Rüzgar Hızları.	5
2.4:	İtme Gücü Test Düzeneği.	7
2.5:	Hatve, Devir, Çekiş 3 Boyutlu Grafik.	7
2.6:	Kontrol Bloğu Şeması.	9
3.1:	Dört Rotorlu İHA Motor ve Gövde Dinamikleri.	12
4.1:	Fırçasız Motor İç Yapısı.	15
4.2:	Tezde Kullanılan Fırçasız Motor.	16
4.3:	Değişken Hatveli Pervane Motor Sistemi.	18
4.4:	Değişken Hatveli Pervane Sistemi.	19
4.5:	SG90 Servo.	20
4.6:	AfroESC 30A.	23
4.7:	SP Racing F3 Uçuş Kontrol Kartı.	24
4.8:	MPU6050 Modülü.	25
4.9:	MS5611 Modülü.	26
4.10:	HMC5883 Modülü.	26
4.11:	Gövde Boyutları.	29
4.12:	Gövde Üst Kapak Boyutları.	29
4.13:	Gövde ve Gövde Üst Kapak Beraber.	30
4.14:	İniş Takımı Boyutları.	31
4.15:	İniş Takımı, Servo, Değişken Hatve Sistemi Montajı.	31
4.16:	Soldan Sağa İniş Takımı Tasarım Denemeleri.	32
4.17:	Genel Gövde Ölçüleri.	33
4.18:	Değişken Hatve Sistemine Motor Montajı.	33
5.1:	Arduino Kodları.	35
6.1:	Pil Durum Göstergesi.	39
6.2:	Lazer Devir Ölçer.	40
6.3:	Itme Kuvveti Ölçüm Standı.	40

6.4: Osiloskop ve Multimetre. 41
6.5: Açı Ölçer. 41
7.1: Hatve Değerlerine Göre Taşıma ve Güç. 46
7.2: Hatve Değerlerine Göre Taşıma ve Güç (Yakınlaştırılmış). 47
7.3: Giriş Çıkış Sinyalleri Arasındaki Bağlantı. 49

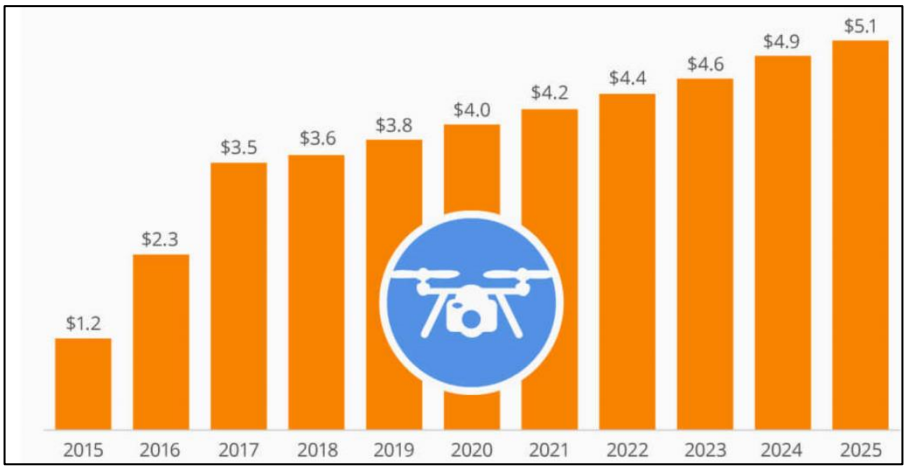
TABLOLAR DİZİNİ

Tablo No:		Sayfa
3.1:	Dört Rotorlu İHA Motor Yönleri ve Hareketler.	13
4.1:	Kullanılan Fırçasız Motor Teknik Özellikleri.	16
4.2:	Değişken Hatveli Pervane Sistemi Teknik Özellikleri.	19
4.3:	SG90 Teknik Özellikleri.	20
5.1:	İşlemcilerin Karşılaştırılması.	35
6.1:	Taşıma, Hatve, ESC PWM.	43
6.2:	Devir, Hatve, ESC PWM.	44
6.3:	Akım, Hatve, ESC PWM.	44
6.4:	Güç, Hatve, ESC PWM.	45
6.6:	Taşıma Kuvvetine Göre Hatve, ESC PWM Çıkışları.	48

1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji ile birlikte insansız hava araçları, yani dronlar da literatürdeki yerini almışlardır. Medya, iletişim, askeriye, reklam, taşımacılık, araştırma, havacılık, tarım, meteoroloji, jeoloji, arama-kurtarma ve oyuncak sektörlerinde artık dronlara başvurulmaktadır. Bunlar henüz kullanılmaya başlanmış olan sektörlerdir, yakın zamanda çok daha fazla alanda kullanılmaya başlanacağını da çok açık görebilmekteyiz. Dronların bu kadar yaygın kullanılması ile dronlarında daha verimli çalışmaları önemli bir unsur haline gelmektedir. Verim dediğimizde daha uzun süre havada kalma faktörü aslında neredeyse en büyük etkendir. Daha uzun süre havada kalmak için de standart dronlarda motor sürücüleri, motorlar, piller ve pervaneler aklımıza gelmektedir, kullanılan bu ekipmanların herbirinin ayrı ayrı verimleri düşünmek gerekmetedir. Ancak bizim çalışmamızda daha farklı bir ekipman ile yola çıkarak pervanenin hız değişimi ile ister istemez kaçamadığımız motordaki ve pervanedeki verim düşüklüğünü yüksek oranda ortadan kaldırması hedeflenmektedir. Bunun yanında doğrusal kontrol imkânı da vermektedir. Şuanda kullanılan insansız hava araçlarında kontrol sinyali elektronik hız kontrol devresine sinyal verir ve motorun çekiş gücüne bakılmaksızın kontrol sinyali doğrudan motora iletilir. Bu tez kapsamında geliştirilen yazılım ile kontrol sinyali doğrudan çekiş gücü ile karşılaştırıldığından dolayı, kontrol sinyali çekiş gücüne paralel olarak değişmektedir. Geliştirilen yazılım hatve kontrollü pervane sistemi kullanmaktadır. Hatve kontrollü pervane sistemlerinde devir değiştirmek için motor devri ve hatve kontrolünün ayrı ayrı yapılması gerekirken geliştirilen yazılım sayesinde sadece tek bir kontrol ile pervane hatvesi ve motor devri ideal değerlerinde çalışacaktır. Bu sistem ile yapılan insansız hava aracına bu tez kapsamında "Değişken Hatve Ve Değişken Hız Kontrollü Döner Kanatlı Dört Rotorlu İnsansız Hava Aracı" olarak bahsedilecektir, kısa haliyle dört rotorlu İHA şeklinde yazılmaktadır.

Forbes'un yayınladığı bir makalede dron sektörünün pazardaki yerini yıllara göre değerlendirmiştir. Şekil 1.1'deki değerler milyon dolar cinsinden olup 2025 yılı için beklenen piyasanın 5,1 milyon dolar olduğunu öngörmüştür [1].



Şekil 1.1: Drone Sektörünün Pazardaki Yeri.

Şuan için reklam, film, güvenlik, eğlence, askeri, haritalandırma sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yakın zamanda çok daha farklı sektörlerde de kullanılacağı tahmin edilmektedir.

Drone'ların bu kadar geniş alanda kullanılması ve yakın gelecekte çok daha geniş alanlarda kullanılacağı tahmin edilirken uçuş verimlerindeki ufak bir iyileştirmenin bile toplamdı ne denli büyük bir enerji tasarrufu ve kullanım avantajı sağlayacağını görmezden gelmek mümkün değildir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda da uçuş verimlerinde iyileştirme sağlanmaya çalışılmıştır. Drone'larda kullanılan elemanlarda motor hızına bağlı pervanenin sabit hatveli olmasından dolayı pervane veriminin düşmesi dışında verimi yükseltecek çok fazla eleman bulunmamaktadır. Bu yüzden pervane sistemleri üzerine eğilinmiştir. Değişken hatveli sistem kullanan drone'lar olmasına karşılık devirlerinin sabit olmasından dolayı, bu sistemlerde de motor verimi düşmektedir. Bu çalışmada iki değişken de ele alınarak en yüksek verime ulaşılmaya çalışılmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

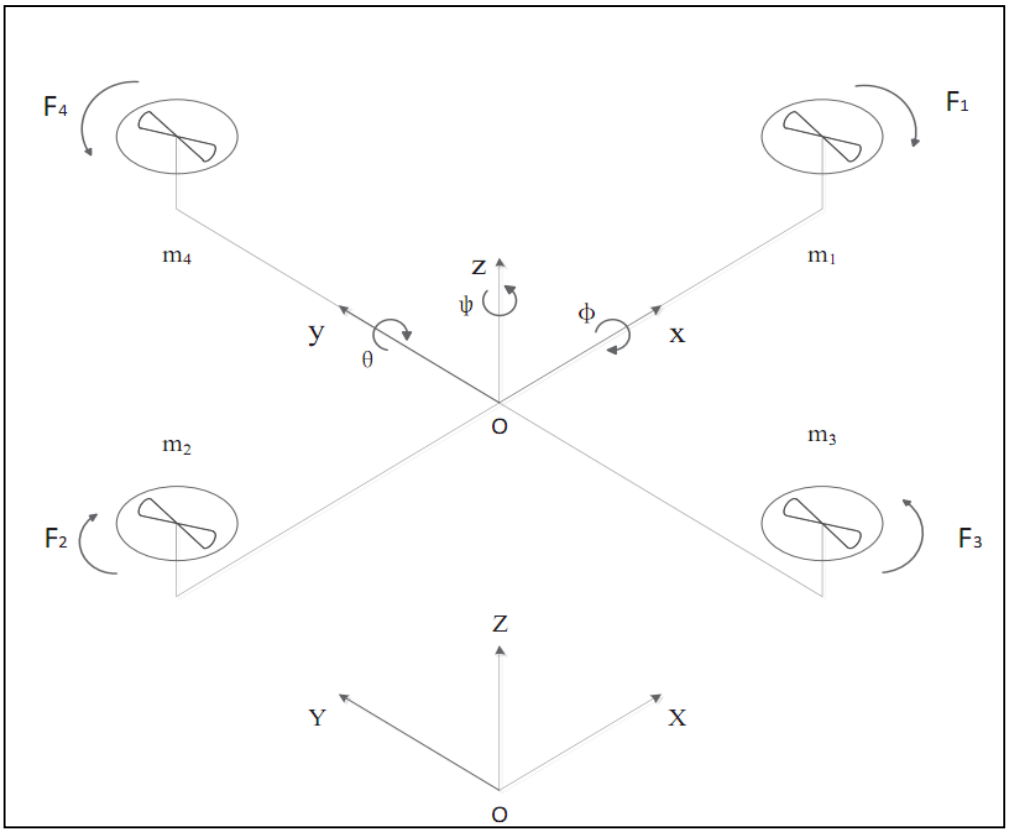
Son yıllarda dört rotorlu insansız hava araçlarının uçuş kontrolleri ve otonom sistemler üzerine birçok çalışma yapıldığı görülmektedir. Literatür taramalarında hem değişken hatve hem değişken devir kontrolü çalışmasının beraber olarak yapıldığına rastlanamamıştır. Bununla birlikte bu kontrol metodları ayrı ayrı uygulanmıştır. Bu da bize üzerinde çalışma yapılmaya değer bir tez konusu olduğunu göstermektedir. Literatür taraması kapsamında bulduğumuz bazı makale ve tezlere aşağıda yer verilmiştir. Bu tez hazırlanırken yapılan makalelerden faydalanılmıştır.

Shuai Zhang ve Zhipping Wang'ın [2], dört rotorlu'larda kullanılan fırçasız doğru akım motorlarının araştırılması ve genişletilmiş kontrolü üzerine yazdıkları makalede bu tez kapsamında dikkate alınmıştır. Makalenin detayları tez ile doğrudan ilişkili olmasa da verilen şekil, eksenel hareketleri anlamak konusunda faydalı olmuştur.

Makalede X, Y, Z eksenleri doğrultusunda üç değişkenden bahsedilmiştir. Bunlar X ekseninde yatış veya eğim açısı Φ, Y ekseninde hatve açısı Θ, Z ekseninde sapma açısı ψ, üç Euler açısı olarak adlandırılmıştır. Dört adet fırçasız doğru akım motoru (BLDC) için dört adet PWM girişi kullanılır. Bu makale kapsamında modeli basitleştirebilmek adına bazı kabuller yapmışlardır. Bu kabuller;

- Dört rotorlu'nın tamamen simetrik ve rijit bir yapı olması.
- Dört rotorlu'nın ağırlık merkezi gövde ve eksenler ile çakışıktır.
- Dört rotorlu'nın kaldırma ve itme kuvveti motorun hızının karekökü ile orantılıdır.
- Dört rotorlu'nın dört adet pervanesi z eksenine paraleldir.

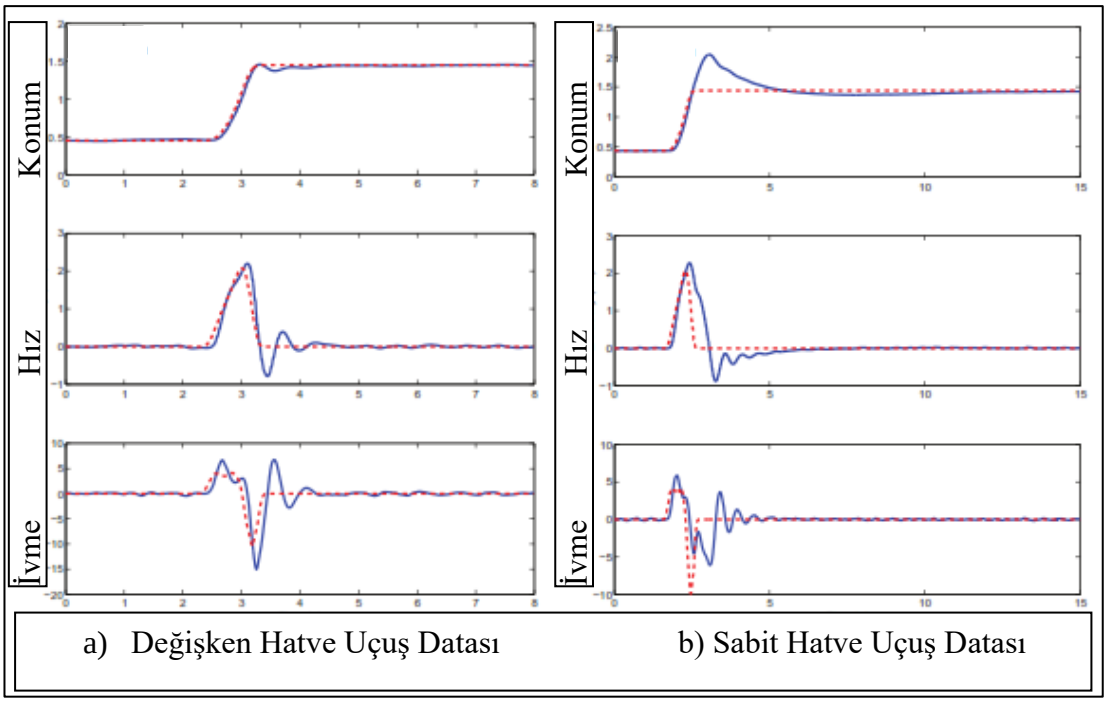
Tüm bu kabuller doğrultusunda dört rotorlu İHA'nın dinamik modeli aşağıdaki Şekil 2.1'de verilmiştir. Eksenel hareketler sağ el kuralına göre tanımlanmıştır. Şekilde de görüleceği üzere iki adet motor, motor 1 ve motor 3 saat yönünde dönerken; motor 2 ve motor 4 saat yönünün tersinde dönmektedir. Ters yönde yapılan bu dönüşler rotorun spin rotasyonunu ve aerodinamik torku engelleyici yönde etki etmektedir [2].



Şekil 2.1: Dört Rotorlu İHA'nın dinamik modeli.

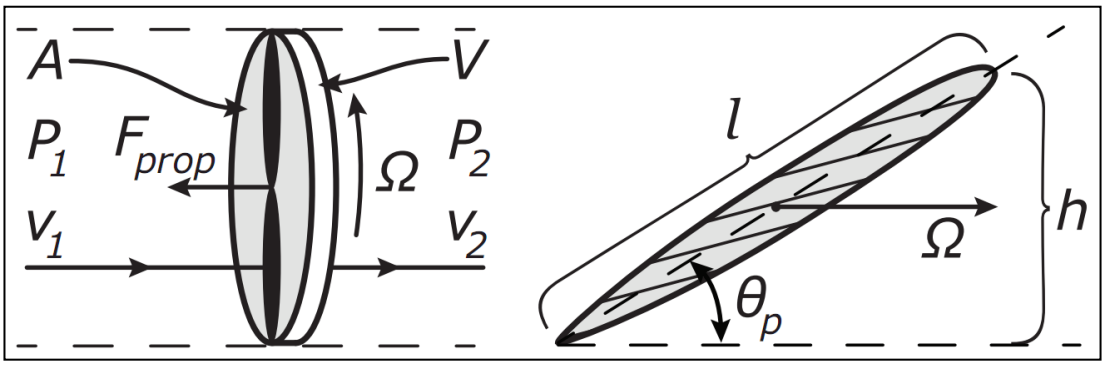
Bu makalede verilen diğer bilgiler bu tez kapsamı ile doğrudan bağlantılı olmadığı için daha ayrıntılı olarak yer verilmemiştir. Makaleden tez kapsamında özellikle eksenel hareketlerin anlaşılması ve hatve değişiminin hangi eksenel hareket olduğunu belirtebilmek açısından yararlanılmıştır.

Mark Johnson Cutler [3], yaptığı otonom değişken hatveli dört rotorlu'ların dizayn ve kontrolüne ilişkin araştırmasında aşağıdaki datalara ulaşmıştır.



Şekil 2.2: Değişkan Hatveli İHA'nın Hareket Dataları.

Emil Fresk and George Nikolakopoulos [4], değişken hatve pervaneli dört rotorlu kontrolü ve deneysel modelinin oluşturulmasına dair yayınladığı makalede, çalışmalarını üç ana başlık altında toplamışlardır. Bu başlıklar; değişken hatveli pervaneler için yeni modellerin teorik olarak geliştirilmesi ve değerlendirilmesi, değişken hatveli- itme kuvveti konfigurasyonlarının optimizasyonu ve değişken hatveli pervanelerin performansının hesaplanması ve değerlendirilmesidir.



Şekil 2.3: Pervane Basınç ve Rüzgar Hızları.

Makalede yukarıda şekildeki gibi bir pervane tarafından üretilen basınç ve rüzgar hızlarına yer verilmiştir. Şekilde sol tarafta; P_1 ve P_2 basınç, V_1 ve V_2 ise rüzgar hızıdır. Burada A alan, V ise pervanenin dönmesinden kaynaklanan debidir. Ω döner

alan hızı. F_{prop} ise itme kuvvetidir. Sağ tarafta pervanenin enine kesiti verilmiştir. l genişlik, h ise yükseklikliktir, θ_p ise hatve açısıdır. Makale de deneysel doğrulama için bernoulli denklemlerinden yararlanmışlardır. Aşağıda makalede yer verilen hesaplamalar yer almaktadır [4].

$$\frac{v^2}{2} + gz + \frac{P}{p} = sabit \tag{2.1}$$

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{P_1}{p} = \frac{v_2^2}{2} + \frac{P_2}{p} \tag{2.2}$$

$$v_1 \approx 0 \rightarrow \frac{v_2^2}{2} = \frac{P_1 - P_2}{p} \tag{2.3}$$

$$\Delta P = \frac{F}{A} \rightarrow F_{prop} = \frac{Ap}{2} v_2^2 \tag{2.4}$$

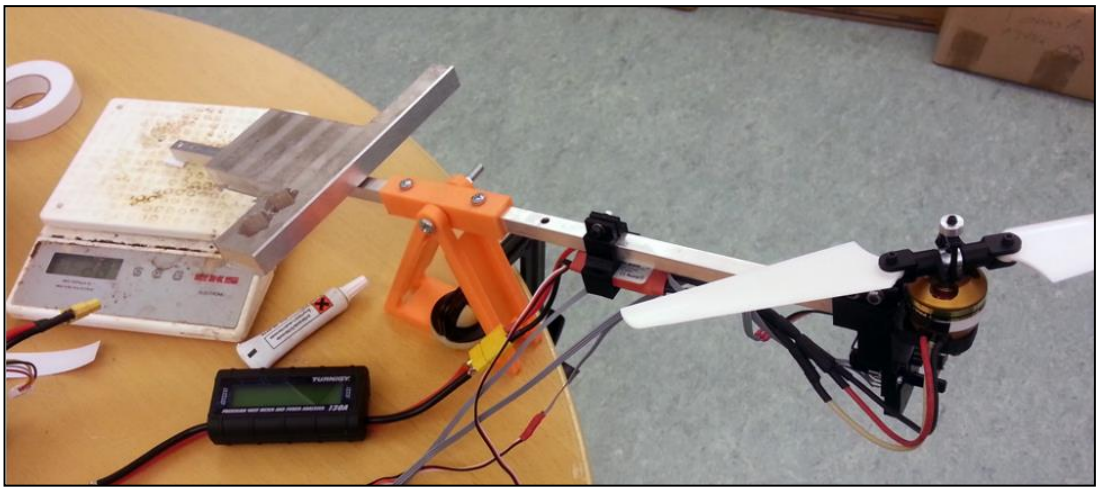
$$Q = V.2\pi\Omega = 2Ah.2\pi\Omega = 4\pi Alsin(\theta_p)\Omega \tag{2.5}$$

$$v_2 = \frac{Q}{A} = 4\pi lsin(\theta_p)\Omega \tag{2.6}$$

$$F_{prop} = 8\pi^2 Al^2 psin^2(\theta_p)\Omega^2 = A_F^{thr} sin^2(\theta_p)\Omega^2 \tag{2.7}$$

$$A_F^{thr} = 1.8.10^{-3} \tag{2.8}$$

Sonuç olarak pervaneler tarafından üretilen itme gücünü denklem 2.7'deki şekilde bulmuşlardır. Buldukları bu sonuçlarla deneysel sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Deney düzeneği Şekil 2.4'deki gibi oluşturulmuştur.



Şekil 2.4: İtme Gücü Test Düzeneği.

Kullandıkları model türevleri için, karşılık gelen veri setleri 0,077 rad'lık bir basamak adımında %10'luk artışlarla grid tabanlı ölçümler kullanılarak gaz kelebeğinde toplanmıştır. Yukarıda denklem 2.8 de verilen A_F^{thr} kullanılmıştır. Aşağıda verilen grafik oluşturulmuştur. Ayrıntılı olarak küçük kareler düzelemi uygulanmıştır, $A_F^{thr} = 1.788.10^{-5}$ için uygulanmıştır. Veri noktaları ve ilgili model değerler arasındaki fark (ortalama sapmanın karekökü) 0,17 N iken çok iyi eşleşmiştir. Bu durum aynı zamanda büyük hatve açılarında, kanatların daha yüksek güçlere çıkabileceğini göstermektedir [4].

Şekil 2.5: Hatve, Devir, Çekiş 3 Boyutlu Grafik.

Bu makale de değinilen konulardan bir başkası ise güç tüketim modelidir. Modelin türetilmesi, güç tüketimi veri noktalarının hatve açısına ve dönme hızına göre incelenmesi suretiyle yapılmıştır.

$$P(\theta_p, \Omega) = A_p + B_p sin^5\theta_p)\Omega^2 \tag{2.9}$$

Bu formülde verdikleri A_p ve B_p genel sabitlerdir. $P(\theta_p, \Omega)$ ilişkisi yukarıdaki şeklin üzerine bindirilerek, aşağıdaki şekil elde edilmiştir. Bu grafik yorumlandığında görülüyor ki değerler arasındaki fark (ortalama sapmanın karekökü) 3,8W'lık ile çok küçük hata sapmalarınayla mükemmele yakın bir eşleşme sağlamıştır. Ölçümler sonucu $A_p = 3{,}232.10^{-5}$ ve $B_p = 2{,}127.10^{-3}$ olarak hesaplanmıştır.

Değişken hatveli pervaneler, dönüş hızı ve hatve değişiminden kaynaklı olarak farklı kombinasyonlarda aynı itme kuvvetini oluşturabilirler. Bu durum farklı uçuş koşulları için istenilen bir durumdur ve bu şekilde optimum çalışma noktaları bulunur. Bu senaryolar için temel olarak iki optimizasyon metodundan bahsedilebilir.

- Güç tüketimini minimize etmek.
- İtme vektörünü olabildiğince hızlı bir şekilde değiştirmek.

Makale kapsamında yukarıda bahsi geçen iki durumu da incelemişlerdir. Özellikle düşük güçlü hızların gerektiği durumlarda güç tüketimini minimize etme yöntemine başvurmuşlardır. Bu tip durumlar aracın genel olarak gezinirken, yavaş hareketlerde veya zaman kısıtı olmadığı durumlarda geçerlidir. Güç tüketimini azaltmak için itmenin güç oranına olan oranı maksimize edilmeye çalışılmıştır. Makalede hızlı ve çevik hareketlerin gerekli olması durumunda, itme hızının tepkisi hızlıca değiştirebilmek için, tork ve ivmenin mümkün olduğunca hızlı değiştirilebilir olması gerekmektedir. Denklemlerden hareketle toplamda iki durumun değerlendirilmesi gerekildiğinden bahsedilmiştir. İlk durum hatvenin sabit olarak hesaplanması, ikinci durum ise dönüş hızının sabit olarak hesaplanmasıdır. İki boyutlu olan karışık denklemleri bu şekilde tek boyuta düşürerek, problemin karmaşıklığını azaltmayı amaçlamışlardır. Makalede bu değişkenler sabit olarak ayrı ayrı incelenmiştir. Özetle hatvesini değiştiren ve dönüş hızını sabit tutarak en hızlı itme tepkisi elde edilmiştir. Makalede bunun sebebinin servo aktüatörlerin zaman sabitinin

dönme hızının zaman sabitinden yaklaşık bir derece daha küçük olmasından kaynaklandığı belirtilmiştir.

Sabit hatveli ve değişken hatveli kanatlar için aynı simülasyon modeli ve formülasyonu kullanmışlardır. Bu formülasyona göre oluşturulan tork değişken hatve ve değişken devir için aşağıdaki şekilde oluşturulmuştur.

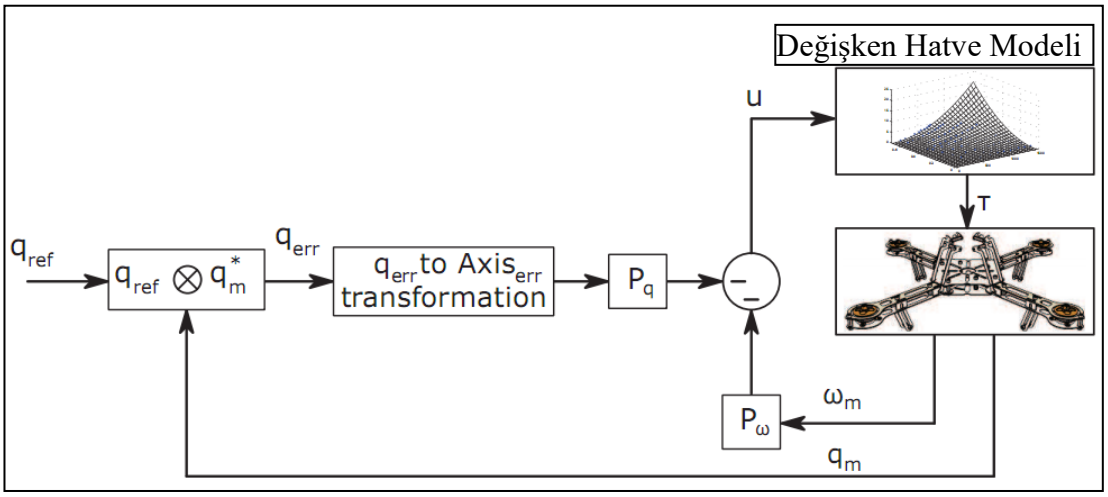
$$\tau_p(\theta_d) = l_a A_p\left(sin^2(\theta_t + \theta_d)\right) - sin^2(\theta_t + \theta_d))\Omega_t^2 \tag{2.10}$$

Denklem 2.10'da verilen değişken hatve formülündeki θ_t itme için eğilim hatvesi, θ_d controllü değişken hatve, l_a motor ile dönüş merkezi arasındaki uzaklık, Ω döner alan hızıdır.

$$\tau_\Omega(\theta_d) = l_a A_p sin^2(\theta_t)((\Omega_t + \Omega_d)^2) - (\Omega_t - \Omega_d)^2) \tag{2.11}$$

Denklem 2.11'de verilen değişken itme formülündeki Ω_t için eğilim vanası, Ω_d kontrollü değişken vana sembolüdür.

Makalede bu formüller ve analizler doğrultusunda dörtlü pervane sisteminde duruma dayalı kontrol bloğunu Şekil 2.6'daki gibi oluşturmuşlardır.



Şekil 2.6: Kontrol Bloğu Şeması.

Bu makale gösteriyor ki değişken hatve kontrolü, dört rotorlu için verimliliği arttırmaktadır. Yukarıdaki grafikte de verildiği üzere değişken hatve kontrollü, sabit

hatve kontrolüne göre neredeyse iki katı daha hızlıdır. Bununla birlikte aşımda değişiklik yok denecek kadar azdır.

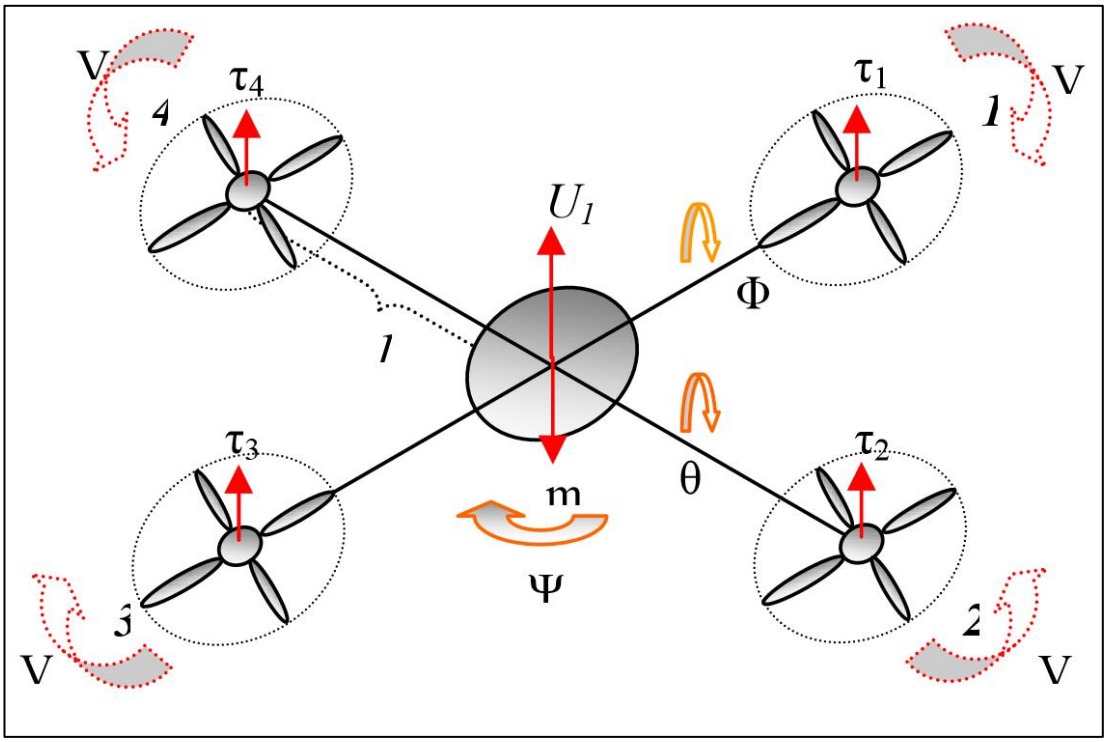
Buddy Michini, Josh Redding, N. Kemal Ure, Mark Cutler ve Jonathan P. How [3], yaptıkları hatve değişkenli dört rotorlu'ların dizaynı ve uçuş testlerine ilişkin yayınladıkları makalede sabit hatveli dört rotorlu'ların sadece diferansiyel motor devri tarafından kontrol edildiğine ve kontrol bant genişliğinin motorların dönme ataletiyle sınırlı olduğuna değinmişlerdir. Bununla birlikte kontrol bant genişliğinin, bir dört rotorlu'nın gerçekleştirebileceği çevik manevraları sınırlandıracağı ve dolayısıyla kıvrak ve becerikli manevraların dörtlü pervane yapısının uygulama alanlarını sınırladığına değinmişlerdir. Geleneksel araçlardaki bant genişliğinin kontrol edilmesi özellikle dört rotorlu'nın boyutunun artması ile daha da zorlaşan bir kontrol metodu olduğu ve motor devri hızını değiştirmek için gereken tork hızlı bir şekilde motor devrinin kapasitesini aştığından, dört rotorlu artık devir kontrolü ile standart olarak kontrol edilemez bir hale geldiğine değinilmiştir. Bu sebeple değişken hatveli kanatların büyük dört rotorlu'lar için sadece standart kullanım için bile gerekli olabileceği vurgulanmıştır.

Yaptıkları uygulamada kanatların açılarını kontrol edebilmek için dijital, yüksek hızlı Futuba marka 4 adet, 10 gramdan daha az ağırlıktaki servoları kullanmışlardır. Sistemde fırçasız doğru akım motorlarının kontrolü için Hacker elektronik hız kontrolcüsünü kullanarak değişken yük durumlarında devirin sabit kalabilmesini amaçlamışlardır. Sistemde sürekli olarak kapalı çevrim devir kontrolünün olması ve servoların hatve değişimini sağlıyor olması aracın değişken şartlar altındaki güvenilirliğini ve stabilizasyonunu arttırmaktadır. Unmanned Innovation tarafından geliştirilen 12 gramlık oto pilot sayesinde atalet, ivme, yükseklik ölçümleri ve stabilizasyonu sağlanmıştır. Oto pilot modülü sistemdeki xBee kartına bağlanarak, radyo modem, güç regülatörü ve konektörler kullanılmıştır. Tasarımı yapılan cihazın uçuş testleri ACL'nin Raven isimli iç ortam test ortamında yapılmıştır. Raven, araca eklenen yansımalı işaretleri gerçek zamanlı olarak izlemek için Vicon Motion yakalama kameralarından yararlanır ve dışarıda bir GPS sistemi tarafından ölçülecek olan konum ve hız bilgisini sağlar. Bu makale kapsamında yapılan ilk uçuş testlerinde değişken hatveli kontrol sistemi fizibilitesi yapılmış ve nominal rota izleme deneylerinde, standart sabit hatveli dört rotorlu'lara oranla performansının daha yüksek olduğunu kanıtlamışlardır. Bunun yanı sıra deneyler farklı konseptlerle

tekrarlanmıştır. Araç ters döndürülerek ters uçacak şekilde teste tabi tutulmuştur ve sabit hatveli araçların çektikleri akım ile kıyaslama yapılarak, temel iyileşmeler gözlemlenmiştir. Araç hala geliştirme aşamasında olmasına rağmen yapılan testler sabit hatveli araçlara kıyas ile değişken hatveli araçların performanslarının daha gelişmiş olacağını göstermektedir. Makalede üzerine değinilen diğer bir konu ise bundan sonra yapılması gereken testlerin; geleneksel dört rotorlu'ların rotalarından farklı olarak, bu tasarıma sahip cihazların agresif manevralarda ve sabit yükseklikteki sarsıntılarda tepkilerinin gözlenmesi olduğunu belirtmişlerdir [1].

Bu tez ve makaleler göstermektedir ki değişken hatveli dört rotorlu tasarımı incelemeye ve araştırmaya değer bir konudur. Yukarıda bahsi geçen tez ve makalelerden yararlanılarak bu tezde tasarım geliştirilmiştir. Bununla beraber aracı test etmek için oluşturulacak test düzenekleri ve saha koşullarını belirlemek içinde bu makale ve tezlerden yararlanılmıştır.

3. DÖRT ROTORLU İNSANSIZ HAVA ARAÇLARINDA HAREKETLER



Şekil 3.1: Dört Rotorlu İHA Motor ve Gövde Dinamikleri.

Bir dört rotorlu'larda 3 adet radyal hareket, 1 adet lineer hareket vardır. Buna ilave olarak 2 adet doğrusal hareket ise radyal ve lineer hareketlerin kombinasyonu ile ortaya çıkmaktadır. Bu üç radyal hareket sırası ile yuvarlanma, yunuslama ve yönelme hareketleridir. Aracın önünü 2. Ve 3. Motorların olduğu taraf olarak kabul edelim. Yuvarlanma hareketi için kullanılan sembol Φ olup, ilgili açı yalpa açısıdır. Sol- sağ hareketinde kullanılır. Yunuslama hareketi için kullanılan sembol θ olup, ilgili açı yunuslama açısıdır. Aracın önünün kaldırılmasını veya indirilmesini sağlar. Yönelme hareketi için kullanılan sembol Ψ olup, ilgili açı sapma açısıdır. Aracın dikey eksen etrafında döndürülmesini sağlar [9].

Dört rotorlu İHA'larda karşılıklı iki pervane saat yönünün tersinde dönerken diğer pervaneler ise saat yönünde dönerler. İki tane saat yönünde, iki tane de tersi yönde dönen pervane bulunduğundan dolayı pervanelerin dönmesi sonucu oluşacak dönme momentine karşı konulmuş olur ve kuyruk pervanesi ihtiyacı olmadan sabit bir şekilde havada burabilmektedirler. Pervanelerin hepsi aynı yönde dönseydi, herbirinin

oluşturacağı dönme momentinden dolayı İHA'nın gövdesi de pervanelerin tersi yönde dönme hareketi yapacaktı.

Yukarıda verilen şekilde τ itki Ω pervane dönüsü Ωr dönüsel dengesizlik m kütle L kol uzunluğu b, d itki, sürükleme sabitidir.

Bu tez kapsamında eksenel hareketler yapılacak değişikliklerden bir tanesi hatve açısının değiştirilmesidir.

Motorları tek tek ele aldığımızda;

Aşağıda verilen tabloda artılar hızlanma ya da hatve artışı, eksiler yavaşlama veya hatve azalmasını göstermektedir.

Tablo 3.1: Dört Rotorlu İHA Motor Yönleri ve Hareketler.

	M1	M2	M3	M4	Hareket	
Hız/ hatve	+	+	-	-	sola yuvarlanma	Radyal hareket
	-	-	+	+	sağa yuvarlanma	
	+	-	-	+	ileri yunuslama	
	-	+	+	-	geri yunuslama	
	+	-	+	-	saat yönü tersi yönelme	
	-	+	-	+	saat yönü yönelme	
	+	+	+	+	yükselme	Lineer hareket
	-	-	-	-	alçalma	

4. DÖRT ROTORLU İNSANSIZ HAVA ARACININ TEMEL PARÇALARI

Bir dört rotorlu insansız hava aracında temel olarak dört adet fırçasız doğru akım motoru, dört adet motor sürücü, uçuş kontrol kartı, radyo sistemi, pil, pervaneler, gövde bulunmaktadır. Bununla birlikte gps, otonom uçuş sistemi, kamera gibi ekipmanlarda opsiyonel olarak bulunabilmektedir.

Aşağıda sırası ile bu ekipmanlara ve tez kapsamında yapılacak olan dört rotorlu için yapılan seçimlere yer verilmiştir.

4.1. Motor

İHA'larda genellikle fırçasız doğru akım motorlar kullanılmaktadır. Verimleri %99'lara kadar varmasından dolayı fırçasız doğru akım motorlar tercih edilmektedir. Bu da standart fırçalı motorlara oranlar %50 uzun uçuş süresi anlamına gelmektedir.

Çalışmalarda kullandığımız fırçasız DC motorun modeli D3124-1600kv olarak geçmektedir. Bazı fırçasız DC motorlar xxxx-xxxxkv şeklinde sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırmada D harfi motorun çapını ifade etmektedir, d harfinden sonra gelen 2 hane milimetre cinsinden motorun çapını ve sonraki 2 hane de yine milimetre cinsinden motorun yüksekliğini göstermektedir. Sağ tarafındaki sayı ve kv ise motorun devri ile alakalı bir göstergedir. Motora uygulanan voltaj başına döneceği deviri göstermektedir.

Örneğin bizim örnek motorumuzda 1600 kv değerli motora 10 volt uygularsak motorumuzun 16.000 devir/ dakika da döneceğini göstermektedir.

Bazı fırçasız DC motorlarda iste şu şekilde gösterim olabilmektedir "xxxxQ-xxxxKV-xxNxxP", yine ilk 2 hane motorun çapını, sonraki 2 hani motorun uzunluğunu, sonraki KV değeri ise voltaj başına kaç devir dönebildiğini göstermektedir. Önceki gösterimden farklı olarak N ve P değerleri de vardır. N sayısı motordaki bobin sarımlarının sayısını P sayısı ise motordaki kalıcı mıknatısların sayısını belirtmektedir.

Şekil 4.1: Fırçasız Motor İç Yapısı.

Şekil 4.1'de [5] de görüldüğü gibi fırçasız DC motorlar temel olarak 2 çeşidi ayrılmaktadır diyebiliriz, içi dönen ve dışı dönen motorlar olarak sınıflandırılır. İçi dönen motorlarda sabit mıknatıslar iç tarafta ve milin etrafında sabitlenmiş şekilde dönerler, bobin sarımları ise dış gövdeye sabitlenmiştir.

Dışı dönen motorlarda tam tersi şekilde sabit mıknatıslar dışarda bir kovana sabitlenmiştir, bobin sarımları ise ortadaki mil ile dışardaki kovan arasında durmaktadır.

Hava araçlarında, hava ile soğutma kolaylığı, kovana sabitlenmiş sabit mıknatıs maliyetinin düşük olması ve pervane bağlama kolaylıklarından dolayı genellikle dışı dönen motorlar tercih edilmektedir.

Kara ve su araçlarında ise toz, kir ve sudan korunması gerektiğinden dolayı içi dönen motorlar çoğunlukla kullanılmaktadır.

Elektrik motorlarında tork sabit mıknatısların ve bobin sarımlarının birbirini itmesi ile elde edildiğinden dolayı sabit mıknatısların ve bobinlerin sayılarının çok olması motorun torkunun yüksek olmasını sağlamaktadır. Bu sebepten dolayı motor çapları arttıkça tork değerleri de artmaktadır. Tabii aynı zamanda devir sayıları düşmektedir. O yüzden yüksek KV değerleri için düşük çaplı motorlar, düşük KV değerleri için de yüksek çaplı motorlar tercih edilmelidir.

Şekil 4.2: Tezde Kullanılan Fırçasız Motor.

Bu tez kapsamında Şekil 4.2'de [12] gösterilen dışı dönen fırçasız doğru akım motoru kullanılmıştır. Motorun özellikleri Tablo 4.1'de gösterilmiştir.

Tablo 4.1: Kullanılan Fırçasız Motor Teknik Özellikleri.

Model	NTM Prop Drive Series 28-30A 800kv
Kv	800rpm/v
Max Akım	20A
Max Güç	270W
Mil	3mm
Ağırlık	65g
ESC	20~30Amper
Hücre Sayısı	3s~6s Lipoly
Cıvata Bağlantı Ölçüsü	16mm & 19mm
Cıvata Bağantı Dişi	M3
Bağlantı	3.5mm konektör

4.2. Pervane

Hava araçlarındaki pervaneler yapı itibari ile ikiye ayrılmaktadır. Uçak ve dört rotorlu'larda yaygın olarak kullanılan sabit pal açısı olan tek parça pervaneler ve genellikle helikopterlerde kullanılan değişken pal açısı olan ve birkaç parçadan oluşan pervaneler vardır.

Çalışma konumuzun temeli değişken pal açısı kontrolü olduğundan dolayı çalışmalarda değişken pal açılı pervaneler kullanıldı.

Pervanelerin isimlendirmeleri de motorlardaki gibi yaygın kullanılan bir standarda oturmuştur. 9x4 şeklinde bir örnekte 9 sayısı pervanenin inch ölçü birimi cinsinden çapını, 4 sayısı da pervanenin açısı ile değişen 1 tur dönmesinde alacağı yolu yani hatve değerini yine inç ölçü biriminden göstermektedir.

Pal açısı değişen pervanelerde hatve değeri değişken olduğu için sadece çap bilgisi verilebilmektedir.

Çalışmalar sırasında 9 ve 10 inç'lik pervaneler kullanılmıştır.

Pervanelerin yapıldığı malzeme de bir o kadar önemlidir. Plastik üretim teknolojileri bu kadar gelişmeden önce genellikle ahşaptan el ile yapılan pervaneler kullanılırdı, daha sonra plastik kalıp teknolojisi ile plastik pervaneler yaygın olarak kullanılmaya başlandı. Dönen cisimlerin ataletlerinden dolayı performansı önemli derecede etkileyen bir parça olmasından dolayı yüksek performans ihtiyacı olan durumlarda karbon-fiber gibi yüksek teknoloji ve maliyet gerektiren pervaneler de kullanılmaktadır.

Çalışmalarda plastik pervaneler tercih edildi.

Pervanelerin hatve değerleri devir sayıları ile orantılı olarak istenilen özelliğe göre seçilmelidir. Yüksek hatve değerine sahip pervaneler düşük devir oranları ile yüksek hava itme özelliklerine sahip olmalarından dolayı yüksek hızlı uçuşlarda tercih edilmektedir.

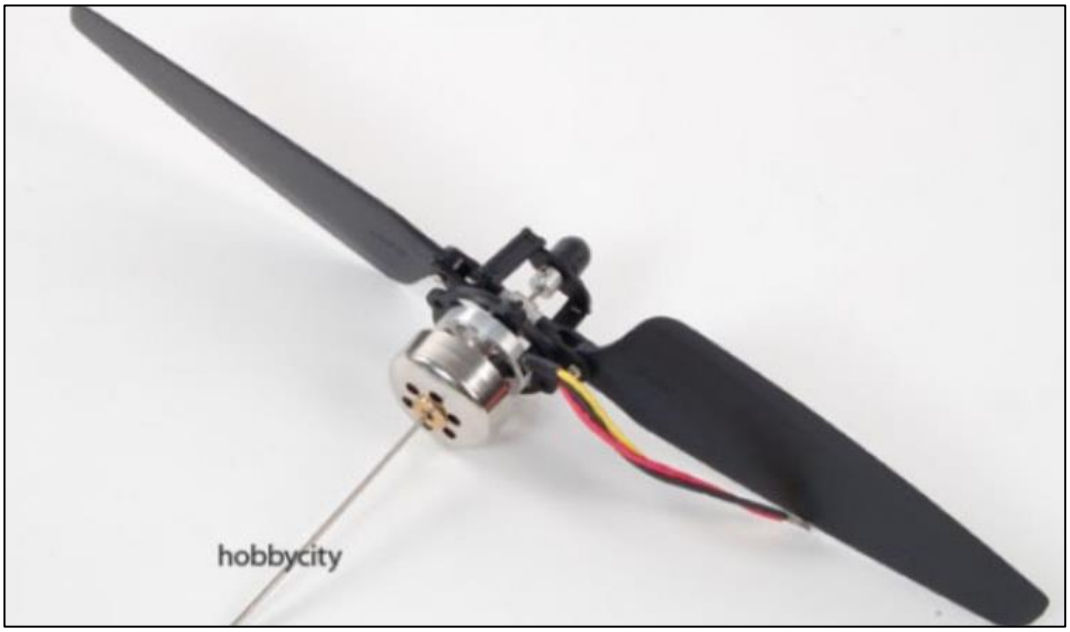
Ancak pervanenin hatve değeri kadar çapı da önemlidir. Büyük çaplı pervanelerin aynı kuvveti uygulayacak daha küçük çaplı pervanelere göre verimleri daha yüksektir. Bu sebepten dolayı düşük hızlı uçuşlarda büyük çaplı pervane kullanımı tercih edilmektedir.

Yüksek hızlı uçuşlarda ise tam tersi olarak küçük çaplı pervaneler tercih edilmektedir.

7 Şubat 1922 yılında Wallece Rupert Turnbull değişken hatveli pervanelerin patentini almıştır. Bu patent havacılık sektöründeki en önemli patentlerden biri olarak bilinmektedir. Bu yenilik sayesinde uçuş koşulları veya taşıtın ağırlığına göre pervane hatvelerinin değişiminin kontrol edilmesini sağlar. Turnbull'un ölümünden sonra 1977'de Kanada Havacılık Ünlüleri arasına kabul edilmesinin ardından onun atfına yapılan konuşmada "Onun havacılık sektöründeki patent başvurularının, özellikle başarılı hatve değişimli pervane icadının, uçuşa özel birçok probleme ve havacılık sektörüne olağanüstü fayda sağlamıştır." diye belirterek, bu icadın önemini ortaya koymuşlardır.

Değişken hatveli pervaneler pervanenin her iki palini de eşzamanlı olarak istenilen açıya getirebilmek amacı ile yapılmış bir sistemdir. Bu sistemde kullanılan motorun mili delik olmaktadır, bu milin içinden pal açılarını kontrol eden bir çubuk geçirilmektedir. Bu çubuğu motor milinin içerisinde ileri yada geriye hareket ettirerek pal açıları değiştirilmektedir [4].

Bu tez kapsamında kullanılması planlanan pervaneler aşağıda verilmiştir. Bu pervaneler değişken hatveye uygun olabilecek özellikte seçilmiştir. Pervanelerin üzerine takılı olarak gelen motorlar sayesinde ayrı olarak fırçasız motor alınması gerekmemektedir. Mekanizmanın ortalama ağırlığı 43 gramdır ve paller ise 10 inç (24,5cm) uzunluğundadır. Sistem 11.1 voltluk pil ile kullanmak üzere tasarlanmıştır.



Şekil 4.3: Değişken Hatveli Pervane Motor Sistemi.

Şekil 4.3’de [6] gösterilen sistemde motorun, milin ve pervanelerin tek üründe toplanmış olması bir avantajdır ancak motorun ve pervanenin tasarıma uygun olmadığı durumda aşağıda verilen parçaların tek tek tedarik edilebilmesi de mümkündür. Olası hatalarla karşılaşılabilmesi ihtimali sebebi ile Şekil 4.4’deki [7] ürünlerde tedarik edilmiştir.

Şekil 4.4: Değişken Hatveli Pervane Sistemi.

Tablo 4.2: Değişken Hatveli Pervane Sistemi Teknik Özellikleri.

Model	“4D Hollow Variable Pitch Unit
Boyutlar	140 x 70 x 19 mm
Ağırlık	25 gram

Pervanelerin hatve açısını değiştirmek için PWM sinyalinin doluluk oranı ile oynanmaktadır. Dolayısıyla hatve açısını değiştirebilmek için Şekil 4.5’deki [8] Micro Servo SG90 servo motorlar kullanılmıştır. Motorun özellikleri Tablo 4.3’de verilmiştir.

Şekil 4.5: SG90 Servo.

Tablo 4.3: SG90 Teknik Özellikleri.

Model	SG90
Çalışma Voltajı	6.0V / 7.4V
Çalışma Akımı	200mA / 240mA
Çalışma Hızı	0.10sec.60°/ 0.09sec.60°
Tutma Torku	1.5kg.cm /1.7kg.cm
Boyutlar	22.5X11.5X24.6mm(0.88"x0.45"x0.96")
Ağırlık	9g
Ölü Band	≤5uSec
Çalışma açısı	40°/ 400us
Potansiyometre	2 kaymalı/ doğrudan yol verme
Rulman	MR85
Dişli	Plastik
Kablo Uzunluğu	215mm
Çalışma Sıcaklık Aralığı	-20°C ~ +60°C
Bağlantı Diş Sayısı	21

4.3. Elektronik Hız Kontrolcü

Fırçasız motorların kontrolünü sağlamak amacı ile elektronik hız kontrolcüleri kullanılmaktadır, her motorun kendi elektronik hız kontrolcüsü bulunmaktadır. Yüksek motor güçleri karşısında yüksek akımların kontrollü bir şekilde motora iletilmesi ve kullanıcının arzu ettiği motor devrini karşılamak için kullanılmaktadır.

Elektronik hız kontrolcülerinde de belli başlı özelliklerini gösteren değerleri vardır. Genel olarak kullanılan ve elektronik hız kontrolcüsü seçiminde ihtiyaç olan değerler şu şekilde sıralanmaktadır;

- Voltaj

Elektronik hız kontrolcülerinin destekledikleri azami voltaj değeridir, bu değerin üzerinde bir pil ile kullanıldıkları takdirde elektronik motor kontrolcüsünün zarar göreceğini belirtmektedir.

- Azamı anlık akım

Elektronik hız kontrolcülerinin destekledikleri azami kısa süreli akım değeridir. Elektronik hız kontrolcülerine bu değerin üzerinde akım çekebilecek motorlar bağlanması durumunda kontrolcünün zarar görebileceğini belirtmektedir. Bu ifadedeki anlık terimi değişkenlik göstermektedir ve parantez içerisinde belirtilmesi gerekmektedir. Bu değer birçok değişkene bağlı olmasından dolayı kesin bir limit olarak düşünülmemelidir.

- Azami devamlı akım

Elektronik hız kontrolcülerinin destekledikleri azami devamlı olarak akım değeridir. Elektronik hız kontrolcüleri bu akım değerini uzun süreli olarak verebilmektedirler. Ancak uzun süreli olarak bu değer aşılması durumunda kontrolcünün zarar görebileceğini göstermektedir. Helikopter, döner kanatlı İHA'lar ve yavaş uçuş yapan uçaklarda devamlı yük altında çalışma olduğundan dolayı azami devamlı akım değeri dikkate alınarak elektronik hız kontrolcüsü seçilmelidir.

- Azami devir

Elektronik hız kontrolcülerinin destekledikleri azami devirdir. Burada belirtilen devir motorunuzun direk olarak devri olmayabilir çünkü burada belirtilen devir değerinin yanında kutup sayısı da belirtilmektedir. Kutup sayısı ile ters orantılı olarak bir azami devir değeri vardır. Örnek: "240.000devir – 2 kutup" bir kontrolcü 4 kutuplu bir motorda en fazla 120.000devir ile çalışabilir. Elektronik hız kontrolcüsünün çalışma mantığını açıklayan ileriki bölümlerde bunun nedeni görülmektedir.

- PWM

Elektronik hız kontrolcüsüne giriş sinyalinin frekans aralığını göstermektedir. Elektronik hız kontrolcüsünün belirtilen frekans aralığından daha alçak ya da yüksek frekanslı sinyallerde çalışmayacağını göstermektedir. Bu değer radyo cihazınız veya sürüş kontrolcü kartınızdan gelen sinyal ile bağlantılıdır.

- BEC

Elektronik hız kontrolcüsünün bir özelliğidir. Elektronik hız kontrolcülerinin çektikleri akımlar yüksek olmasından dolayı güç kaynakları kalın kablolar ile doğrudan elektronik hız kontrolcülerine bağlanır. Kontrolcü üzerinden diğer cihazlara güç beslemesi yapılabilmesi amacı ile kontrolcünün üzerinde voltaj regülatörü özelliği bulunabilmektedir. Ancak bu özelliğin olmadığı veya bu özelliğin değişken özellikleri olan elektronik motor kontrolcüleri de bulunmaktadır.

Yukarıdaki temel özelliklerin dışında bütün parçalarda olduğu gibi elektronik hız kontrolcüsünün de fiziksel özellikleri belirtilmektedir. Özellikle ağırlık en önemli özelliklerden birtanesidir. Ağırlığın yanısıra boyutları da tasarım aşamasında etkili olmaktadır.

Bu tez kapsamında seçilen ESC, Şekil 4.6'daki [10] Afro 30Amper multi-rotor markalı ürün satın alınmıştır. Maksimum akımı kapasitesi 30 amper, giriş frekansı ise 1 kilohertz'dir. ESC'nin ortalama ağırlığı 26,5 gram, boyutları ise 50x25x11 mm ölçülerindedir.

Şekil 4.6: AfroESC 30A.

4.4. Uçuş Kontrol Kartı

Temelde dört rotorlu'lardaki her bir motorunu ayrı ayrı kontrol etmek için kullanılan elektronik kontrolcüdür. Üzerindeki açı ve ivme sensörleri sayesinde dört rotorlu'nın stabil durmasını sağlamaktadır. Kullanıcının hedeflediği hareket isteklerini sağlayabilmek için gerekli motor hızlarını hesaplayarak motorlara sinyal gönderir. Motorların hızlanmaları, hedef hızları gibi birçok kriteri uçuş kontrol kartı belirler. Acil durumlar için de belli başlı senaryolara sahiptir. Örneğin pil seviyesinin kritik seviyenin altında olması durumunda ilk kalkış yüksekliğine ve ilk kalkış konumuna gidebilme özellikleri olan uçuş kontrol kartları vardır. Bazı uçuş kartları ise kullanıcı ihtiyacı olmadan önceden öğretilmiş rotalara kendi kendine gidebilme özelliklerine sahiptir. Bu kartlar otonom uçuş özellikli kartlardır. Uçaklar, 3 motorlu, 4 motorlu, 6 motorlu dört rotorlu'lar gibi farklı insansız hava aracı yapılarına uyum sağlayabilmektedirler. Dört rotorlu'nın diğer elemanlarında çıkabilecek hatalara karşı hata algılama sistemleri bulunmaktadır ve her hata için farklı senaryolar ayarlanabilmektedir. Uçuş kontrol kartları kullanıcının ve aracının uçuş özelliklerine göre programlanması gerekmektedir. Bazı kullanıcılar uçuş kontrol kartındaki güvenlik senaryoları ve düzeltme ayarlarını sıfırlayarak kontrolün tamamen kendisinde olmasını isterken bazı kullanıcılar da en az müdahale ile uçurabilecek şekilde birçok kontrolü uçuş kontrol kartının yapmasını isteyebilmektedir.

Bu tez kapsamında Şekil 4.7'de gösterilen [11] SP Racing firmasının clean flight uçuş kontrol kartı kullanılacaktır.

Şekil 4.7: SP Racing F3 Uçuş Kontrol Kartı.

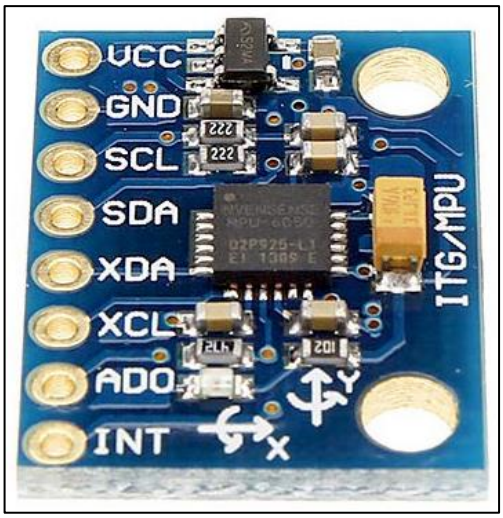
Kullanılan uçuş kartının fiziksel teknik özellikleri;

- 36 x 36 mm Boyutlarında
- 6 Gram ağırlık
- STM32F303 72Mhz işlemci

Kullanılan uçuş kartının içerisinde bulunan sensör modülleri;

- Jiroskop(Gyro)

Jiroskop sensörü kendi ekseninde dönme hareketinin değişimlerini ölçmek için kullanılan bir sensördür. İHAlarda 3 eksenli jiroskop kullanılarak bütün eksenlerdeki değişimler ölçülür ve bu sonuçlara göre uçuş kontrol kartı vereceği tepkilere karar verir. Bu tez kapsamında kullanılan Cleanflight uçuş kartında Şekil 4.8'de gösterilen MPU6050 modül kullanılmıştır [13].



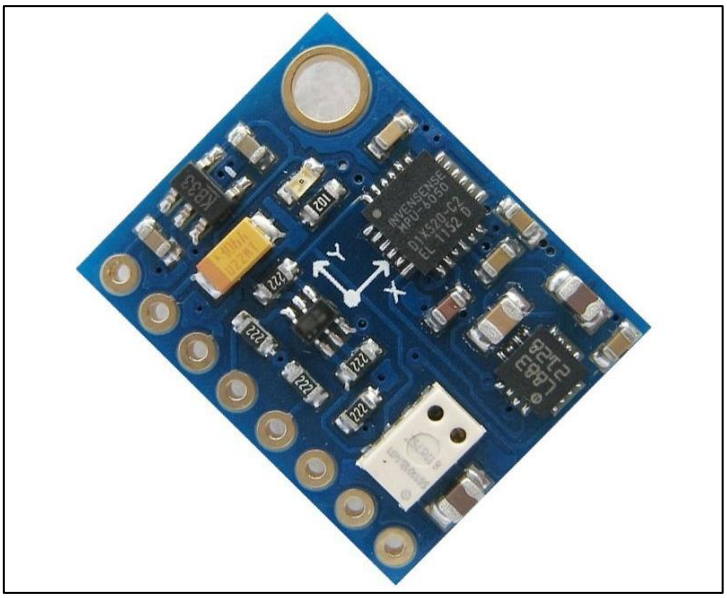
Şekil 4.8: MPU6050 Modülü.

- İvmeölçer (Accelerometer)

İvmeölçer isminden de anlaşılacağı gibi eksen boyunca doğrusal ivmeyi ölçmek için kullanılan bir sensördür. Dört rotorlu'larda 3 eksenli ivmeölçer kullanılarak bütün eksenlerdeki ivmeler ölçülür ve bu sonuçlar jiroskop ölçümleri ile birleştirilerek dört rotorlu'nın tam olarak nasıl bir hareket yaptığı tespit edilmiş olur. Bu tespit sonrasında uçuş kontrol kartı yapması gereken bir tepki var ise elektronik hız kontrolcülerine gerekli sinyali gönderir. Bu tez kapsamında kullanılan Cleanflight uçuş kartında MPU6050 modül kullanılmıştır.

- Barometre

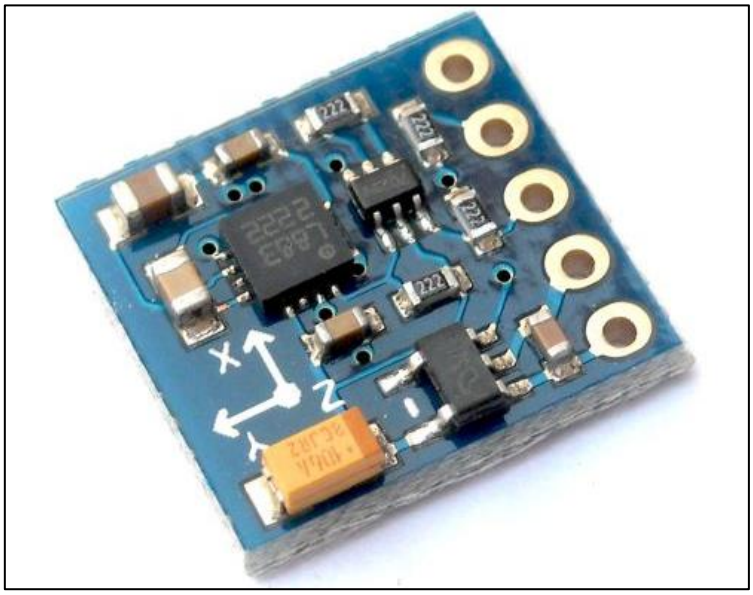
Bu tez kapsamında kullanılan Cleanflight uçuş kartında Şekil 4.9'da görülen MS5611 barometre modülü kullanılmıştır [14].



Şekil 4.9: MS5611 Modülü.

- Pusula

Bu tez kapsamında kullanılan Cleanflight uçuş kartında Şekil 4.10'da görülen HMC5883 pusula modülü kullanılmıştır [15].



Şekil 4.10: HMC5883 Modülü.

4.5. Radyo Kontrol Sistemi

Radyo kontrollü dört rotorlu İHAlar, R/C helikopterler olarak da bilirnirler. Radyo sistemleri ilk olarak 1900 lerin başlarında torpidolarda ve deniz altılarda kullanılmaya başlanmıştır. Yaygın olarak kullanımı da 1950 lerden sonra olmuştur. Bakıldığında çok büyük bir gelişme olmayan bir sistemdir. Günümüzde radyo sistemleri de farklı çalışma frekanslarına sahiptir. Çoğunluğu 5.8ghz ile 27mhz frekansı aralığındadır. Hatta son yıllarda 2.4ghz kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır.

Radyo frekansı: iki elektronik devre arasında haberleşmeyi sağlamak üzere kullanılan belli bir ses frekansıdır. Bu frekans etraftaki bütün cihazlara ulaşabildiğinden dolayı radyo frekansı ile haberleşen cihazlar arasında şifreleme yapılması gerekmektedir. Radyo frekansı ile haberleşen cihazlarda bir alıcı ve bir verici taraf bulunmaktadır. Verici taraf gönderilecek bilgiyi şifreleme yaptıktan sonra gönderir, alıcı tarafa ise aldığı bilginin şifrelemesini açtıktan sonra kullanabilir. Radyo frekanslarının diğer haberleşme yöntemlerine göre avantajları ve dezavantajları vardır. Işık ve hava koşullarından etkilenmemeleri ve iletişim mesafelerinin de oldukça fazla olması önemli avantajlarındandır. Alıcı cihaz ile verici cihaz arasında görsel bir temas olmaması da güzel bir avantajdır. Maliyetlerinin yüksek olması düşük bütçeli projeler için dezavantaj olabilmesinin yanında ortamda bulunabilecek diğer radyo frekansı ile haberleşen cihazlar ile karışabilme problemi ve şifrelemenin çözülerek güvenliğin alt edilebilmesi de önemli dezavantajlarındadır. Bunların yanında diğer haberleşme yöntemlerine göre haberleşme hızının düşük olması da bir dezavantajdır. Ancak günümüzde maliyetleri oldukça düşmüştür. Hızları ve güvenlik seviyeleri de oldukça yükselmiştir. Bu sebeplerden dolayı da son yıllarda birçok alanda görülebilmektedir.

Radyo sistemleri ilk başlarda sadece araçların basit sağ-sol, yukarı-aşağı, ileri-geri gibi basit kontrollerini yapabilirken şu anda radyo sistemleri vasıtası ile araçtaki verileri de kullanıcının görebilmesine imkan vermektedir. Hatta aracın üzerine istekler doğrultusunda farklı sistemler entegre edilerek bu sistemlerin kontrolünü de aynı radyo sistemi üzerinden yapmanız mümkün hale gelmiştir.

Radyo sistemleri genellikle alıcı-verici-pil şeklinde set olarak satılırlar. Dört rotorlu sistemlerinde çok hassas bir denge olduğundan dolayı uçuş kontrol kartı olmadan yalnızca radyo sistemi kullanarak uçuş yapabilmeniz pek mümkün değildir

bu yüzden radyo sistemleri uçuş kontrol kartları göz önünde bulundurularak ayarlanmalıdır.

4.6. Pil

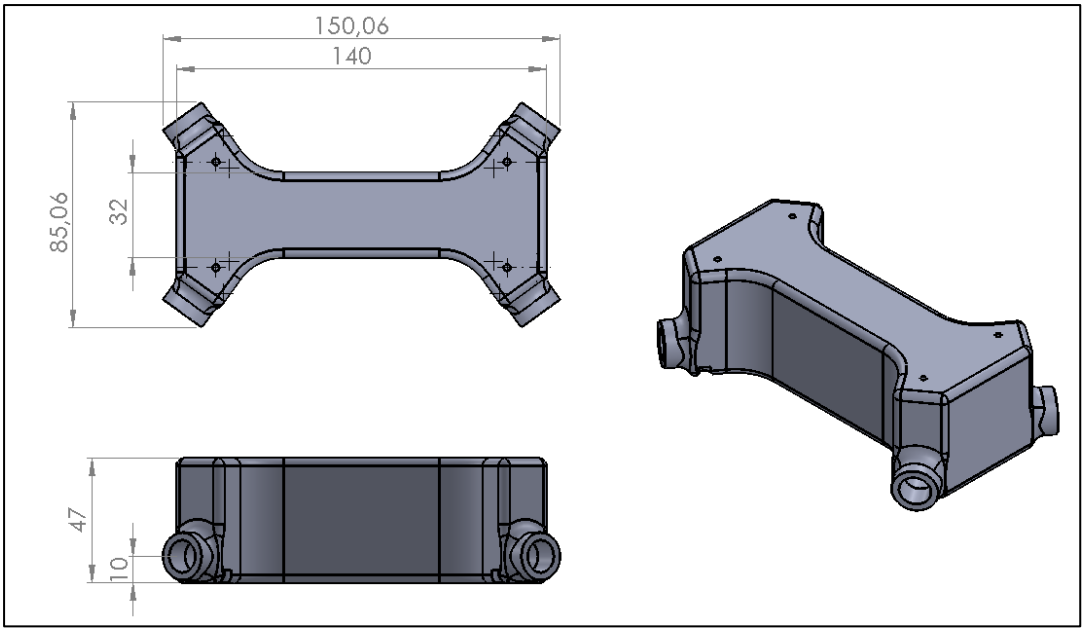
Radyo kontrollü araçların hepsinde olduğu gibi dört rotorlu'larda de pil bulunmaktadır ancak dört rotorlu'larda diğer araçlara oranla pilin verimi çok daha önemlidir çünkü hiçbir şey yapılmadan hava dursa dahi devamlı motorların çalışması ve havada durması gerekmektedir. Kapasite, ağırlık ve güç açısından lityum polimer piller dört rotorlu'lar için tercih edilmektedir. Lityum polimer pillerin her bir hücresi 3.6-3.7 volt aralığında olabilmektedir. Araçta kullanacanılacak hücre sayısı, motorlar ve elektronik hız kontrolcü özelliklerine göre seçilmelidir. Pillerin kapasitesi ise istenilen uçuş süresine göre büyük ya da küçük seçilebilir.

Pil seçiminde dikkat edilmesi gereken bazı özellikler vardır. Pillerin "C" birimi ile tanımlanan değer, pilden çekebileceğiniz azami akım değerinin katsayısıdır. Pil kapasitesi 5000 mAh ise akım katsayısı da 50C ise bu örnek pilin verebileceği azami akım aşağıdaki şekilde hesaplanabilmektedir.

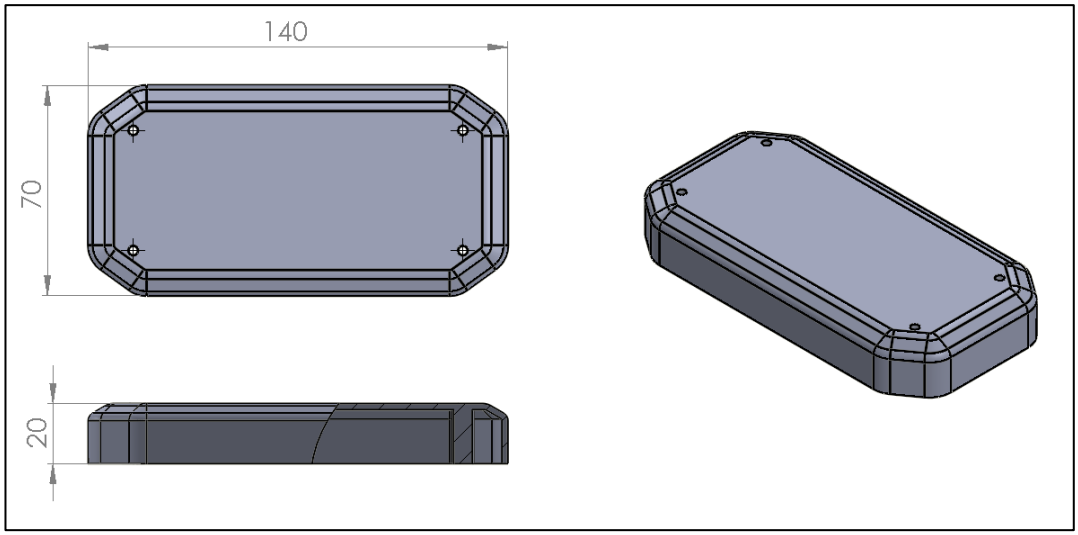
$$5000\ mAh\ x\ 50C = 250000\ mAh = 250\ A \qquad (2.12)$$

4.7. Gövde

Gövde tasarımı dört rotorlu İHA için seçilen pil ve kontrolcüye özel olarak Solidworks de tasarlanmıştır. Yapılan tasarım üç boyutlu fdm yazıcıda basılmıştır. Pilin şeklinin uzun olması göz önünde bulundurularak dikdörtgen bir yapı düşünülmüştür. Tasarımın üzerinde bırakılan vida delikleri sayesinde ikinci bir kapak gövdenin üzerine takılmakta, uçuş kontrol kartı, radyo alıcısı, motor sürücüleri gibi ekipmanları örtmektedir. Gövde kullanılacak 5000 mAh kapasitesindeki pili tamamen içine alabilecek boyutlarda tasarlanmıştır. Pilin etrafında komple bir kabuk oluşturmasından dolayı pervanelerin kaldırma kuvvetinden doğan kuvvetler karşısında geometri bozukluklarına karşı daha dayanıklı bir yapı oluşturmuştur. Şekil 4.8'de gövde tasarımı ve boyutları görülebilmektedir.

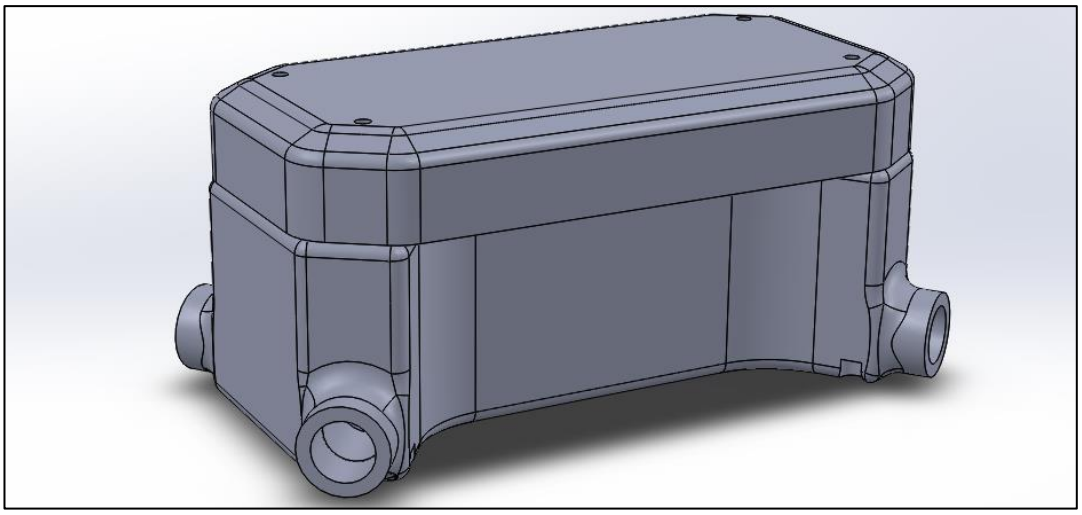


Şekil 4.11: Gövde Boyutları.



Şekil 4.12: Gövde Üst Kapak Boyutları.

Şekil 4.9'da gövdenin üstüne elektronik sistemleri örtmesi için tasarlanan üst kapak görülmektedir. Üst kapağın alt kapağa montajı M3 dört adet civata ile yapılacaktır. Montaj sonucu oluşacak parça Şekil 4.10'daki gibi olacaktır.

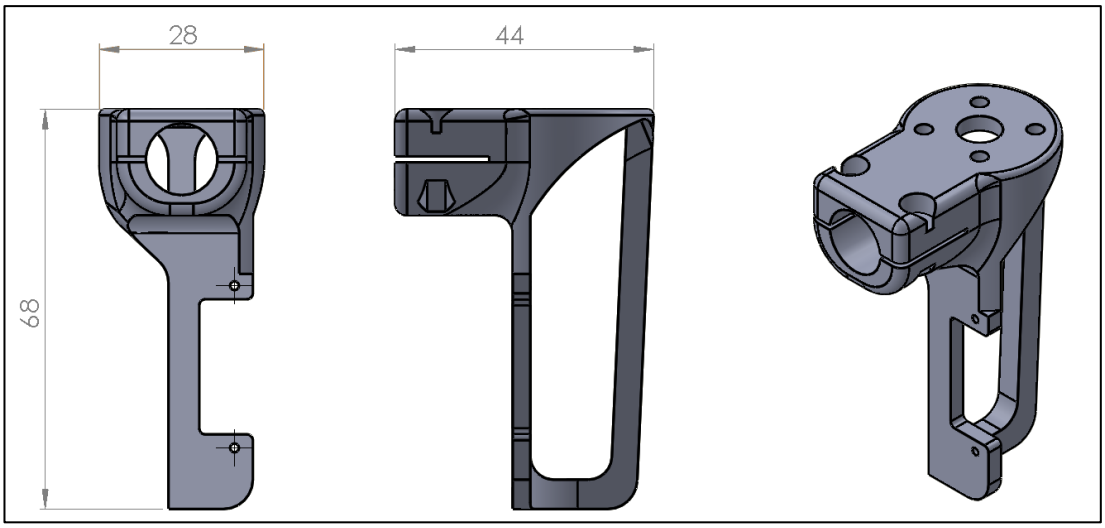


Şekil 4.13: Gövde ve Gövde Üst Kapak Beraber.

4.8. İniş Takımları

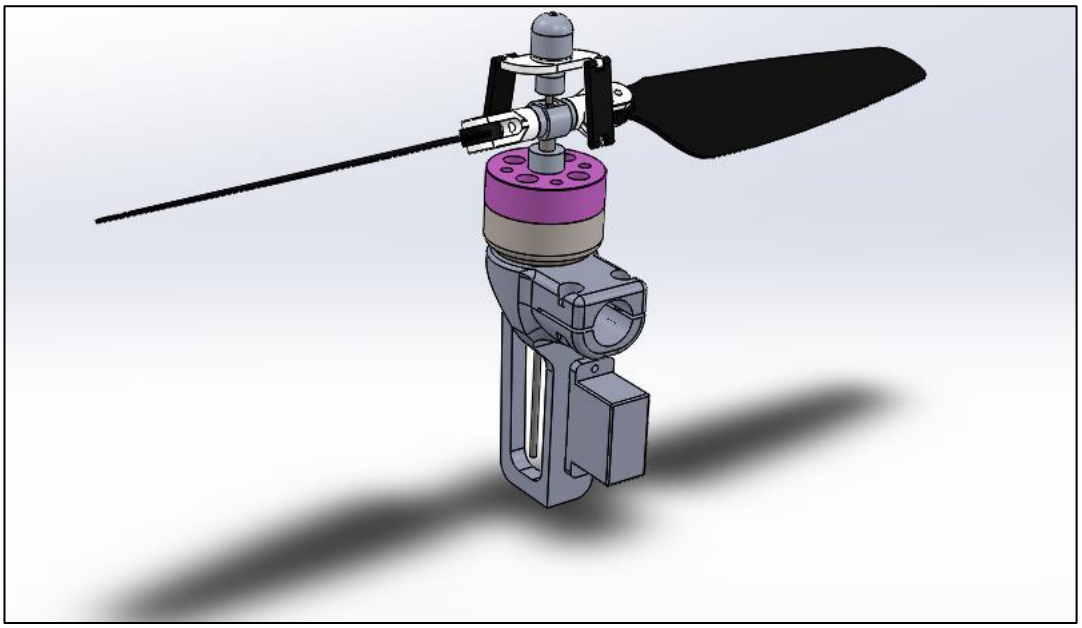
İniş takımı tasarımı değişken hatveli pervanenin mil uzunluğu ve servo motor ölçülerine göre solidworks de tasarlanmıştır. Tasarım üç boyutlu fdm yazıcıda basılmıştır. İniş takımı dört rotorlu İHA'yı taşıyabilecek ve darbelere karşı dayanıklı olabilmesi için baskı ayarlarında iç dolgu oranı yüksek tutulmuştur. Gövdeye 12mm çapında karbon fiber borular ile bağlanmak üzere tasarım yapılmıştır. Karbon fiber borular 2 adet M3 cıvata yardımı ile ayaklara bağlanacaktır.

Motor bağlantılarında 4 adet M3 cıvata kullanılacaktır. Servo bağlantısında 2 adet plastik vidası kullanılacaktır. Tasarımın son hali Şekil 4.11'de görülmektedir.



Şekil 4.14: İniş Takımı Boyutları.

Tasarıma servo motorun ve değişken hatve kontrollü pervanenin montajının yapılmış hali Şekil 4.12'de görülmektedir.



Şekil 4.15: İniş Takımı, Servo, Değişken Hatve Sistemi Montajı.

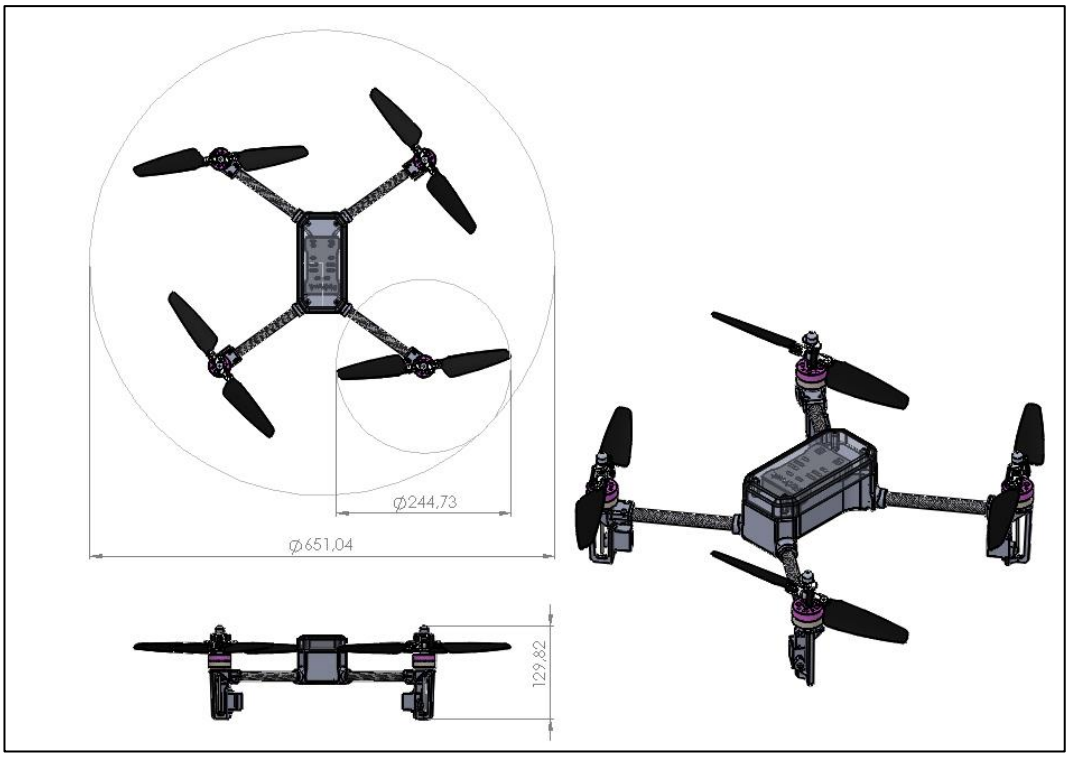
Ayakların gövdeye bağlantısı 12 mm çapında 150 mm uzunluğunda karbonfiber borular ile yapılmıştır. Uzunluğun 150 mm olarak seçilmesinin sebebi kullanılan motora uygun en büyük pervane çapının 254mm olmasıdır. Pervanelerin gövdeye en yakın olduğu açıda gövdeye uzaklığı 20 mm'dir. Bu mesafe hava akışının genişleyerek ilerlediği teorisine uygun olarak tasarlanmıştır..

İniş takımları son halini beş farklı tasarım ve üretim denemesinden sonra ulaşılmıştır. Şekil 4.13'de beş farklı tasarım denemesinin üretilmiş halleri görülmektedir.

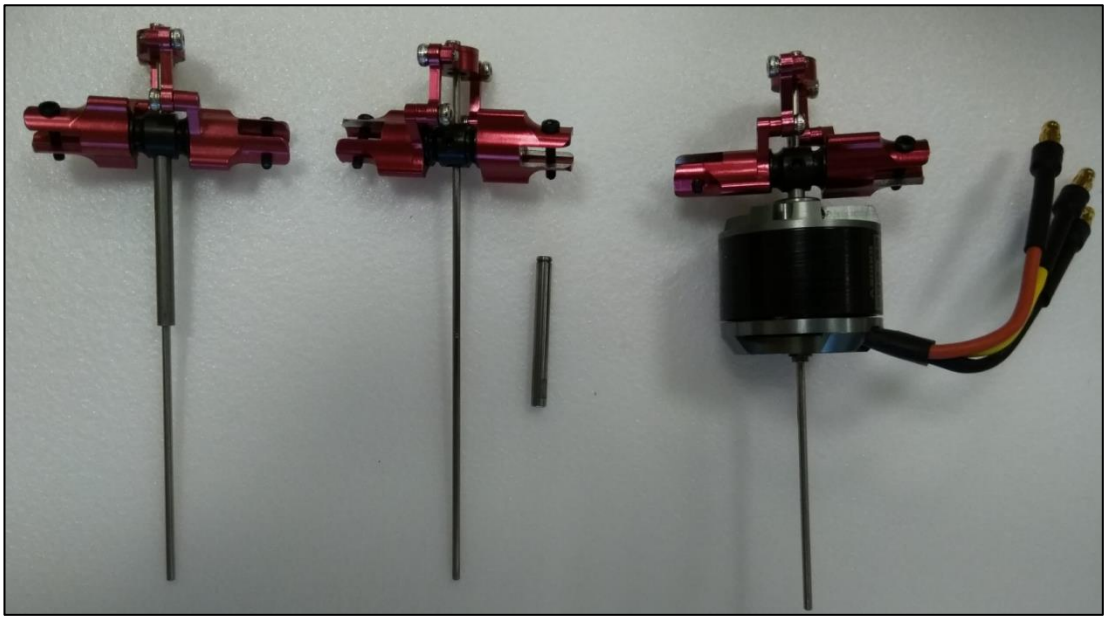
Şekil 4.16: Soldan Sağa İniş Takımı Tasarım Denemeleri.

4.9. Gövdenin Montajı

Bu tez kapsamında kullanılan değişken hatve kontrol rotor sistemi motordan bağımsız olarak tedarik edildiği için motora bağlantılarının yapılması gerekmektedir. Ancak motor üzerinde gelen millerde değişken hatve kontrolü için gerekli olan ayar mekanizmasını yataklayacak delik bulunmamaktadır. Bu sebeple sistemde ayar çubuğu üzerinde gelen mil ve motor mili sökülmüş, motor mili yerine doğrudan ayar mekanizmasının mili takılmıştır. Bu şekilde motor, ayar mekanizmasını yataklayacak şekilde yerleştirilmiştir. Şekil 4.14'de gövdenin, motorların, iniş takımlarının ve pervanelerin monte edilmiş hali ve ölçüleri görülmektedir.



Şekil 4.17: Genel Gövde Ölçüleri.



Şekil 4.18: Değişken Hatve Sistemine Motor Montajı.

Motorların 4 ü de aynı şekilde hazırlanmıştır. Daha sonra motorlar ayaklara 4 adet M3 civata ile sabitlendi.

Dört adet servo motor da aynı şekilde ayakların alt kısımlarına iki adet servo plastik vidası ile sabitlendi. Servo motorların montajı sırasında servoların kafasına

takılan “servo horn” ismi verilen hareketi sağlayan plastik parçalar montaj kolaylığı için çıkartıldı. Daha sonra servo horn parçaları ile değişken hatve pervane sisteminin hatve değiştirme milini birbirine bağlandı.

Dört ayağa da iki adet M3 cıvata ve somun ile sıkıştırılan 12mm çaplı karbon fiber borularında monte edilmesi ile ayaklardaki mekanik montaj işlemi tamamlanmış oldu.

Karbon fiber boruların diğer tarafı yine ikişer adet M3 cıvata ile gövdeye monte edildi. Artık elektroniklerin montajına geçilecektir.

İlk olarak pusula, ivme ve açı sensörleri bulunduğundan dolayı konumu ve açısı önemli olan uçuş kontrol kartı yerleştirilmektedir. Daha sonra uçuş kontrol kartına PPM hattının bağlandığı uzaktan kumandanın alıcı devresi bağlanmaktadır.

Uçuş kontrol kartlarından standart olarak 4 adet motor hızı kontrolü için elektronik hız kontrolcüye sinyal gider ancak bu çalışmada hem hatve kontrol hem motor hızı kontrolü olduğundan dolayı 8 adet sinyal ihtiyacı vardır. Her bir sinyali motor hızı ve hatve kontrolü sinyaline çevirecek olan bir devreye girecektir. Bu devrede 1 tane olan motor hızı sinyali, sinyalin seviyesine göre en verimli uçuşu yakalamak için oluşturulmuş olan algoritmaya girerek 2 farklı sinyal olarak çıkmaktadır. Bu devreden 4 tane kullanma ihtiyacı vardır.

Bu devrelerin de giriş sinyali uçuş kontrol kartından olacak şeklinde montajı yapılmaktadır. Çıkış sinyalinin de 1. kanalı hatve kontrol servosuna, 2. kanalı ise elektronik hız kontrol kartına bağlanacaktır.

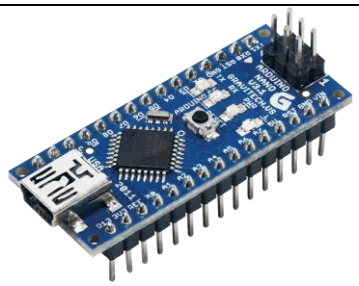
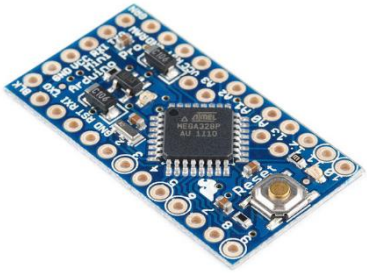
Sinyal kablolarının bağlantısı bittikten sonra güç kablolarının bağlantıları yapılabilir. Elektronik hız kontrol kartlarının güç girişine güç dağıtım kablosunun çıkış uçları bağlanır, güç dağıtım kablosunun giriş ucu ise doğrudan pil konektörüne bağlanır. Ancak dikkat edilmesi gereken bir nokta vardır, İHA’larda ağırlık önemli olduğundan güç açma kapama düğmesi yerine pil konektörü sökülüp takılarak İHA’nn gücü açılıp kapatılmış olur.

5. DEĞİŞKEN HATVE VE DEĞİŞKEN HIZ KONTROL ALGORTİMASI

Değişken hatve ve değişken hız kontrol algoritması yazılımı R/C servo PWM sinyalini okuyacak ve bu sinyali algoritmaya göre hesaplayarak 2 çıkış olarak verecektir. Her bir PWM sinyali azami 200 Hz'de olmaktadır bu yüzden işlemci hızının sinyali kaçırmadan okuyabilecek ve bu sinyallere eş zamanlı olarak 2 adet PWM çıkışı verebilecek hızda olması gerekmektedir.

İlk denemelerde arduino nano kullanılmıştır. Arduino Nano gelişirme kartı en fazla 16mhz işlemci hızına sahiptir. Daha sonra dört rotorlu İHA üzerine konulmak üzere Arduino pro mini kartı kullanılmıştır. Arudino pro mini kartı da aynı işlemciye ve 16mhz lik işlemci hızına sahiptir. Bu araştırmada tercih edilmesinin sebebi Arudino pro mini kartının Arudino nano kartından daha ufak ve daha hafif olmasıdır.Aşağıda iki devrenin fotoğraflarını ve Tablo 5.1'de teknik bilgileri görülebilmektedir.

Tablo 5.1: İşlemcilerin Karşılaştırılması.

	Arduino Nano	Arduino Pro Mini
Boyut	7 gram	2 gram
Ağırlık	18 x 45 mm	18 x 33 mm
Görünüm		

200 Hz hızındaki sinyali kaçırmadan okuyabilmek için interrupt girişi kullanılmıştır.

Sinyal geldiği anda sayaç çalışmaya başlayarak sinyalin düşük seviyeye geçmesine kadar olan zamanı saymaktadır. Bu zaman bize sinyalin genişliğini vermektedir. R/C servo PWM sinyallerinden sinyalin genişliğine göre servonun açı bilgisi alınmaktadır. R/C servo sinyalleri 1000 nano saniye ile 2000 nano saniye aralığında çalışmaktadır. Toplamda 270 derece dönebilme kabiliyetindeki bir servo

için 1000 nano saniyelik bir doluluktaki PWM sinyali 0 derece konumunu ifade ediyor ise 2000 nano saniyelik bir doluluk da 270 derece konumunu ifade etmektedir.

Bizim ihtiyacımız olan sistemde servo kolundaki dairesel hareketi lineer harekete çevirerek kullanacağımızdan dolayı en az 180 derece hareket kabiliyeti olan bir servo kullanılmaktadır. Ancak birçok R/C servonun hareket açısı 270 derece olduğundan dolayı bizim kullanacağımız PWM sinyali aralığı da 1000-2000 nano saniye değil ortalama 1000-1650 nano saniye PWM sinyali aralığında işlem yapmamız gerekmektedir.

Bu sinyal aralığında kullanılacak algoritma ise seçilen motor ve seçilen pervane çapına göre test düzeneğinde farklı hatvelerde, farklı devirlerde ölçülen akım ve çekiş kuvveti göz önünde bulundurularak oluşturulan tablo yardımı ile oluşturulmaktadır.

Tablolardaki değerler 0-1000 aralığında çalışılmıştır ancak gerçekten sinyal çıkışı 1000-2000 ms aralığında olduğundan dolayı yazılımda en son çıkış bölümünde işlemden geçmiş değerlere bin değeri eklenmiştir.

Yazılımda ESC PWM'i R/C Sinyal yelpazesinin tamamını kullanırken pervane hatve açısı kontrolünde kullanılan servo toplamda doksan derece hareket etmesi yeterli olmaktadır bu yüzden de sinyal 1000-2000 aralığında değil de 1250-1550 milisaniye aralığında orantılandırılmıştır. Bu orantılandırma işlemi kullanılacak servo kafası bağlantı parçasına ve kullanılan değişken hatveli pervane sistemine göre değiştirilebilir özelliklerdedir.

Yazılımda "dizi" özelliği kullanıldığından dolayı yapılacak yeni bir çalışmada çıkacak olan yeni değerleri girmek için sadece yazılımın başlangıcında bulunan tanımlama bölümündeki "hatve", "escpwm" ve "pwmin" dizilerinin girilmesi yeterli olacaktır.

Yazılımımızda arduinonun beşinci ve altıncı kanalı çıkış olarak ayarlanmıştır. Beşinci kanal "escpwm" ismiyle elektronik hız kontrolcüsünün sinyalini, altıncı kanal ise "hatve" ismi ile pervane hatve açısı kontrolcüsü olan servonun sinyalini oluşturmaktadır.

Kumanda sisteminden gelen pwm sinyali ise D2 kanalında okunuyor. Kumanda sisteminden gelen sinyal "kesme" yöntemi ile okunmaktadır.

Ölçümler sonucunda ulaşılan giriş sinyali ile çıkış sinyalleri arasındaki ilişki tablodaki değerlerin yazılımdaki dizi bölümlerine girilmesi ile yazılıma aktarılmış olur.

Yazılımda giriş sinyalinin tablodaki giriş sinyali değerleri ile karşılaştırılarak ne aralıkta olduğu tespit edilir. Bulunduğu aralıktaki pozisyonu dizideki bir üstü ve bir altı değere bakılarak hesaplanır. Bulunan değere karşılık ilk olarak elektronik hız kontrol devresine gönderilecek olan sinyal hesaplanır. Elektronik hız kontrol devresine gönderilecek olan sinyal giriş sinyalindeki değerin bulunduğu aralığa denk gelen ESC PWM değer aralığı dizisinden seçilerek aynı seviyedeki değer hesaplanır ve çıkış sinyali olarak gönderilir.

İkinci olarak pervane hatve açısını kontrol edecek sinyali oluşturmak için yine aynı şekilde giriş sinyalinin seviyesine bakılarak hatve dizisinden aynı seviyedeki hatve değeri seçilerek çıkışa gönderilir.

R/C servo sinyali bin milisaniye ile iki bin milisaniye aralığındaki sinyal ile çalıştığından dolayı bulunan değerler bin üzerinden ve fazladan bin eklenerek çıkış sinyali oluşturulur. Giriş sinyali okunurken de aynı şekilde bin değer eksiltilerek bütün işlemler yapılmıştır.

Kodun ilk kısımların değişkenler tanımlanmıştır, daha sonrasında ise deney sonuçlarından elde edilen Tablo 7.1'deki üç farklı dizi değerleri yazılımdaki dizi bölümlerine girilir. Genel olarak yazılımda bir adet sinyal kesme komutu ile okunarak giriş sinyali diziler değerleri doğrultusunda işleme alınarak iki farklı sinyal çıkışı yapılmaktadir. Şekil 5.1'de arduino kodları görülebilmektedir.

```
volatile int pwm_value = 0;
volatile int prev_time = 0;
volatile bool doneFlag= false;
int pwm_son = 0; int pwm1 ;//= 5; int pwm2 ;//= 6; int i=1;
const byte interruptPin = 2;
int pwmin[11] = {0, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000};
int hatve[11] = {0, 0, 125, 125, 125, 125, 125, 125, 125, 125, 200};
int escpwm[11] = {0, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1000};
void setup() {Serial.begin(9600);
pinMode(7, OUTPUT); pinMode(9, OUTPUT);
attachInterrupt(0, rising, RISING);}
void loop() { pwm_son = pwm_value-900 ;
Serial.println(pwm_son);
if (pwm_son <= pwmin[i]){
pwm1=                    (escpwm[i-1]+((pwm_son-pwmin[i-1])/(pwmin[i]-pwmin[i-
1]))*(escpwm[i]-escpwm[i-1]));
pwm2=     (hatve[i-1]+((pwm_son-pwmin[i-1])/(pwmin[i]-pwmin[i-1]))*(hatve[i]-
hatve[i-1]));
pwm2 = 550+pwm2; // 0-20 aralığındaki hatve değerini 250-550 aralığına aldık
i=1; } i++;
if(doneFlag == true){
digitalWrite(7, HIGH);
delayMicroseconds(1000);
delayMicroseconds(pwm1);
digitalWrite(7, LOW); digitalWrite(9, HIGH);
delayMicroseconds(1000);
delayMicroseconds(pwm2);
digitalWrite(9, LOW);
doneFlag = false;
attachInterrupt(0, rising, RISING);}}
void rising() {attachInterrupt(0, falling, FALLING);prev_time = micros();}
void falling() {pwm_value = micros()-prev_time; doneFlag = true;}
```

Şekil 5.1: Arduino Kodları.

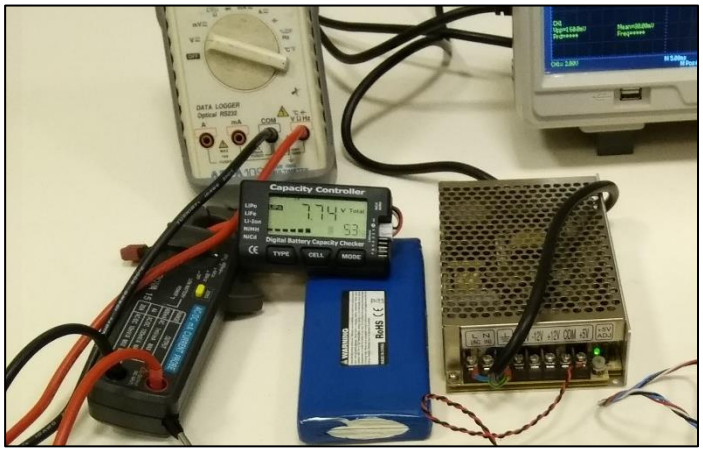
6. DENEY VE GÖZLEM

Yapılan deneylerde çekilen toplam akım, sistemin taşıma kuvveti, elektronik hız kontrolüne verilen PWM, pervane hatve açısı ve motor devri ölçülmüştür. Bu ölçümler daha önce oluşturulmuş tablolara girilerek sonucunda hatve değerlerine göre taşıma ve güç grafiğine yansıtılmıştır. Bu grafik pervane motor sisteminin verimi ile paralel sonuç vermektedir. Bu sonuçlar baz alınarak algoritmadaki referans tablosu oluşturulmuştur ve referans tablosuna göre hatve kontrolü yapan servo ile elektronik hız kontrol devresine çıkış sinyali verilmektedir.

6.1 Deney Düzeneği

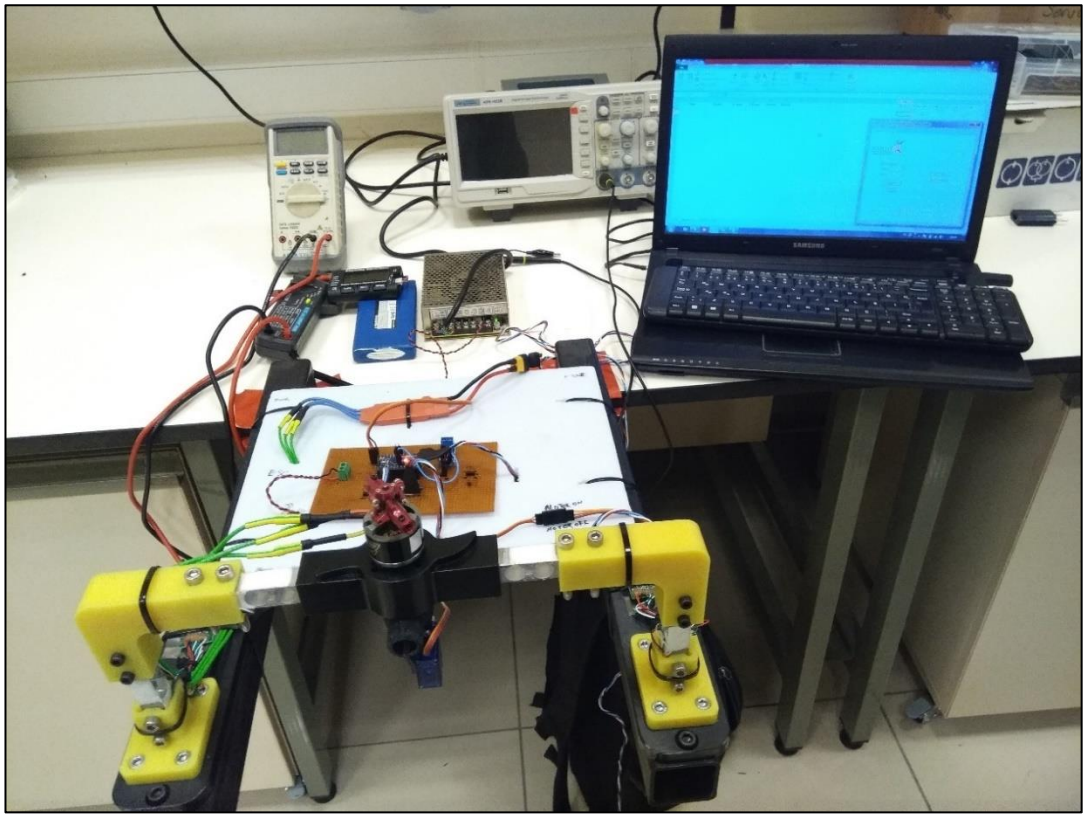
Deneylerde en önemli olarak motorun itme kuvvetini ölçmek üzere aşağıda görülen ölçüm standı kullanılmıştır.

Radyodan gelen “ESC PWM” olarak adlandırılan sinyalin ölçümü için osiloskop, motorun çektiği akımı ölçmek üzere multimetre ve akım ölçer, pil voltajını takip etmek için pil durum göstergesi ve son olarak motorun devrini ölçmek için lazer devir ölçer cihazları kullanılmıştır. Aşağıda test cihazları görülmektedir.

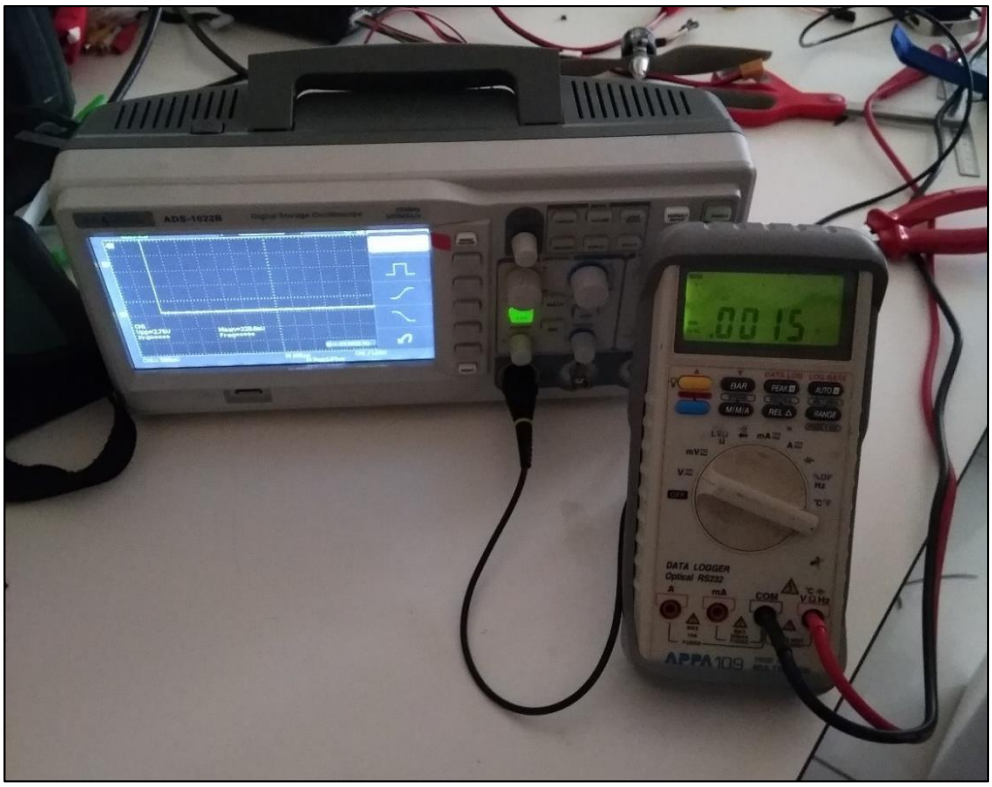


Şekil 6.1: Pil Durum Göstergesi.

Şekil 6.2: Lazer Devir Ölçer.



Şekil 6.3: Itme Kuvveti Ölçüm Standı.



Şekil 6.4: Osiloskop ve Multimetre.

Pervane hatve ölçümü için de Şekil 6.5'deki açı ölçme aparatı kullanılmıştır.

Şekil 6.5: Açı Ölçer.

Motor ölçüm standında esnemelerden kaynaklanacak açı değişikliği ve ölçüm hatalarını asgariye indirmek için çift taraflı bağlantı yapılmıştır. Doğru değerler için çift taraftaki itme-çekme kuvvetleri birleşimi alınmaktadır. Deney düzeneğinde aynı zamanda tork değerlerini ölçmekte mümkündür ancak bu tezde tork değerleri kullanılmayacağı için sadece itme kuvveti ölçümü yapılmıştır.

Deneyde ilk olarak pervane hatve açısı on dereceye ayarlanarak ESC PWM sinyali sıfırdan yüze kadar onar onar artırılarak itme kuvveti ölçüm standından itme kuvveti gram cinsinden, multimetreden motorun çektiği akım amper cinsinden, pil durum göstergesinden pilin voltajı volt cinsinden ve son olarak lazer devir ölçüm cihazından devir/dakika cinsinden motorun dönme devri ölçülmüştür. Daha sonra pervane hatve açısı sırası ile on beş derece, yirmi derece, yirmi beş derece ve otuz derece olarak ölçümler yapılmıştır.

Ölçülen değerler tablolara aktarılmıştır. Akım değerleri ile voltaj değer tabloları çarpım işlemine sokularak güç tablosu elde edilmiştir.

Ölçümler sonucunda en yüksek itme kuvveti on beş derecede alınmıştır. On beş derece ile bir üstü değer olan yirmi derece ve bir altı değer olan on derece hatve açılarındaki itme kuvvetleri arasındaki büyük farktan dolayı on iki buçuk ve on yedi buçuk derece pervane hatve açılarının da ölçülmesinin daha doğru sonuç vereceği görülmüştür.

On iki buçuk derece ve on yedi buçuk pervane hatve açılarında ölçümler tekrarlanmıştır. Yapılan ikinci deneyde on yedi buçuk derece pervane hatve açısının değerleri on beş derece pervane hatve açısı değerleri ile karşılaştırıldığında itme kuvveti değerlerinde ufak bir fark olmasına rağmen motorun çektiği akım değerinde ciddi bir yükselme gözlemlendiğinden dolayı on yedi buçuk pervane hatve açısı sonuc etkileyecek bir durum değildir.

On iki buçuk derece pervane hatve açısı ölçümü ise tam tersi şekilde itme kuvveti ölçümündeki değerler on beş derece pervane hatve açısı ölçüm değerlerine yakın çıkarken güç değerleri daha düşük çıkmıştır, bu değerlerin sonucu ciddi anlamda etkileyeceği gözlemlenmiştir ve tablolara eklenmiştir.

6.2. Gözlemler

Deney düzeneğinde beş farklı pervane hatvesi açısı ve on farklı kumanda sinyal seviyesine göre gram cinsinden taşıma kuvveti, amper cinsinden akım ve devir/dakika cinsinden motor deviri ölçülmüştür. Tablolarda ESC PWM sinyalinin sıfır olduğu durumlarda motor hiç dönmeyeceğinden dolayı tablolarda gösterilmemiştir.

Tablolar değerlerin en yüksek olduğu kutucuk yeşil, en küçük olduğu kutucuk kırmızı olacak şekilde renklendirilmiştir.

Taşıma kuvvetinin en yüksek olduğu değer uçağın maksimum taşıma kuvvetini gösterirken, yüksek verimli bir uçuş sağlayabilmek için sadece taşıma tablosuna bakmak yeterli değildir. Taşımanın güç ile orantısı olan en sondaki tablodaki ölçümüm yüksek olduğu değerlerin sahip olduğu pervane hatve açısı ve ESC PWM değerlerinde kullanmak yüksek verimli bir uçuş sağlayacaktır.

Pervane hatve açısı yirmi dereceye kadar taşıma kuvvetini arttırırken yirmi dereceden sonra pervanenin radyal hava kuvveti artacağından dolayı taşıma kuvveti düşmektedir. Bu yüzden dolayı dört rotorlu İHA'nın maksimum taşıma kuvveti hesaplanırken yirmi derece pervane hatve açısındaki maksimum değerden hesaplanmalırıdr ve kumandadan maksimum taşıma komutu geldiğinde pervane yirmi derece hatve açısı konumuna getirilmelidir.

Pervane hatve açısının sıfır olduğu durumlarda taşıma olmadığından dolayı Tablo 6.1'deki ilk sütun tamamen sıfır dır ve hesaplamalara dahil edilmemiştir.

Tablo 6.1: Taşıma, Hatve, ESC PWM.

Taşıma (gram)	Hatve (0°)	10°	12,5°	15°	20°	25	30°
ESC PWM (100)	0	1	1	1	2	3	2
200	0	10	14	16	32	22	25
300	0	22	39	44	79	58	53
400	0	36	73	83	120	99	86
500	0	53	120	128	166	144	117
600	0	71	158	173	215	183	146
700	0	91	196	209	260	225	174
800	0	111	225	244	299	267	198
900	0	137	280	291	340	300	216
1000	0	158	325	331	376	305	233

ESC PWM sinyali arttıkça pervane devir sayısı neredeyse lineer bir artış gösterirken pervane hatve açısı artırıldıkça pervanenin yaptığı iş arttığından dolayı da devir düşmektedir.

Tablo 6.2: Devir, Hatve, ESC PWM.

RPM (devir/dk.)	Hatve (0°)	10°	15°	20°	25	30°
ESC PWM (100)	1230	1180	770	592	540	415
200	2135	1940	1319	1135	1080	900
300	2850	2570	1933	1634	1572	1265
400	3470	3180	2536	2056	1973	1575
500	4087	3840	3103	2444	2339	1817
600	4695	4500	3594	2764	2628	2020
700	5393	5180	4156	3071	2895	2192
800	6056	5880	4694	3351	3227	2313
900	6782	6580	5164	3592	3391	2422
1000	7298	7080	5508	3745	3548	2554

Pervane hatve açısı arttırıldıkça artan pervane işinden dolayı motorun çektiği akım da yükselmektedir. Pervane hatve açısı da ESC PWM sinyali de motorun akımını neredeyse lineer yükselten değerler olduklarından dolayı Tablo 6.3'deki en yüksek değer en sağ altta görülmektedir.

Tablo 6.3: Akım, Hatve, ESC PWM.

Akım (A)	hatve (0°)	10°	12.5°	15°	20°	25	30°
ESC PWM (100)	0,1	0,12	0,12	0,13	0,15	0,2	0,26
200	0,2	0,2	0,2	0,24	0,47	0,54	0,69
300	0,4	0,47	0,52	0,64	1,08	1,1	1,55
400	0,58	0,65	0,9	1,14	2,07	2,1	2,87
500	0,78	0,9	1,6	1,95	3,43	3,57	4,53
600	0,97	1,2	2,35	2,88	5	5,04	6,45
700	1,38	1,7	3,4	3,85	6,85	6,84	8,65
800	1,69	2,15	4	4,92	8,8	8,83	10,95
900	2,03	2,8	5,8	6,48	10,95	11	13
1000	2,73	3,45	7,32	7,86	13	13	15,6

Test düzeneğinde pil voltajı da ölçülmüştür ancak pil voltajında belirgin bir değişiklik gözlemlenememiştir. Pil voltajı 7.9 volt olarak alınmıştır. Sabit pil voltajı ile motor akım grafiği birleştirilerek motor güç grafiği oluşturulmuştur. Pil voltajı sabit

olduğundan dolayı motor güç grafiği de motor akım grafiği gibi lineer ve en yüksek değer en sağ alttaki kutuda olacak şekilde oluşmuştur.

Tablo 6.4: Güç, Hatve, ESC PWM.

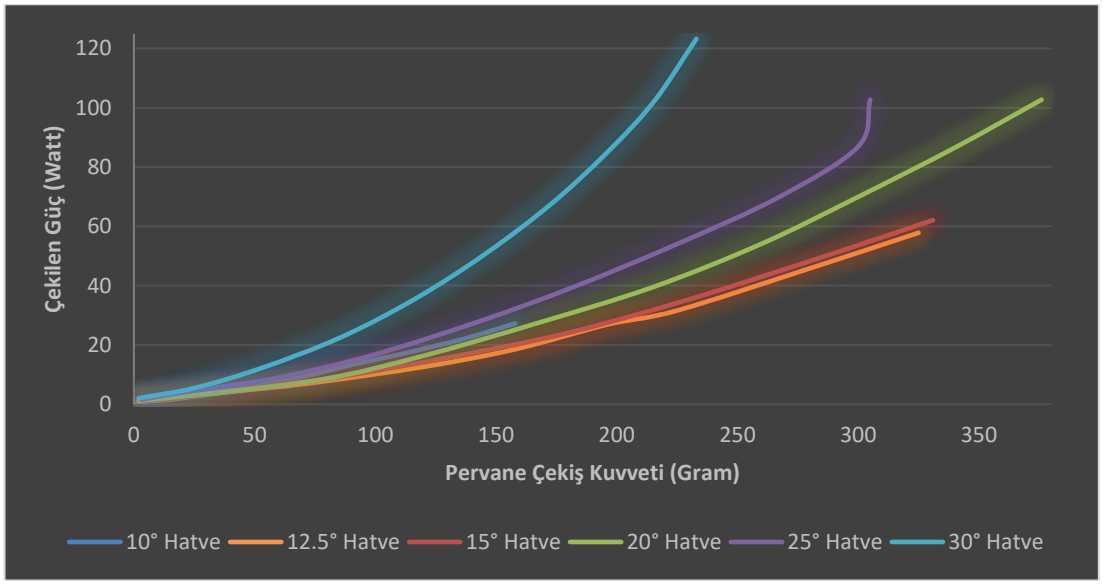
Güç (W) @7.9V	hatve (0°)	10°	12.5°	15°	20°	25	30°
ESC PWM (100)	0,79	0,948	0,948	1,027	1,185	1,58	2,054
200	1,58	1,58	1,58	1,896	3,713	4,266	5,451
300	3,16	3,713	4,108	5,056	8,532	8,69	12,245
400	4,582	5,135	7,11	9,006	16,353	16,59	22,673
500	6,162	7,11	12,64	15,405	27,097	28,203	35,787
600	7,663	9,48	18,565	22,752	39,5	39,816	50,955
700	10,902	13,43	26,86	30,415	54,115	54,036	68,335
800	13,351	16,985	31,6	38,868	69,52	69,757	86,505
900	16,037	22,12	45,82	51,192	86,505	86,9	102,7
1000	21,567	27,255	57,828	62,094	102,7	102,7	123,24

Motor pervane sisteminin taşıma kuvvetinin motor gücüne orantısı, motor pervane sisteminin verimini göstermektedir. Uçuş, Tablo 6.5'deki değerin yüksek olduğu bölgelerde yapılırsa uçuş verimliliği arttırılmış olmaktadır. Ancak irtifa kaybetmemek için taşıma kuvvetinin de belli bir değerin altına düşmemesi gerekmektedir.

Tablo 6.4'deki değerlerden yararlanılarak her pervane hatve açısı değeri için çekiş kuvveti ve motor gücü grafiği çıkartılmıştır. Çıkartılan tablodan aynı çekiş kuvveti ile en düşük gücü çeken hatve değeri tercih edilmelidir.

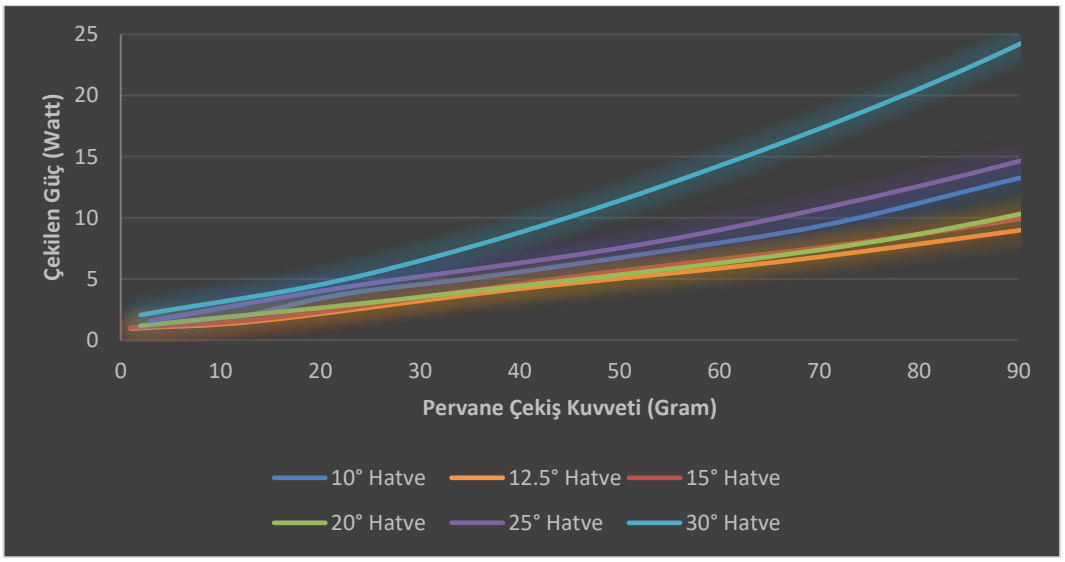
7. TARTIŞMA

Yapılan deney ve gözlemler sonucunda yorum yapılabilmesi için Şekil 6.6'da her bir hatve açısı için pervane çekiş kuvveti ve motorun harcadığı güç gösterilmiştir. Bu grafiklere bakılarak daha düşük seviyede olan grafiğin aynı çekiş kuvvetini daha düşük enerji ile sağladığını görebiliyoruz.



Şekil 7.1: Hatve Değerlerine Göre Taşıma ve Güç.

Yukarıdaki genel grafikte yüz gram pervane çekiş kuvvetinin altındaki çizgiler net görülemediğinden dolayı yukarıdaki grafiğin yüz grama kadar olan kısmı aşağıdaki şekilde yakınlaştırılmış olarak yeniden grafik oluşturulmuştur.



Şekil 7.2: Hatve Değerlerine Göre Taşıma ve Güç (Yakınlaştırılmış).

Yularıdaki grafikte ortalama yirmi gram pervane taşıma kuvvetinin altında on derece, on beş derece ve yirmi derece pervane hatve açılarında motorun çektiği enerjiler hemen hemen aynı olduğundan dolayı sonraki adımlara bakılması gerekmektedir. Sonraki adımda ise on iki buçuk derece pervane hatve açısının maksimum çekiş gücü olan üç yüz yirmi beş gramlık çekiş gücüne kadar en düşük enerji ile sağladığı görülmektedir. Bu bilgiler doğrultusunda çekiş kuvvetinin daha da yükseltilebilmesi için motor hızı maksimumda tutularak sadece pervane hatve açısı yirmi dereceye kadar arttırılmalıdır. Daha önceki grafiklerde yirmi derece hatve açısı için maksimum motor devrinin maksimum çekiş kuvvetini sağladığı zaten görülmüştür.

Bu sonuçlar ışığında yeni bir çekiş kuvveti, hatve açısı, kullanıcıdan gelen pmw değeri ve motor pwm değeri tablosu çıkartılabilmektedir. Çıkartılan yeni tablodaki değerler yazılımdaki dizilere aktarılarak istenilen çekiş kuvvetine karşılık çıkması gereken hatve açısı sinyali ve motor pwm sinyali çıkmış olacaktır.

Aşağıda istek çekiş kuvveti, hatve açısı ve motor pwm değerleri görülebilmektedir.

En sağ taraftaki kullanıcı PWM bölümü radyo kumandasından gelen pwm sinyallerini göstermektedir. Hatve ve ESC PWM değerleri ise kullanıcıdan gelen pwm sinyallerine karşılık pervane hatve açısını ayarlayan servo motor ve elektronik hız kontrolcüsüne gönderilecek sinyallerin bilgilerini göstermektedir.

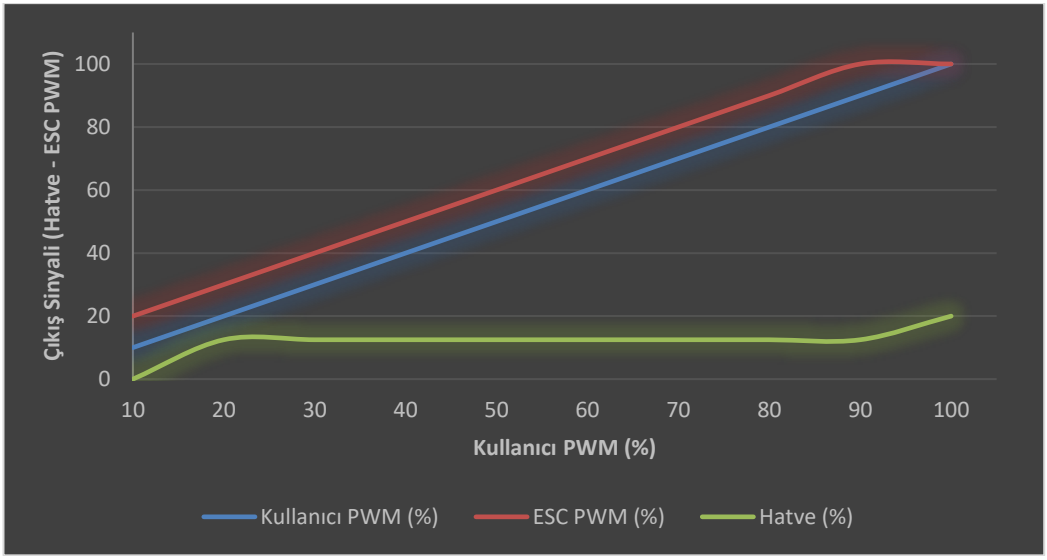
Tablo 7.1: Taşıma Kuvvetine Göre Hatve, ESC PWM Çıkışları.

Taşıma kuvveti	Hatve(°)	ESC PWM (%)	Kullanıcı PWM (%)
14	12,5	20	10
39	12,5	30	20
73	12,5	40	30
120	12,5	50	40
158	12,5	60	50
196	12,5	70	60
225	12,5	80	70
280	12,5	90	80
325	12,5	100	90
376	20	100	100

Kullanılacak devredeki yazılım tablodaki kullanıcıdan gelen PWM sinyalini okuyarak pervane hatve açısını ve ESC PWM değerini hesaplayacaktır.

Tabi bu değerler yazılımda farklı sayısal değer aralıklarına tekabul etmektedir. Bu yüzden yazılımdaki dizilere aktarırken yazılımdaki değer aralıklarına göre aktarılması gerekmektedir. Kullanıcı PWM (%) değerleri yüzde olmaktan çıkartılıp sıfır ile bin değer aralığnında yazılıma aktarılacaktır. Hatve açı değeri yazılımın içinde zaten işleme sokularak servo için gerekli olan sinyali vereceğinden dolayı hatve açı değeri doğrudan yazılıma girilebilir. ESC PWM (%) değeri de Kullanıcı PWM (%) deperi gibi sıfır ve yüz aralığında olduğundan dolayı bu değerlinde de sıfır, bin aralığına büyütülerek yazılımdaki diziye yazılmaktadır.

Aşağıdaki grafiklerde devrenin çalışması sonucu karşımıza çıkacak giriş sinyaline göre değişen iki farklı çıkış sinyalini görebilmekteyiz.



Şekil 7.3: Giriş Çıkış Sinyalleri Arasındaki Bağlantı.

Çıkartılan bu sonuçlar doğrultusunda motorun maksimum performansını olan 376 gramlık çekişi kullanmak istediğimizde pervane hatve açısı yirmi derece olmalıdır. Ancak daha düşük itme kuvvetleri istendiğinde yirmi derecelik pervane hatve açısında verimin düştüğünü görebilmekteyiz. Sabit yirmi derecelik pervane hatve açısı ile değişken hatve açılı sistemlerin karşılaştırılması aşağıda görülmektedir.

Kargo taşıma amacı ile tasarlanan bir dört rotorlu insansız hava aracı üzerine karşılaştırma yapılacaktır. Hava aracının kendi ağırlığı 600 gram ve taşıyacağı yük de 600 gram olacağı düşünülebilir. Toplamda 10 dakika sürecek bir yola yükü götürecek ve dönüşte yüksüz olarak geri dönecektir. İnsansız hava aracını ve taşıyacağı yükü her bir rotora düşen yük olarak bölecek olursak 150 gram aracın ağırlığı 150 gram yük ağırlığı olacaktır.

20 derece pervane açısı için senaryo toplamında harcanacak olan güç;

10 dakika boyunca toplamda 300 gram itme kuvveti oluşturarak bir seyahat yapılacaktır. 300 gramlık itme kuvveti oluşturulabilmesi için taşıma tablosundan bakılarak 800 ms lik bir ESC PWM i gerekmektedir. 800ms lik ESC PWM'ine denk gelecek güç değeri ise 70 watt olacaktır. 10 dakikalık süreç için de toplamda 116 watt saat enerji tüketilecektir.

Seyahatin yüksüz geri dönüş kısmında ise 150 gram itme kuvveti oluşturarak bi seyahat yapılacaktır. 150 gramlık itme kuvveti oluşturulabilmesi için taşıma tablosundan bakılarak 480 ms lik bir ESC PWM'i gerekmektedir. 480 ms'lik ESC

PWM'ine denk gelecek güç değeri ise 24 watt olacaktır. 10 dakikalık süreç için toplamda 40 watt saat enerji tüketilecektir.

Değişken pervane açısı için senaryo toplamında harcanacak olan güç;

10 dakika boyunca toplamda 300 gram itme kuvveti oluşturarak bir seyahat yapılacaktır. 300 gramlık itme kuvveti oluşturulabilmesi için ilk olarak oluşturulan çıkış tablosuna bakılarak gerekli olan pervane hatve açısı ve ESC PWM değeri okunur. Bulunan değerin güç tablosundan güç karşılığı bulunur. Sonuç tablosundan 300 gramlık itme kuvveti için 12.5 derece hatve açısı ve %95 ESC PWM değeri yani 950 ms ESC PWM değeri görülmektedir. Bu değerler ile güç tablosundan 300 gram itme kuvveti için 51 watt görülmektedir. 10 dakikalık süreç için toplamda 85 watt saat enerji tüketilecektir.

10 dakika boyunca toplamda 150 gram itme kuvveti oluşturarak bir seyahat yapılacaktır. 150 gramlık itme kuvveti oluşturulabilmesi için ilk olarak oluşturulan çıkış tablosuna bakılarak gerekli olan pervane hatve açısı ve ESC PWM değeri okunur. Bulunan değerin güç tablosundan güç karşılığı bulunur. Sonuç tablosundan 150 gramlık itme kuvveti için 12.5 derece hatve açısı ve %58 ESC PWM değeri yani 580 ms ESC PWM değeri görülmektedir. Bu değerler ile güç tablosundan 150 gram itme kuvveti için 16watt görülmektedir. 10 dakikalık süreç için toplamda 26,6 watt saat enerji tüketilecektir.

Hesaplamalar sonucunda sabit 20 derecelik pervane açısı için 10 dakikalık yüklü gidiş ve 10 dakikalık yüksüz dönüş için 116 watt saat ile 40 watt saat toplanarak toplamda 156 watt saat lık bir enerji harcandığı görülmektedir. Değişken hatveli sistemde ise harcanan enerji toplamda 85 watt saat ile 26,6 watt saat toplanarak 111,6 watt saat görülmektedir.

İki uçuş senaryosu karşılaştırıldığında yapılan çalışma sonucunda %28,4 kadar daha düşük enerji ile aynı taşıma işlemi yapıldığı görülebilmektedir. İki farklı yöntemde oluşan %28,4 lük enerji tasarrufu aynı iş gücü için yapıldığından dolayı aradaki 44,4 watt saat lik enerji motorlarda, elektronik hız kontrolcüde, pilde ve bir kısmı pervanede harcanmaktadır. Bütün bu parçaların ısınmasına sebep olmaktadır, ısınma da parçaların ömürlerini doğrudan etkileyen önemli faktördür. Değişken hatve açısı kullanılarak yapılan sistemlerde insansız hava aracındaki parçaların da daha uzun ömürlü olacağını söylemek mümkündür.

KAYNAKLAR

[1] Web 1, (2017), http://www.iktisadi.org/insansiz-hava-araci-sektorunun-ekonomiye-etkisi.html, (ErişimTarihi: 07/03/2017).

[2] Shuai Z., Zhiping W., (2016) "Resaerch on Extension Control of Brushless DC Motor of the Quad-rotor", 31st Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation, Wuhan, China, November 11-13.

[3] Buddy M., Josh R., N. Kemal U., Mark C., Jonathan P., (2011), "How, Design and Flight Testing of an Autonomous Variable-Pitch Quadrotor", Shanghai International Conference Center, Shanghai, China May 9-13.

[4] Emil F., George N., (2014), "Experimental Model Derivation and Control of a Variable Pitch Propeller Equipped Quadrotor", IEEE Multi-conference on Systems and Control, Antibes, France, October 8-10.

[5] Web 2, (2017), http://www.avdweb.nl/solar-bike/hub-motor/permanent-magnet-dc-hub-motor-tuning.html, (Erişim Tarihi: 07/03/2017).

[6] Web 3, (2017), https://hobbyking.com/en_us/variable-pitch-prop-motor-set-10-type-a.html, (Erişim Tarihi: 12/03/2017).

[7] Web 4, (2017), https://hobbyking.com/en_us/4d-hollow-variable-pitch-unit-without-motor-3mm-motor-shaft.html, (Erişim Tarihi: 12/03/2017).

[8] Web 5, (2017), https://www.studiopieters.nl/arduino-sg90-servo/, (Erişim Tarihi: 12/03/2017).

[9] İ. Can D., Aydemir A., Hakan T., (2010), "Dikey İniş-Kalkış Yapabilen Dört Rotorlu Hava Aracının Uçuş Kontrolü.", Havacılık ve Uzak Teknolojileri Dergisi 4(3), 33-40.

[10] Web 6, (2017), https://hobbyking.com/en_us/afro-esc-30amp-multi-rotor-motor-speed-controller-simonk-firmware.html, (Erişim Tarihi: 17/03/2017).

[11] Web 7, (2017), http://www.ebay.com/itm/Cleanflight-SP-Racing-F3-Deluxe-Flight-Controller-6dof-for-RC-Quadcopter-FPV-/172462695653, (Erişim Tarihi: 15/04/2017).

[12] Web 8, (2017), https://hobbyking.com/en_us/ntm-prop-drive-28-30-800kv-270w-brushless-motor.html, (Erişim Tarihi: 09/03/2017).

[13] Web 9, (2017), https://www.digibay.in/mpu-6050-triple-axis-accelerometer-gyroscope-6-dof-module, (Erişim Tarihi: 01/06/2017).

[14] Web 10, (2017), https://minseg.com/products/10dof-imu-mpu6050-hmc5883l-ms5611, (Erişim Tarihi: 18/05/2017).

[15] Web 11, (2017), http://www.sonsivri.to/forum/index.php?topic=59841.0, (Erişim Tarihi: 25/05/2017).

ÖZGEÇMİŞ

1988'de Ankara'da doğan Yavuz Selim Öngül 2006 yılında başladığı Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünü 2013 yılında başarıyla tamamladı. 2014 Yılında Gebze Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Yüksek Lisans Programına başladı ve 2017 yılında başarıyla tamamladı. Lisans eğitiminden sonra savunma sanayii sektöründe Ar-Ge mühendisi olarak birsüre çalıştıktan Tübitak destekli bir proje aracılığı ile Gebze Teknik Üniversitesi Kuluçka Merkezinde kendi şirketini kurdu.