

**BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**MÜHENDİSLİK VE DOĞA BİLİMLERİ FAKÜLTESİ**



**İHA İÇİN ELEKTRONİK HIZ KONTROLCÜSÜ (ESC) DONANIMI TASARIMI**

**LİSANS BİTİRME ÇALIŞMASI**

**Nil DUMAN**

**Bilgisayar Mühendisliği Bölümü**

**TEMMUZ 2022**

**BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**MÜHENDİSLİK VE DOĞA BİLİMLERİ FAKÜLTESİ**



**İHA İÇİN ELEKTRONİK HIZ KONTROLCÜSÜ (ESC) DONANIMI  
TASARIMI**

**LİSANS BİTİRME ÇALIŞMASI**

**NİL DUMAN**  
**18360859026**

**Bilgisayar Mühendisliği Bölümü**

**Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Erdem YAVUZ**

**TEMMUZ 2022**

BTÜ, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nün 18360859026 numaralı öğrencisi Nil DUMAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ESC DONANIMI VE İHA İLE ÜRETİMİ” başlıklı bitirme çalışmasını aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Danışmanı :** **Dr. Öğr. Üyesi Erdem YAVUZ** .....  
Bursa Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Özgür CİNGİZ** .....  
Bursa Teknik Üniversitesi

**Dr. Öğr. Üyesi Seçkin YILMAZ** .....  
Bursa Teknik Üniversitesi

**Savunma Tarihi :**

**BM Bölüm Başkanı : Prof. Dr. Turgay Tugay BİLGİN** .....  
Bursa Teknik Üniversitesi ...../...../.....

## **İNTİHAL BEYANI**

Bu bitirme çalışmasında görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, bitirme çalışması içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri bitirme çalışmasında kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı:

İmzası :

## ÖNSÖZ

Bu tez merhum dedem Niyazi DUMAN ve öğretim hayatım boyunca her zaman yanımda olan sevgili aileme ithaf edilmiştir.

Uzun dönem stajımda ve bitirme tezi projemde danışmanım olan, hiçbir zaman desteğini esirgemeyen Erdem YAVUZ'a da teşekkürü bir borç bilirim.

TEKNOFEST yarışmalarına hazırlık sürecinde bünyesinde yer aldığım IEEE ANKA takımına ve takım arkadaşlarıma da şükranlarımı sunarım.

Temmuz 2022

Nil DUMAN

## İÇİNDEKİLER

|   | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| <b>ÖNSÖZ .....</b>  | <b>v</b>     |
| <b>İÇİNDEKİLER.....</b>   | <b>vi</b>    |
| <b>KISALTMALAR.....</b>   | <b>vii</b>   |
| <b>SEMBOLLER.....</b>   | <b>viii</b>  |
| <b>ŞEKİL LİSTESİ.....</b>   | <b>ix</b>    |
| <b>ÇİZELGE LİSTESİ.....</b>                                       | <b>ix</b>    |
| <b>ÖZET .....</b>   | <b>x</b>     |
| <b>SUMMARY.....</b>   | <b>xi</b>    |
| <b>1. GİRİŞ .....</b>   | <b>12</b>    |
| <b>2. İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI (İHA) .....</b>                      | <b>13</b>    |
| 2.1 İHA Üretimi.....  | 13           |
| 2.2 Otonom Uçuş.....  | 16           |
| <b>3. ESC .....</b>   | <b>19</b>    |
| 3.1 ESC Tanımı .....  | 19           |
| 3.2 ESC Çeşitleri .....   | 19           |
| 3.3 ESC'nin Çalışma Prensibi .....                                | 20           |
| 3.4 MOSFET (Metal Oksit Yarı İletken Alan Etkili Transistör)..... | 22           |
| 3.5 Pil Eliminatör Devresi (BEC).....                             | 23           |
| 3.6 PID (Oransal İntegral Türev).....                             | 23           |
| 3.6.1 Proportional (Oransal) Terim .....                          | 24           |
| 3.6.2 Integral (İntegral) Terimi .....                            | 24           |
| 3.6.3 Derivate (Türev) Terimi .....                               | 25           |
| <b>4. ESC DONANIML.....</b>                                       | <b>26</b>    |
| 4.1 Geliştirme Kartı .....  | 26           |
| 4.1.1 STM.....  | 26           |
| 4.1.2 Arduino.....  | 30           |
| <b>5. ENTEGRASYON.....</b>  | <b>32</b>    |
| <b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>                                  | <b>35</b>    |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>   | <b>36</b>    |
| <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>  | <b>38</b>    |

## **KISALTMALAR**

|               |   |
|---------------|---|
| <b>ADC</b>    | : Analog-Dijital Dönüştürücü                      |
| <b>BEC</b>    | : Pil Eliminâtör Devresi                          |
| <b>İHA</b>    | : İnsansız Hava Aracı                             |
| <b>ESC</b>    | : Elektronik Hız Kontrolcüsü                      |
| <b>MOSFET</b> | : Metal Oksit Yarı İletken Alan Etkili Transistör |
| <b>PID</b>    | : Proportional İnegral Derivative                 |
| <b>YKİ</b>    | : Yer Kontrol İstasyonu                           |

## SEMBOLLER

|           |                      |
|-----------|----------------------|
| <b>D</b>  | : Türevsel           |
| <b>df</b> | : İntegral           |
| <b>dt</b> | : Türev              |
| <b>I</b>  | : İntegral           |
| <b>Kd</b> | : Türev katsayısı    |
| <b>Ki</b> | : İntegral katsayısı |
| <b>Kp</b> | : Oransal katsayı    |
| <b>P</b>  | : Oransal            |



## ŞEKİL LİSTESİ

|  | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| Şekil 2.1.1: Kanat Üretimi .....                 | 14           |
| Şekil 2.1.2: Gövde Üretimi .....                 | 15           |
| Şekil 2.1.3: Gövde Kalıbı .....                  | 15           |
| Şekil 2.1.4: El ile Yatırma Yöntemi .....        | 16           |
| Şekil 2.1.5: Gövde – Kanat Bağlantısı.....       | 16           |
| Şekil 2.2.1: Mission Planner Rota Oluşturma..... | 17           |
| Şekil 2.2.2: Rota Dosyası.....                   | 17           |
| Şekil 2.2.1: Haberleşme .....                    | 18           |
| Şekil 3.2.1: Fırçasız ESC .....                  | 20           |
| Şekil 3.2.2: Fırçalı ESC .....                   | 20           |
| Şekil 3.3.1: Fırçasız ESC'nin İç Yapısı .....    | 21           |
| Şekil 3.3.2: Hall Sensörü .....                  | 21           |
| Şekil 3.3.2: Optik Sensör .....                  | 22           |
| Şekil 3.4.1: Kullanılan MOSFET'ler .....         | 22           |
| Şekil 3.5.1: Servo-ESC-Pixhawk Bağlantısı.....   | 23           |
| Şekil 3.6.1: PID Algoritması.....                | 24           |
| Şekil 3.6.2: Mission Planner PID Ayarı .....     | 24           |
| Şekil 4.1.1.1: STM Devresi .....                 | 27           |
| Şekil 4.1.1.2: STM Devresi .....                 | 28           |
| Şekil 4.1.1.3: STM Devresi .....                 | 29           |
| Şekil 4.1.2.1: Arduino Devresi .....             | 31           |
| Şekil 5.1: Nihai İHA.....                        | 32           |
| Şekil 5.2: Devrenin Kurulumu.....                | 33           |
| Şekil 5.3: İHA Devre Şeması.....                 | 34           |

## ÇİZELGE LİSTESİ

|  | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| Şekil 2.1.1: Mekanik Parça Üretim Yöntemleri ..... | 13           |

## ESC DONANIMI VE İHA İLE ÜRETİMİ

### ÖZET

Bu bitirme tezi çalışmasında, DC motoru ile çalışan sabit kanatlı insansız hava araçları (İHA) ve onunla uyumlu bir Elektronik Hız Kontrolcüsü (ESC) tasarımı ve üretimi konu alınmıştır.

Günümüz teknolojisi ile birlikte sürekli geliştirilen İHA'lar savunma sanayimizin kritik bir bileşenidir. Uçuş kontrolü, uzaktan kumanda ile veya otonom olarak gerçekleştirilebilir. Otonom kontroller genellikle, bir açık kaynaklı insansız havar aracı yazılımı olan Ardupilot ile gerçekleştirilir.

Mission Planner yer istasyonu simülasyon programı üzerinden rota çizilir ve İHA'ya aktarılır. İHA bu yolu otonom olarak takip ederek uçuşunu tamamlar.

İHA üretirken temel hedef hafif ve hızlı bir İHA üretmek olmuştur. Bütün elektronik bileşenleri içine alabilecek en küçük gövde kanat ve kuyruk yapılması hedeflenmiştir. Elektronik Hız Kontrolcüsü (ESC), motorun hızını kontrol eden ve yöneten bir elektronik devresidir.

ESC, motorun dönmesi için gereken manyetik alanı oluşturmak üzere uygun MOSFET (Metal Oksit Yarı İletken Alan Etkili Transistör)leri tetikleyerek fırçasız motor hareketini veya hızını kontrol eder. Motor hızının sabit kalmamasına yardımcı olurken aynı zamanda da geri vites özelliğini sağlar.

Geliştirme kartı olarak STM32'de yaşanan tedarik sorunu sebebi ile Arduino R3 seçilmiştir. İki kart için de ayrı ayrı devreler çizilmiştir. En son nihai devre yani Arduino R3 için hazırlanan devre kullanılmıştır.

Bu tez çalışmasının misyonu TÜBİTAK tarafından düzenlenen İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI YARIŞMASI'na katılacak bir Sabit Kanatlı İHA üretirken bu İHA ile çalışabilecek bir ESC tasarlamaktır.

Bu tez çalışmasının vizyonu ise milli teknoloji hamlesine katkı sağlamak adına yerli parça üretimini teşviklendirmektir.

**Anahtar kelimeler:** Arduino, ESC, İHA, MOSFET, otonom

## PRODUCTION OF ESC HARDWARE AND UAVS

### SUMMARY

In this final thesis study, the design and production of fixed wing unmanned aerial vehicles (UAVs) powered by a DC motor and an Electronic Speed Controller (ESC) compatible with it were discussed.

UAVs, which are constantly being developed together with today's technology, are a critical component of our defense industry. Flight control can be carried out by remote control or autonomously. Autonomous controls are usually performed using Ardupilot, an open source unmanned aerial vehicle software.

The route is plotted through the Mission Planner ground station simulation program and transferred to the UAV. The UAV completes its flight by following this path autonomously.

The main goal when producing UAVs has been to produce a light and fast UAV. It is aimed to make the smallest fuselage wing and tail that can accommodate all electronic components.

The Electronic Speed Controller (ESC) is an electronic circuit that controls and manages the speed of the engine.

The ESC controls the brushless motor movement or speed by triggering the appropriate MOSFETS (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistors) to generate the magnetic field required for the motor to rotate. It helps to keep the engine speed constant while at the same time providing the reverse gear feature.

Arduino R3 has been selected as the development board due to the supply problem experienced in STM32. Circuits have been drawn separately for both cards. The most recent final circuit i.e., Arduino R3 Chinese prepared circuit has been used.

The mission of this thesis is to design an ESC that can work with this UAV while producing a Fixed-Wing UAV that will participate in the UNMANNED AERIAL VEHICLES COMPETITION organized by TÜBITAK.

The vision of this thesis is to encourage the production of domestic parts in order to contribute to the national technology movement.

**Keywords:** Arduino, ESC, MOSFET, otonom, UAV

## 1. GİRİŞ

Savunma sanayi, ulusal savunma alanında ihtiyaç duyulan teçhizat, malzeme, teknoloji ve tesislerin üretimini; araştırılması ve geliştirilmesinden sorumlu olan sanayi alanıdır. Bu sektör sanayileşmenin ve ekonomik kalkınmanın önemli bir dalıdır. Özellikle teknolojik gelişmelerin paralelliğiyle son yıllarda önemi ve etki alanı oldukça artmıştır. Savunma Sanayinin en yeni teknolojilerinden biri olan İnsansız Hava Araçları (İHA), 1999 yılında Türkiye'ye ithal edilmiş ve bundan yaklaşık 1 yıl sonra ise yerli üretimi başlamıştır. Günümüzde, özellikle son yıllarda teknolojinin ilerlemesiyle birlikte İHA'lar, Türk Silahlı Kuvvetleri'nin başlıca silahları arasında yer almaktadır.

Savunma sanayi sektöründe yaşanan sürekli gelişmeler ise, sadece İHA'ların değil aynı zamanda İHA'larda kullanılan parça ve bileşenlerin de yerli olarak üretilmesine öncü olmuştur.

## 2. İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI (İHA)

İnsansız Hava Araçları; uzaktan veya yazılım ile kontrol edilen, içinde fiziksel olarak bir insan buldurmeyen bir tür uçan araçtır. İHA'lar yer tabanlı bir sistem ile kontrol edilirler. Bu araçlar genel olarak uzaktan kumanda edilen (manuel) ve bir uçuş planı boyunca otonom hareket edenler olarak iki başlık altında incelenir. Manuel kontrol, Yer Kontrol İstasyonu (YKİ) tarafından RC alıcılı kumanda ile sağlanır. Otonomda ise yazılım kontrolü yine YKİ tarafından genellikle açık kaynaklı bir otonom uçuş yazılımı olan Ardupilot ile yapılır.

İHA'lar en basit şekilde -kanatlarına göre- döner kanat (drone) ve sabit kanat (uçak) olarak 2 ana başlık altında incelenir. İleri bir sınıflandırma ise uçuş irtifaları, uçuş süreleri, itki sistemleri, ağırlıkları ve kullanım alanları gibi pek çok açıdan yapılabilir. İHA'lar genel olarak mekanik-tasarım, elektronik-donanım ve otonom-yazılım olmak üzere 3 sistem altında ele anılabilir. Bir İHA üretiminde hem yazılım hem de donanım dikkate alınmalıdır.

### 2.1 İHA Üretimi

İHA 3 ana parçadan oluşur: gövde, kanat ve kuyruk.

Bu parçaların üretiminde kullanılan malzemeler ve üretim yöntemleri Tablo 2.1.1'de verilmiştir.

**Tablo 2.1.1: Mekanik Parça Üretim Yöntemleri**

| MEKANİK PARÇA | YAPI MALZEMESİ     | EK MALZEME                                    | ANA ÜRETİM YÖNTEMİ |
|---------------|--------------------|---|--------------------|
| Kanat         | balsa              | kontroplak, karbon fiber boru, kaplama kağıdı | yapıştırma         |
| Gövde         | karbon fiber kumaş | kontroplak, köpük                             | vakum infüzyon     |
| Kuyruk        | balsa              | karbon fiber boru                             | yapıştırma         |

Üretimde kullanılan yapı malzemelerinde seçim kistası hafiflik ve dayanıklılıktır. Yarışma isterleri doğrultusunda hafif ve hızlı bir İHA, daha iyi bir puana sahip

olacaktır Bu bilinçle, bütün elektronik bileşenleri içine alabilecek en küçük gövde kanat ve kuyruk yapılması hedeflenmiştir.

Kanat üretiminde lazer ile balsadan kesilen kanat profilleri, karbon fiber borulara japon yapıştırıcı ile sabitlenir. Servo motor taşıyan profiller ve gövdeye yakın olan ilk iki profil, daha sağlam olması için kontroplaktan kesilir. Bu parçaların sabitlenmesi ise epoksi yardımı ile gerçekleşir. Kanat iskeleti oluşturulduktan sonra ise hava akışının bozulmaması için kanatlar, ütü yardımı ile kaplama kağıdı ile sarılır.

Kuyruk üretimi ise kanat üretimine çok benzerdir. Tek fark, kuyrukta kontroplak profillerin bulunmamasıdır.



**Şekil 2.1.1: Kanat Üretimi**

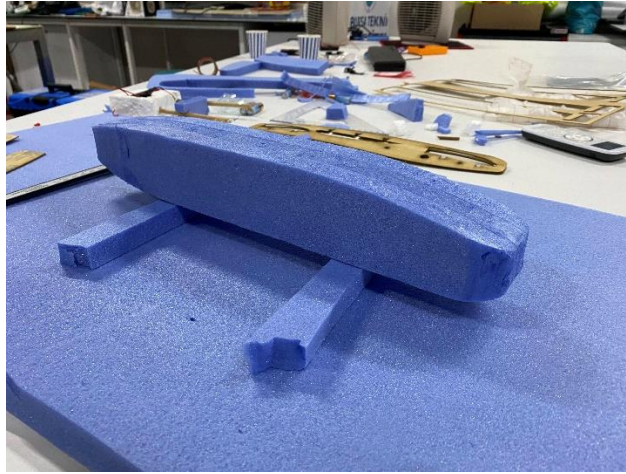
Şekil 2.1.2’de verilen gövde üretiminde, gövde iskeleti için hazırlanan kontrplak parçalar köpük üzerine yapıştırılır, sıcak teli yardımı ile kesilerek Şekil 2.1.3’te verilen gövde kalıbı oluşturulur. Kalıbın çevresine zımpara yardımı ile radiuslar verilir ve gövde bantlanır. Gövde ölçülerine göre kesilen karbonfiber kumaşlar, hassas terazide tartılan ve oranları hassas bir şekilde ayarlanan epoksi-sertleştirici karışımı ile oluşturulan gövde üzerine elle yatırma yöntemi (Şekil 2.1.4) ile yapıştırılır. Sertleşmesi için vakuma verilir.

Vakumdan çıkartılan gövde, fazla epoksiden arınması için zımparalanır. Zımpara ilaveten gövdenin hafiflemesini de sağlar. Kanat, kuyruk ve diğer parçaların montajı

için gövde üzerine delikler açılır (Şekil 2.1.5). Son olarak, kumaşın içinde kalan sünger ve bant tiner yardımı ile eritilir ve gövde temizlenir.



**Şekil 2.1.2: Gövde retimi**



**Şekil 2.1.3: Gövde Kalıbı**



**Şekil 2.1.4: El ile Yatırma Yöntemi**



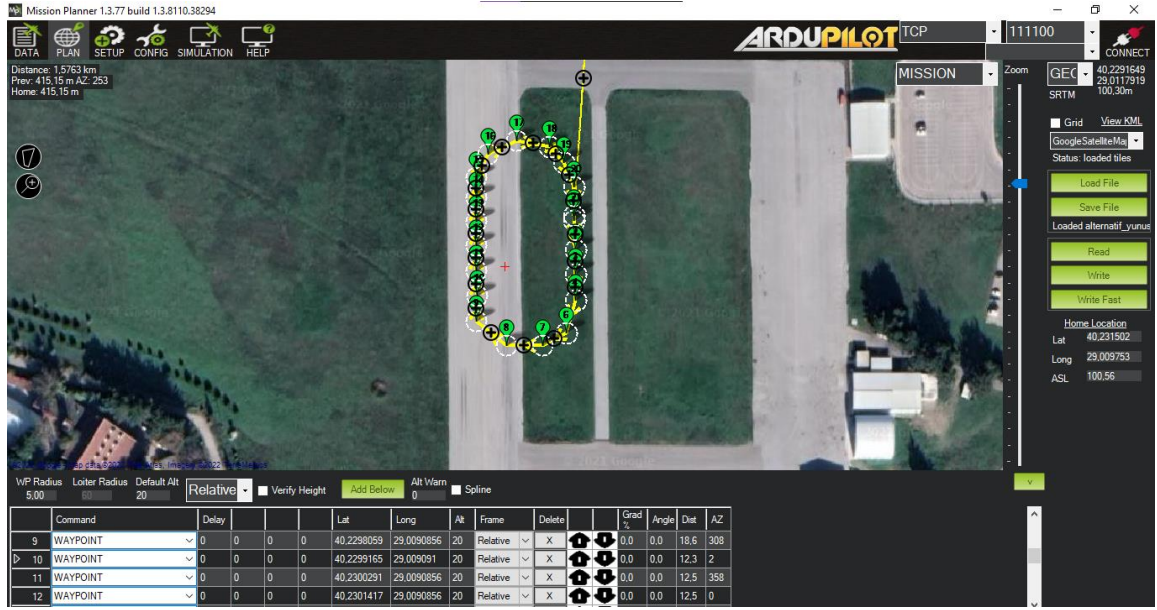
**Şekil 2.1.5: Gövde - Kanat Bağlantısı**

## **2.2 Otonom Uçuş**

Otonom uçuş, Ardupilot'un açık kaynaklı bir simülasyonu olan Mission Planner üzerinden gerçekleştirilmektedir. Mission planner (Şekil 2.2.1) üzerinden çizilen uçuş rotası Pixhawk'a aktarılır ve İHA otonom olarak uçuşunu gerçekleştirir. Uçuş irtifası, havaya göre ve yere göre uçuş hızı, kalkış açısı, seyir gazı, kalkış gazı, uçuş agresifliği (İHA'nın keskin dönüşlere sahip olabilmesi için agresif bir yapıda olması gerekmektedir) gibi parametrelerin hepsi, Mission Planner üzerinden tanımlanır.

Pixhawk, Ardupilot yazılımlı bir uçuş kontrol kartıdır. Kullanılan bütün elektronik bileşenler Pixhawk'a bağlanır ve Pixhawk tarafından yönetilir.





Şekil 2.2.1: Mission Planner Rota Oluşturma

Raspberry Pi, Jetson Nano gibi kartlar tarafından yönetilen uçuşlarda ise uçuş rotası yine Mission Planner tarafından çizilir ve txt dosyası olarak kaydedilir. Bu dosya sonrasında koda entegre edilir ve otonom görev uçuşları gerçekleştirilir. Örnek bir uçuş txt dosyası Şekil 2.2.2 ‘de verilmiştir.

alternatif\_yunuseli\_v11.waypoints - Not Defteri

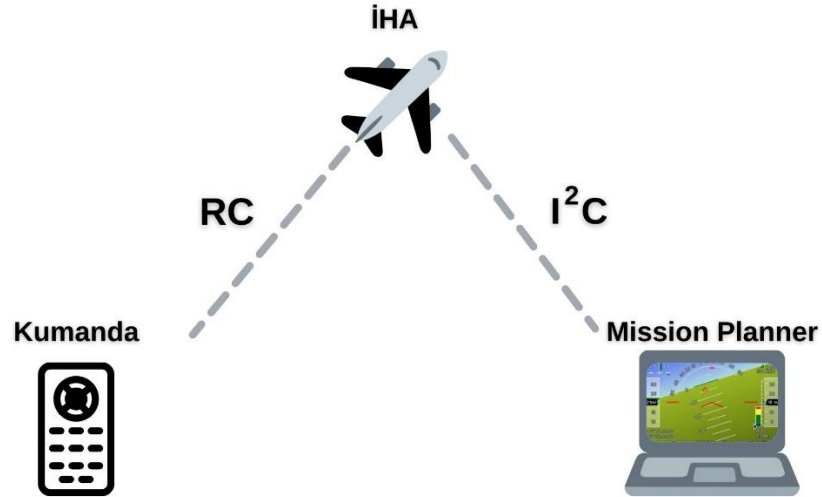
| Dosya       | Düzen | Biçim | Görünüm | Yardım  |
|-------------|-------|-------|---------|---|
| QGC WPL 110 |       |       |         |   |
| 0           | 1     | 0     | 16      | 0 0 0 0 0 0 40.230151 29.010026 104.190000 1                                      |
| 1           | 0     | 3     | 22      | 12.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 40.23025030 29.00965290 4.000000 1   |
| 2           | 0     | 3     | 178     | 0.00000000 0.00000000 100.00000000 0.00000000 40.23013350 29.00965290 20.000000 1 |
| 3           | 0     | 3     | 16      | 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 40.22997590 29.00965420 15.000000 1   |
| 4           | 0     | 3     | 16      | 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 40.22985300 29.00965690 20.000000 1   |
| 5           | 0     | 0     | 178     | 0.00000000 0.00000000 40.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.000000 1     |
| 6           | 0     | 3     | 16      | 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 40.22975670 29.00960330 20.000000 1   |
| 7           | 0     | 3     | 16      | 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 40.22960930 29.00942890 20.000000 1   |
| 8           | 0     | 3     | 16      | 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 40.22960320 29.00922240 20.000000 1   |
| 9           | 0     | 3     | 16      | 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 40.22970860 29.00908830 20.000000 1   |
| 10          | 0     | 3     | 16      | 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 40.22980590 29.00908560 20.000000 1   |
| 11          | 0     | 3     | 16      | 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 40.22992620 29.00908690 20.000000 1   |
| 12          | 0     | 3     | 16      | 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 40.23002910 29.00908560 20.000000 1   |
| 13          | 0     | 3     | 16      | 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 40.23014170 29.00908560 20.000000 1   |
| 14          | 0     | 3     | 16      | 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 40.23024620 29.00908560 20.000000 1   |
| 15          | 0     | 3     | 16      | 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 40.23035120 29.00908590 20.000000 1   |
| 16          | 0     | 3     | 16      | 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 40.23043770 29.00908590 20.000000 1   |
| 17          | 0     | 3     | 16      | 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 40.23057180 29.00920630 20.000000 1   |
| 18          | 0     | 3     | 16      | 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 40.23058400 29.00940750 20.000000 1   |
| 19          | 0     | 3     | 16      | 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 40.23050930 29.00957510 20.000000 1   |
| 20          | 0     | 3     | 16      | 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 40.23039360 29.00964350 20.000000 1   |
| 21          | 0     | 3     | 16      | 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 40.23027380 29.00965290 20.000000 1   |
| 22          | 0     | 0     | 177     | 4.00000000 4.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.000000 1      |

Şekil 2.2.2: Rota Dosyası

Her bir sütun farklı bir parametreyi ifade eder. En önemlilerine bakılacak olursa; 1. Sütun waypoint yani hedef noktaların numaralandırılmasıdır.; 3. sütun bu waypointlerin türünü ifade eder, kalkışta ve uçuşta kullanılan waypointler farklıdır. 9. sütun enlem, 10. sütun boylam ve 11. sütun ise irtifa değerlerini ifade ederler. Bu ifadeleri anlamak için ise yazılımda DroneKit kütüphanesi kullanılmıştır. DroneKit kütüphanesi Python programlama dili aracılığı ile Ardupilot ile haberleşmeye olanak sağlar.

Mission Planner ve Pixhawk arasındaki haberleşim I<sup>2</sup>C haberleşme protokolü ile gerçekleşir. Bu iletişim Xbee 3 Anten Modülü tarafından sağlanır.

Kumanda ile İHA arasındaki iletişim ise RC Elektronik Haberleşme Protokolü sağlanır. Bu iletişim için ise FS-A6B Alıcısı kullanılır. Haberleşme Şekil 2.2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.2.3: Haberleşme

### **3. ESC**

#### **3.1 ESC Tanımı**

Elektronik Hız Kontrolcüsü (ESC), bir elektrik motorunun hızını kontrol eden ve düzenleyen bir elektronik devre, hız sürücüsüdür. ESC, motor hızlarının yukarı ve aşağı rampalamasını veya gerekli bir hızda tutulmasını sağlar. Bu da İHA'ların sabit bir uçuş hızına sahip olmasındansa değişken hızlarda uçmasını, böylece daha düşük gerilimde ihtiyacını karşılamasını yani yalnızca gerekli miktarda enerji kullanarak enerjiden tasarruf sağlar. [1]

Motora giden çıkış fazları mekanik ekipmana ihtiyaç duymadan elektronik olarak değiştirilebildiğinden, ayarlanabilir bir hız sürücüsü geri vites marş gereksinimini ortadan kaldırır. Başka bir deyişle, motorun tersine dönmesini ve fren yapabilmesini sağlar.

ESC, uçak, gemi, helikopter, tekne, araba gibi uzaktan kumanda edilen edilen veya manual kontrol edilen araçların genelinde kullanılır.

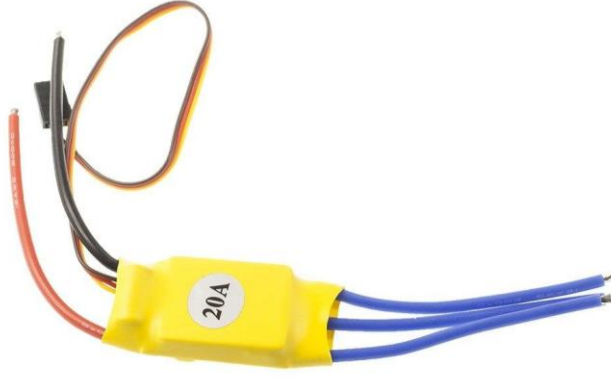
#### **3.2 ESC Çeşitleri**

ESC fırçalı (Şekil 3.2.1) ve fırçasız (Şekil 3.2.2) olmak üzere ikiye ayrılır. İki tür arasında gözle görülür en büyük fark, motor bağlantısının fırçalı ESC'de iki kablo, fırçasız ESC'de ise üç kablo ile sağlanmasıdır.

Fırçalı bir ESC'nin birincil işlevi voltaj kontrolüdür ve mekanik olarak ESC fırçaları dönen bir dirençli elemanla elektrik teması kurduğunda ve koptuğunda motorun içinde komütasyon - motor faz akımının değişmesi - meydana gelir. Fırçasız ESC'de ise komütasyon, ESC üzerinden tamamen elektronik olarak (mekanik olarak değil) gerçekleştirilir, bu da motorun fırçasız olmasını mümkün kılar. [2]

İdeal verim alınabilmesi için fırçasız bir motor kullanılıyorsa fırçasız bir ESC, fırçalı motor kullanılıyorsa da fırçalı ESC tercih edilmelidir.

Bu bitirme tezinde fırçasız ESC konu alınmıştır.



**Şekil 3.2.1: Fırçasız ESC [3]**



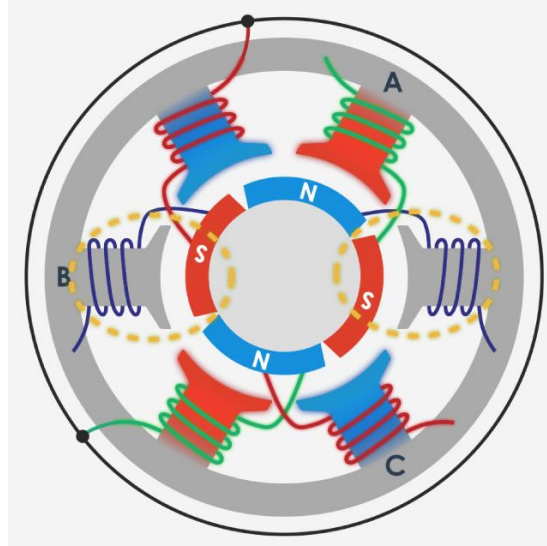
**Şekil 3.2.2: Fırçalı ESC [4]**

### **3.3 ESC'nin Çalışma Prensibi**

Motorun hareket etmesini 2 parça sağlar: stator ve rotor.

Stator, motorun içindeki düzenli sarılı bobinlere sahip olan sabit kısımdır. Bobinler rotorun dönmesi için manyetik alanı sağlar.

Rotor ise fırçasız DC motordaki hareketli, dönen kısımdır. Pervanenin hareket etmesini sağlar. ESC nin iç yapısı Şekil 3.3.1'de verilmiştir.



**Şekil 3.3.1: Fırçasız ESC'nin İç Yapısı [2]**

ESC, motorun dönmesi için dönen manyetik alanı oluşturmak üzere uygun Mosfetleri etkinleştirerek fırçasız motor hareketini veya hızını kontrol eder. Frekans ne kadar yüksek olursa veya ESC 6 aralıktan ne kadar hızlı geçerse, motorun hızı o kadar yüksek olur. Hangi mosfetlerin ne zaman etkinleştirilmesi gerektiğini bilmek için rotorun konumu bilinmelidir. Rotorun konumu, manyetik alanı algılayan *Hall Sensörü* veya elektromotor kuvvetini algılayan *Optik Sensör* kullanılarak bulunur. Drone motorlarında optik sensör kullanılır. [5]



**Şekil 3.3.2: Hall Sensörü [5]**

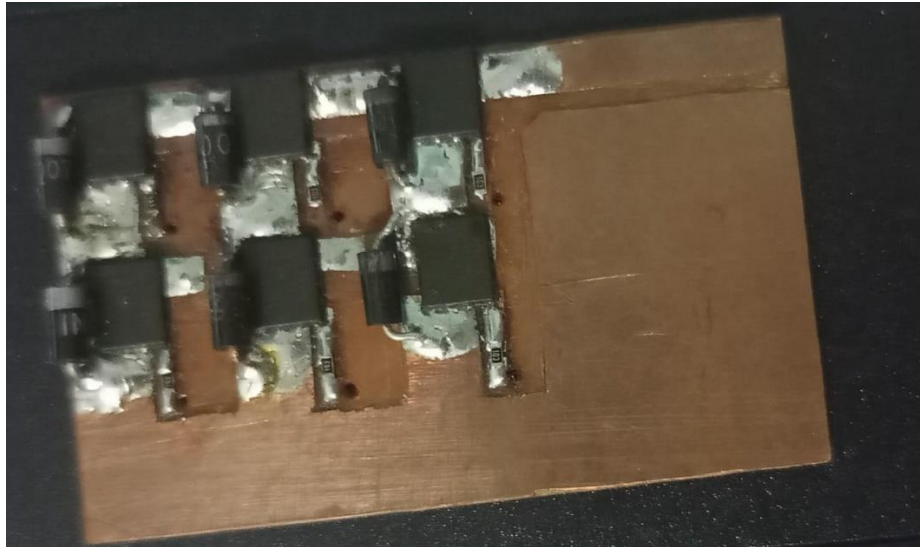


**Şekil 3.3.3: Optik Sensör [6]**

#### **3.4 MOSFET (Metal Oksit Yarı İletken Alan Etkili Transistör)**

Fırçasız bir ESC de motora bağlanan 3 kablo yani 3 ayrı faz vardır. MOSFET, batarya ve motordaki fazlar arasındaki anahtar gibidir.. ESC'nin içinde bulunun MOSFETler motora ne kadar güç gideceğini kontrol eder. Bu yüzden ESC kablolarının motor kablolarına doğru bir şekilde bağlanması çok önemlidir.

Kullanılan K0351 MOSFET'ler Şekil 3.4.1'de verilmiştir.



**Şekil 3.4.1: Kullanılan MOSFET'ler**

### 3.5 Pil Eliminatör Devresi (BEC)

Pil Eliminatör Devresi (Battery Eliminator Circuit -BEC), ek bir pile ihtiyaç duymadan bir alt sisteme farklı bir voltajda güç sağlamak için kullanılan elektronik bir voltaj regülatörüdür. Başka bir deyişle, büyük voltajı daha küçük bir voltaja dönüştürür. İHA'da kumanda alıcısı ve hareketli yüzeylerin kullanımını sağlayan servo motorlarının ihtiyaç duyduğu voltaja kıyasla, daha yüksek voltajlı bir batarya kullanılır. Kumanda alıcısı ve servo motorlar, Pixhawk uçuş kartı aracılığı ile ESC'nin BEC'ine bağlanır ve oradan beslenir. Bu sayede ek bir bataryaya ihtiyaç duyulmaz. Aşağıda verilen Şekil 3.5.1'de ESC – servo bağlantısının Pixhawk üzerinden nasıl yapıldığının bir örneği verilmiştir.



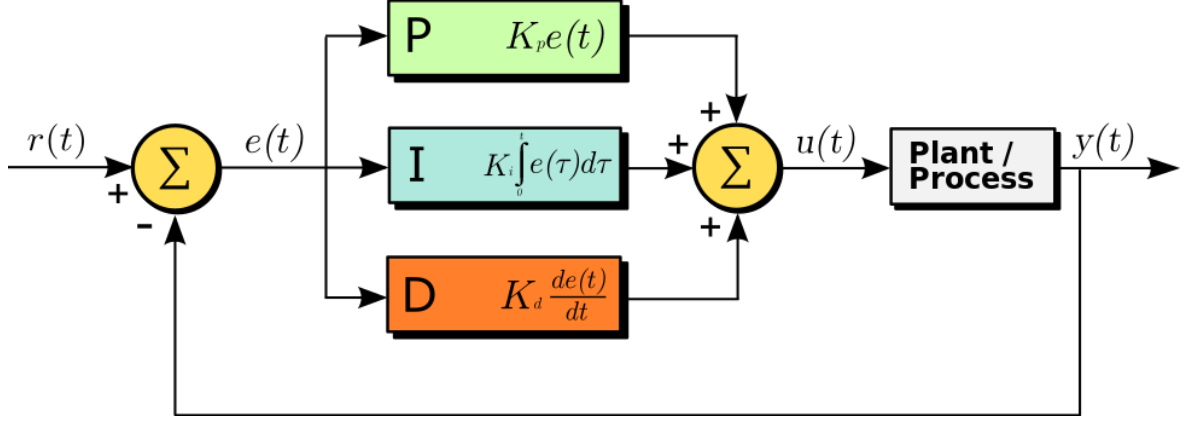
Şekil 3.5.1: Servo-ESC-Pixhawk Bağlantısı [7]

### 3.6 PID (Oransal İntegral Türev)

*PID (Proportional Integral Derivative — Oransal İntegral Türev)*; endüstriyel, mekatronik, robotik vb. sistemlerde kullanılan bir kontrol yöntemidir. İHA'nın uçuş kararlılığına sahip olabilmesi ve uçarken oluşabilecek sarsıntıların en aza indirgenmesi için PID ayarlarına ihtiyaç vardır.

PID, girdi alan bir algoritma mantığında çalışır. İHA'nın seyir hızı, seyir yüksekliği gibi parametreler çıktı olarak verilir, PID bu bilgiyi işler ve gerekli hareketli yüzeyler çalıştırır.





Şekil 3.6.1 : PID Algoritması [8]

İHA için PID ayarlaması Mission Planner ara yüzünde manual olarak yapılır. İdeal değerler uçuş denemelerinde elde edilmiştir.

| Servo Roll Pid |            | Servo Pitch Pid |            | Servo Yaw       |      |
|----------------|------------|-----------------|------------|-----------------|------|
| P              | 0,080      | P               | 0,080      | Yaw 2 roll      | 0,96 |
| I              | 0,075      | I               | 0,0875     | Integral        | 0,25 |
| D              | 0,000      | D               | 0,000      | Dampening       | 0,00 |
| INT_MAX        | 0,00666666 | INT_MAX         | 0,00666666 | Intergrator Max | 15   |

Şekil 3.6.2: Mission Planner PID Ayarı

### 3.6.1 Proportional (Oransal) Terim

Oransal terimi, sistemin hatasını bir faktör ( $K_p$ ) ile çarparak azaltmayı amaçlar. Bu işlem ile hata hızlı bir şekilde düzeltilir ancak çıkışta salınım olasılığı artar. Salınımı önlemek için yüksek bir  $K_p$  değeri seçilmemelidir. [9]

$$P = K_p \times Hata$$

### 3.6.2 Integral (İntegral) Terimi

Integral, hata bölgesini bulmak anlamına gelir. Her periyottaki hata katsayısı ( $K_i$ ) ile çarpılır. Toplama işlemi sürekli yapıldığından integral çok fazla artırılmadan sınırlandırılmalıdır. [9]

$$I = I + (K_i \times Hata \times dt)$$



### 3.6.3 Derivate (Türev) Terimi

Türev, zaman içinde değerdeki değişime karşılık gelir. Sistemdeki değişiklikten meydana gelecek değişikliği tanır ve istenen değeri geçmemesi için sistemi yavaşlatır. İki örnek arasında hatada değişiklik yoksa türev sıfırdır. [9]

$$D = \frac{Kd \times HD}{dt}$$

(HD: İki örnek arasındaki hataların farkı)

#### **4. ESC DONANIMI**

Fırçasız DC motor ESC sinin iç yapısında 6 adet anahtarlama elemanı (MOSFET) bulunur. 3 faza sahip olan bu motorlar, rotorun konumuna göre, uygun komütasyon sırasıyla mosfetlerin darbe genişlik modülasyonu (PWM) ile anahtarlanarak çalışır. Devrede 6 adet K0351 N channel mosfet kullanılmıştır. Bu mosfetlerin uçlarında ters gerilim oluşmasını önlemek amacıyla drain- source arasına ters polarlanmış şekilde diyot bağlantısı yapılmıştır. Şekil 3.4.1’de verilen devreye bakıldığında, üstteki 3 MOSFET sırasıyla A, B ve C fazının HIGH side’ı, alttaki 3 MOSFET ise LOW Side olacak şekildedir. Devrenin gate ucuna 100 ohm luk direnç bağlanmıştır. Gate uçları IR2104S gate driverlara bağlı olup Aduino’dan gelen PWM sinyali ile Mosfetler tetiklenmektedir. Arduino devre şemasında (Şekil 4.1.2.1) gözüktüğü üzere motor fazları dirençlerle oluşturulan kısma bağlanmış ve arduinonun analog girişlerine sinyal kabloları çekilmiştir. Motordan gelen Back EMF ile analog girişten ADC (Analog-Dijital Dönüştürücü) okuması yapılmış ve gelen sinyal anlamlandırılarak rotor pozisyon bilgisi alınmıştır.

##### **4.1 Geliştirme Kartı**

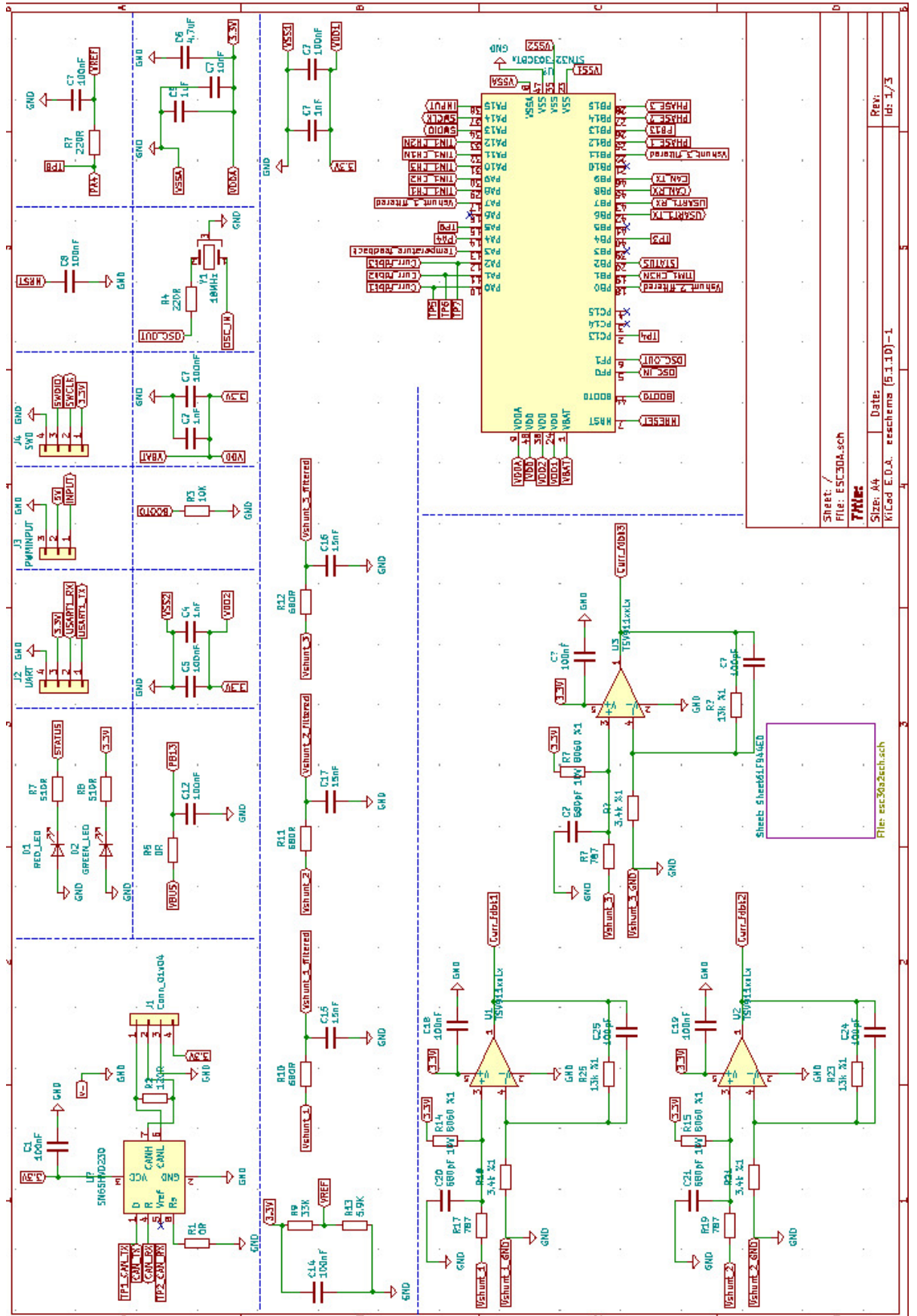
Geliştirme Kartı seçimi yapılırken hız ve ağırlık parametreleri dikkate alınmıştır.

###### **4.1.1 STM**

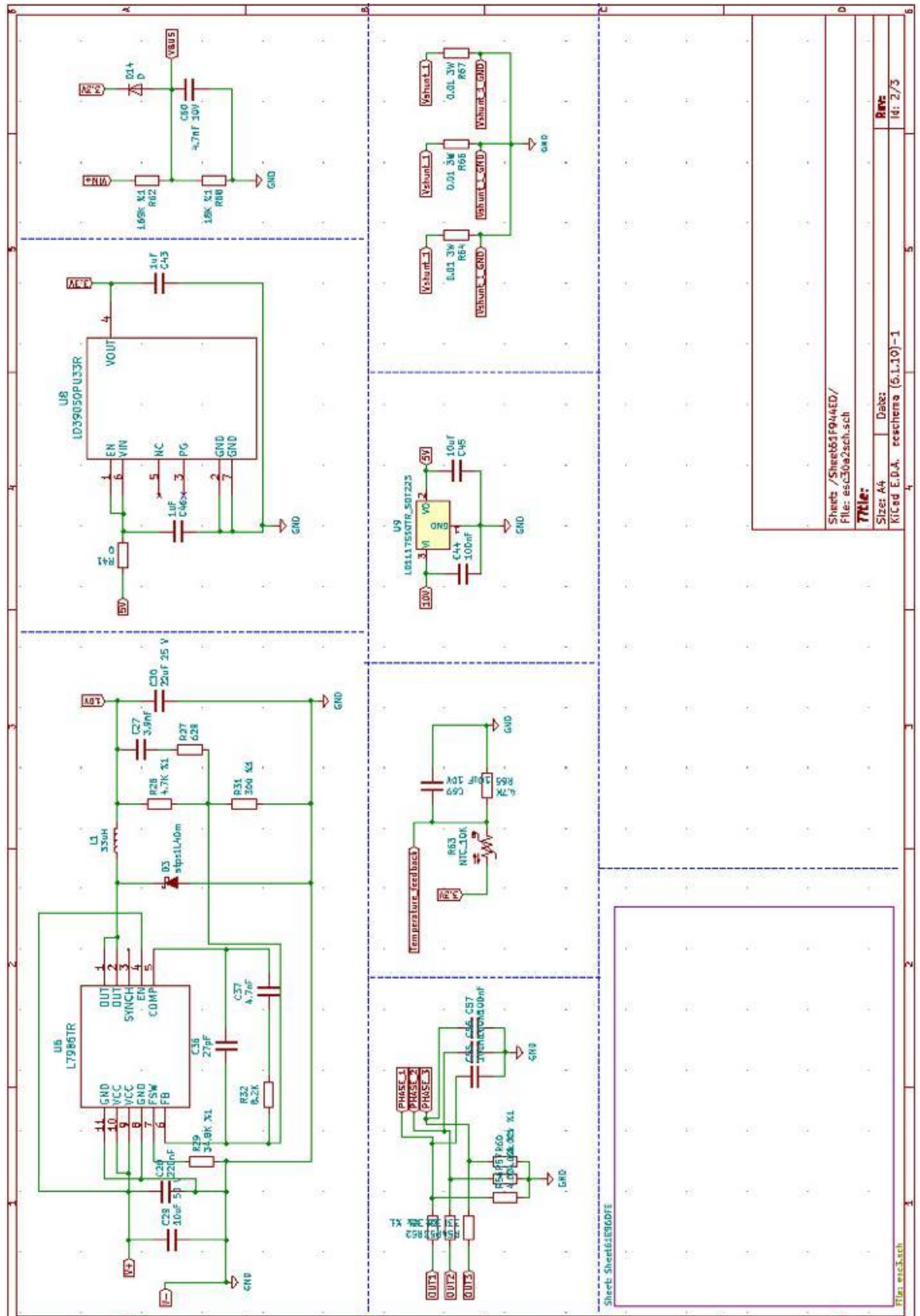
STM’in bir çok modeli vardır. Model seçimi proje ihtiyaçları doğrultusunda yapılır. Bu tez çalışması için ise uygun olan STM modelinin STM32 olduğu kararlaştırılmıştır.

STM’in karmaşık bir yapısı vardır bu yüzden başlangıç seviyesinde kullanılabilecek bir kart olarak önerilmez.

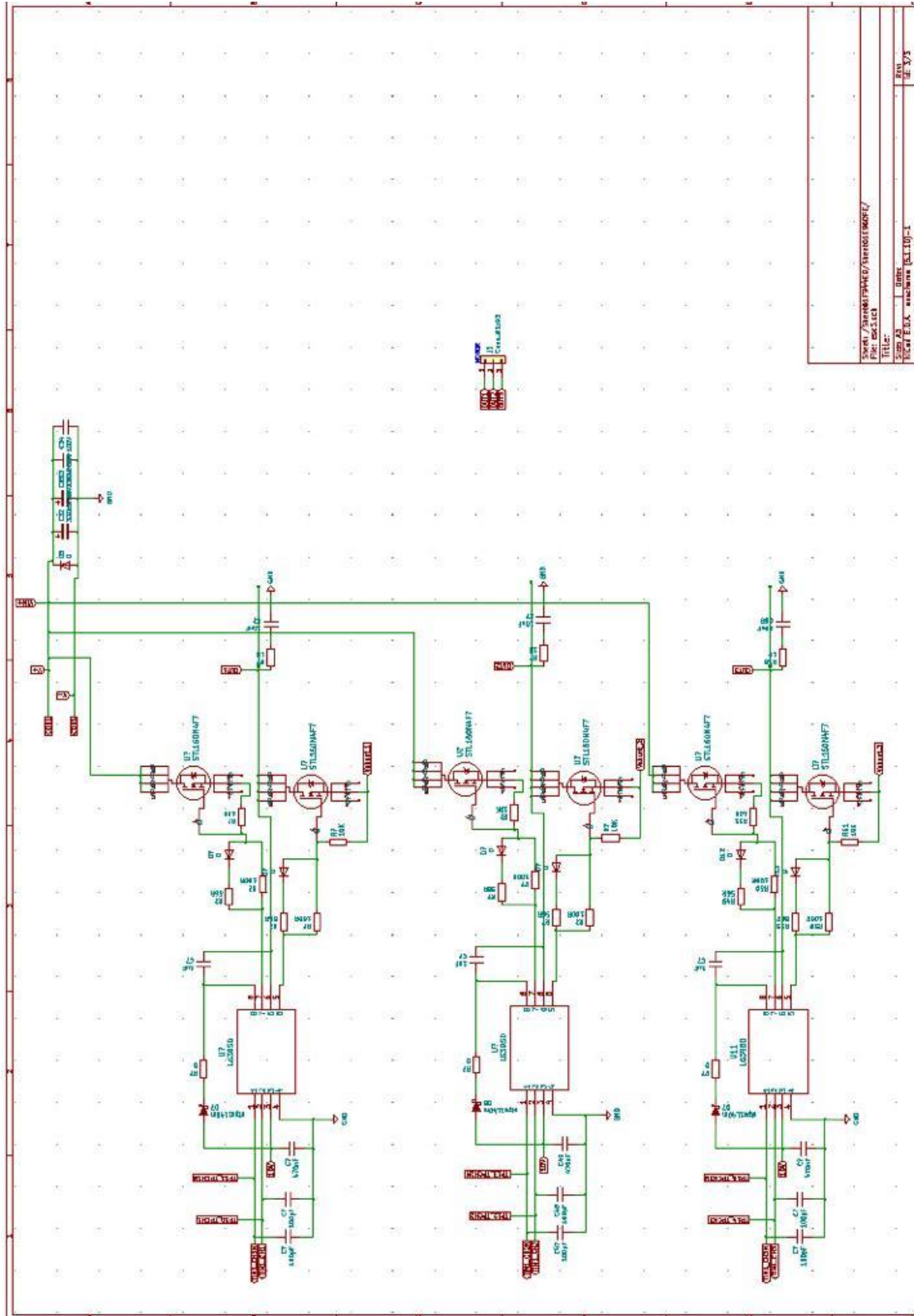
ESC için tasarlanan STM devresi bölümler halinde Şekil 4.1.1.1, Şekil 4.1.1.2 ve Şekil 4.1.1.3’te verilmiştir.



Şekil 4.1.1.1: STM Devresi



Şekil 4.1.1.2: STM Devresi



Şekil 4.1.1.3: STM Devresi

#### 4.1.2 Arduino

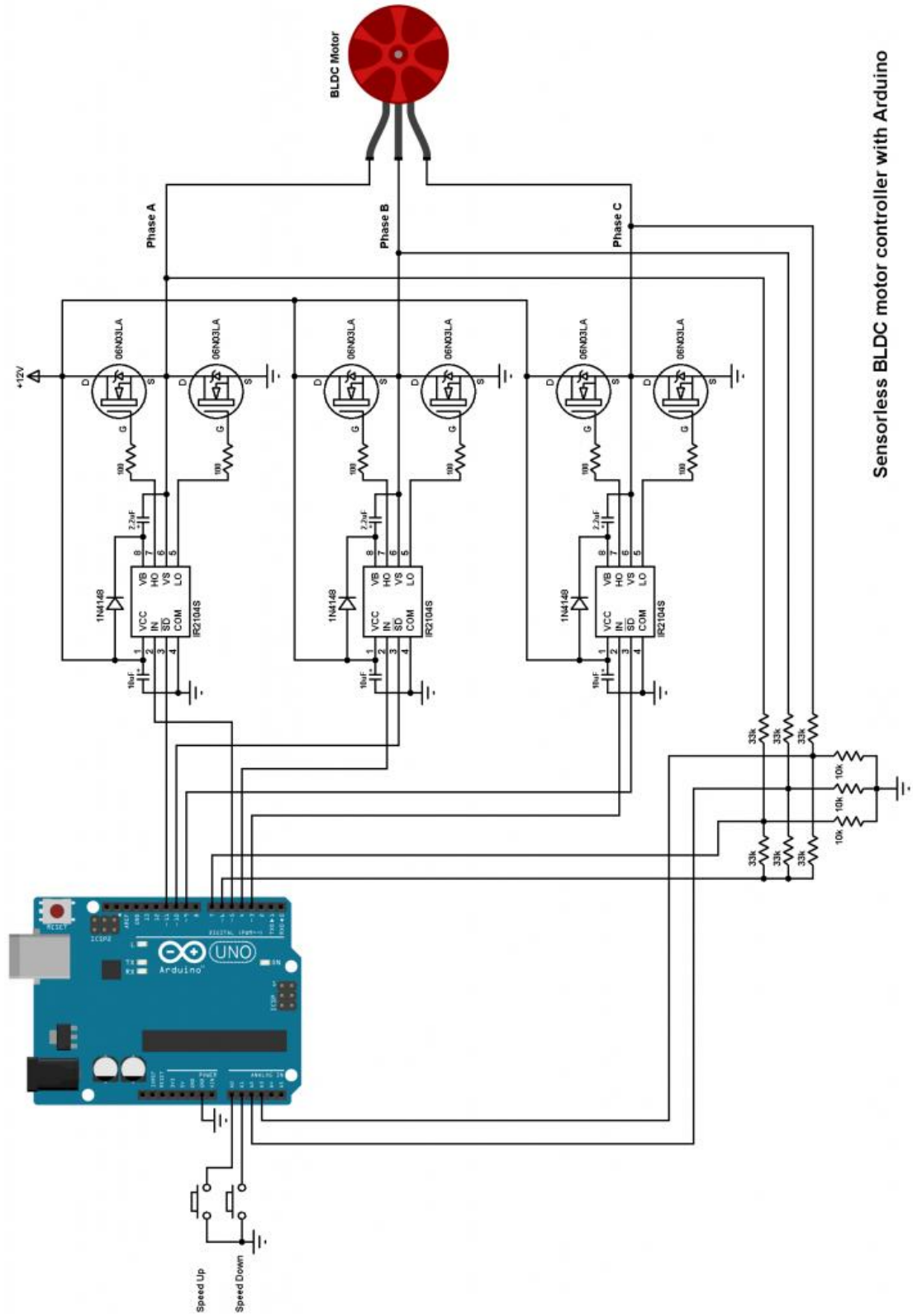
Arduino açık kaynaklı bir elektronik platformdur. Kullanımı elverişli ve işlevsel yazılım ve donanım üzerine kuruludur. Arduino fiziksel olarak programlanabilir mikrodenetleyici olarak adlandırılan bir devre kartı barındırır. Aynı zamanda içeriğinde kodu fiziksel karta yazmak ve yüklemek için entegre geliştirme ortamı (IDE) bulunur.

Arduino Programlama Dili, temel olarak C++ üzerine kurulmuştur. Günümüzde farklı spesifikasyonlara sahip çok sayıda arduino modeli mevcuttur. Bunlara örnek olarak Arduino UNO, Red Board, LilyPad Arduino, Arduino Mega, Arduino Leonardo gibi modellerden bahsedilebilir.

Arduino günlük hayatta pek çok yerde vardırİ trafik ışıkları ve yaya geçidi mekanizmalarında, gerçek zamanlı saat kontrol sistemlerinde Arduino kullanılır.

Bu çalışmada Arduino UNO R3 kullanılmasına karar verilmiştir. ESC için tasarlanan devre Şekil 4.1.2.1’de verilmiştir.

Bu bitirme çalışmasında, başlangıçta STM32 geliştirme kartı seçilmiş ve tasarım o kart düşünülerek yapılmıştır fakat sonrasında Arduino UNO R3 kartına geçilmiştir. STM32 kartının tedariki, çip yetmezliği sebebi ile yavaşlamıştır. Yaşanan bu sıkıntının maalesef çözüme kavuşturulamamıştır.



Sensorless BLDC motor controller with Arduino

Şekil 4.1.2.1: Arduino Devresi



## 5. ENTEGRASYON

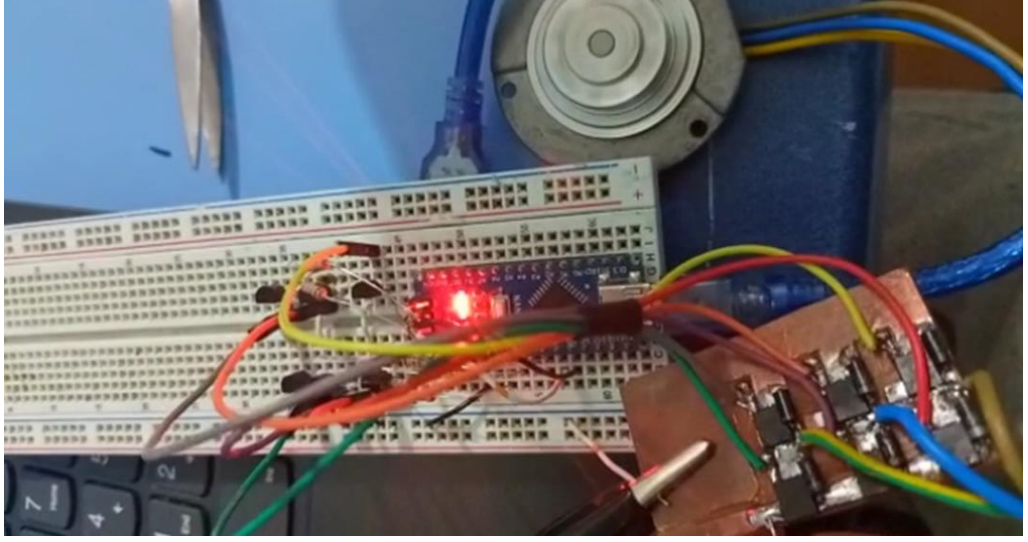
Üretimi gerçekleştirilen İHA'nın nihai görünümü Şekil 5.1'de verilmiştir. Üretilen bu İHA'dan karakteristik olarak hızlı uçuşu ve keskin manevra kabiliyetlerine sahip olması beklenmektedir. İlavenen yarışma istekleri doğrultusunda olabildiğince hafif bir İHA üretmek misyon edilmiştir. Hassas terazide 929.9 gram olarak tartılan İHA ile bu hedefe ulaşıldığı düşünülmektedir.



**Şekil 5.1: Nihai İHA**

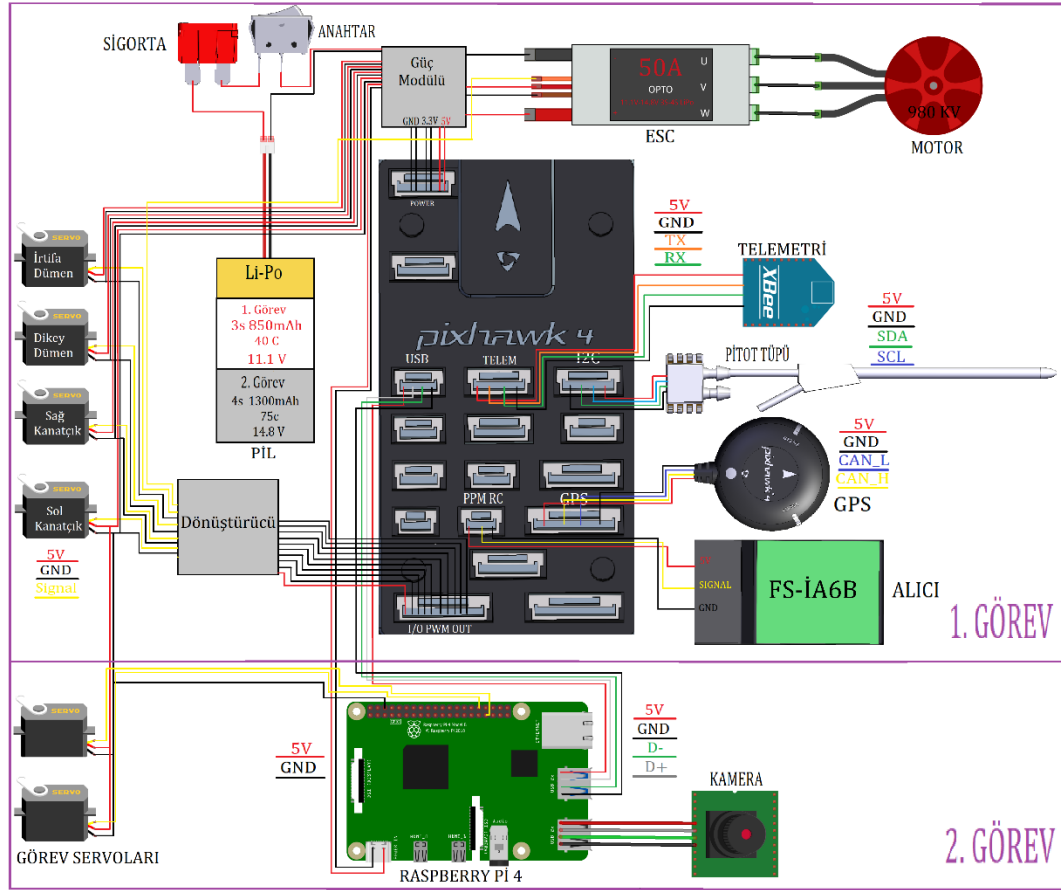
Tasarlanan ESC'nin kurulumu Şekil 5.2'de gösterilmiştir. Bu tasarımın motoru yaklaşık olarak 45 saniye döndürdüğü gözlemlenmiştir.





**Şekil 5.2: Devrenin Kurulumu**

Bütün elektronik bileşenleri kapsayan devre ise Şekil 5.3'te verilmiştir. Üretilen İHA'nın gerçekleştirmesi gereken 2 görev vardır bu yüzden devre şemasına 2. Görev de dahil edilmiştir.



Şekil 5.3: İHA Devre Şeması

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Arduino ile tasarlanan ESC çalıştırılabilmektedir.

Hazır ESC ile yapılan uçuş testleri ve tasarlanan ESC ile yapılan atölye testlerinin sonuçları karşılaştırıldığında, tasarlanan ESC'nin hazır ESC kadar verim vermediği açık bir şekilde ortadadır. STM ile tasarlanan bir ESC'nin daha verimli çalışabileceği düşünülmektedir.

Günümüzde ESC üretiminde yaşanan en yaygın sorun çip eksikliğinden kaynaklı kart yetmezliğidir. Bu sebeple yerli parça üretimi hedeflenen projelerde ikincil bir üretim planı olması şarttır. Bu tez çalışmasının başlangıcında düşünülen STM kartı tedarik edilemeyince Arduino ile çalışılmaya başlanılmış ve proje tamamlanmıştır. Arduino'da çalışmak STM'e göre daha kolay fakat STM kadar verimli değildir. Proje süresi uzun ve yurtdışından tedarik edinilebiliyorsa STM kartında çalışmanın daha başarılı bir sonuç getireceği aşıkardır.

## KAYNAKLAR

- [1] Esc'lerin Çalışma Prensipleri ve Esc'lerde Bulunan Sensörler. (2020). Erişim 12.06.2022.  
<https://avdesodrone.com/esclerin-calisma-prensibi-ve-esc-programlama-cesitleri/>
- [2] How Brushless Motor and ESC Work. (2019). Erişim 10.06.2022.  
<https://howtomechatronics.com/how-it-works/how-brushless-motor-and-esc-work/#:~:text=An%20ESC%20or%20an%20Electronic,of%20the%20motor%20will%20be.>
- [3] ESC 30A Brushless Fırçasız Motor Hız Kontrol Sürücüsü . (2022). Erişim 27.06.2022  
<https://www.motorobit.com/urun/esc-30a-brushless-fircasiz-motor-hiz-kontrol-surucusu>
- [4] 6-12V ESC 320A ESC Fırçalı ESC Hız Kontrol Fiyatları ve Özellikleri. (2022). Erişim 27.06.2022  
<https://urun.n11.com/arduino-urunleri-ve-setleri/6-12v-esc-320a-esc-fircali-esc-hiz-kontrol-P483910889>
- [5]"49E Hall Sensörü Fiyatları Ve Özellikleri". *Urun.N11.Com*, 2022, Erişim 27.06.2022  
<https://urun.n11.com/arduino-urunleri-ve-setleri/49e-hall-sensoru-P470072914>.
- [6] Ltd.&#350;ti., PCE. "Optik Sensör OSENP | PCE Instruments". *Pce-Instruments.Com*, 2022, Erişim 27.06.2022  
[https://www.pce-instruments.com/turkish/oel\\_uem-teknolojisi/oel\\_uem-cihazlarae/takometre-wachendorff-prozesstechnik-gmbh-optik-sensoer-osenp-det\\_1836293.htm](https://www.pce-instruments.com/turkish/oel_uem-teknolojisi/oel_uem-cihazlarae/takometre-wachendorff-prozesstechnik-gmbh-optik-sensoer-osenp-det_1836293.htm).
- [7] "Servo — Copter Documentation". *Ardupilot.Org*, 2022, Erişim 28.06.2022  
<https://ardupilot.org/copter/docs/common-servo.html>.
- [8] "PID - Vikipedi". *Tr.Wikipedia.Org*, 2022, Erişim 28.06.2022  
<https://tr.wikipedia.org/wiki/PID>.
- [9] Python ile PID Kontrol Örneği. (2020). Erişim 15.06.2022  
<https://ahmetatasoglu98.medium.com/python-ile-pid-kontrol%C3%B6rne%C4%9Fi-18d0b4cee2b2>
- Arduino, Raspberry Pi, DC Motor, LED, Direnç Çeşitleri | Robocombo. (2022). Erişim 10.06.2022  
<https://www.robocombo.com/blog/icerik/arduino-esc-ile-fircasiz-motor-kullanimi-ve-kontrolu>

drives, 1. (2009). Plant Engineering | 10 benefits of using adjustable speed drives. Erişim 12.06.2022.  
<https://www.plantengineering.com/articles/10-benefits-of-using-adjustable-speed-drives/>

İNSANSIZ HAVA ARACI UÇUŞ KONTROL SİSTEMLERİ | ASELSAN. (2022), Erişim 10.06.2022.  
<https://www.aselsan.com.tr/tr/inovasyon/haber-detay/insansiz-hava-araci-ucus-kontrol-sistemleri-3433>

**Dejan,** How Brushless Motor and ESC Work. (2019). Erişim 30.06.2022.  
<https://howtomechatronics.com/how-it-works/how-brushless-motor-and-esc-work/>

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Nil DUMAN  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 15 Şubat 1999- İSTANBUL  
**E-posta** : nil.duman.yes@gmail.com

## BİTİRME ÇALIŞMASINDAN TÜRETİLEN MAKALE, BİLDİRİ VEYA SUNUMLAR:

- .....
- .....
- .....