

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNSANSIZ HAVA ARAÇLARININ
GERÇEKLENMESİ VE MODELLENMESİ

Ersan AKTAŞ

Kasım, 2013

İZMİR

İNSANSIZ HAVA ARAÇLARININ GERÇEKLENMESİ VE MODELLENMESİ

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Ersan AKTAŞ

Kasım, 2013

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

ERSAN AKTAŞ tarafından YRD. DOÇ. DR. GÜLESER KALAYCI DEMİR yönetiminde hazırlanan “İNSANSIZ HAVA ARAÇLARININ GERÇEKLENMESİ VE MODELLENMESİ ” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



Yrd.Doç.Dr. Güleser DEMİR KALAYCI

Yönetici



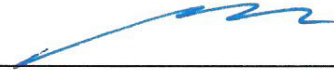
Doç.Dr.Adil ALPKOÇAK

Jüri Üyesi



Yrd.Doç.Dr.Aytaç GÖREN

Jüri Üyesi



Prof.Dr. Ayşe OKUR

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

“İnsansız hava araçlarının gerçekleşmesi ve modellenmesi” konulu tez çalışmasının bulunup kararlaştırılmasında, araştırılmasında, sonuca ulaşılmasında ve sonuçlarının değerlendirilmesinde sabırla bekleyen maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocam sayın Yrd. Doç.Dr. Güleser KALAYCI DEMİR’E teşekkür ederim.

Uçuş Mekaniği ve Kontrol analizlerinde her türlü yardımı yapan, zaman harcayan, emek veren, tecrübesini paylasan iş arkadaşlarım Dr. Sinan PAKKAN’A, Dr. Bedri YAĞIZ’A, Eren KAHRAMAN’A, Gökhan ÖZDOĞAN’A teşekkürü bir borç bilirim.

Sayısal Elektronik ve Yazılım konularında her türlü yardımı yapan, zaman harcayan, emek veren, tecrübesini paylasan iş arkadaşlarım Uğur GÜNGÖR’E, Dr. Burak SEYMEN’E, İhsan YALÇINKAYA ’A teşekkürü bir borç bilirim.

Analog Elektronik konularında her türlü yardımı yapan, zaman harcayan, emek veren, tecrübesini paylasan iş arkadaşlarım Bülent ÇAĞLAR’A, Tayfun FİLCİ, Çağdaş ÖZTÜRK’E, Selim YÖNET ‘E teşekkürü bir borç bilirim.

Yüksek lisansım boyunca bana verdiği desteklerinden ötürü sayın müdürüm Yüksel SERDAR’A ve Dr. Volkan NALBANTOĞLU’A teşekkürü bir borç bilirim.

Ersan AKTAŞ

İNSANSIZ HAVA ARACININ GERÇEKLENMESİ VE MODELLENMESİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında, insansız hava aracı olarak baz aldığımız dört motorlu ve dört pervaneli bir sistem olan hava aracının, temel dinamik denklemlerden yola çıkarak modeli oluşturulduktan sonra mekanik, elektronik ve son olarak kontrol sistemleri tasarlanılmış ve gerçekleştirilmiştir. Sistemdeki pervaneleri yüksek devir sayılarında döndürebilmek için fırçasız motor kullanılmıştır. Fırçasız motorların devir sayıları elektronik hız kontrolörleri üzerinden değiştirilmektedir. Aracın temel dinamik yunuslama, yuvarlanma ve dümen açıları, araçta bulunan AHRS sensörü üzerinden alınmaktadır. Bu açılar, daha sonra elektronik kart üzerinde bulunan işlemci üzerinde koşulan kontrol algoritmasına girdi olarak verilmektedir. Aracın kontrol algoritması, elektronik kart üzerinde gerçekleştirilmiştir. Elektronik kart üzerinde, bir adet FPGA ve içindeki soft işlemcinin yazılımını koşturabilmesi için bir adet SRAM bulunmaktadır. Aynı zamanda pozisyon bilgisinin alınabilmesi için bir adet GPS ve yerdeki bilgisayarla kablosuz iletişim kurabilmek için bir adet RF modül kullanılmıştır. Aracın taşıyıcı iskelet yapısı karbon fiber malzemeden yapılmıştır. Aracın karbon fiber malzemeden yapılması aracın hafif ve sağlam olmasını sağlamıştır. Quadrotor olarak adlandırdığımız hava aracı için çeşitli test düzenekleri hazırlanmıştır. Quadrotorun bu test düzenekleri üstünde analizleri gerçekleştirilmiştir. Sistemde yunuslama, yuvarlanma ve dümen eksenleri için kontrolcüler tasarlanmıştır. Kontrol algoritması iç içe iki tane döngüden oluşmaktadır. İç taraftaki döngü açısal hız döngüsüdür. Dış taraftaki döngü açı ya da pozisyon döngüsü olarak adlandırılmaktadır. Quadrotor serbest uçuş denemesinde başarı ile uçurulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Quadrotor, insansız hava aracı, kontrol sistemi.

IMPLEMENTATION AND MODELLING OF UNMANNED AIR VEHICLE

ABSTRACT

In this thesis study, the four-engine propeller-driven aircraft regarded as unmanned aerial vehicle system is modeled using fundamental dynamic equations. Also, mechanical, electronics and control system of the air vehicle are designed and implemented. The brushless motor is used to rotate the propeller at high level revs. Brushless motor speeds are changed via electronic speed controllers. The vehicle's fundamental state angles (*i.e.*, roll angle, pitch angle, and yaw angle) are taken from AHRS sensor. These angles are provided as an input to the control algorithm that run on soft the processor on the electronic card. The vehicle control algorithm is carried out on the electronic card. Electronic card includes one FPGA and one SRAM to run software on soft processor that is inside of FPGA. At the same time, one GPS is used to obtain position information and one RF module is used to communicate wirelessly with the computer at the ground station. Carrier structure of the air vehicle is made of carbon fiber which provides that the vehicle is more lightweight and more robust. Many test setups are constructed for analyzing the control algorithms of an unmanned air vehicle. Controller is designed for each roll, pitch and yaw axes respectively in the system. Control algorithm consists of two cascade loops. The inner loop is called angular velocity loop and the outer loop is called angle or position loop. Quadrotor has been flown in the free-flight testing successfully.

Keywords: Quadrotor, unmanned air vehicle, control system

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZ SINAV SONUÇ FORMU.....	ii
TEŞEKKÜRLER.....	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xiii

BÖLÜM BİR-GİRİŞ.....	1
-----------------------------	----------

BÖLÜM İKİ – QUADROTOR.....	8
-----------------------------------	----------

2.1 Quadrorotor Çalışma Prensipleri.....	8
2.2 Quadrorotorun Dinamik Denklemleri.....	13
2.2.1 İtme Kuvveti.....	14
2.2.2 Sistem Ağırlığı.....	14
2.2.3 Sürüklenme Torku.....	14
2.2.4 Yunuslama, Yuvarlanma ve Döndürme Torku.....	15
2.3 Kontrolör İçin Sistem Denklemleri.....	17

BÖLÜM ÜÇ – QUADROTOR KONTROLÖR.....	25
--	-----------

3.1 PID Kontrolör.....	26
3.1.1 Orantısal Terim.....	35
3.1.2 İntegral Terim.....	36
3.1.3 Türev Terim.....	38
3.2 Quadrorotor Kontrolör.....	39
3.2.1 Yuvarlanma Eksen Açısı ve Açsal Hız Kontrolcüsü.....	40
3.2.2 Yunuslama Eksen Açısı ve Açsal Hız Kontrolcüsü.....	42

3.2.3 Dümen Eksen Açısı ve Açılma Hızı Kontrolcüsü.....	43
3.3 Ayrılmış Zamanlı PID.....	44
BÖLÜM DÖRT – DONANIM.....	47
4.1 Elektronik Kart.....	48
4.1.1 FPGA,Qsys Sistem ve NIOS II İşlemci.....	53
4.1.1.1 FPGA.....	53
4.1.1.2 Qsys Sistem ve NIOS II İşlemci.....	58
4.1.2 EPCS64(Flash) ve EPCS Kontrolör.....	62
4.1.3 SRAM.....	63
4.1.4 RS-232/RS-422.....	65
4.1.5 Seviye Kaydırıcılar.....	67
4.1.6 Osilatör.....	67
4.1.7 ADC VE Akım Sensörü.....	68
4.1.8 MicroSD Hafıza Kartı.....	70
4.1.9 GPS Modülü Ve Anteni.....	71
4.1.10 Güç Katı Bölümü.....	72
4.1.11 Koruma Devresi.....	75
4.1.12 Xbee RF Modülü.....	76
4.1.13 CHR-6DM AHRS.....	77
4.1.14 Elektronik Kartın Dizdirilmesi ve Toplanması.....	78
4.2 3DM-GX1 AHRS.....	79
4.3 Analog IR Uzaklık Sensörleri.....	80
4.4 Motorlar, Pervaneler, Batarya ve Elektronik Hız Denetleyicileri.....	80
BÖLÜM BEŞ – MEKANİK TASARIM VE GERÇEKLEME.....	84
5.1 Quadrotor İskeleti.....	85
5.2 Tek Eksen Test Düzeneği.....	89
5.3 Üç Eksen Test Düzeneği.....	91

BÖLÜM ALTI – QUADROTOR ARAYÜZ YAZILIMI.....	94
6.1 Veri İzleme Arayüzü.....	95
6.2 Kontrol Arayüzü.....	98
BÖLÜM YEDİ – GÖZLEM VE SONUÇ.....	99
KAYNAKLAR.....	101

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 İlk insanlı quadrotor.....	1
Şekil 1.2 Starmac.....	1
Şekil 1.3 X-4 Flayer quadrotor.....	2
Şekil 1.4 Javiator quadrotor.....	2
Şekil 1.5 Quadrotor genel bir görünüşü.....	3
Şekil 1.6 Sistemin genel şeması.....	7
Şekil 2.1 Quadrotor üstündeki kuvvetler.....	8
Şekil 2.2 Öne doğru hareket.....	10
Şekil 2.3 Arkaya doğru hareket.....	11
Şekil 2.4 Sola doğru hareket.....	11
Şekil 2.5 Sağa doğru hareket.....	12
Şekil 2.6 Dümen açısının yönelimi.....	13
Şekil 2.7 Pwm sinyali ile itki kuvvetinin ilişkisi.....	18
Şekil 2.8 Pwm sinyali ile itki kuvvetinin lineer olmayan grafiği.....	19
Şekil 2.9 Pwm sinyali ile motor rpm'nin lineer grafiği.....	21
Şekil 3.1 Genel geri-bildirimli kontrolör ve sistem yapısı.....	25
Şekil 3.2 Pid kontrolör basit diyagramı.....	26
Şekil 3.3 Birinci mertebeden sistem diyagramı.....	27
Şekil 3.4 Birinci mertebeden sistem birim basamak cevabı.....	28
Şekil 3.5 İkinci mertebeden sistem diyagramı.....	29
Şekil 3.6 İkinci mertebeden birim basamak cevabı $\zeta=0$	30
Şekil 3.7 İkinci mertebeden birim basamak cevabı $\zeta=1$	30
Şekil 3.8 İkinci mertebeden birim basamak cevabı $\zeta=0.4$	31
Şekil 3.9 İkinci mertebeden birim basamak cevabı $\zeta=1.4$	32
Şekil 3.10 Bode diyagram farklı sönümlenme katsayıları için.....	32
Şekil 3.11 Pid deneme sistemi.....	33
Şekil 3.12 Pid deneme sisteminin açık döngü cevabı.....	34
Şekil 3.13 P kontrol sistemi.....	35

Şekil 3.14 P kontrol sistemi birim basamak cevabı.....	36
Şekil 3.15 PI kontrol sistemi.....	37
Şekil 3.16 Pi kontrolcünün birim basamak cevabı.....	37
Şekil 3.17 Pid kontrol sistemi.....	38
Şekil 3.18 Pid kontrolcünün birim basamak cevabı.....	39
Şekil 3.19 Quadrotor sistemi ve kontrol yapısı.....	39
Şekil 3.20 Yuvarlanma açısı kontrolörü.....	40
Şekil 3.21 Yuvarlanma açısı kontrolör basamak cevabı.....	41
Şekil 3.22 Yunuslama açısı kontrolörü.....	42
Şekil 3.23 Yunuslama açısı kontrolör basamak cevabı.....	42
Şekil 3.24 Dümen açısı kontrolörü.....	43
Şekil 3.25 Dümen açısı kontrolörü basamak cevabı.....	44
Şekil 4.1 Otopilot kartının boş mekanik çizimi.....	48
Şekil 4.2 Kart konektörleri.....	49
Şekil 4.3 Otopilot kartının cad modeli.....	50
Şekil 4.4 Kartın gerçek fiziksel çizimi(Layout).....	52
Şekil 4.5 Fpga cad çizimi.....	53
Şekil 4.6 Quartus Fpga tasarımı.....	54
Şekil 4.7 Fpga konfigürasyon şeması.....	55
Şekil 4.8 Fpga açılış reseti ve çalışma ledleri.....	56
Şekil 4.9 Fpga güç modülü ve decoupling kapasitörleri.....	57
Şekil 4.10 Qsys sistem örneği.....	58
Şekil 4.11 Qsys’de donanımsal pwm özel komponent oluşturma.....	59
Şekil 4.12 Qsys’de donanımsal pwm Avalon arayüzü zamanlama.....	60
Şekil 4.13 Qsys tasarımı.....	60
Şekil 4.14 Qsys generic tri-state kontrolör.....	61
Şekil 4.15 Epcs(Flash) konfigürasyon.....	62
Şekil 4.16 Sram yazma zamanlaması.....	64
Şekil 4.17 Sram okuma zamanlaması.....	65
Şekil 4.18 Rs-232 devresi.....	66
Şekil 4.19 Rs-422 devresi.....	66
Şekil 4.20 Seviye kaydırıcı devresi.....	67

Şekil 4.21 Osilatör devresi.....	68
Şekil 4.22 Adc-1 devresi.....	69
Şekil 4.23 Adc-2 devresi.....	69
Şekil 4.24 Microsd konektör devresi.....	70
Şekil 4.25 Gps modülü ve rf anten devresi.....	71
Şekil 4.26 2.5V lineer regülatör.....	73
Şekil 4.27 Lmz12003 anahtarlama regülatör.....	74
Şekil 4.28 Tps5420 anahtarlama regülatör.....	74
Şekil 4.29 Koruma devresi.....	75
Şekil 4.30 Xbee rf modüller.....	76
Şekil 4.31 Chr-6dm ahrs.....	77
Şekil 4.32 Otopilot kartının toplanmış resmi.....	78
Şekil 4.33 3dm-gx1 ahrs.....	79
Şekil 4.34 Sharp analog Ir sensör.....	80
Şekil 4.35 Kullanılan motor ve pervanelerin birlikte cad çizimi.....	81
Şekil 4.36 Quadrotor Esc.....	82
Şekil 4.37 Li-Po batarya.....	83
Şekil 4.38 Batarya,Esc,motor bağlantısı.....	83
Şekil 5.1 Quadrotor üç boyut tasarımı.....	84
Şekil 5.2 Quadrotor fiziksel fotoğrafı.....	85
Şekil 5.3 Quadrotor kolları.....	86
Şekil 5.4 Kolların motor ve Ir bağlantısı.....	86
Şekil 5.5 Otopilot kartının bağlantısı.....	87
Şekil 5.6 Dört kolun iki plaka arasındaki bağlantısı.....	87
Şekil 5.7 Bataryanın bağlanması.....	88
Şekil 5.8 Quadrotor bacak tasarımı.....	89
Şekil 5.9 Tek eksen test düzeneği.....	90
Şekil 5.10 Tek eksen quadrotor ile birlikte.....	90
Şekil 5.11 Üç eksen quadrotor bağlantı elemanı.....	91
Şekil 5.12 Üç eksen test düzeneği.....	92
Şekil 5.13 Quadrotor üç eksen test düzeneğinde test edilirken.....	92
Şekil 5.14 İlk serbest uçuş denemesi.....	93

Şekil 6.1 Quadrotor veri izleme arayüzü.....	94
Şekil 6.2 Quadrotor üç boyut arayüzü.....	95
Şekil 6.3 Quadrotor grafik arayüzü.....	96
Şekil 6.4 Quadrotor kayıt ve simulasyon arayüzü.....	96
Şekil 6.5 Konsol arayüzü.....	97
Şekil 6.6 Quadrotor kontrol birimi.....	97
Şekil 6.7 Motor gösterge arayüzü.....	98
Şekil 6.8 Kontrol katsayıları arayüzü.....	98

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1 Pwm sinyali ve itki kuvveti test tablosu.....	18
Tablo 2.2 Pwm sinyali ve motor rpm test tablosu.....	20
Tablo 4.1 Sram mode tablosu.....	63
Tablo 4.2 Voltaj ve akım ihtiyaçları tablosu.....	72

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Bu tezde manual ya da otonom modda uçan mini bir insansız hava aracı yapılmıştır. Burada bahsi geçen insansız hava aracı, quadrotor yapısındaki helikopterlerdir. Mini insansız hava aracı olarak quadrotor oldukça popüler ve gündemde olan bir araçtır. Quadrotorlarla ilgili akademik çevrelerde olsun askeri alanlardan olsun hala dünyada birçok araştırma enstitüsünde araştırmalar devam etmektedir. İlk yapılan çalışma 1922 de De Bothezat tarafından yapılmıştır (Taylor, 1997). İlk tasarlanan insanlı quadrotor Şekil 1.1’te gösterilmektedir.



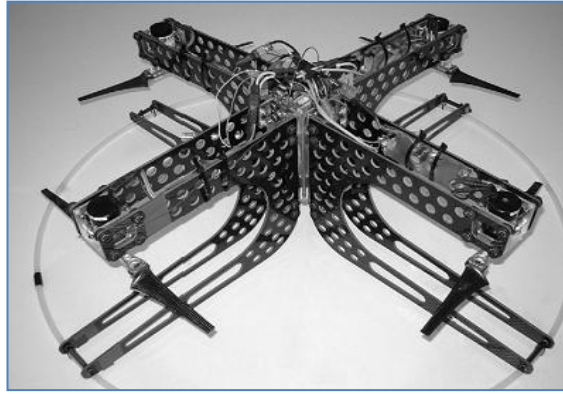
Şekil 1.1 İlk insanlı quadrotor (Taylor, 1997)

Yukarıda bahsettiğimiz gibi bu alanda akademik çalışmalar çok genişlemiş, pek çok quadrotor mekanizması ve kontrol algoritmaları geliştirilmiştir. Örneğin PID kontroller, ters kontrol, geri adım kontrol, gibi kontrol teknikleri quadrotora uygulanabilir (Dikmen, Arısoy ve Temeltaş, 2010). Stanford üniversitesinin geliştirdiği quadrotorun ismi STARMAC’tır (Hoffmann ve diğer, 2004). STARMAC PD kontrolcü kullanılarak uçurulmuştur.



Şekil 1.2 Starmac (Hoffmann ve diğer, 2004)

Uluslararası çalışmalarda yer alan üstünde çeşitli kontrolcülerin geliştirildiği çalışmalardan biride X-4 Flayer isimli quadrotordur. Şekil 1.3'te quadrotorun resmi gösterilmektedir. X-4 Flayer'in toplam ağırlığı 4 kilogramdır. 1 kg faydalı yük taşıyabilir. Yuvarlanma ve yunuslama eksenlerini ayrı ayrı PID kontrolcü ile kontrol edilebilmektedir (Pounds, Mahony ve Corke, 2010). Ayrıca bu platform üzerinde adaptif bulanık (fuzzy) kontrol ve adaptif sinir (neural) kontrol gibi kontrol teknikleri uygulanmıştır (Nicol, Macnab ve Ramirez-Serrano, 2011).



Şekil 1.3 X-4 Flayer quadrotor (Pounds ve diğer., 2010)

Bir diğer proje ise Salzburg üniversitesi tarafından gerçekleştirilmiştir (The JAviator Project, 2013). Bu çalışma Javiator olarak adlandırılmıştır. Bu platformda daha çok yeni yazılım yapıları denenmeye çalışılmıştır. Yüksek seviyeli gerçek zamanlı ve eş zamanlı bir yazılım yapısı kullanılmıştır. Şekil 1.4'te platformun resmi verilmiştir.

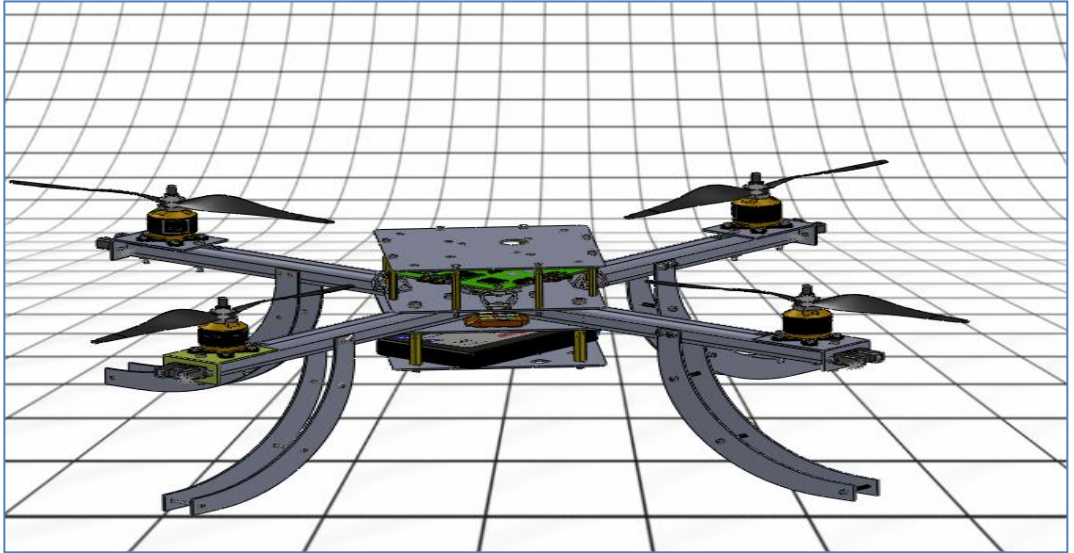


Şekil 1.4 JAviator quadrotor (Javiator Project, 2013)

Bu tezde gerçekleştirilen aşamalar aşağıda gsterildiği gibi dört ana başlık altında incelenmiştir.

- Donanım (Elektronik kart, motor ve diğer ekipmanlar, ayrıntılar bölüm dörtte)
- Yazılım (Soft işlemcistnde koşan yazılım ve bilgisayar komuta kontrol arayüz yazılımları, ayrıntılar bölüm altıda)
- Mekanik (Sistemin taşıyıcı iskeleti, ayrıntılar bölüm beşte)
- Kontrol (Uçuş kontrol algoritması, ayrıntılar blmte)

Dört rotorlu (quadrotor) olan bu araç isminden de anlaşılacağızere 4 adet pervanesi olan bir hava aracıdır. Son yıllarda giderek artan bir ilgi ile insansız hava aracı araştırmalarında, quadrotor tasarımları mekaniksel basitliklerinden dolayı bir hayli fazla ilgi çekmektedir. Quadrotorlar diğer helikopterlerdeki gibi pervanenin havayı süpürme açılarını değiştirilmesine gerek duymaz. Bu da tasarımı mekanik açıdan kolaylaştırır. Bir diğer ekicizelliği ise dar bir alan da asılı kalma veya gerek kapalı alanda olsun gerek açık alanda olsun dikey iniş ve kalkışzelliğine sahip olmasıdır.



şekil 1.5 Quadrotorun genel bir görünüşü

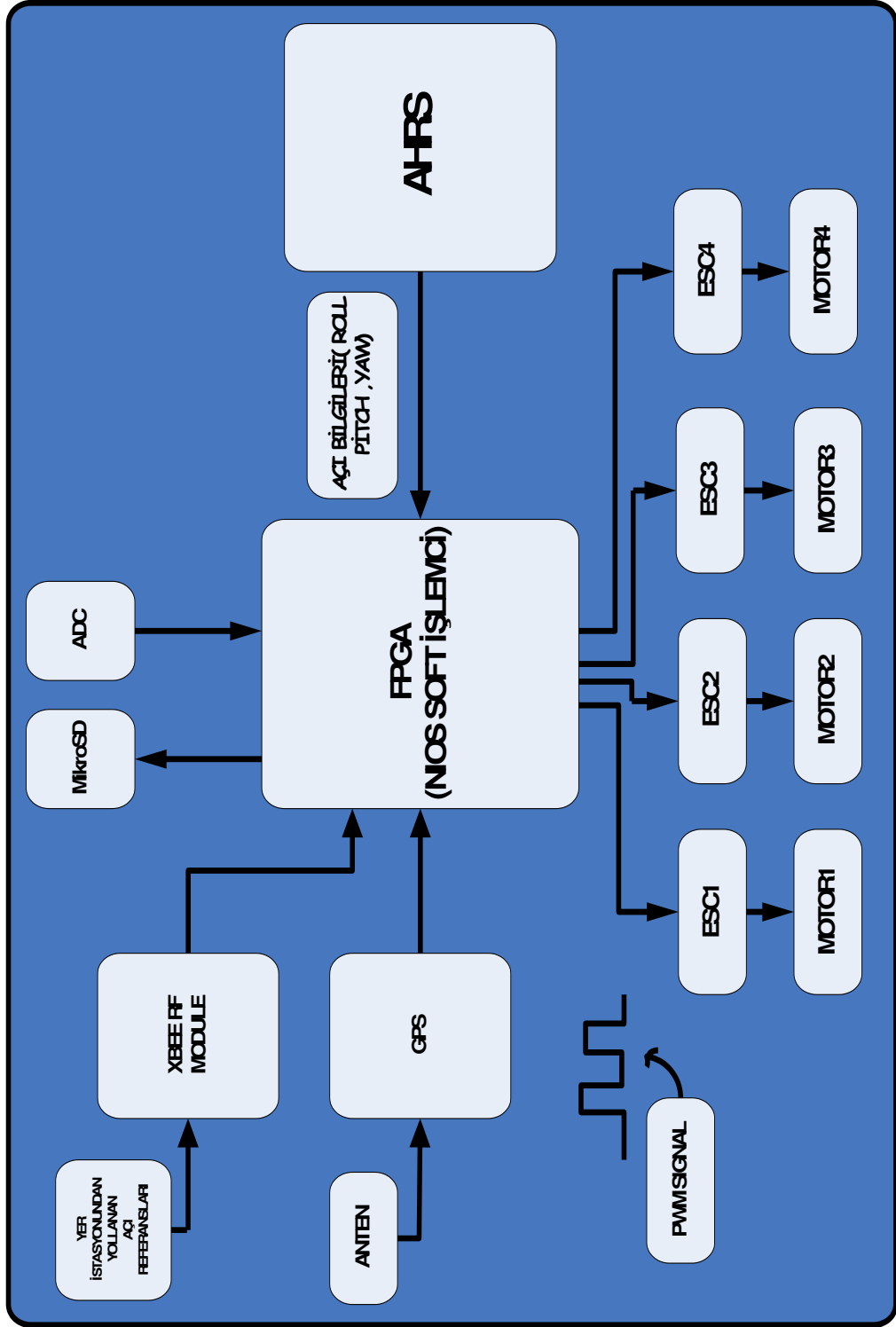
Quadrotor yüksek hareket kabiliyetine sahip olan bir hava aracıdır. Tek pervaneli helikopterlerle kısıtlı hareketler yapabilirken, quadrotor ile birçok yönde hareket edebilmek mümkündür. Ayrıca tek pervaneli bir araçla sağa veya sola dönmek için yarım daire çizilmesi gerekirken, quadrotor motor hızını değiştirerek istediği yöne dönebilmektedir. Bu sistem otonom olarak uçabilmesi için ya da kullanıcı tarafından verilen bir girdinin kontrolünü sağlayabilmesi için çeşitli sensörlere ihtiyaç duyar. AHRS (Attitude Heading Reference System) sistemin en önemli parçalarından biridir (AHRS, 2013). Sistemin ihtiyaç duyduğu açılar olan yuvarlanma, yunuslama ve dümen gibi açıları bu sensör topluluğu sağlamaktadır. AHRS sistemi içinde dönüölçer ivmeölçer ve magnetometre barındırmaktadır. AHRS bu üç sensörden gelen ham dataları bir kalman filtresinden geçirdikten sonra bunları açı bilgisine dönüştürür. Sistem stabilizasyonu için ilk uyguladığımız sistem klasik bir kontrol sistemidir. Kullanıcı ya da otonom kontrol algoritması belli girdi başka bir deyişle belli bir açı giriyor bu kontrol sisteminde referans diye de adlandırılabilir. Bu girdi girildikten sonra sensörlerden alınan açı değerleri kullanılarak hata oranları hesaplanır. Bu hata değerleri daha sonra çeşitli katsayılardan geçirilerek motor sürücü kartlarına gönderilmektedir. Böylelikle sistem hata büyüklüğüne göre farklı motor hız değerleriyle çalışmaktadır. Sistemde dört tane pervane olduğu için dört tane motora ihtiyaç duyulmaktadır. Motor olarak dıştan dönen fırçasız motorlar seçilmiştir. Kısaca fırçasız motordan bahsetmek gerekirse mıknatıs kutuplarının dönen kısma yapıştırıldığı, bobinin ise stator kısma yerleştirildiği klasik modelin tam tersinin uygulandığı bir motor sistemidir. Yani mıknatıslar ve bobin herhangi bir elektriksel bağlantı olmaksızın serbestçe dönmektedir. Böylece fırçaya ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu motorlar üç faz delta bağlı alternatif akım ile çalışmaktadır. Bizim sistemimizde Li-Po pilden verilen doğru akım (DC akım) elektronik hız kontrolörü (ESC) ile alternatif akıma çevirildikten sonra motorlara verilmektedir. Her bir fırçasız DC motor için bir tane ESC kullanılmaktadır. Bu parça sayesinde alınan komutlarla hız kontrolü yapılabilmektedir. Sistemin ana parçası olan bir adet akıllı cihaz olarak Altera firmasının Cyclone III adlı FPGA (Alan programlanabilir kapı dizisi) kullanılmıştır. İçerisinde NIOS II adlı soft işlemciyi barındırmaktadır. Kontrol algoritmasının döngüsünün gerçekleştiği yer burasıdır. Çevreden bilgi almak için bir adet AHRS (Attitude Heading Reference System) gerekmektedir. Bu birim

sayesinde quadrotorun yere paralel bir şekilde dengede kalması sağlanmaktadır. Ayrıca quadrotorun kontrolsüzce yükselip bir yere çarpmasını engellemek için dört bir koluna analog uzaklık sensörleri yerleştirilmiştir. Bilgisayar üzerinden kablosuz bir şekilde quadrotoru yönetmek için ise RF (radyo frekans) iletişim modülü kullanılmıştır. Toplanırsa sistemin ana parçaları aşağıdaki bileşenlerden oluşmaktadır.

Sistemin Ana Bileşenleri:

- Sayısal NIOS II soft işlemci (döngünün kapatıldığı yer)
- SRAM (yazılım bilgisinin koştığı yer)
- E2PROM (FPGA konfigürasyon verisi ve yazılım verisini saklandığı yer).
- AHRS (sistem açılarının geldiği sensör)
- Analog uzaklık sensörleri (4 tane uzaklık engelleri gösteriyor)
- Elektronik Hız Kontrolcüsü (ESC) (DC voltajı AC voltaja çeviren motor sürücüsü)
- GPS (konum bilgisi sağlayıcı)
- MicroSD kart (Hafıza birimi, veri arşivleme)
- XBEE RF (Module kablosuz iletişimi sağlayan yapı)
- Li-Po Batarya (14.8V sisteme güç sağlandığı yer)
- Analog-sayısal çevirici (uzaklık sensörlerinin analog sinyalden sayısal çevrildiği yer)
- Graupner pervaneler 28x12.5 cm (itki kuvveti ile sistemi havalandırmak için)
- Akım sensörü (pilden çekilen tüm akımı analog çıktı olarak verir.)
- Bilgisayardaki bilgi ve komut kontrol arayüzü
- Quadrotorun mekanik iskeleti
- Sistem test için seriport arayüzleri
- Fırçasız Motorlar
- Joystick(Kumanda)
- Tek eksen ve üç eksen test düzenekleri

Quadrotorun yapım aşamasındaki önemli özelliklerinden biri de sistemi taşıyıcı yapının hafif ve sağlam olması ve motorlar çalıştığı anda motorların yaydığı titreşime karşı dayanıklı olmasıdır. Bu yüzden tüm iskelet, karbon fiber kompozit malzemeden yapılmıştır. Aynı zamanda motorlar tarafından yayılan titreşimi emmesi için motorların frame ile bağlandığı yere titreşim emici malzeme konmuştur. Titreşim emici malzeme konmasına rağmen motorlar tarafından yayılan titreşim hassas cihazlar AHRS ye az da olsa hala gelmektedir. Bu AHRS nin içinde bulunan sensörler olan dönüölçer ve ivmeölçerin performansını etkilemektedir. Sistemde iki tane AHRS bulunmaktadır, birisi elektronik kart üzerine yerleştirilmiştir. Özellikle elektronik kart üzerindeki AHRS nin hassasiyeti düşük olduğu için elektronik işlemci kartını tel ip (wire rope) izolatörler ile sistem iskeletinden ayrılmıştır. Diğer hassasiyeti yüksek olan AHRS sistemdeki en üst taraftaki plakanın üzerine sistem izole etmek için kauçuk izolatörlerle bağlanmıştır. Böylelikle motorların yüksek devirlerde yaydığı titreşimleri olabildiğince sistemin kontrol algoritmasından uzak tutulmuştur. Sistemin elektronik kart, mekanik iskelet ve bilgisayardaki arayüz yazılımı tamamlandıktan sonra quadrotorun kontrol algoritmaları denemek amaçlı çeşitli test düzenekleri oluşturulmuştur. İlk olarak aracın tek eksen testleri yapılmıştır. Araç tek ekseninde (bu eksenler yunuslama ve yuvarlanma eksenleri) dönecek şekilde kısıtlanmıştır. Her iki tarafından hassas rulmanlar tarafından bağlanmıştır. Böylelikle araç bir eksen hava serbest kalmışçasına hareket ettirilebilmektedir. Tek bir ekseninde stabilasyonu sağladıktan sonra sistem diğer eksenini bağlanıp o ekseninde stabilasyon sağlanmıştır. Tek eksen düzeniğinin bir dezavantajı ise sistemde aynı yönlü iki motorda dönmek istemesine rağmen sistem iki taraftan bağlı olduğu için dönmemektedir Bu yüzden sistem dinamikleri belli bir dereceye kadar etkilemektedir. Daha sonra eksenlerde teker teker stabilasyon sağlandıktan sonra diğer test düzeniğine geçilmiştir. Son test düzeniğinin sırasıyla üç ekseninde (dümen, yunuslama ve yuvarlanama) ve yukarıya doğru oynama kabiliyeti vardır. Bu dört tarafta oynama kabiliyetine sahip düzenekte stabilasyon testi yapıldıktan sonra araç boş havada test edilmiştir. Sistem yapısının ana diyagramı aşağıdaki Şekil 1.6’da gösterilmiştir.



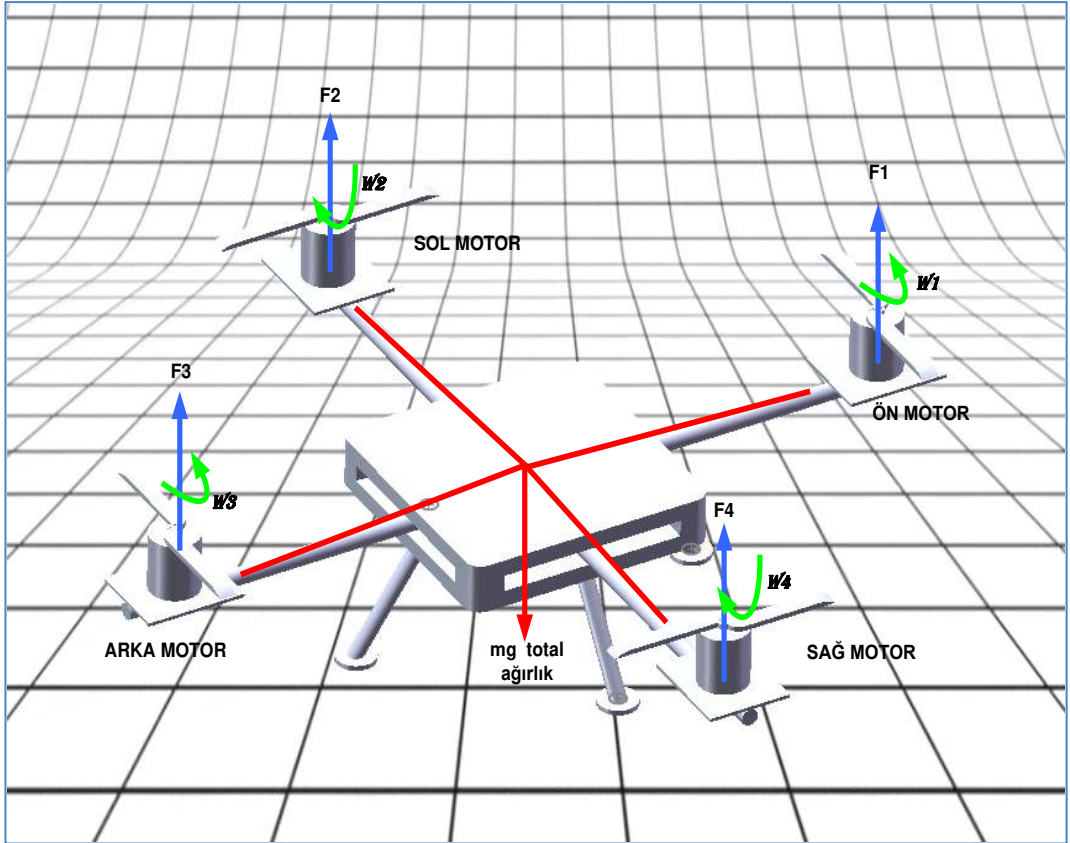
Şekil 1.6 Quadrotor genel bir görünüşü

BÖLÜM İKİ

QUADROTOR

2.1 Quadrotor Çalışma Prensibi

Quadrotor temel çalışma prensiblerinin dayandığı ana nokta, motor devir sayısını değiştirerek pervanelerin dört bir yandan (ön, arka, sağ, sol) oluşturduğu itki kuvvetlerini dengelemektir. Motorlar artı şeklindeki uçlarına yerleştirilerek sistemin merkezine doğru her bir motor moment oluşturmaktadır. Bütün motorların sistemin ağırlık merkezine olan uzaklıkları eşit olduğu için sistemde momentler yerine kuvvetlerden yola çıkarak tanımlanabilir. Sistem üzerindeki kuvvetler Şekil 2.1’de verilen quadrotorun basitleştirilmiş modeli üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Quadrotor üstündeki kuvvetler

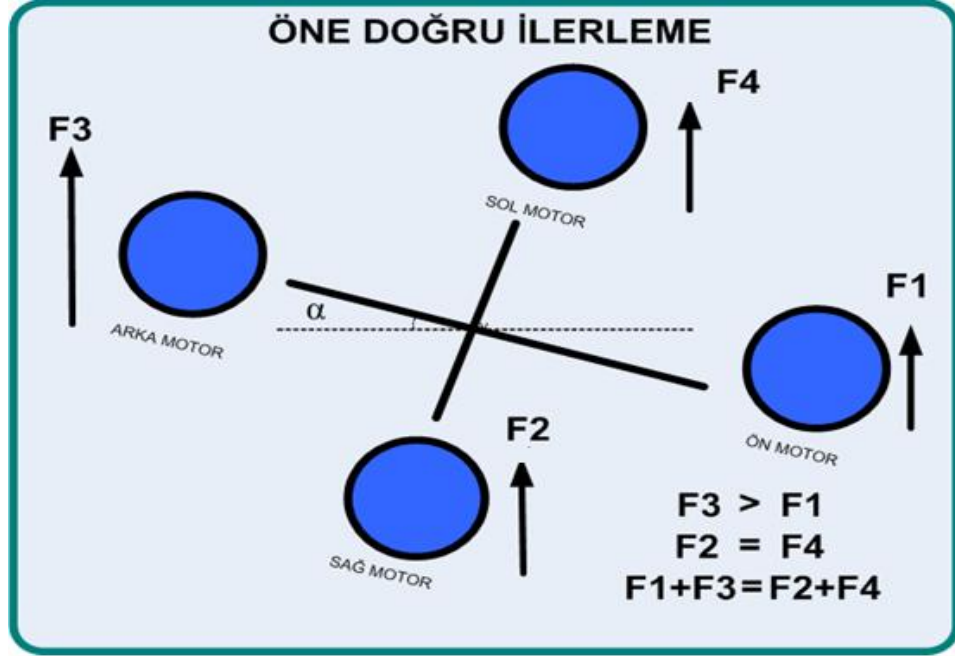
Yukarıdaki Şekil 2.1’de gösterildiği gibi her bir motorun ürettiği itki kuvveti mavi renkteki kuvvet vektörleri ile gösterilmiştir. Yeşil renkler ise her bir motorun belli bir açısal hız ile hangi yöne döndüğünü göstermektedir. Kırmızı renk ile gösterilen sistemin toplam ağırlığını temsil etmektedir. Simetrik bir yapıda olduğu için toplam ağırlık sistemin tam ortasından geçen bir vektör ile ifade edilebilir.

F1 ön motor kuvveti, F3 arka motor kuvveti, F2 sağ motor kuvveti, F4 sol motor kuvveti olmak üzere sistemin yere paralel olarak uçabilmesi için $F1=F3$, $F2=F4$ denklemlerinin öncelikli olarak sağlanması gerekmektedir. Eğer herhangi bir itki kuvvetlerinden birinden biri farklı olduğunda sistem kuvvetin fazla olduğu tarafın zıttına doğru eğilecektir. Karşılıklı kuvvet dengesi sağlandıktan sonra quadrotorların ya da normal tek pervaneli helikopterlerde yaygın olan gövdenin dönmesi problemi çözülmelidir. Rotorlar dönmeye başlamadan önce bir platforma ya da bir gövdeye tutturulurlar. Rotor dönmeye başladığında pervanelere aktarılan torku bağlı olduğu gövdeden aldığı kuvvet tepkilerine dayanarak sağlamaktadır. Dolayısı ile açısal momentum kanununa göre sistemin gövdesi açısal momentumu sıfırlayabilmek için pervanenin dönüş yönünün zıttına doğru dönmeye başlayacaktır. Bu durum istenmeyen bir durum olduğundan bu sorunu giderebilmek için tek pervaneli klasik helikopterlerde kuyruk tarafına takılan pervane ile gövdenin dönme yönüne ters olarak moment oluşturulmaktadır. Böylelikle gövdenin dönmesi engellenmiştir. Quadrotor sistem iskeletinin dönmelerini engellemek için ön ve arka motorların pervaneleri saat yönünde döndürülerek itki kuvveti oluşturulur. Sol ve sağ motorların pervaneleri ise saat yönünün tersi yönünde döndürülerek itki kuvveti oluşturulur. Sonuç olarak iki pervaneyi saat yönünün tersi yönde diğer iki pervaneyi de saat yönünde döndürerek sistem üzerinde oluşan total açısal moment sıfırlanmaktadır. Aynı zamanda quadrotorun ön tarafını bir yönde sabitleyebilmek için yani olduğu yerde dönmemesi için $F1+F3 = F2+F4$ denkleminin de sağlanması gerekmektedir.

Quadrotorun herhangi bir yöne olan hareketini kontrol etmenin yolu rotor devir sayılarını değiştirerek sistemin merkezine olan torkları değiştirerek diğer tarafa yönelmesini sağlamaktır.

Öne doğru ilerlemesi için arka motor devir sayısının ön motor devir sayısından fazla olması gerekmektedir. Bununla birlikte sol ve sağ motor birbiriyle eşit hızda

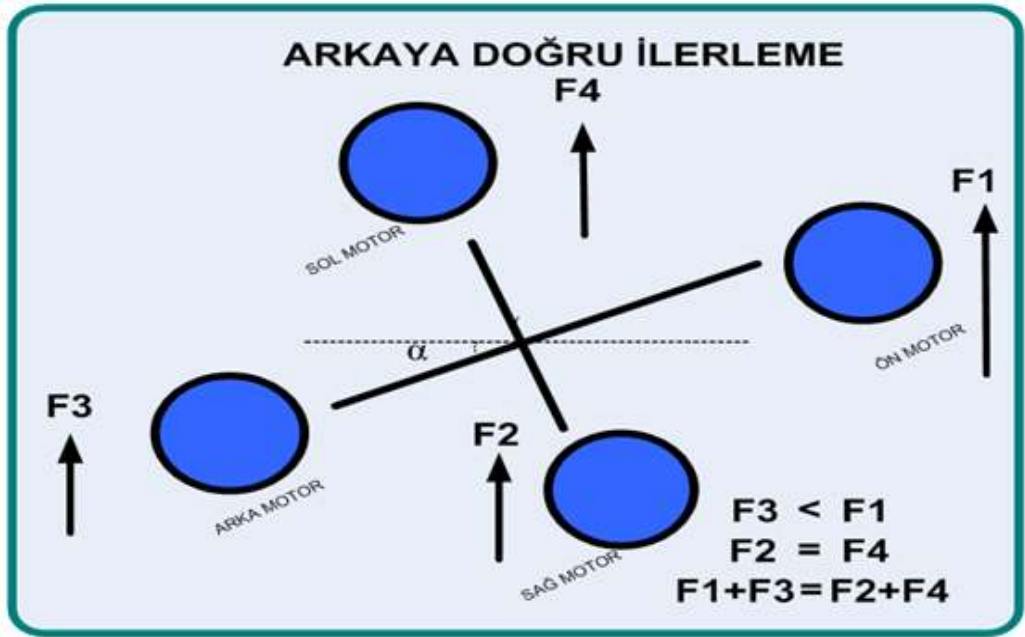
dönmeli ve aynı zamanda sol ve sağ motorların total oluşturduğu kuvvet ön ve arka motorların oluşturduğu toplam kuvvette eşit olmak zorundadır. Bu durum aşağıda Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



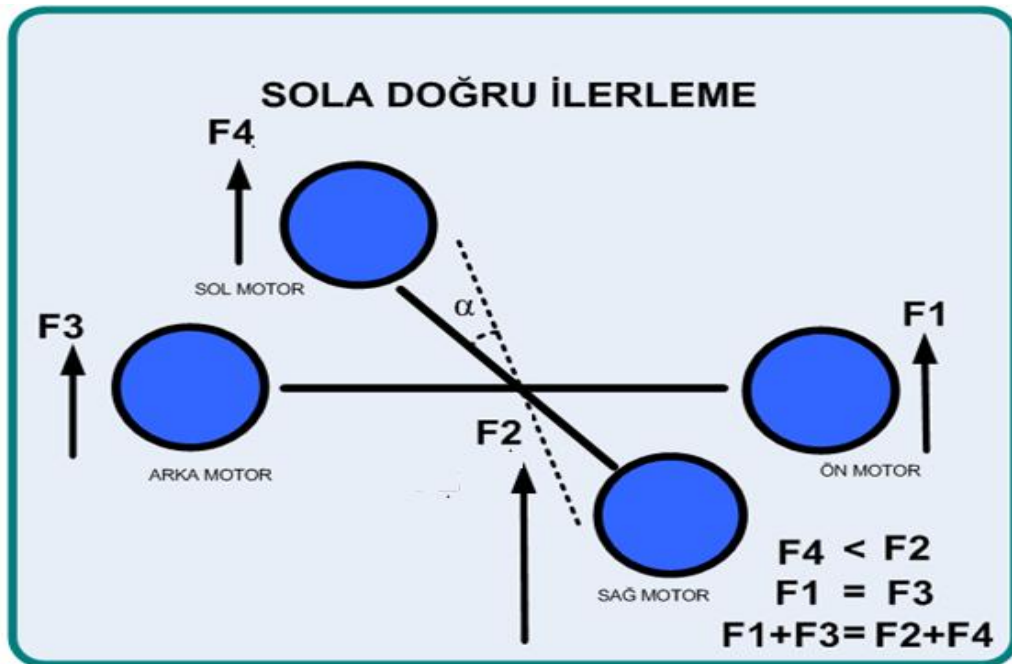
Şekil 2.2 Öne doğru hareket

Arkaya doğru ilerlemesi için ön motor devir sayısının arka motor devir sayısından fazla olması gerekmektedir. Bununla birlikte sol ve sağ motor birbiriyle eşit hızda dönmeli ve aynı zamanda sol ve sağ motorların total oluşturduğu kuvvet ön ve arka motorların oluşturduğu toplam kuvvette eşit olmak zorundadır. Bu durum aşağıda Şekil 2.3’te gösterilmiştir.

Sol tarafa doğru ilerlemesi için sağ motor devir sayısının sol motor devir sayısından fazla olması gerekmektedir. Bununla birlikte ön ve arka motor birbiriyle eşit hızda dönmeli ve aynı zamanda sol ve sağ motorların total oluşturduğu kuvvet ön ve arka motorların oluşturduğu toplam kuvvete eşit olmak zorundadır. Bu durum aşağıda Şekil 2.4’te gösterilmiştir.

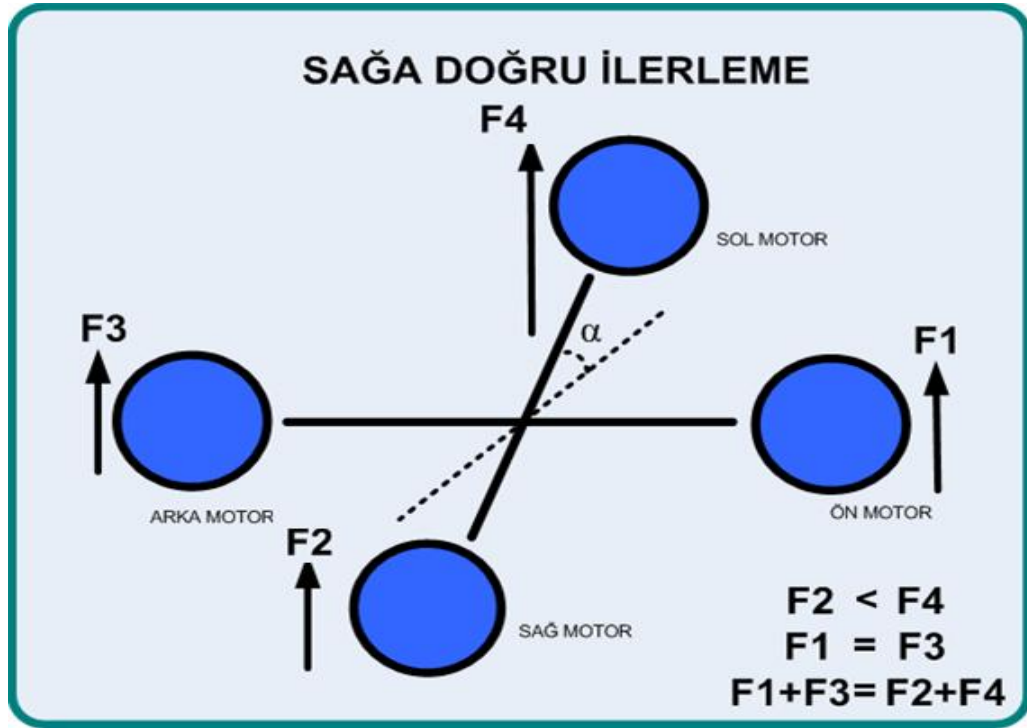


Şekil 2.3 Arkaya doğru hareket



Şekil 2.4 Sola doğru hareket

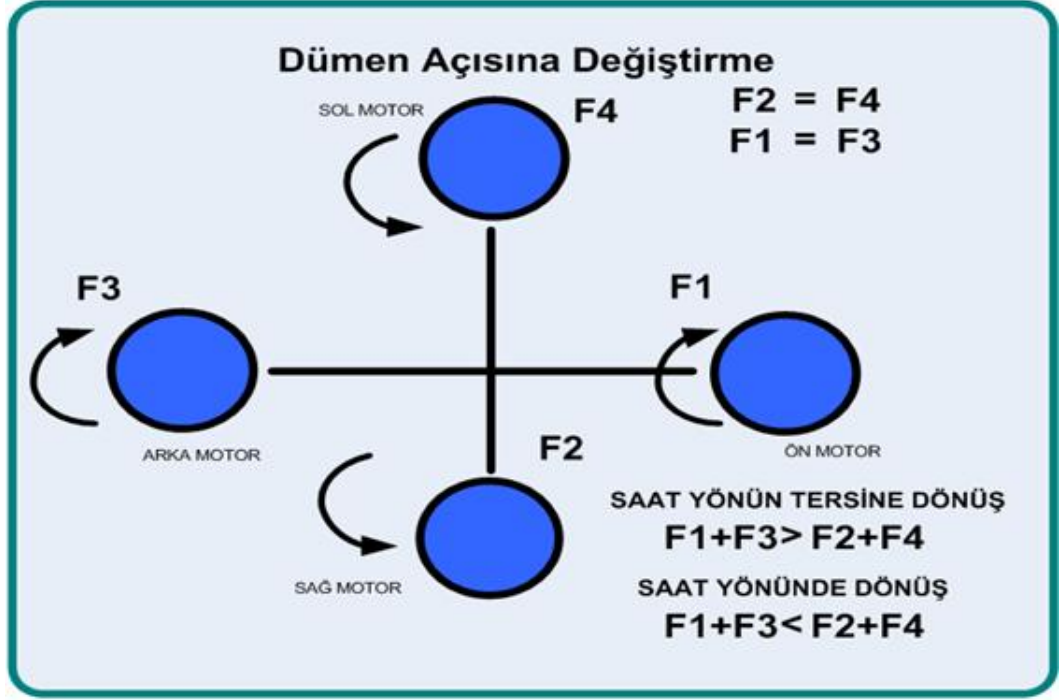
Sağ tarafa doğru ilerlemesi için sol motor devir sayısının sağ motor devir sayısından fazla olması gerekmektedir. Bununla birlikte ön ve arka motor birbiriyle eşit hızda dönmeli ve aynı zamanda sol ve sağ motorların total oluşturduğu kuvvet ön ve arka motorların oluşturduğu toplam kuvvette eşit olmak zorundadır. Bu durum aşağıdaki Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Ön ve arka veya sağ ve sol motorun oluşturduğu kuvvetler arasındaki farklar belli bir seviyeyi geçmemelidir. Belli bir seviyeyi geçerse sistem stabil olmayan noktaya girecektir. Sistem bu noktalardan olabildiğince uzak tutulmalıdır. Quadrotorun bu noktalardan uzak durabilmesi için kontrol algoritmasında kısıtlamaların konulması gerekebilir.



Şekil 2.5 Sağa doğru hareket

Sistemin dümen (yaw) açısını kontrol etmek için karşılıklı ön ve arka motorların itki kuvvetlerinin sağ ve sol itki kuvvetlerinin toplamına eşit olması gerekmektedir ki sistem belli bir dümen açısında dursun. Sistemi belli bir dümen açısında döndürüp o açıda kitlemek için şöyle bir yöntem uygulanmaktadır. Dümen açısını saat yönüne doğru döndürebilmemiz için saat yönünün tersindeki motorlarının devir sayısını artırılması gerekmektedir. Böylelikle sıfır olan açısal momenti bozarak sistemin

dönmesini sağlanmaktadır. Aynı şekilde dümen açısını sola döndürmek için ise yukarıdaki bahsedilen işlemin tersi yapılmalıdır. Aşağıdaki Şekil 2.6 bu durumun nasıl gerçekleştiğini göstermektedir.



Şekil 2.6 Dümen açısının yönelimi

2.2 Quadrotorun Dinamik Denklemleri

Quadrotorun dinamik denklemlerini çıkarmak amacı ile ilk önce aşağıda maddelenen varsayımlarda bulunulmuştur (Bouabdallah, 2007).

- Sistem yapısının tamamı esnek olmayan bir yapıdır
- Sistem yapısının kütle merkezi ile sistemin geometrik merkezinin çakışık olduğu kabul edilmektedir.
- Yapının simetrik olduğu kabul edilmektedir.
- Pervane pallerine uygulanan kaldırma (lift) ve sürüklenme (drag) kuvvetleri pervanelerin açısal hızlarının karesi ile doğru orantılıdır.
- İlerlemeli (translational) harekette hava sürtünmesi ihmal edilmektedir.

- Sistemdeki eyleyicilerin (actuator) ve algılayıcıların (sensör) cevap zamanlarındaki gecikme ihmal edilmiştir.

2.2.1 İtme Kuvveti (Thrust Force)

Quadrotorun yukarıya doğru tırmanma hareketini yaptırtan kuvvet bu kuvvettir. Herbir rotorun ürettiği kuvvet aşağıda verilen denklem ile ifade edilmektedir. Denklemden anlaşılacağı üzere rotorların ürettiği kuvvet, F_i , rotorların açısal hızlarının, Ω_i , karesi ile doğru orantılıdır. Burada, b kaldırma katsayısıdır.

$$F_i = b \cdot \Omega_i^2 \quad i=1,2,3,4$$

2.2.2 Sistem Ağırlığı

Quadrotorun toplam ağırlığı sistemin geometri merkezinden geçecek şekilde noktasal kuvvet olarak aşağıya doğru gösterilir. Bu kuvvet sadece sistemin iskeletinden dolayı oluşmamaktadır. Aynı zamanda sistemde önemli bir ağırlık olan batarya da bu ağırlığın içinde olup diğer bütün elemanlarla birlikte tek ağırlık olarak ele alınmaktadır. W , toplam ağırlık kuvveti, m , toplam kütle ve g , yer çekimi ivmesi olmak üzere toplam ağırlık kuvveti şu şekilde yazılabilir:

$$W = m \cdot g$$

2.2.3 Sürüklenme Torku (Drag Moment)

Sürüklenme momenti pervanelerin döndüğü sırada havanın pervane pallerine uyguladığı ters kuvvetten dolayı rotor eksenine doğru oluşturduğu momenttir. Bu moment her zaman rotorun döndüğü yönün tersine oluşmaktadır. Dümen açısının kontrolünü başka bir deyişle açığı ne yönde ne kadar değişeceğini belirleyebilmek için aynı yönde olan dönme momentleri ters yönde olan dönme momentlerinin birbirinden çıkarılması ile elde edilir. d , sürüklenme katsayısı olmak üzere ilgili tork şu şekilde elde edilebilir:

$$D_i = d \cdot \Omega_i^2 \quad i=1,2,3,4$$

2.2.4 Yunuslama (pitch), Yuvarlanma (roll), Dümen (yaw) Torku

Bu momentler pervanelerin oluşturduğu kuvvetlerin quadrotorun geometrik merkezine doğru oluşturdukları momentlerdir. Örneğin yunuslama açısı için ön ve arka rotorların sırasıyla F1 ve F3 kuvvetlerinin merkeze olan uzaklığı olan L çarpılması ile elde edilir ve daha sonra ne bu iki kuvvet birbirlerini zıt yönde olduğu için birbirinden çıkartılarak net tork elde edilir. Aynı şekilde yuvarlanma açısı içinde bu sefer sol ve sağ motorların oluşturduğu kuvvetlerden kaynaklanan net tork hesaplanarak yuvarlanma açısının ne kadar değişeceği görülür.

$$\tau_{\theta}=L \times (F_1- F_3) \quad (\text{Net yunuslama torku})$$

$$\tau_{\phi}=L \times (F_2- F_4) \quad (\text{Net yuvarlanma torku})$$

Yukardaki denklemleri toparlayarak stabilizasyon için yapılması gereken yunuslama (pitch), yuvarlanma (roll), dümen (yaw) açı referanslarının sıfıra getirilmesidir. Şu anda sistem üzerindeki tüm torklar belirlenebildiği için sistem açılarına geçiş yapılabilir. Bilindiği üzere, M, dönerken uygulanan moment, I, dönme yönündeki eylemsizlik momenti, a, açısal ivme olmak üzere

$$M = I \times a$$

‘dir. Bu denklemden hareketle her eksenindeki açılar için ilgili denklemler elde edilir.

Yaw denklemi için sistemin toplam net momenti yazılır. Ön ve arka motorlardan gelen sürüklenme yönü negatif seçilirse total tork, τ_{ψ} , bu sistemde aşağıdaki denklemdeki gibi olmaktadır.

$$\tau_{\psi}=d \times ((\Omega_1^2 + \Omega_3^2) - (\Omega_2^2 + \Omega_4^2))$$

Dolayısı ile z eksenini üzerindeki açısal ivme, $\ddot{\psi}$, z eksenini üzerindeki eylemsizlik momenti I_{zz} olmak üzere şu şekilde elde edilir:

$$\ddot{\psi} = \frac{\tau_{\psi}}{I_{zz}}$$

Benzer şekilde roll açısı içinde ilgili tork ve x eksenini üzerindeki açısal ivme, $\ddot{\phi}$, denklemleri bulunur.

$$\tau_{\phi}=L \times b \times (\Omega_2^2 - \Omega_4^2)$$

$$\ddot{\phi} = \frac{\tau_{\phi}}{I_{xx}}$$

Yunuslama (pitch) açısı içinde yuvarlanma (roll) açısındaki gibi benzer denklemler çıkartılacaktır. Burada sadece değişecek olan dönme eksenini artık y eksenidir ve eylemsizlik momentinin bu eksene göre hesaplanması gerekmektedir. Son olarakta arka ve ön motorlar yerine artık sol ve sağ motorların oluşturdukları kaldırma kuvveti kullanılmaktadır.

$$\tau_{\theta}=L \times b \times (\Omega_1^2 - \Omega_3^2)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{\tau_{\theta}}{I_{yy}}$$

Burada, y eksenini üzerindeki açısal ivme, $\ddot{\theta}$ ve y eksenini üzerindeki eylemsizlik momenti, I_{yy} 'dir.

Motorların devir sayısını sistem çalışır haldeyken ölçülemediğinden dolayı yukarıdaki denklemler, doğrudan sistemde kullanılamamaktadır. Motor sürücülere verdiğimiz PWM sinyali ile oluşturdukları itki kuvvetleri arasında bir korelasyon ya da bir denklem çıkarmamız gerekmektedir. PWM sinyali ile itki kuvvetleri arasında aşağıdaki denklemlerdeki gibi bir ilişki kurulmaya çalışılmıştır:

$$F1n = a2.Pwm1$$

$$F2n = a2.Pwm2$$

$$F3n = a3.Pwm3$$

$$F4n = a4.Pwm4$$

Burada, F1n, F2n, F3n ve F4n sırası ile ön motor, sağ motor, arka motor ve sol motor kuvvet değerleri, a1, a2, a3 ve a4 ise sabit katsayılarıdır. Daha sonra sırasıyla yuvarlanma (roll), yunuslama (pitch), dümen (yaw) toplam net momentleri için aşağıdaki denklemler yazılabilir.

$$M_x = L \times (F2n - F4n)$$

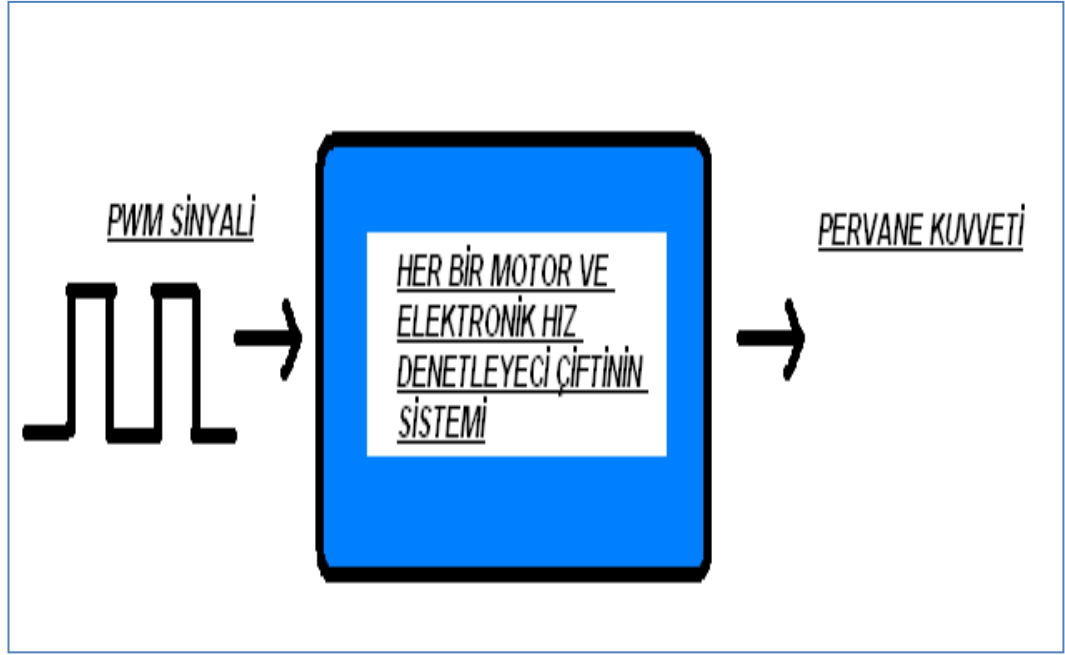
$$M_y = L \times (F1n - F3n)$$

$$M_z = -c \times F_{1n} + c \times F_{2n} - c \times F_{3n} + c \times F_{4n}$$

Burada c, itki kuvvetlerinin momente dönüştürülebilmesi için gerekli olan katsayıdır. Katsayı deneysel sonuçlarla bulunmuştur. Her eksendeki gerçek momentleri bulduktan sonra artık sistemdeki gerçek açı değerlerine $M=I \times a$ denklemi ile geçebiliriz.

2.3 Kontrolör İçin Sistem Denklemleri

Bu bölümde sistemin denklemlerini çıkarırken sistemin mertebesini belirleyebilmek için yapılan çalışma anlatılacaktır. İlk önce sistem her eksen için kendi etrafında birbirinden bağımsız olarak denklemleri çıkartılıp buradan sistemin mertebesi belirlenmeye çalışılmıştır. Burada referans olarak alınacak eksen yuvarlanma ya da yunuslama eksenlerinden biri olacaktır. İki eksen de birbirinin simetriği olduğu için herhangi birini referans alınması denklemleri çıkarırken bir farklılık yaratmayacaktır. Yuvarlanma eksenini (Y eksenini) referans eksen olarak seçilmiştir. Bir önceki bölümde sırasıyla yuvarlanma, yunuslama ve dümen eksenindeki tork ve açısal ivme arasındaki bağlantılar detaylı olarak gösterilmiştir. Sistem analizine başlamadan önce sistem lineer olmayan yöne iten durumun tespiti yapılmıştır. Bu durum kontrol edebildiğimiz değişkenler gözlemlenerek yapılmıştır. Her motoru kontrol eden elektronik hız denetleyicisine PWM sinyali girilmiştir. Bu sinyale bağlı olarak daha sonra her bir motora bağlı olan pervanenin oluşturduğu kuvvet gözlenmiştir. Şekil 2.7’de bu işlem basit bir diyagram ile özetlenmiştir.



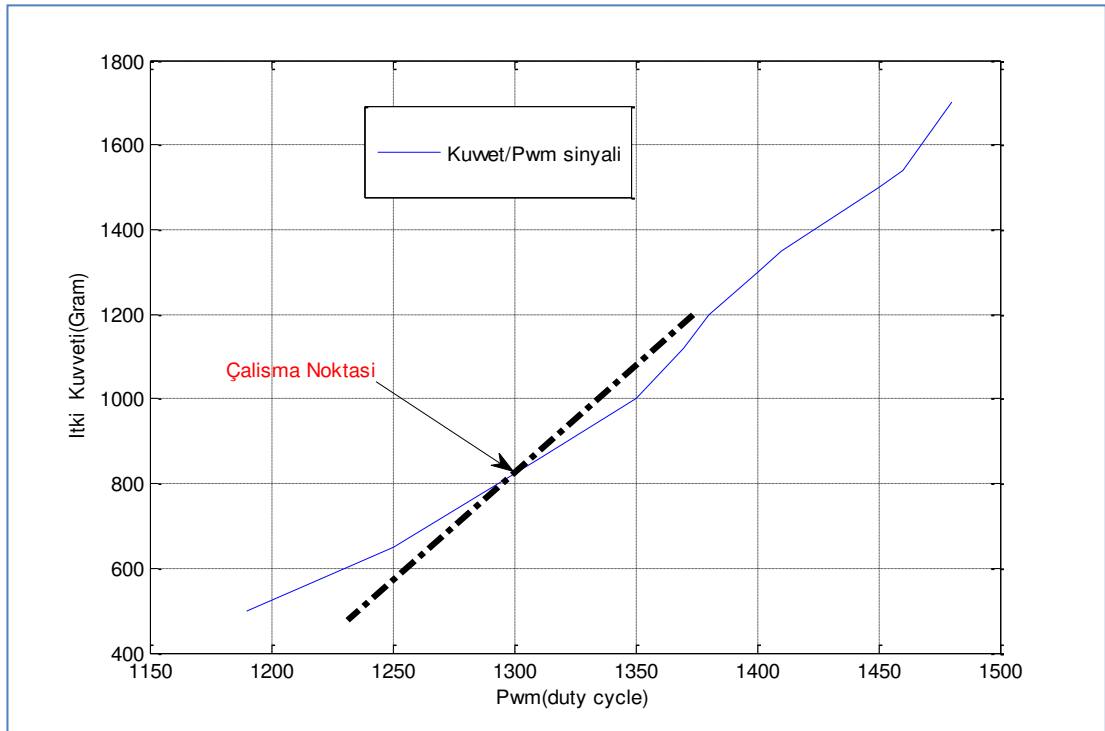
Şekil 2.7 Pwm sinyali ile itki kuvvetinin ilişkisi

Yapılan testlerde PWM sinyalinin minumum değeri olan 1000 değerinden başlanarak maksimum değeri olan 1500 değerine kadar çeşitli girdiler verilmiştir. Daha sonra her bir motorun üzerindeki pervaneden oluşan kuvvetler ölçülmüştür.

Tablo 2.1 Pwm sinyali ve itki kuvveti test tablosu

Pwm	İtki Kuvveti(Gram)
1190	500
1250	650
1310	856
1350	1000
1370	1120
1380	1200
1400	1300
1410	1350
1450	1500
1460	1540
1480	1700

Pwm sinyali ile itki kuvveti tablosu tamamlandıktan ikisi arasındaki bağlantıyı daha net belirleyebilmek için Şekil 2.7’de grafik çizdirilmiştir. Grafikten de anlaşılacağı gibi itki kuvveti ile pwm sinyali arasındaki ilişki lineer olmayan bir davranış göstermektedir. Bu durum da sistemi kontrolünü gerçek manada zorlaştırmaktadır. Sistem üzerinde bir çalışma noktası seçilmiştir. Pwm sinyali 1310 civarındayken bir tane pervanın oluşturduğu itki kuvveti 856 gram dolaylarında olmaktadır. Sistemin toplam ağırlığı batarya ile birlikte 2700 gram civarında olmaktadır. Quadrotor da 4 tane pervane olduğu için her bir pervaneye düşen ağırlık 700 gram gibi rakam tekabül etmektedir. Dolayısıyla sistemin yerden ayaklarını kesmesi için Pwm sinyalinin minimum 1310 dolaylarında olması gerekmektedir. Bu yüzden dolayı 1310 pwm değeri her bir pervane, motor ve elektronik hız kontrolcü birimi için çalışma noktası seçilmiştir. Sistemdeki kontrolcü tasarımı bu çalışma noktası etrafında çalıştırılarak yapılmaktadır. İlerleyen bölümlerde çalışma noktasının önemi dahada iyi anlaşılacaktır. Çünkü sistemin kontrolünü zorlaştıran önemli bir noktadır.



Şekil 2.8 Pwm sinyali ile itki kuvvetinin lineer olmayan grafiği.

Sistemin her eksenindeki dinamik denklemlerini çıkarırken itki kuvvetinin rotor dönüş hızlarının karesi ile doğru orantılı olduğun söylenmişti. Burada şöyle bir durumdan bahsetmek mümkündür: Elektronik hız denetleyicilerine girdi olarak sadece pwm sinyali verilmektedir. Daha doğrusu cihaz çalışırken rotorların hızlarını ölçecek bir sensör yoktur. Bu yüzden de pwm sinyali ile rotor hızları arasında bağıntı kurulması gerekmektedir. Aradaki bağıntıyı elde etmek için ise verilen girdiye karşılık çıktının gözlemlenmesi gerekmektedir. Çıktı, yani rotor hızları anlık olarak gözlemlenemese de çevrimdışı olarak gözlemlenebilir. Şöyle ki, elektronik hız denetleyicileri her yeniden çalıştırıldığı zaman için bir kayıt tutmaktadır. Elektronik hız denetleyicileri kapatıldığı zaman tüm çalışma durumlarını içerisindeki hafızaya yazmaktadır. Daha sonra bilgisayardaki bir arayüz programından bilgisayara aktarılabilmektedir. Bilgisayara aktarılan veriler içinde motorlara verilen voltaj değeri, akım değeri ve en önemlisi olan motorların ne kadar hız (rpm) ile döndükleri bilgisi vardır. Bu bilgi kullanılarak pwm sinyali ile hız (rpm) arasındaki bağıntı bulunmuştur.

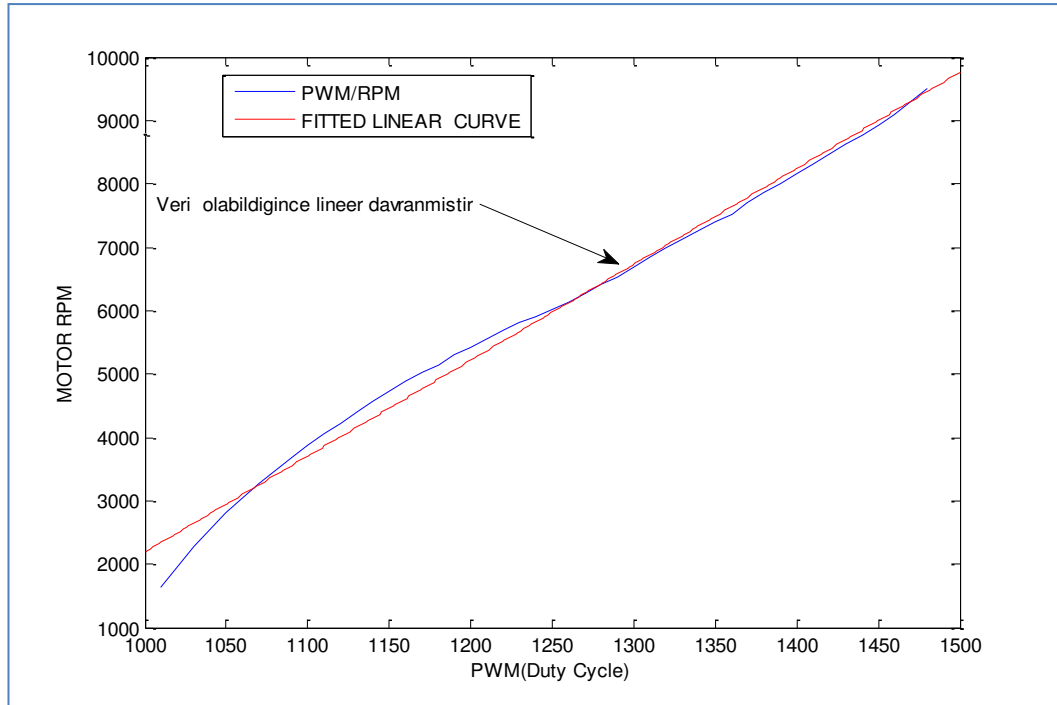
Tablo 2.2 Pwm sinyali ve motor rpm test tablosu

PWM	RPM
1010	1628
1020	1965
1030	2273
1040	2550
1050	2803
1060	3050
1070	3280
1080	3488
1090	3680
1100	3870
1110	4056
1120	4228
1130	4393
1140	4560
1150	4735
1160	4878
1170	5016
1180	5153

Tablo 2.2 Pwm sinyali ve motor rpm test tablosu devamı

PWM	RPM
1190	5293
1200	5412
1210	5556
1220	5686
1230	5810
1240	5910
1250	6014
1260	6140
1270	6272
1280	6410
1290	6532
1300	6682
1310	6847
1320	6994
1330	7130

Yukarıdaki Tablo 2.2’de gösterildiği gibi pwm sinyali her seferinde 10 birim artırılarak sistem çıktısı olan motor rpm sinyaline bakılmış ve sistemden veri toplanmıştır. Aradaki bağlantının daha da net anlaşılabilmesi için pwm sinyali, motor rpm değerlerine göre çizilmiştir.



Şekil 2.9 Pwm sinyali ile motor rpm’nin lineer grafiği.

Yukarıdaki Şekil 2.9’de anlaşılaçağı üzere pwm sinyali ile motor rpm’i arasındaki ilişki olabildiğince lineer bir davranış sergilemektedir. Bu durumda, zamanla değışen motor rpm değeri RPM(t), zamanla değışen pwm sinyali PWM(t) ve k sabit katsayı olmak üzere

$$RPM(t)=k.PWM(t)$$

‘dir. Hız sinyali, pwm sinyali cinsinden yazıldıktan sonra quadrotor dinamik denklemleri bölümünde çıkartılan itki kuvveti ile hız sinyali arasındaki bağıntıyı çağırıp yerine bulunan denklemleri yazılır:

$$F_i(t)=b.\Omega_i(t)^2$$

↓

$$F_i(t)=b. (k.PWM_i(t))^2$$

↓

$$F_i(t)=b . k^2 . (PWM_i(t))^2$$

Daha sonrasında ise quadrotor dinamik denklemleri bölümünde çıkartılan herhangi bir bir eksene ait tork, açısal ivme, eylemsizlik momenti bağıntısı yazılırsa sistem dinamikleri pwm giriş sinyali cinsinden ifade edilecektir. Yuvarlanma (roll) eksenini örnek olarak seçildiğinde denklemler aşağıdaki gibi bulunmaktadır:

$$\ddot{\Phi}=\frac{\tau_{\Phi}}{I_{xx}}$$

$$\tau_{\Phi}=L. (F_2- F_4)$$

$$\tau_{\Phi}=L. (b . k^2 . (PWM_2(t))^2 - b . k^2 . (PWM_4(t))^2)$$

$$\ddot{\Phi} (t) = \frac{L.(b.k^2 .(PWM_2(t))^2 - b .k^2 .(PWM_4(t))^2)}{I_{xx}}$$

$$\ddot{\Phi}(t) = \frac{L.b .k^2 \left((PWM_2(t))^2 - (PWM_4(t))^2 \right)}{I_{xx}}$$

Yukarıdaki açısal ivme denklemin de matematiksel bağıntıda görüldüğü gibi açısal ivme(roll durum açısının ikinci türevi) sağ motor ve sol motorlara verilen pwm sinyallerinin karelerinin farkı ile doğru orantılıdır. Burada, $a^2 - b^2 = (a-b)(a+b)$ eşitliği kullanıldığında aşağıdaki ifadeye ulaşılır.

$$\ddot{\phi}(t) = \frac{L \cdot b \cdot k^2 \cdot (PWM_2(t) - PWM_4(t)) \cdot (PWM_2(t) + PWM_4(t))}{I_{xx}}$$

Sabit alınabilir.

Kontrolörün çıkışını PID_term olarak adlandırsak çıkış denklemleri aşağıdaki gibi olmaktadır (Burada, yuvarlanma eksenini üzerinden sistem tanımlanacaktır.)

$$PWM_2(t) = ref2_Value(t) + PID_term \cdot 0.5$$

$$PWM_4(t) = ref4_Value(t) - PID_term \cdot 0.5$$

ref2_Value(t), motor2'ye ve ref4_Value(t) motor4'e verilen referans pwm değeridir ve değerlerini sistem kullanıcısı belirlemektedir. Sistem ne kadar yükseltilmek istenirse bu değer o derecede artırılmalıdır. Daha farklı bir şekilde bu değerler kullanıcı tarafından sabitlenir. $PWM_2(t)$ ve $PWM_4(t)$ toplamının kontrolör çıktılarından birbirini götürdüğü görülür Dolayısıyla pwm değişkenlerinin toplamı sabittir. Daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi sistemin ayaklarını yerden kesmesi için ref2_Value(t) ve ref4_Value(t) değerlerinin toplamının minimum 2600 civarında olması gerekmektedir.

Son olarak

$$A = ref2_Value(t) + ref4_Value(t)$$

olmak üzere

$$\ddot{\phi}(t) = \frac{L \cdot b \cdot k^2 \cdot (PWM_2(t) - PWM_4(t)) \cdot A}{I_{xx}}$$

'dir. Yukarıdaki denklemde bütün sabitler, B katsayısının altında aşağıdaki şekilde birleştirilerek

$$B = \frac{L \cdot b \cdot k^2 \cdot A}{I_{xx}}$$

ilgili diferansiyel denklem

$$\ddot{\Phi}(t) = B \cdot (PWM_2(t) - PWM_4(t)) = B \cdot PID_term(t)$$

şeklinde elde edilir. Bu noktada, dikkat edilmesi gereken diğer bir husus, bir eksen üzerinde yer alan iki motor arasındaki pwm farkının kontroler çıkış değerine eşit olduğudur.

Sistemin dinamik denklemine ilişkin transfer fonksiyonu, açısal hız değişkenine göre aşağıdaki gibi olmaktadır:

$$s\omega(s) = B \cdot PID_term(s)$$

$$\frac{\text{Çıkış}}{\text{Giriş}} = \frac{\omega(s)}{PID_term(s)} = \frac{B}{s} \quad (1. \text{ mertebeden sistem})$$

Açı değişkeninin çıkış olduğu durumda ise sistemin transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi olmaktadır:

$$s\Phi(s) = B \cdot PID_term(s)$$

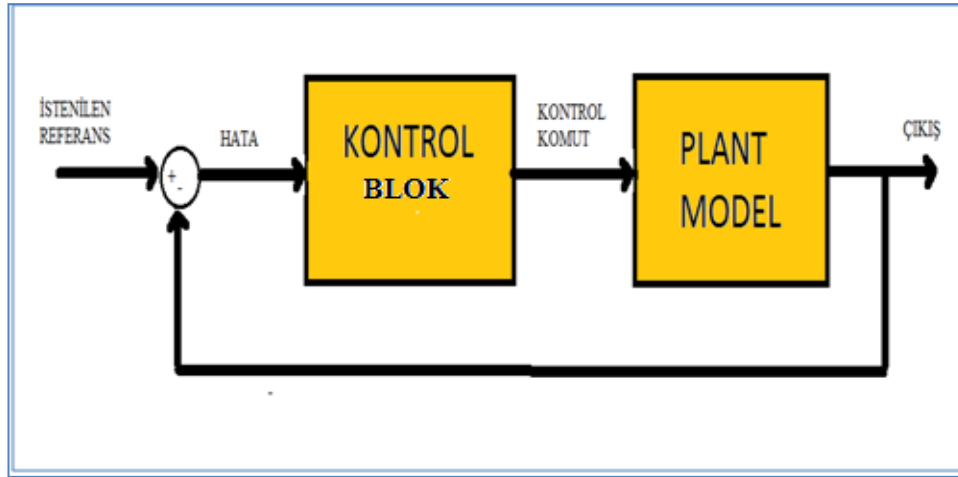
$$\frac{\text{Çıkış}}{\text{Giriş}} = \frac{\Phi(s)}{PID_term(s)} = \frac{B}{s^2} \quad (2. \text{ mertebeden sistem})$$

Eksen dinamikleri birbirinden bağımsız olarak düşünülen sistemin transfer fonksiyonlarının s-domaininde ifadeleri bulunmuştur. Bu denklemler kontrolcü tasarımında önemli bir yer tutmaktadır. Quadrotor kontrol algoritmasının uygulanması aşamasında bu sistemlerin detaylı analizi yapılacaktır. Sistemdeki bilinmeyen birçok parametreye rağmen transfer fonksiyonları sistem hakkında genel bir fikir vermektedir.

BÖLÜM ÜÇ

QUADROTOR KONTROLÖR

Kontrol sistemini tasarlamaya başlamadan neden bir kontrolcüye ihtiyaç duyulduğunu anlamak sistemi anlamakta yardımcı olacaktır. Sistem dinamiklerini belirledikten sonra tüm motorlara aynı itki kuvveti verilse dahi hava akımındaki değişiklik gibi en küçük bir dış etki sistemin dengesizleşmesine yol açarak düşmesine neden olacaktır. Bu nedenle oluşan hatayı çevrimiçi azaltacak bir kontrolcüye ihtiyaç vardır. Bu çalışmada yaygın kullanım alanı olan Proportional_Integral_Derivative (PID) kontrolcü quadrotor kontrolü için kullanılacaktır. Aşağıdaki Şekil 3.1’te genel geri bildirimli kontrolcü ile sistemin genel yapısı verilmiştir.

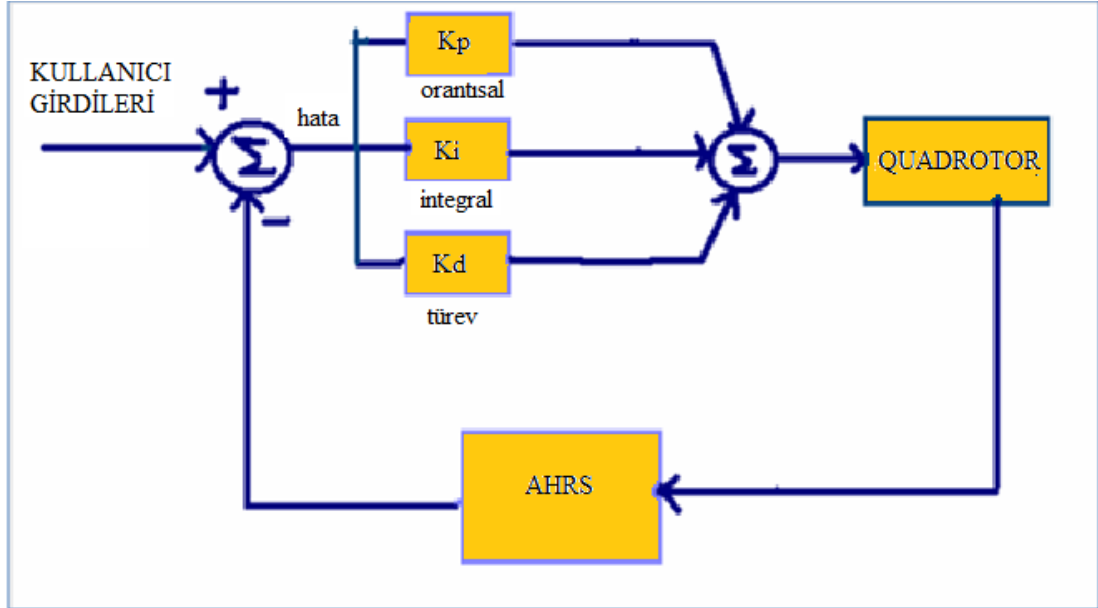


Şekil 3.1 Genel geri-bildirimli kontrolör ve sistem yapısı

Yukarıda verilen Şekil 3.1 de istenilen referans değeri sistem çıkışının gelmesi gerektiği yer olarak verilmiştir. Kapalı döngüden oluşan ölçümde referans değerden çıkartılarak bir değer bulunmaktadır. Bu değer, tekrar sisteme geri-bildirim döngüsü üzerinden sistem hatasını sıfır seviyesine getirene kadar tekrar verilmektedir. Kontrolörün asli görevi quadrotoru kullanıcının girdiği açı veya hız referans değerinde istenen performans kriterlerini sağlayarak tutabilmektir.

3.1 PID Kontrolör

Quadrotorun kontrol algoritmasında kontrolcü olarak pid kontrolcü kullanılmıştır. Kontrolcüyü tasarlamadan önce pid kontrolcünün kapalı döngü sisteminde pid parameterelerinin performans etkileri analiz edilmiştir. Analizler yapılırken MATLAB/SIMULINK kontrol araç kutusu kullanılmıştır.

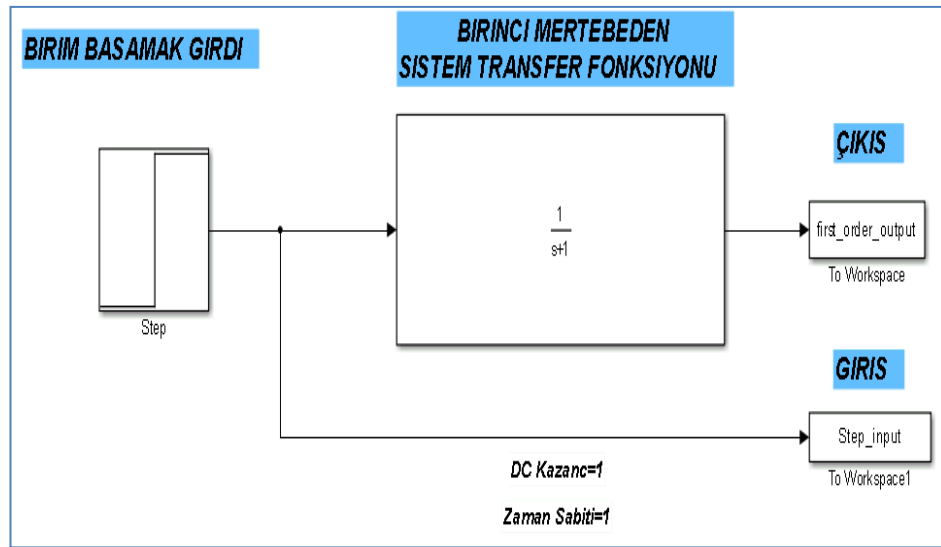


Şekil 3.2 Pid kontrolör basit diyagramı

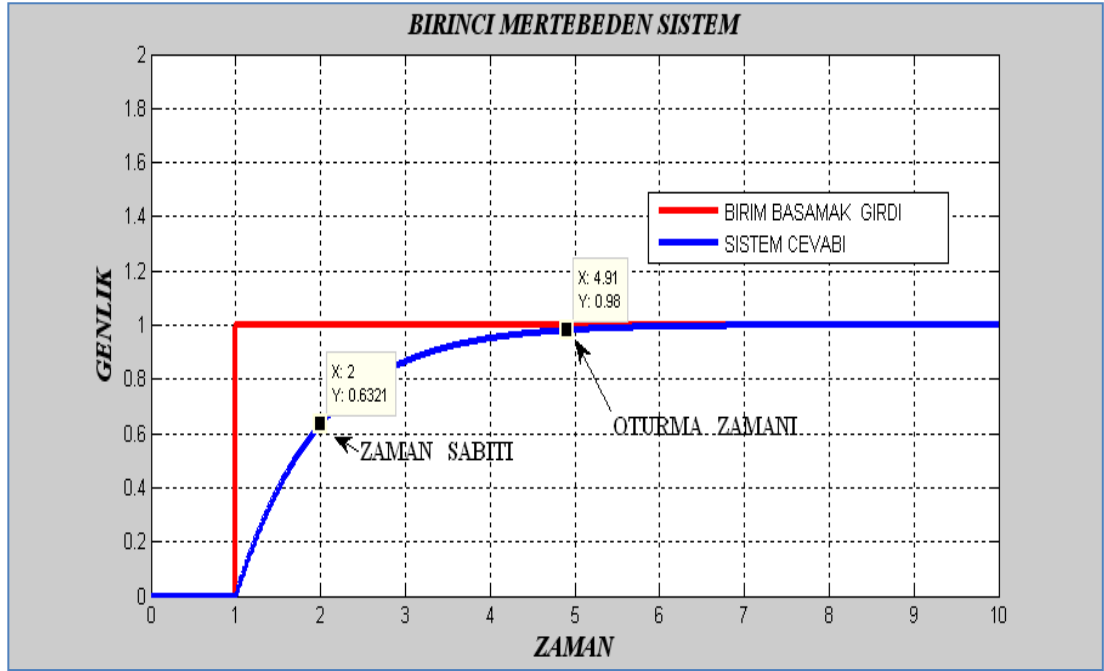
Analizler standart birinci ve ikinci mertebeden sistemler üzerinden yapılmaktadır. Sistemin dinamik denklemlerini çıkarırken en son açısal hız seviyesinden bakarsak sistem transfer fonksiyonunu birinci mertebeden, açı seviyesinden bulunduğunda ise sistem transfer fonksiyonu ikinci dereceden bulunmuştur. Kontrolör katsayılarının sistem üzerindeki etkilerini yukarıda söylediğimiz sistemler üzerinde analiz edilip daha sonra gerçek sistem üzerinde gerçekleyebiliriz (Control System, 2012). Alt bölümlerde kontrolcü parametreleri tek tek ele alınıp daha sonra birlikte nasıl etkileri olduğu sistem üzerinde araştırılmıştır. Aşağıda ilk olarak standart birinci ve ikinci mertebe sistemlerin denklemi verilmiştir. Transfer foksiyonundaki terimler detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

$$H(s) = \frac{K}{\tau s + 1}$$

Yukarıdaki genel 1. mertebeden sistemin terimleri sırasıyla açıklarsak K terimi sistemde şuna karşılık gelmektedir: Eğer sisteme basamak girdisi girilirse ve sistemin çıkışında da düzenli rejim çıktısına bakılırsa ve çıkışı girişe büyüklük olarak oranlarsak bu oran K terimine karşılık gelmektedir. Diğer bir adlandırma ile bu terim DC kazanç olarak adlandırılmaktadır. τ terimi ise zaman sabiti olarak adlandırılmaktadır. Bu da şu manaya gelmektedir. Sistem çıkışının düzenli rejim çıktısının %63 üne ulaştığı noktadır. Sistemin çıkışının aslında ne kadar sürede oturduğu gösteren önemli bir parametredir. Transfer fonksiyonunda bahsedeceğimiz diğer parametreler kutup ve sıfırlardır. Sıfırlar ve kutuplar sırasıyla şu manaya gelmektedir. Sıfırlar, transfer fonksiyonunun paydaki denklemini sıfır yapan köklerdir. Kutuplar ise paydadaki denklemini sıfır yapan köklerdir. Birinci mertebeden sistemler de yukarıdaki transfer denkleminde de anlaşılacağı gibi sadece kutuplar bulunmaktadır. Eğer kutuplar kompleks düzleminin sol tarafında bulunuyorsa sistem stabilize olmuş çıkış cevabı vermektedir. Aşağıdaki örnekte birinci mertebeden sistemin SIMULINK'te analizi yapılmıştır.



Şekil 3.3 Birinci mertebeden sistem diyagramı



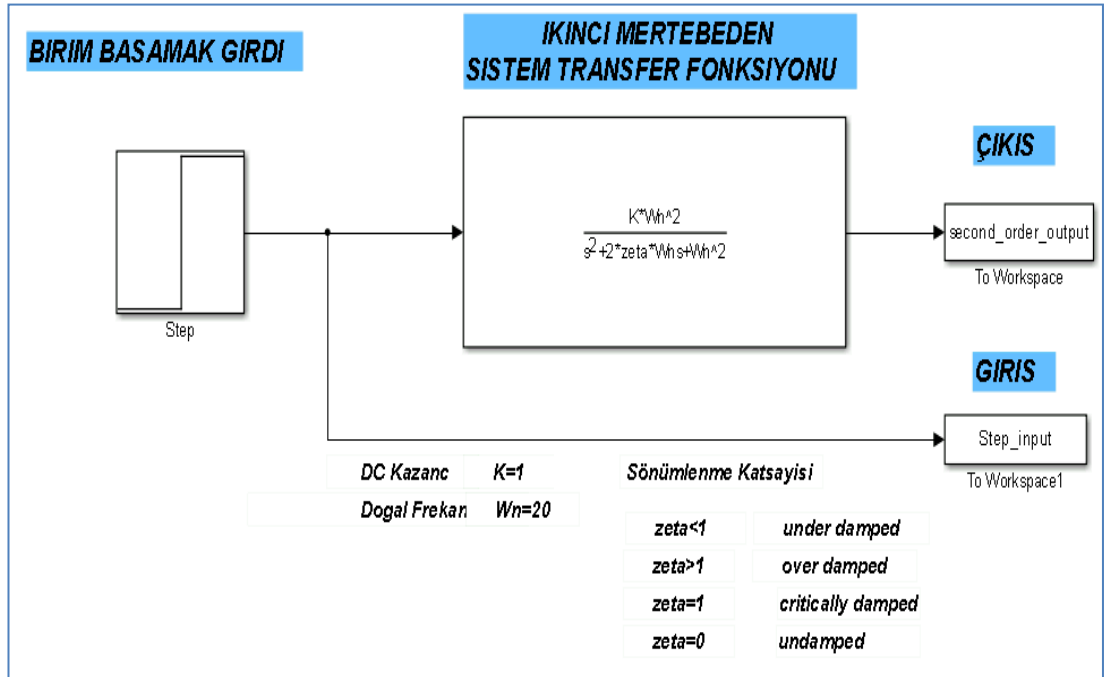
Şekil 3.4 Birinci mertebeden sistem birim basamak cevabı

Şekil 3.4 de görüldüğü gibi genliği 1 olan bir basamak girdi verilmiştir. Zaman sabiti ise 1 saniye seçilmiştir. Beklendiği gibi sisteme çıkışı %63 üne 1 saniye sonra ulaşmıştır. Sistem çıkışı son ulaşacağı değerinden %2 azı olan kısma hemen hemen zaman sabitinin 5 katı sürede ulaşmıştır. Kazanç değeri 1 olduğu için sistem çıkışı düzenli rejimde 1 değerinde oturmuştur. İkinci mertebeden sistemler, pratikte gerçek sistemlere daha yakındır. Daha yüksek mertebedeki sistemler, analizin daha rahat yapılabilmesi amacı ile ikinci mertebe sistemlere indirgenebilir.

$$H(s) = \frac{K w_n^2}{s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2}$$

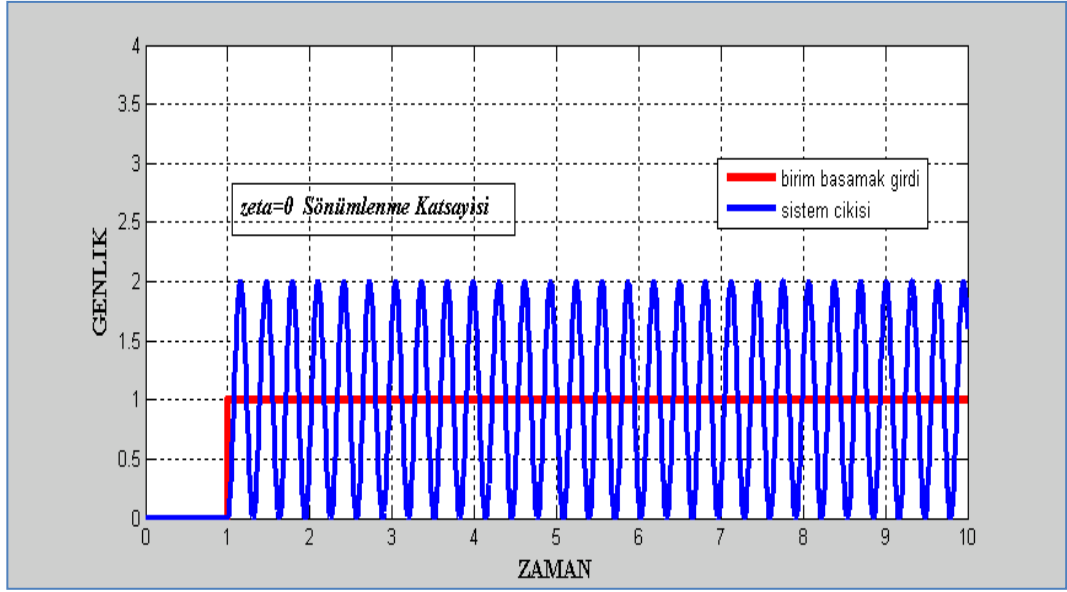
Yukarıda denklemde genel ikinci dereceden sistemin transfer fonksiyonu verilmiştir. Sırasıyla terimlerini açıklamaya başlarsak K birinci mertebeden sistemlerde olduğu gibi sistemin DC kazancını gösterir. ζ terimi sönümlenme oranı olarak adlandırılır. Sistemdeki sürtünme gibi enerji sönümleyici etkilerden kaynaklanır. w_n sistemin doğal frekansı olarak adlandırılır. $\zeta = 0$ olduğu durumda sistem sürekli olarak doğal frekansında salınacaktır (osilasyon). İkinci mertebeden

sistemlerin birinci mertebeden sistemlerden farkı iki tane kutup a sahip olması ve gene sisteminin stabil olabilmesi için kutuplarının kompleks düzleminin sol tarafında olması gerekiyor. Aksi taktirde sisteme herhangi bir girdi verildiğinde sistem çıkışı kendini sonsuza doğru artıracaktır. Yukarıdaki ikinci mertebe denkleminde $K=1$, $w_n = 20$ değerleri için SIMULINK te farklı ζ sönümlenme katsayıları için analiz yapılmıştır. Analizlere ek olarak sistemlerin tranfer fonksiyonlarının genlik ve faz değerlerini diyagramları(Bode Plots) çizdirilmiştir. Genlik ve faz diyagramları sistemin frekans tepkilerini anlamak için önemli ölçüde yardımcı olmaktadır. Farklı sönümlenme oranlarına sahip sistemlerin hepsi tek bir bode diyagram içinde çizdirilerek farklı sönümlenme katsayılarına sahip sistemlerin frekans bölgesinde nasıl farklı cevaplar verdiği anlaşılmıştır.



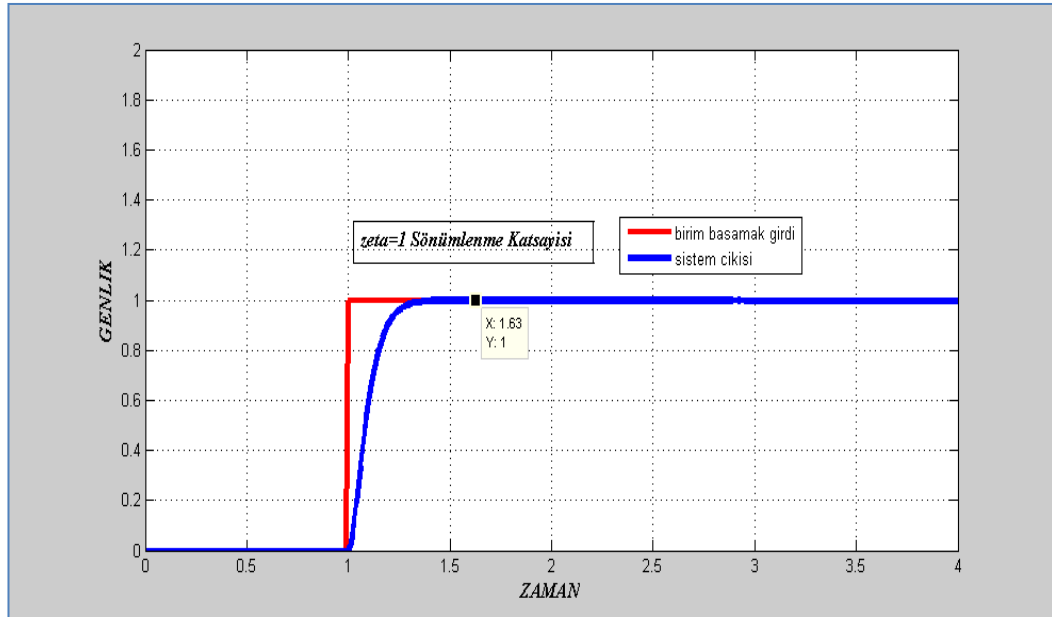
Şekil 3.5 İkinci mertebeden sistem diyagramı

İlk olarak $\zeta=0$ durumu için sisteme girdi olarak verilen basamak girdisine karşılık olarak verilen açık döngü cevabına bakılmaktadır. Sönüm katsayısı sıfır olduğu için kutupları imajiner eksen üzerindedir. Bu yüzden sistem sonsuza kadar salınmaktadır.



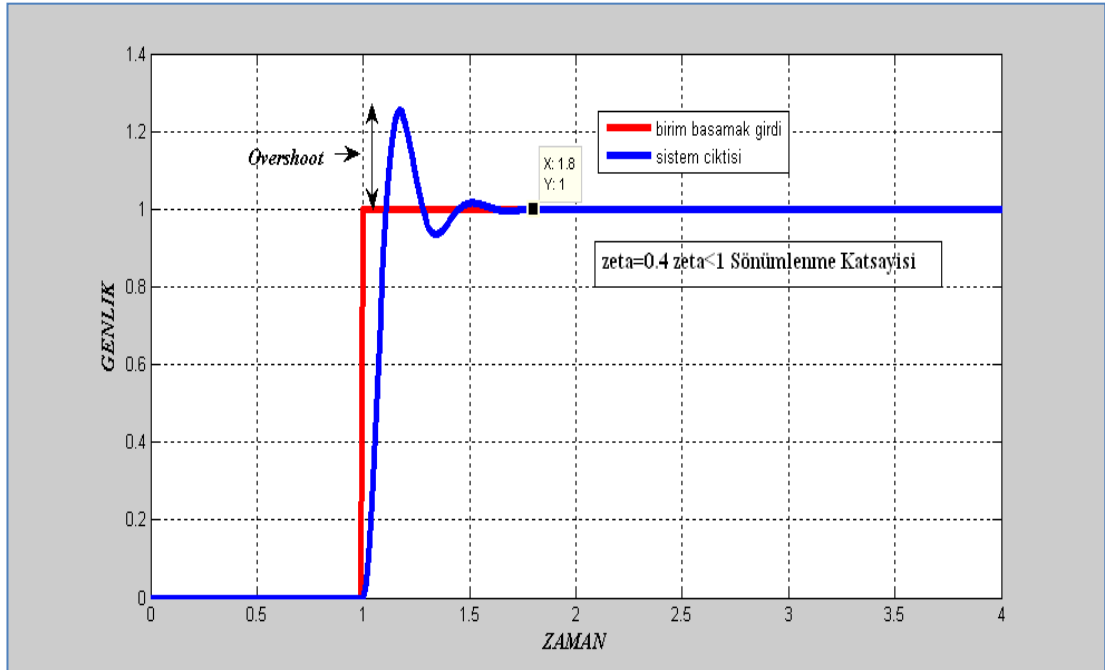
Şekil 3.6 İkinci mertebeden birim basamak cevabı zeta=0

$\zeta=1$ olması durumunda sistem kritik sönümlü olarak adlandırılmaktadır. Bu durumda sistemin köklerinin karmaşık düzlemde reel eksen üzerindedir. Sistem bu durumda hiç osilasyon yapmadan olabilecek en kısa sürede kararlı rejime ulaşmaktadır. Şekil 3.7’te sistemin basamak girdi tepkisine karşılık açık döngüsü çizdirilmiştir.



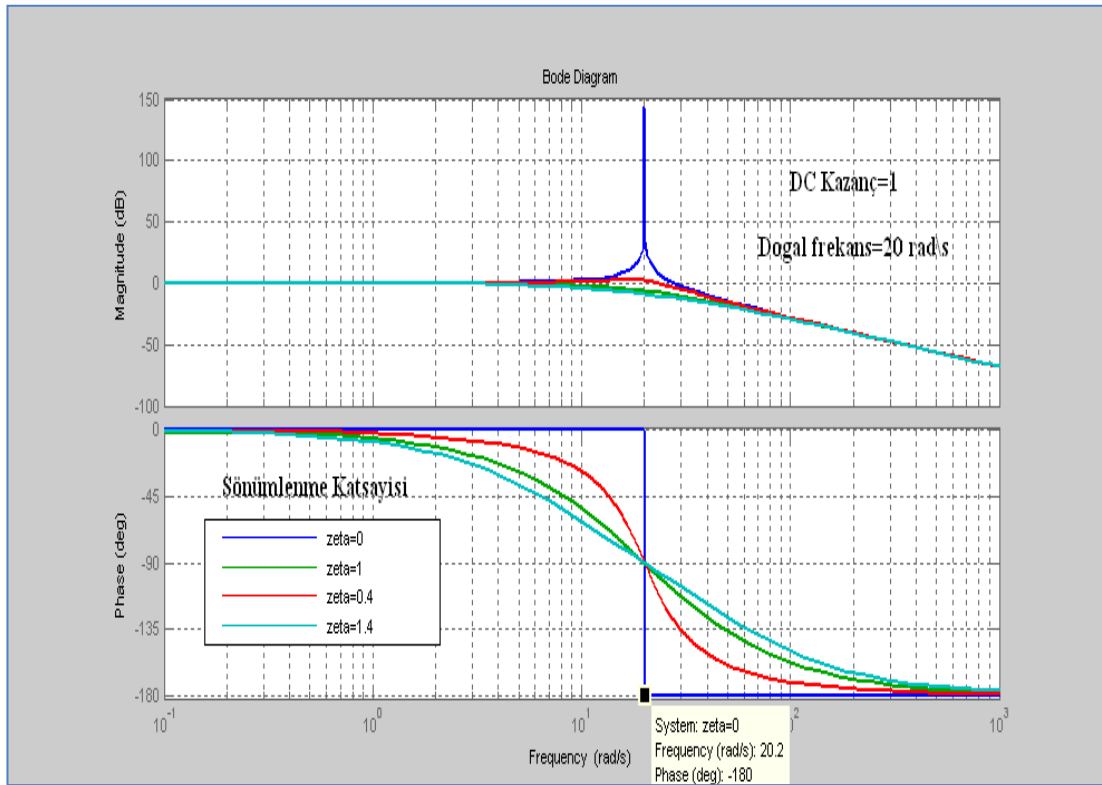
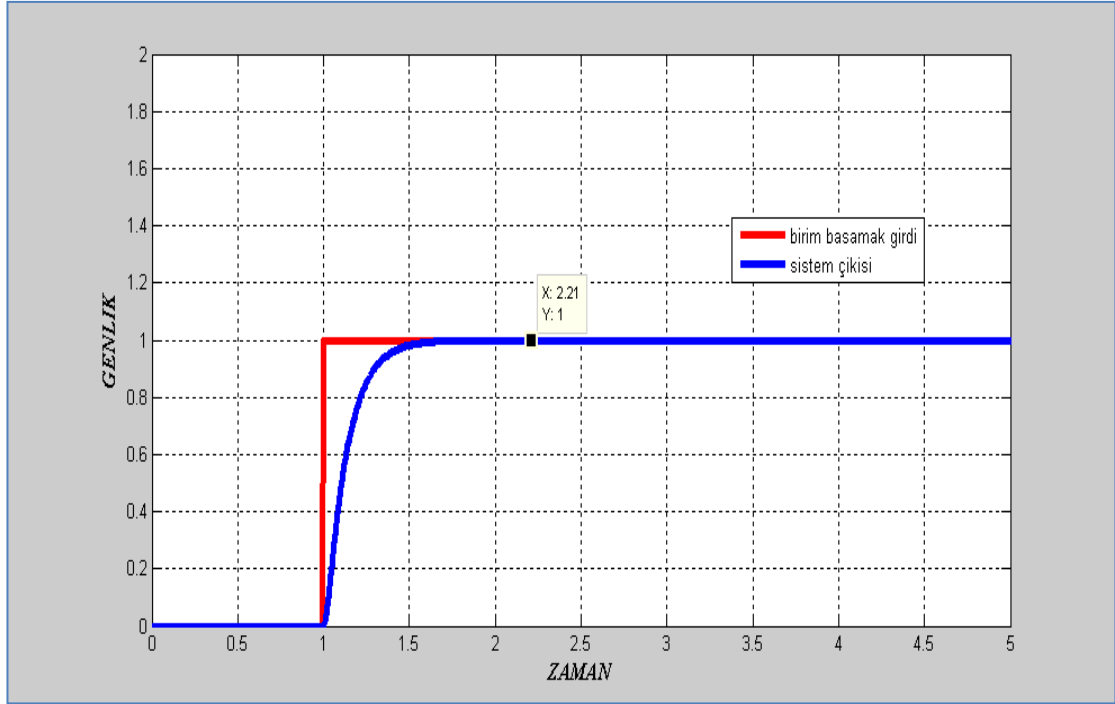
Şekil 3.7 İkinci mertebeden birim basamak cevabı zeta=1

$\zeta < 1$ olması durumunda sistem sönüm altında olarak adlandırılmaktadır. Kutupların karmaşık düzlemde sol tarafında bulunmaktadır. Sistem kararlıdır. Sistemin düzenli rejim cevabı ise osilasyon yaparak düzenli rejim cevabına ulaşmaktadır. Osilasyon yapmasının sebebi ise kutuplarının reel ve imajiner değerlere sahip olmasından dolayıdır. Şekil 3.8 te sistemin basamak girdi tepkisine karşılık açık döngüsü çizdirilmiştir. Sistem davranışı beklendiği gibi osilasyon yaparak son haline oturmuştur. Quadrotor transfer fonksiyonuna en yakın davranışı bu sistem sergilemektedir. Yapılan test düzeneklerinde yapılan sistem testlerinde bu ayrıntılı olarak gözlenmiştir. Son olarak $\zeta > 1$ durumunda sistemin osilasyon yapmadan nasıl daha geç kararlı duruma oturduğu gözlenmiştir. Şekil 3.9’ta bu çizim verilmiştir.



Şekil 3.8 İkinci mertebeden birim basamak cevabı zeta=0.4

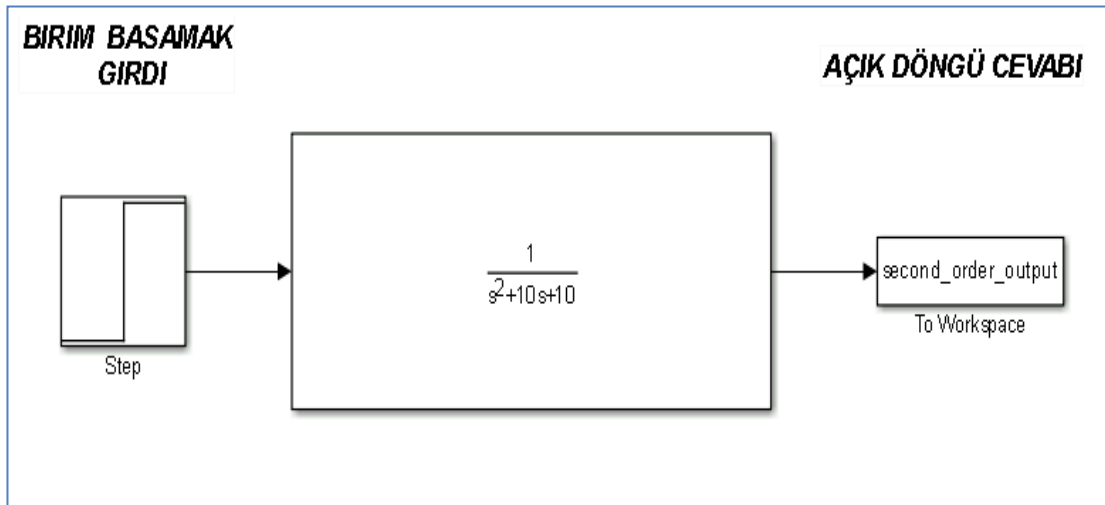
$\zeta > 1$ durumunda sistem tepkisi $\zeta = 1$ durumunda dahada geç kararlı duruma gelmektedir. Birinci durumda sistem 1,63 saniyede kararlılığa otururken ikinci sistem 2,21 saniyede kararlı duruma gelmektedir.



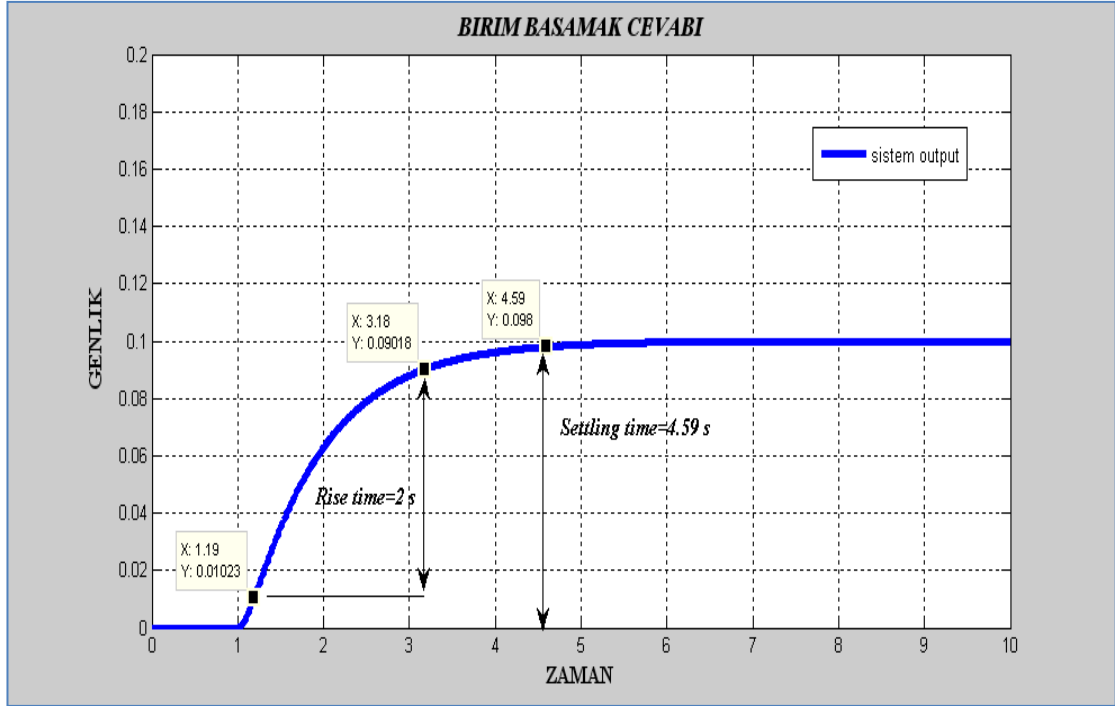
Şekil 3.10' ta farklı sönümlenme katsayılarına sahip sistemlerin bode diyagramları çizdirilmiştir. Zeta=0.4 olduğu durumda beklendiği frekans doğal frekansa yakın olduğu yerde maksimum genlikte çıkış vermektedir. Faz diyagramından görüldüğü gibi sistemin keskin olarak geçişi tamamen sistemdeki sönümlenme katsayısına bağlıdır.

Temel birinci dereceden ve ikinci dereceden sistemleri açık döngü cevaplarını inceledikten sonra bu sistemlerin PID kontrolünün nasıl yapılacağını ve PID kontrolcünün katsayı parametrelerinin sistem üzerinde nasıl bir etkisi olduğunu incelenecektir (Control PID, 2012). İlk olarak kontrolcünün sistem üzerinde etkisini inceleyebilmek için bir sistem modeli aşağıdaki denklemde verildiği şekilde seçilmiştir.

$$H(s) = \frac{1}{s^2 + 10s + 10}$$



Şekil 3.11 Pid deneme sistemi



Şekil 3.12 Pid deneme sisteminin açık döngü cevabı

Sistem girdisi birim basamak olduğu için çıkışında 1 değerinde olması gerekmektedir. Şekil 3.12’te açık döngü cevabından gözlemlendiği gibi sistem çıkışı düzenli rejim cevabı 0,1 olmaktadır. Sistemin aynı zamanda yükselme zamanı ve kararlı rejime oturma zamanlarının yüksek olduğu görülmektedir. Kontrolcü kullanılarak bu noktalarda iyileştirme yapılmaya çalışılacaktır. Sırasıyla yukarıdaki sistem için PID kontrolcünün parametreleri orantısal terimi, integral terimi ve türev terimi incelenecektir. Aşağıda ilk olarak PID kontrolcünün zaman bölgesindeki denklemi verilmiştir.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Burada, $e(t)$, hata sinyali, $u(t)$ kontrolcünün çıktısı, K_p, K_i, K_d değerleri kontrolcünün orantısal, integral ve türev katsayılarıdır. Kontrolcünün yaptığını kısaca özetlenirse sistemi istenen noktaya getirebilmek için sistem çıkışından geribildirim alınır. Bu çıktı, referans değerden çıkarılır ve hata sinyali üretilir. Sonra hata sinyali üç farklı terime yollar. Birinci terim orantısal terimdir bu terim gelen hata sinyali

ile çarpılır. İkinci terim ise integral alma terimidir; hata sinyalinin sürekli olarak integrali alınmaktadır. Daha sonra sistemdeki integral katsayısı ile çarpılır. Üçüncü terim ise türev terimidir. İntegraldeki gibi sinyalin türevi alınıp türev katsayısı ile çarpılır. En son bu üç terim toplanır ve kontrolcünün çıktısı olarak sistem girişine verilir. İşlemleri kolaylaştırmak için kontrolcüyü frekans bölgesinde inceleyebiliriz. Bunuda laplace dönüşümü ile gerçekleştirebiliriz. Bu durumda, kontrolcünün laplace dönüşümü ve transfer fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

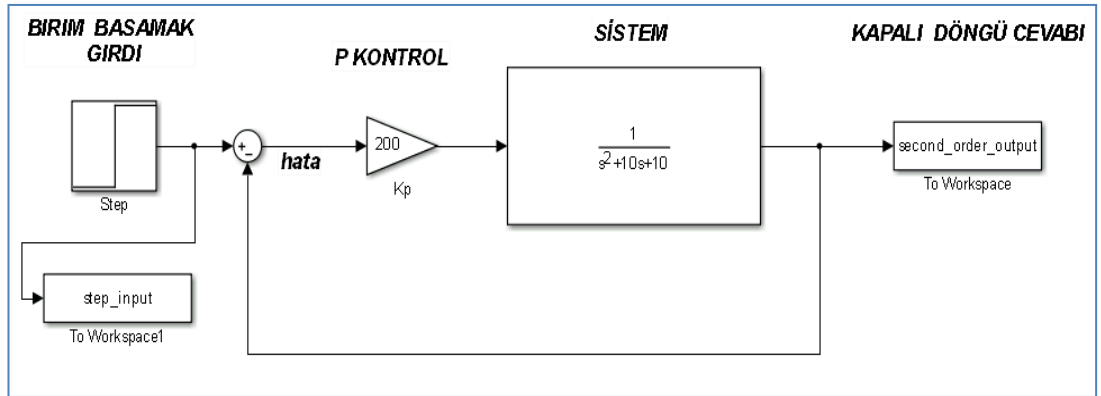
$$u(s) = K_p e(s) + K_i \frac{e(s)}{s} + K_d e(s)s$$

$$\frac{u(s)}{e(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$$

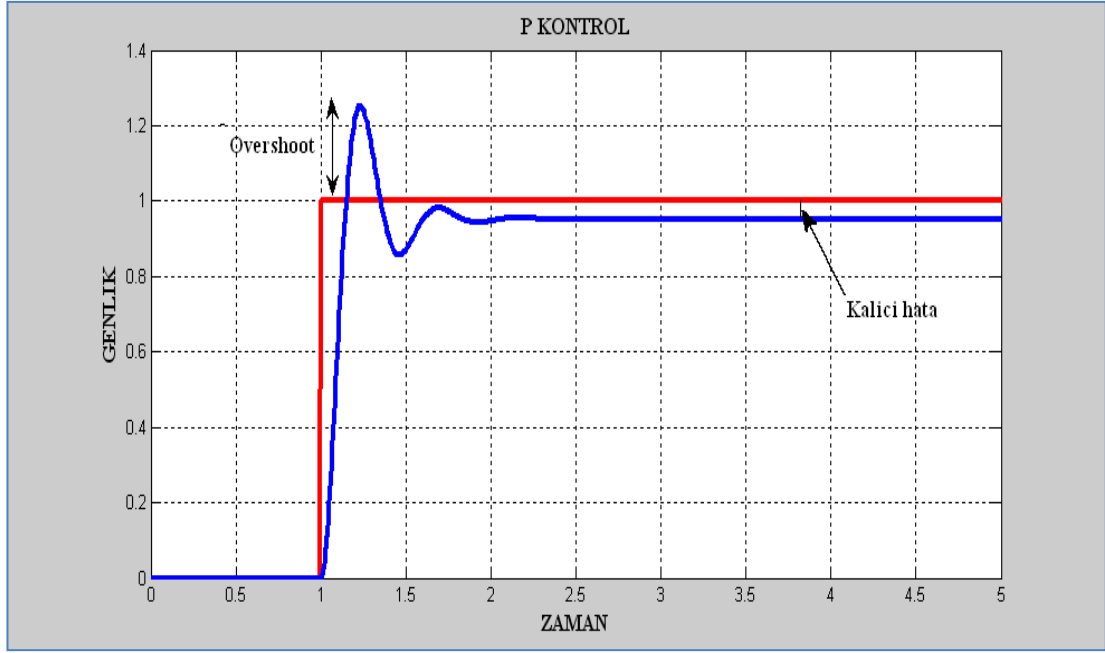
$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$$

3.1.1 Orantısal Terim

Yukarıdaki parametre analizi için ele aldığımız sistemde ilk önce sadece P kontrolcü uygulanacak ve tek başına sistem üzerindeki etkilerine bakılacaktır. Burada sisteme oluşan hata ile orantısal bir girdi verilir. Şekil 3.13'te ilgili simulink modeli verilmiştir.



Şekil 3.13 P kontrol sistemi

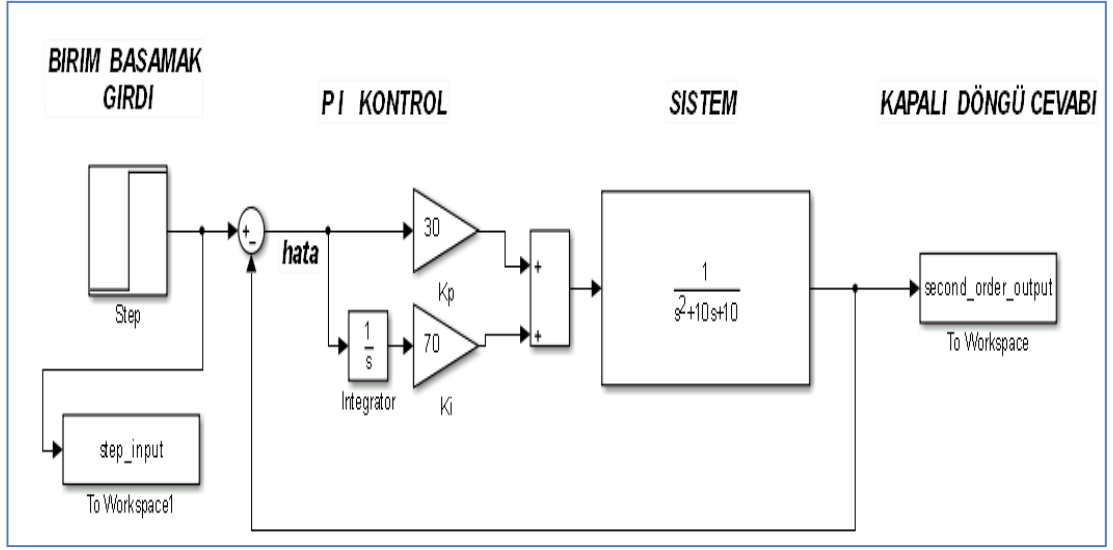


Şekil 3.14 P kontrol sistemi birim basamak cevabı

Şekil 3.14'te kapalı döngü ve orantısız kontrolcü kullanıldığında elde edilen birim basamak cevabı bulunmaktadır. Birim basamak cevabı, eğer sistemde sadece P kontrollör kullanılsaydı, sistemde hep kalıcı bir hata olacağını belirtmektedir. Şekil 3.14'te gözüktüğü gibi sistem çıkışı hiçbir zaman 1 değerine ulaşmamıştır. Sistemin yükselme zamanı gözle görülür şekilde düşmüştür. Ama zamandaki düşüş sistemde aşım (overshoot) sebebidir. K_p değerinin çok büyük seçilmesi sistemde stabil olmayan durumlara yol açabilmektedir.

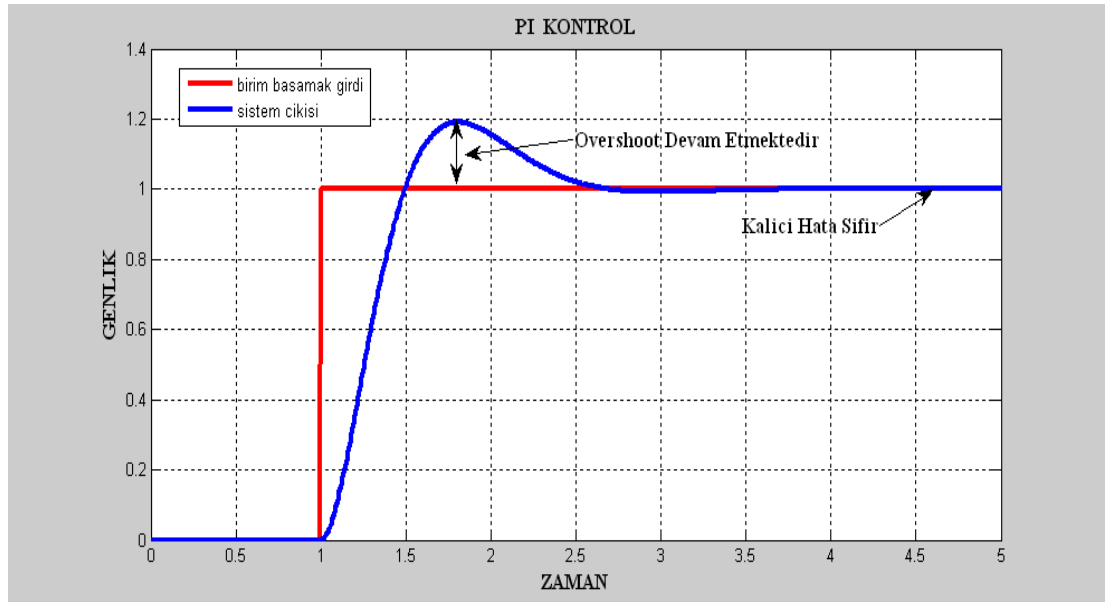
3.1.2 İntegral Terim

Bu terim, daha önceki hata değerlerinin integralini alıp integral katsayı ile çarpılmaktadır. Tek başlarına kullanılmazlar genelde P kontrolcü ile birlikte kullanılır. Eğer sadece I kontrolcüyü kullanırsak sistem yavaş cevap verecektir. Aşağıdaki Şekil 3.15'te P kontrolcüyü ve I kontrolcüyü beraber kullanan SIMULINK modelini göstermektedir.



Şekil 3.15 PI kontrol sistemi

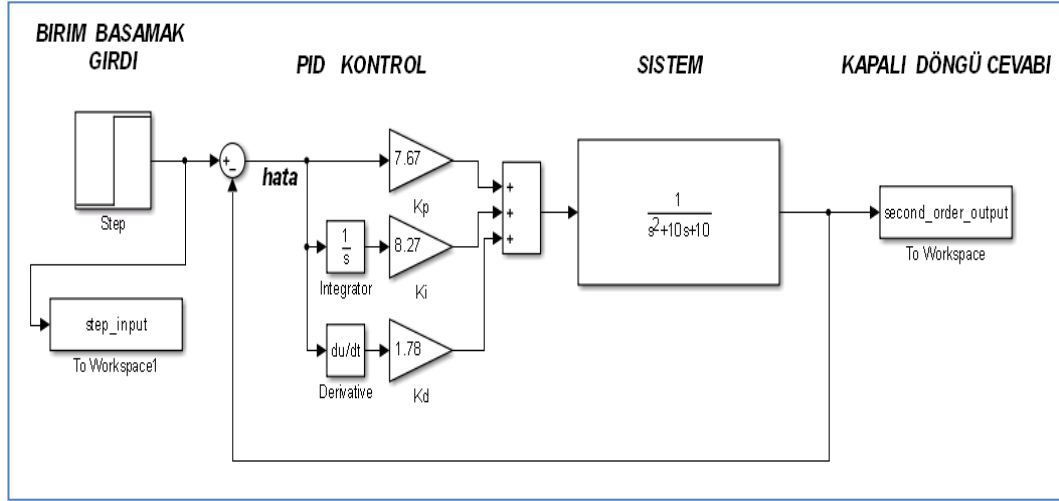
Kalıcı hatayı yok edebilmek için P kontrolcünün katsayısı azaltılmıştır $K_p=30$. I kontrolcü de devreye sokulmuştur. I kontrolcü katsayısı ise $K_i=70$ yapılmıştır. Her ikisi de birbirlerinin eksiklerini tamamlayarak daha iyi bir kontrolör sonucu vermektedir. Şekil 3.16'ta gözlemlendiği gibi kapalı döngü çıktısı kalıcı hatayı sıfırlamıştır.



Şekil 3.16 Pi kontrolcünün birim basamak cevabı

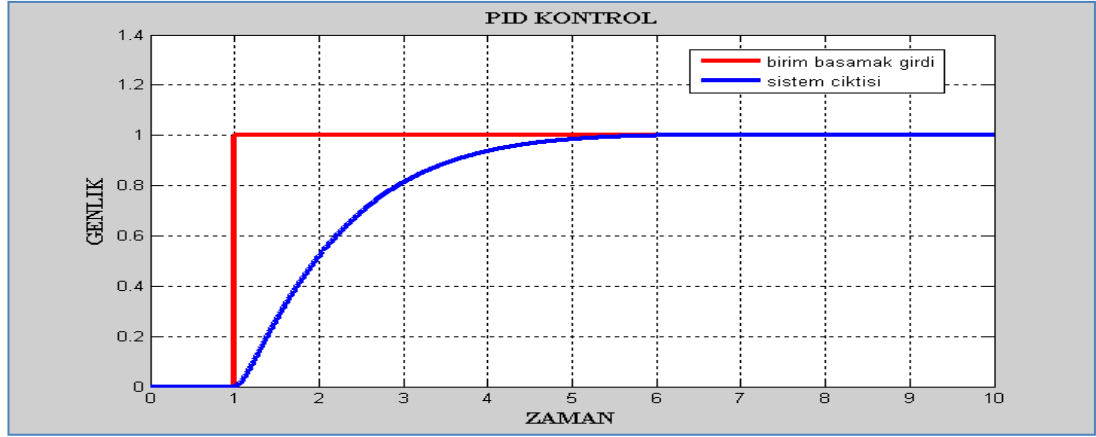
3.1.3 Türev Terim

Bu terim kontrolcüye gelen hatanın değişim oranını yani türevini alarak hatanın pozitif yönde veya negatif yönde bir artış gösterdiğini anlar ve sistemin bu yönde aşım (overshoot) yapmasını engelleyici şekilde sisteme geri bildirim verir. Hatanın türevi alındıktan sonra türev katsayısı ile çarpılır ve diğer terimler ile toplanarak sisteme verilir. Bu terimin asıl amacı hatada gelen ani değişikliklere uygun kontrolcü çıktısının verilmesidir. Şekil 3.17’de P kontrol, I kontrol ve ek olarak D kontrolcünün bir arada kullanımını gösteren SIMULUNK modeli verilmiştir.



Şekil 3.17 Pid kontrol sistemi

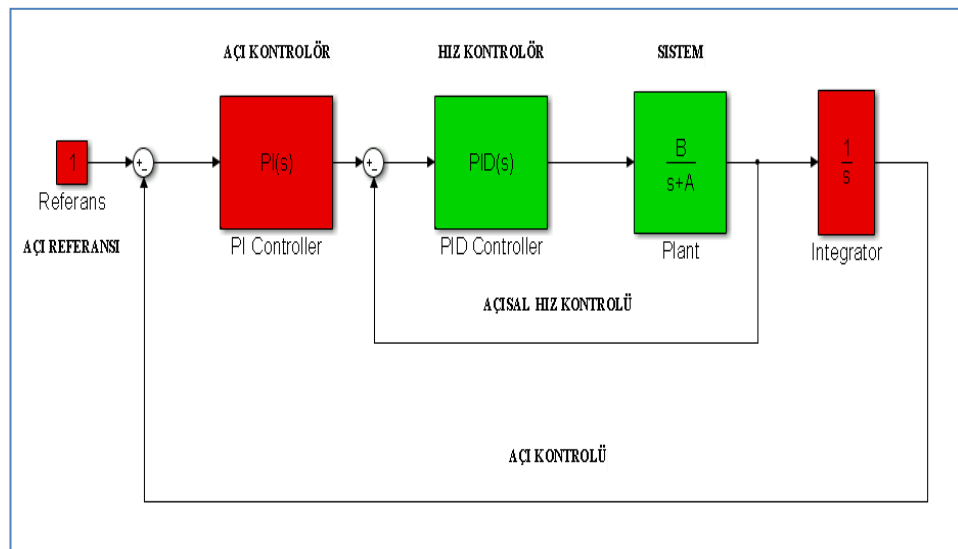
Sistemde büyük K_d değerleri sistemi stabil olmayan bir noktaya doğru kaydırabileceğinden bu noktaya dikkat edilmelidir. Sisteme gelen en küçük gürültü bile kontrolcü çıktısını doyum (saturation) noktasına çok kolaylıkla ulaştırabilir. Bu yüzden eğer PID kontrolcünde türev teriminde kullanılmış ise türev bloğunun önünde sistemin yüksek gürültüden etkilenmemesini sağlayan alçak geçiren (Low-Pass) filtrenin kullanılması tercih edilebilmektedir. Şekil 18’te gözüktüğü gibi sistemin birim basamak cevabında aşınımlardan kurtulunmuştur.



Şekil 3.18 PID kontrolcünün birim basamak cevabı

3.2 Quadrotor Kontrolör

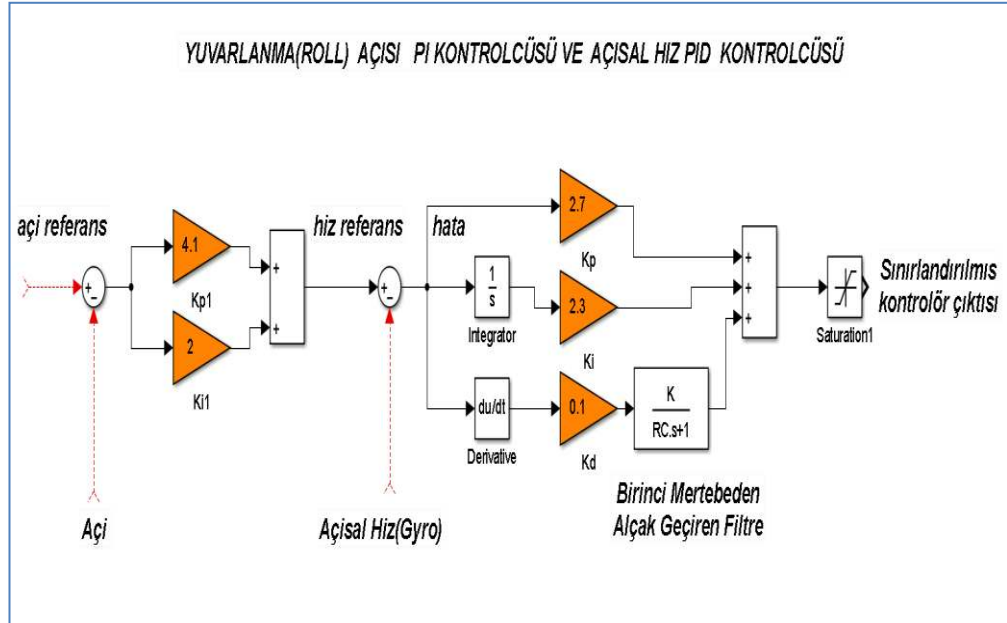
Bir önceki bölümde bir tane PID kontrolörün sistem üzerindeki tüm etkileri incelenmişti. Bu bölümde quadrotorun kontrol açısından birbirinden ayrı olarak düşünülen her bir eksen (yuvarlanma, yunuslama, dümen) için ayrı kontrolcü tasarlanacaktır. İlk önce yuvarlanma (roll) açısı için tasarım yapılacaktır. Quadrotorun tek eksen kontrolör tasarımının kilit noktalarından biri iç içe iki tane kontrolcüye sahip olmasıdır. Yuvarlanma ekseninde temel olarak yapılacak olan sistemi istenilen yuvarlanma (roll) açısında tutmaktır.



Şekil 3.19 Quadrotor sistemi ve kontrol yapısı

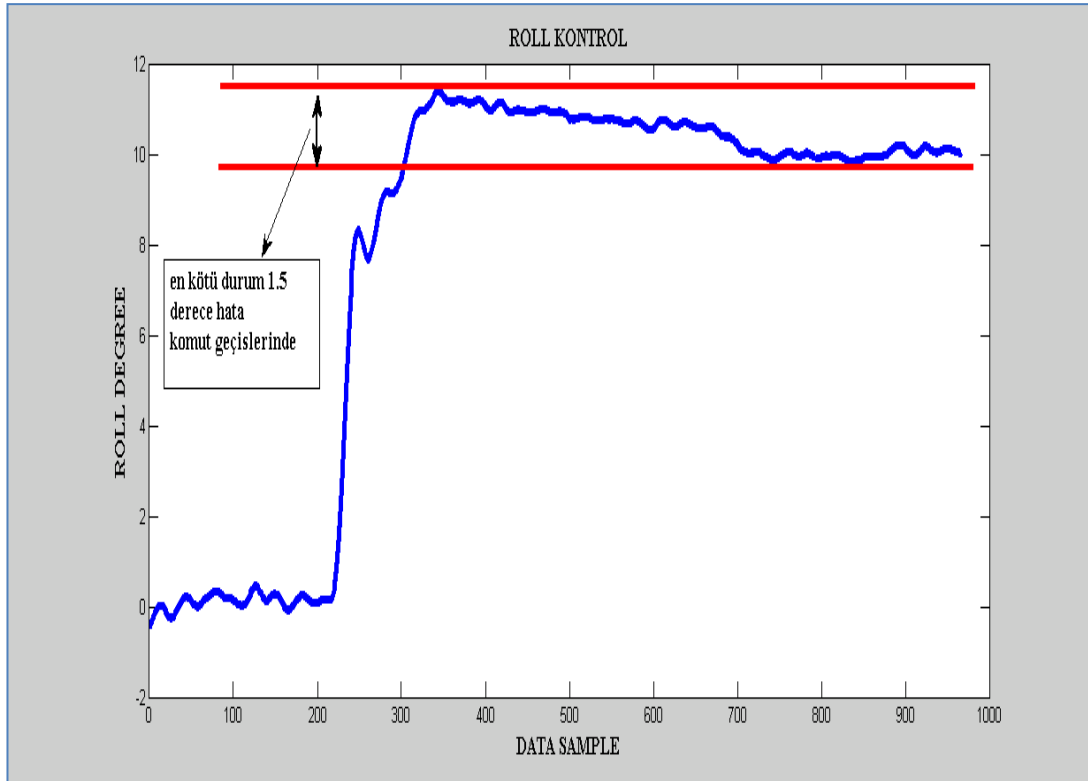
Açı kontrolünü yuvarlanma ekseninde düzgün ve sağlam şekilde yapılabilmesi için daha öncesinde o eksen de açısal hız kontrolünün yapılması gerekmektedir. Şekil 3.19’da quadrotorun iç içe olan kontrol döngüsünün diyagramı verilmiştir. Quadrotor kontrolünde açısal hız kontrolü için PID kontrolcü kullanılmıştır. PID kontrolcünün dışarısında açı kontrolü için ise PI kontrolcü kullanılmıştır. En dışarıdaki kontrolcüde türev terimine ihtiyaç duyulmamaktadır. Nedeni ise içeri kısımdaki hız kontrolcüsünde bu stabilizasyon sağlanmaktadır. Dışarıdaki açı kontrolcüsünün tek amacı hız kontrolcüsüne hatayı kapatmak için ne kadar hızla istenilen açığa gitmesi gerektiğini iletmektedir. Bir sonraki bölümlerde sırasıyla her kontrol eksen i için tasarlanan kontrolörlerin ayrıntıları ve hepsinin gerçek sistemden toplanan birim basamak cevaplarının çıktısı incelenecektir. Yuvarlanma eksen i kontrolcü parametreleri yunuslama eksenine ait olanlar ile hemen hemen aynıdır. Aralarındaki çok küçük farklılık, sistem ağırlığının tam olarak simetrik dağılmamasından kaynaklanmaktadır. Dolayısı ile her eksen üzerindeki atalet momenti farklı olmaktadır.

3.2.1 Yuvarlanma Eksen i Açı ve Açısal Hız Kontrolcüsü



Şekil 3.20 Yuvarlanma açısı kontrolörü

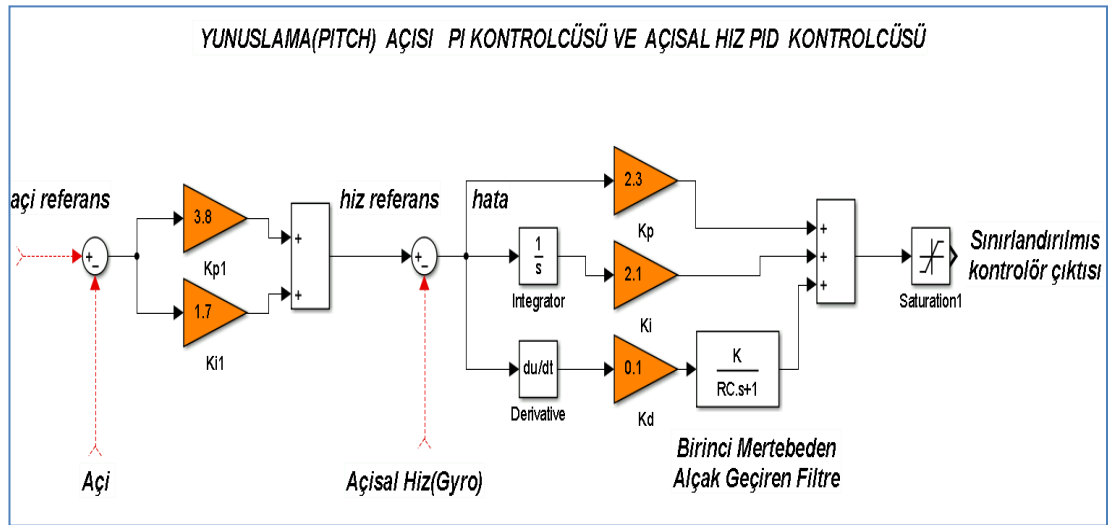
Test düzeneklerde ilk olarak denenen eksen bu eksenidir Şekil 3.20’de kontrolcünün ayrıntılı şekli ve ilgili kontrolcü katsayıları verilmiştir. Türev teriminin hemen ardına birinci mertebeden alçak geçiren filtre konmuştur. Türev terimi doğası gereği gürültülere karşı çok hassastır. Bu da sistemi kararsız noktaya doğru itmektedir. Bundan dolayıdır ki türev teriminin çıkışına 10 Hz lik alçak geçiren filtre konmuştur. Daha sonra türev terimi diğer terimlerle topladıktan sonra kontrolcü çıkışı olarak sisteme direk olarak verilmemekte; bir saturasyon bloğundan geçirilerek rotorlara girdi olarak verilmektedir. Tasarlanan kontrolcünün ne kadar stabil olduğu çeşitli basamak girdileri ile test edilmiştir. Quadrotor yuvarlanma açısı 0 derecede stabil dururken sistemin açı referansı değiştirilerek 10 dereceye getirilmiştir. Bu arada sistemin cevabı arayüz programı tarafından kaydedilmiştir. Kaydedilen yuvarlanma açısı Şekil 3.21 deki gibi çizdirilmiştir. Grafikten de anlaşılacağı gibi yuvarlanma kontrolörünün açı girdisi 10 derece değiştirildiğinde sistem maximum 1,5 derece hata yaparak referans değerine oturmaktadır.



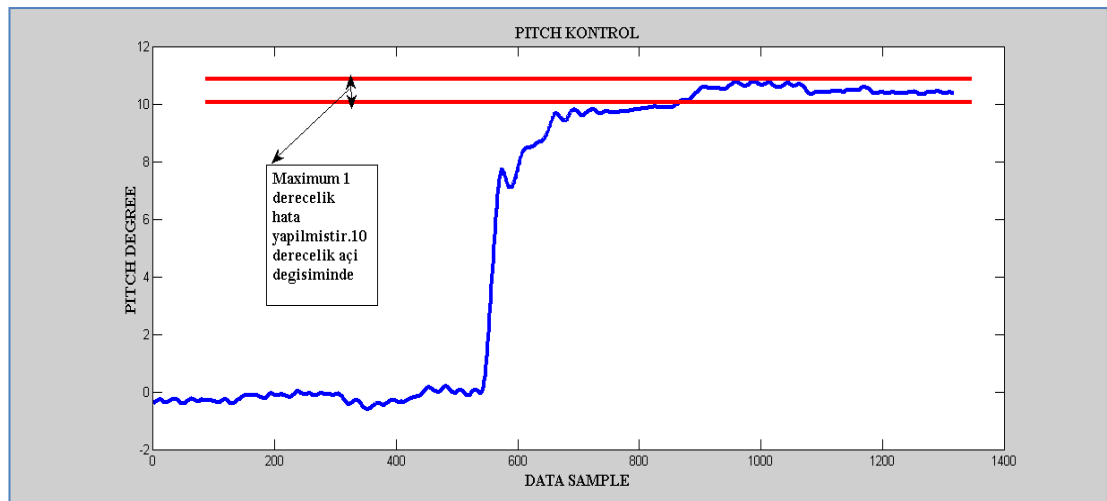
Şekil 3.21 Yuvarlanma açısı kontrolör basamak cevabı

3.2.2 Yunuslama Eksenini Açısı ve Açısal Hız Kontrolcüsü

Yunuslama (pitch) ekseninin açısı ve açısal hız kontrolcüsünün yapı olarak yuvarlanma (roll) eksenine ile aynıdır. Ana fark olarak her iki eksenindeki atalet momentleri farklıdır. Bu sebepten ötürü kontrolcü katsayılarında az da olsa farklılığa sebep olmuştur. Şekil 3.22’de yunuslama açısı ve açısal hız kontrolcüsünün parametre değerleri verilmiştir.



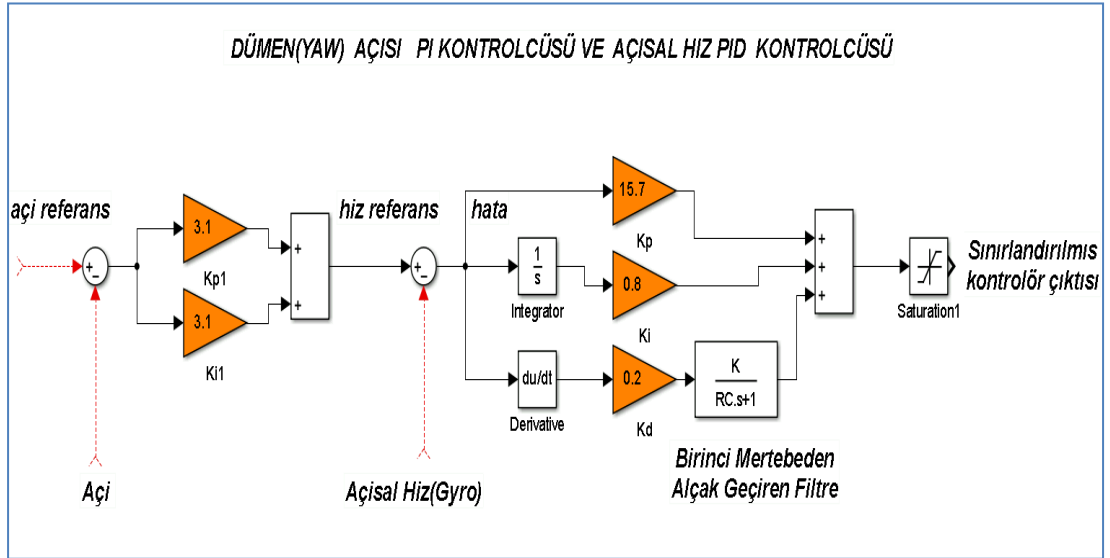
Şekil 3.22 Yunuslama açısı kontrolörü



Şekil 3.23 Yunuslama açısı kontrolör basamak cevabı

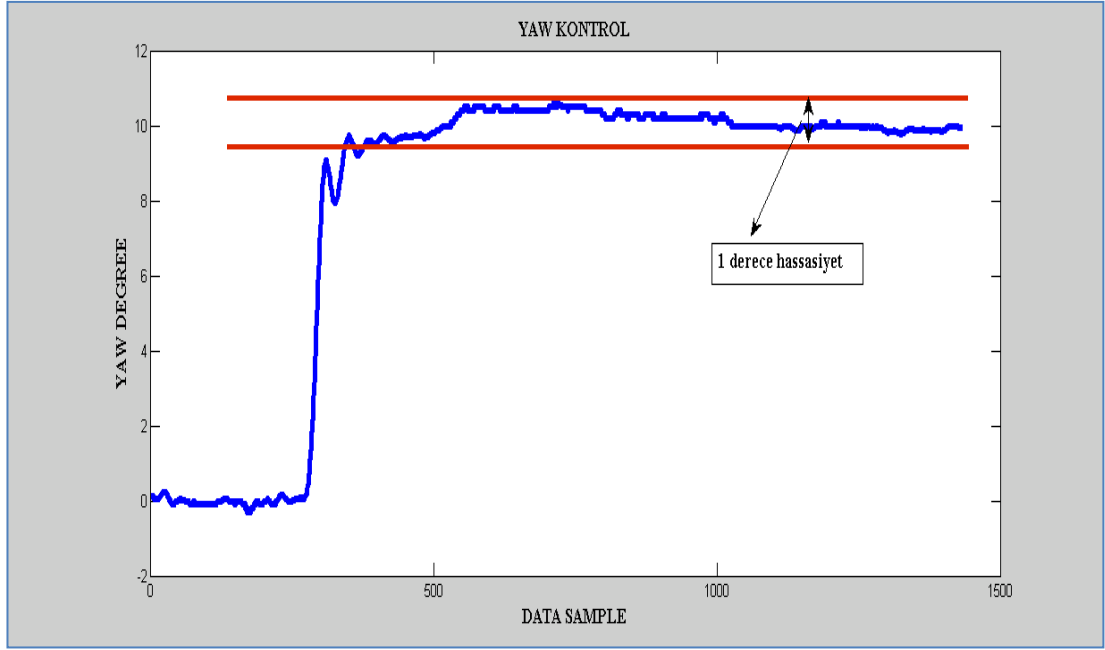
3.2.3 Dümen Eksen  Açı ve Açısal Hız Kontrolcüsü

Dümen (yaw) ekseninde kontrol yapısı diğ r kontrolcülerde olduğu gibi aynıdır. Kontrolcü katsayıları bir önceki kontrolcülerden oldukça farklıdır. Bunun sebebini şöyle açıklayabiliriz. Diğ r kontrolcülerde denge kontrolü tamamıyla rotorların itki kuvvetlerine bağılydı. Dümen kontrolünde sistemi dengede tutabilmek için sadece sürüklenme momentleri vardır. Bu momenti, itki kuvvetlerinin oluşturduğu momentler ile karşılaştırınca oldukça zayıf kalmaktadır. Bu yüzden de kontrolcü parametreleri diğ r kontrolcülere göre oldukça farklı bulunmuştur. şekil 3.24’de dümen açısı ve açısal hız kontrolcüsünün tasarımı verilmiştir.



şekil 3.24 Dümen açısı kontrolörü

Dümen eksen  kontrolcüsünün a ı referans girdisi sistem hareket ettiği zaman ki noktayı kendine referans almaktadır. Bunun sebebi sistem daha yerdeyken dümen kontrolcüsünün aşırı bir şekilde çalışıp sistemi yerdeyken döndürmeye çalışmasını engellemektir. Dümen kontrolcüsünün diğ r kontrolcülerden bir önemli farkı da kontrolcü çıktısının 4 rotoru da etkilemesidir. Diğ r kontrolcülerde (yunuslama ve yuvarlanma) sadece görevli oldukları eksenindeki karşılıklı 2 motor etkilenmektedir. şekil 3.25’te dümen kontrolcünün 0 derecedeyken 10 dereceye gelmesi için girilen basamak girdiye karşılık cevabı çizdirilmiştir.



Şekil 3.25 Dümen açısı kontrolörü basamak cevabı

3.3 Ayrık Zamanlı PID

Bir önceki bölümde her eksen için tasarlanan PID kontrolcülerin gerçekleştirilmesi bir işlemci üzerinde olacağı için ayrık(discrete) zamanlı bir kontrolöre ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrık zamanlı PID kontrolcünün denklemi aşağıda olduğu gibidir.

$$u(n) = K_p e(n) + K_i \sum_{k=0}^n e(k) dt + K_d \frac{e(n) - e(n-1)}{dt}$$

$e(n)$ =>hata girdisi

$e(n-1)$ =>bir önceki hata girdisi

dt =>örnekleme zamanı

Denklemi incelersek ilk önce orantısal terime bakarsak gelen hata örneği K_p katsayısı ile çarpılır. İntegral teriminin hesaplanmasına gelinirse gelen hata değeri örnekleme zamanı ile çarpılır daha sonra akümülatif şeklinde kendi üzerine toplanır, böylelikle integral terimi hesaplanır. Türev teriminde ise her zaman bir önceki hata değeri her zaman tutulur, şu andaki hata değerinden çıkarılır ve örnekleme zamanına

bölünür. Hata değerinin türevini aldıktan sonra Kd sabit katsayısı ile çarpılır, diğer terimler ile toplanır. Daha sonra üç terim toplanarak kontrolcü çıkışı oluşturulur.

Aşağıda ilgili yapının aşamaları gösterilmektedir. :

Kontrol Sisteminin Tasarımı

$$\text{Anlık_Hata} = \text{Referans_Data} - \text{Sensor_Data};$$

$$\text{P_Term} = K_p \cdot \text{Anlık_Error}$$

↓

Hata_Top => (gelen bütün değerleri üzerine toplar).

$$\text{I_Term} = K_i \cdot (\text{Hata_Top} + \text{Anlık_Hata}) \cdot \text{Sample_Zamanı}$$

$$\text{D_Term} = K_d \cdot (\text{Anlık_Hata} - \text{Önceki_Hata}) \cdot \text{Döngü_Frekansı}$$

↓

D_term alçak geçirgen filtreden geçirilir.

$$\text{D_Term} = \text{Son_D_Term} +$$

$$(\text{Sample_Zamanı} / (\text{Zaman_Sabiti} + \text{Sample_Zamanı})) \cdot (\text{D_Term} - \text{Son_D_Term});$$

↓

Tüm terimler toplanır.

$$\text{PID} = \text{P_Term} + \text{I_Term} + \text{D_Term}$$

↓

Sisteme komut olarak verilmeden önce sınırlandırılır.

$$\text{PID} = \text{saturation}(\text{PID})$$

Yukarıdaki ayırık zamanlı PID kontrolör bütün eksenler için ayrı ayrı uygulanır. Dolayısı ile yunuslama, yuvarlanma ve dümen eksenleri için ilgili PID kontrolcü çıktıları sırası ile

$$PID_{pitch} = P_Term_{pitch} + I_Term_{pitch} + D_Term_{pitch}$$

$$PID_{roll} = P_Term_{roll} + I_Term_{roll} + D_Term_{roll}$$

$$PID_{yaw} = P_Term_{yaw} + I_Term_{yaw} + D_Term_{yaw}$$

'dir.

Her eksen için ayrı ayrı hesaplanan PID kontrolör değerlerinin rotor pwm değerlerine aktarılmasında ise aşağıdaki bağıntılar kullanılmıştır.

$$motor_2_out = motor_2 + (PID_{roll} \times 0.5) + (PID_{yaw} \times 0.25)$$

$$motor_4_out = motor_4 - (PID_{roll} \times 0.5) + (PID_{yaw} \times 0.25)$$

$$motor_1_out = motor_1 + (PID_{pitch} \times 0.5) - (PID_{yaw} \times 0.25)$$

$$motor_3_out = motor_3 - (PID_{pitch} \times 0.5) - (PID_{yaw} \times 0.25)$$

Burada, motor_2_out, motor_4_out, motor_1_out, motor_3_out sırası ile sağ, sol, ön ve arka motorlara gönderilen pwm değerleridir. motor_1, motor_2, motor_3 ve motor_3 değişkenleri ise motorların döndürülmek istenen referans hız değerleridir.

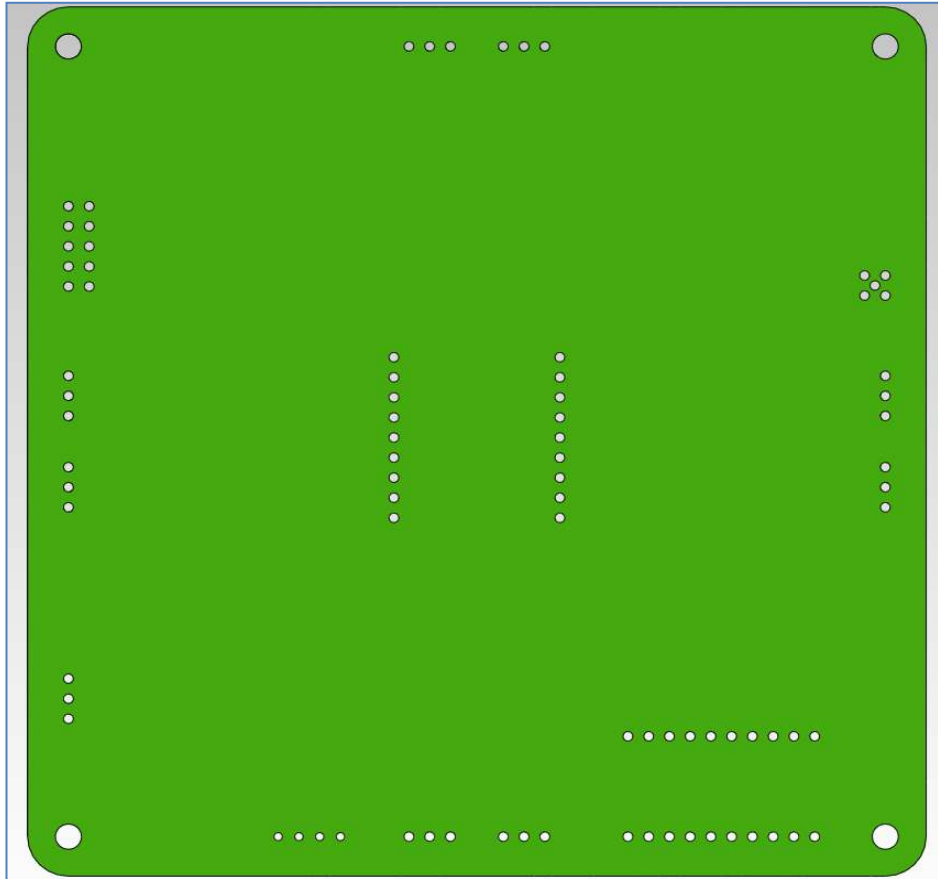
BÖLÜM DÖRT

QUADROTOR DONANIM

Bu bölümde quadrotorun oluşturan tüm donanım parçalarının görevleri detaylı olarak açıklanmıştır. İlk önce, sistemde tüm sistemi kontrol eden elektronik kartla başlanacaktır. Elektronik kart üzerindeki tüm sistem elektronik kart bölümünde detaylı olarak açıklanacaktır. Aynı zamanda elektronik kart üzerinde kullanılan akıllı sistem olarak görev yapan FPGA (işlemci birimi) içerisindeki konfigüre edilebilen donanımsal birimin tasarımı da anlatılmıştır. Elektronik kart, otopilot kartı olarak da adlandırılmıştır. Daha sonra otopilot kartıyla iletişim halinde olan birimler incelenecektir. Quadrotorun havadayken durum açılarını ve kontrol edilecek eksenler üzerindeki açısal hız bilgisini otopilot kartına yollayacak olan AHRS'ler anlatılacaktır. AHRS'ler dememizin sebebi sistem üzerinde iki tane AHRS vardır. Bir tanesi otopilot kartının üzerine daha düşük seviye Pololu firmasının CHR- 6DM adlı AHRS'si takılmıştır. Diğer AHRS ise MicroStarin firmasının 3DM-GX1 adlı AHRS'sidir. 3DM-GX1 titreşim izolatörleri ile mekanik platform üzerine takılmaktadır. Otopilot kartı ile iletişimde olan bir diğer altbirim ise Elektronik Hız Kontrolörleridir. Otopilot kartında üretilen pwm sinyalleri ESC' lere gönderilir. ESC ler de motorlarının gelen pwm sinyaline oranla hızlandırır ya da yavaşlatır. Bir diğer alt birim ise RF modüllerdir. Bu modüller bilgisayar arayüzü ile quadrotor arasındaki veri iletişimini sağlayacaktır. Quadrotorun konumunu belirlemek için ise U-BLOX firmasının LEA6T isimli gps modülü kullanılmıştır. Sistemde kaldırma kuvveti oluşturması için ve sistemin tek oynar parçaları olan fırçasız dıştan dönen motor ve bir diğer birim ise quadrotorun gözleri olarak tanımlayabileceğimiz IR analog uzaklıkölçerlerdir. Bunlardan sisteme 4 tane takılmıştır. Herbiri sistemin hareket edebileceği doğrultulara doğru takılmıştır. Böylelikle sistemin herhangi bir engele çarpmasının önüne geçilmektedir. İncelenen bir başka birim ise sisteme enerji sağlayan is Li-Po bataryalardır. Bir diğer alt birim ise akım ve voltaj ölçüm birimidir. Akım ve voltaj ölçümü batarya için yapılmaktadır. Böylelikle sistemin ne kadar enerji tükettiği izlenebilmektedir.

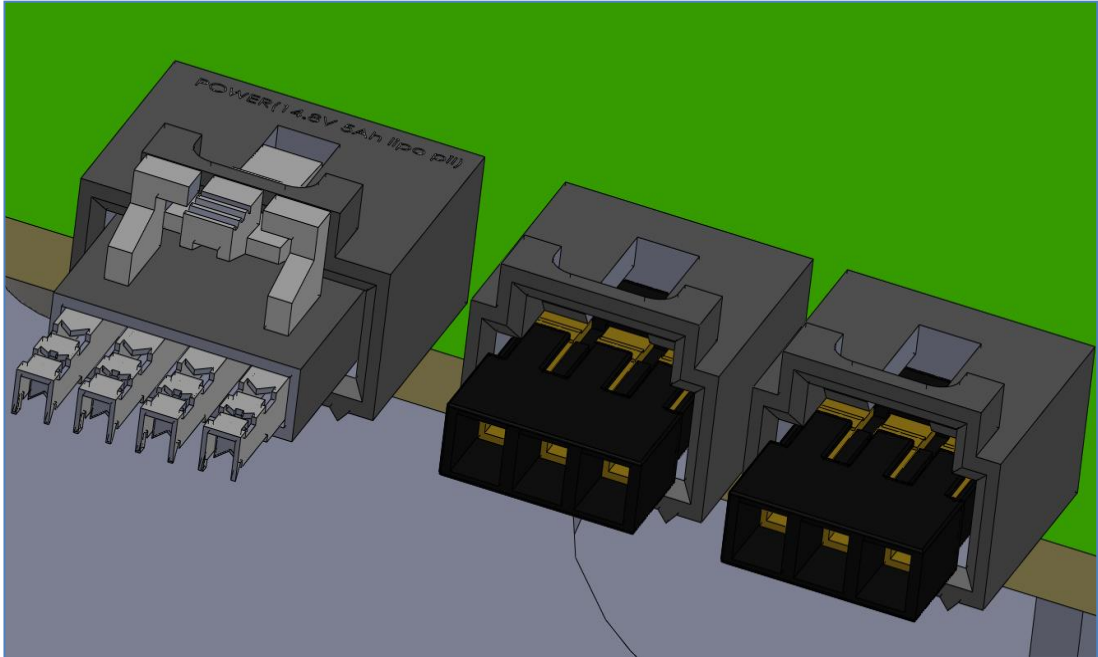
4.1 Elektronik Kart

Quadrotor otopilot kartının asli görevi AHRS de gelen durum açı datalarını alıp sistemin durumunu yorumluyup ona göre motorlardaki devir sayısını değiştirerek quadrotoru belli bir açıda tutmaktır. Otopilot kartının tasarımına başlamadan önce sistem gereksinimleri belirlenmiştir. İlk önce otopilot kartının mekanik isterleri belirlenmiştir. Kartın üstüne koyulacak malzemelere CAD programında modellenip bakıldığında kartın mekanik boyutları en ve boy olarak 10 x 10 cm olarak belirlenmiştir. Boyutları belirledikten sonra bir diğer iş ise kartın sisteme nasıl bağlanacağına karar verilmiştir. Kartın 4 köşesine 4 tane M3 vida deliği konmuştur. Mekanik platforma bu delikler üzerinden vidalanmıştır. Şekil 4.1’de kartın sadece çıplak hali verilmiştir.



Şekil 4.1 Otopilot kartının boş mekanik çizimi

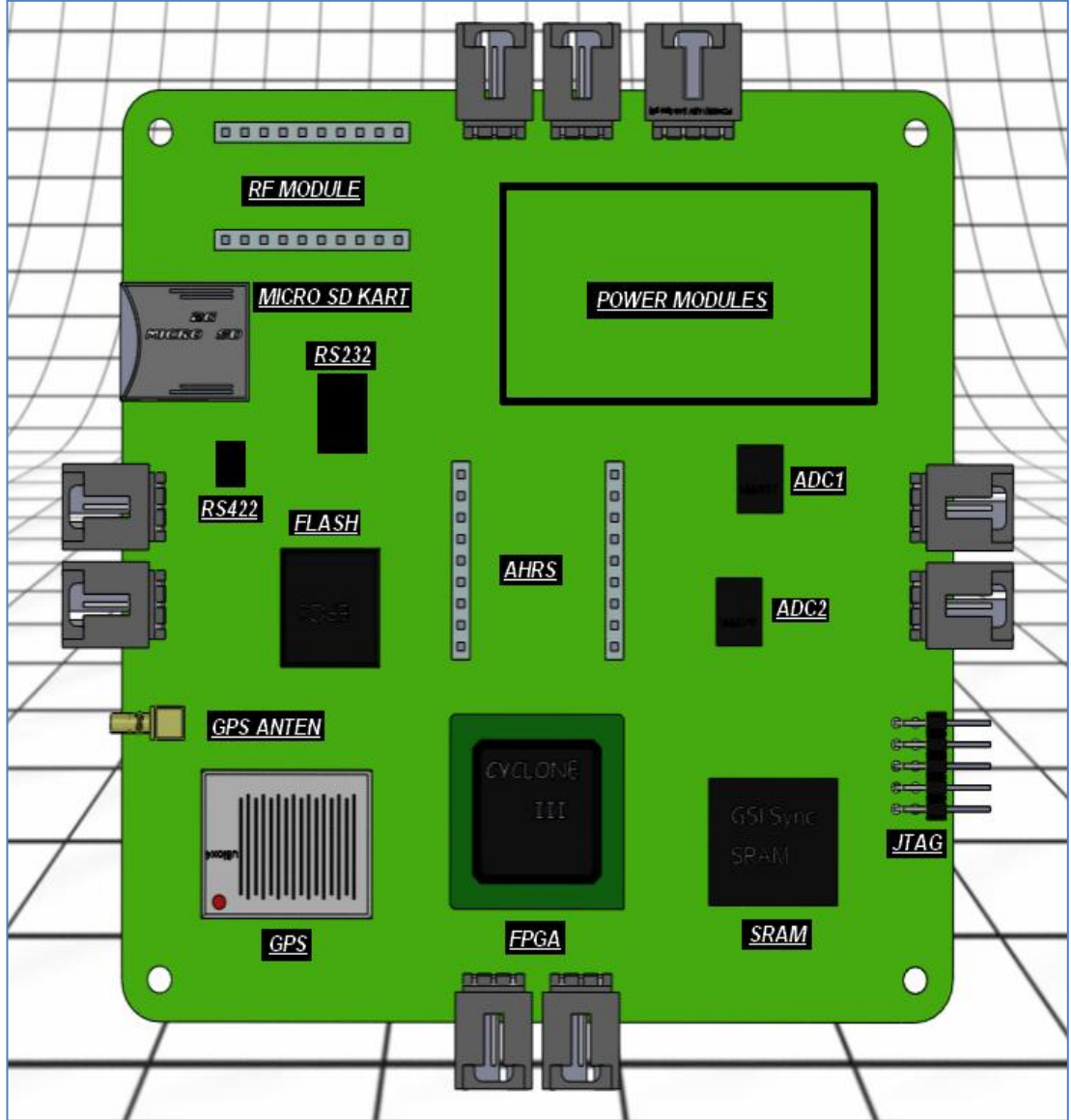
Kartı tasarlarken dikkate almamız gereken hususlardan biri de çevre cihazlar ile otopilot kartı arasında bağlantının nasıl olacağıdır. Bu durum önemli bir durumdur çünkü çevre cihazlardan özellikle AHRS veya motor pwm sinyallerinin bağlantılarından herhangi birisinin kopmasından kaynaklanacak hata direk olarak quadrotorun düşmesi ile sonuçlanacaktır. Sistemde motorlar çalışmaya başladığı zaman oldukça güçlü bir titreşim yaymaktadırlar. Bu da sistemde seçilecek konektörleri önemli kılmaktadır. Bu sebepten dolayıdır ki seçilen konektörler karşılıklı olarak kilitli seçilmiştir. Şekil 4.2’de sırasıyla kartın güç bağlantısı, motor pwm ve uzaklık sensör bağlantılarının yapıldığı konektörler gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Kart konektörleri

Kartın üstüne koyulacak AHRS ve RF modülü standart konektörlere sahiptir. GPS modülü ve GPS anteni ise yüzey monteli oldukları için kartın üzerine lehimlendirmektedir. Bu yüzden sistem üzerinde standart konektörler koyularak bunların üstüne takılmıştır. Bu komponentlerde dikkat edilmesi gereken hususlar şöyledir: GPS modülü, RF modülü ve AHRS olabildiğince birbirinden uzak tutulmaktadır. Birbirleri olan etkileşimlerini minimum seviye indirmek için bu durum göz önünde bulundurulmuştur. AHRS, sistemin geometrik merkezine

konulmuştur. Bu durumun sebebi ise AHRS, sistemin durum açılarını otopilot kartına yollarken olabildiğince quadrotorun doğru durum açılarını yollaması gerektiğinden kaynaklanmaktadır. Bu durum Şekil 4.3'te otopilot kartının ayrıntılı CAD modelinde gösterilmiştir. Otopilot kartı sistemin tam merkezine konulduğu için kartın üstündeki AHRS modülde sistemin geometrik merkezinde yer alır.

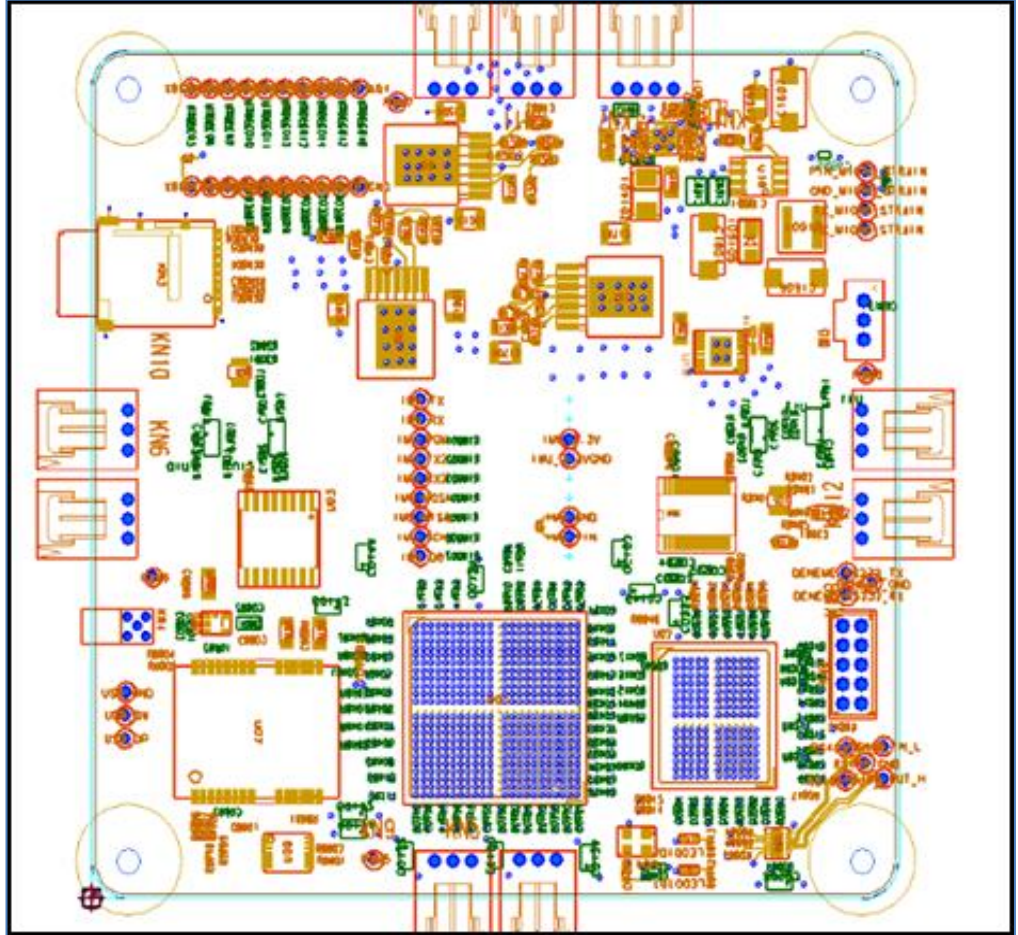


Şekil 4.3 Otopilot kartının cad modeli

Otopilot kartı aşağıda sıralanan gibi ana özelliklere sahiptir.

- Kart'ta 1 adet ALTERA firmasının Cyclone III EP3C55F484I7 adlı FPGA'ı kullanılmaktadır.
- İşlemci olarak FPGA içerisinde NIOS II adlı soft işlemci kullanılmıştır.
- RAM olarak Synchronous SRAM GS832136GE kullanılmaktadır. Yazılım kodu bu ram üzerinde koşturmaktadır.
- FPGA konfigurasyon data ve yazılım kodu EPCS64 adlı flashda tutulmaktadır. Sistem başlangıcını burdan yapmaktadır.
- FPGA Programlanması ve Flash yazma JTAG/IEEE 1149.1 arayüzü üzerinden yapılmaktadır.
- Konum bilgileri UBLOX LEA6T ile RS232 protokolu üzerinden işlemci ile haberleşmektedir.
- Sistem dataları üzerinde flash olan microSD kartı tarafından kayıt altına alınmıştır. SPI protokolu üzerinden işlemci ile haberleşmektedir.
- Temel kart fonksiyonlarını test etmek için iki tane test led'i konmuştur.
- Fpga, motor sürücülerin pwm pinlerine 3.3V tan 5V a seviye çeviricilerinden geçerek bağlanmaktadır.
- Kartta kullanılan osilatör FOX firmasının FXO-HC536R-20 kodlu ürünüdür Çalışma frekansı 20 Mhz dir.
- Çıkışları analog olan uzaklık sensörlerinin işlemcinin anlayacağı duruma gelebilmesi için AD7991 adlı iki tane sensor kullanılmıştır.
- Sistemdeki toplam çekilen akımı ölçebilmek için akım sensörü kullanılmıştır.
- Yer istasyonu ile bağlantıyı kurabilmek için ZIGBEE RF modül kullanılmıştır. Bu modül, seri arayüz üzerinden işlemci ile konuşmaktadır.

- Kart üzerinde sırasıyla 1.2V 2.5V 3.3V 5V ve 7V üretilmiştir. 2.5V haricinde diğer tüm voltajlar anahtarlamalı yöntem ile üretilmiştir. 2.5V sistemden düşük akım istediği için lineer regülatör üzerinden üretilmiştir
- Kart GPS modulu sistem uydulardan daha da iyi bilgi çekebilmesi için RF anten kullanılmıştır.
- Kartın layout aşamasında 10 katlı bir çizim yapısı kullanılmıştır
- Sistem testleri için LTC2855 (full duplex) RS-422 ve RS-232 entegresi kullanılmaktadır.



Şekil 4.4 Kartın gerçek fiziksel çizimi(Layout)

Otopilot kartının ana özelliklerini söyledikten sonra yukarıda belirtilen tüm maddeler aşağıdaki alt bölümlerde detaylı bir şekilde incelenmiştir.

4.1.1 FPGA,Qsys Sistem veNIOŚ II İşlemci

4.1.1.1 FPGA

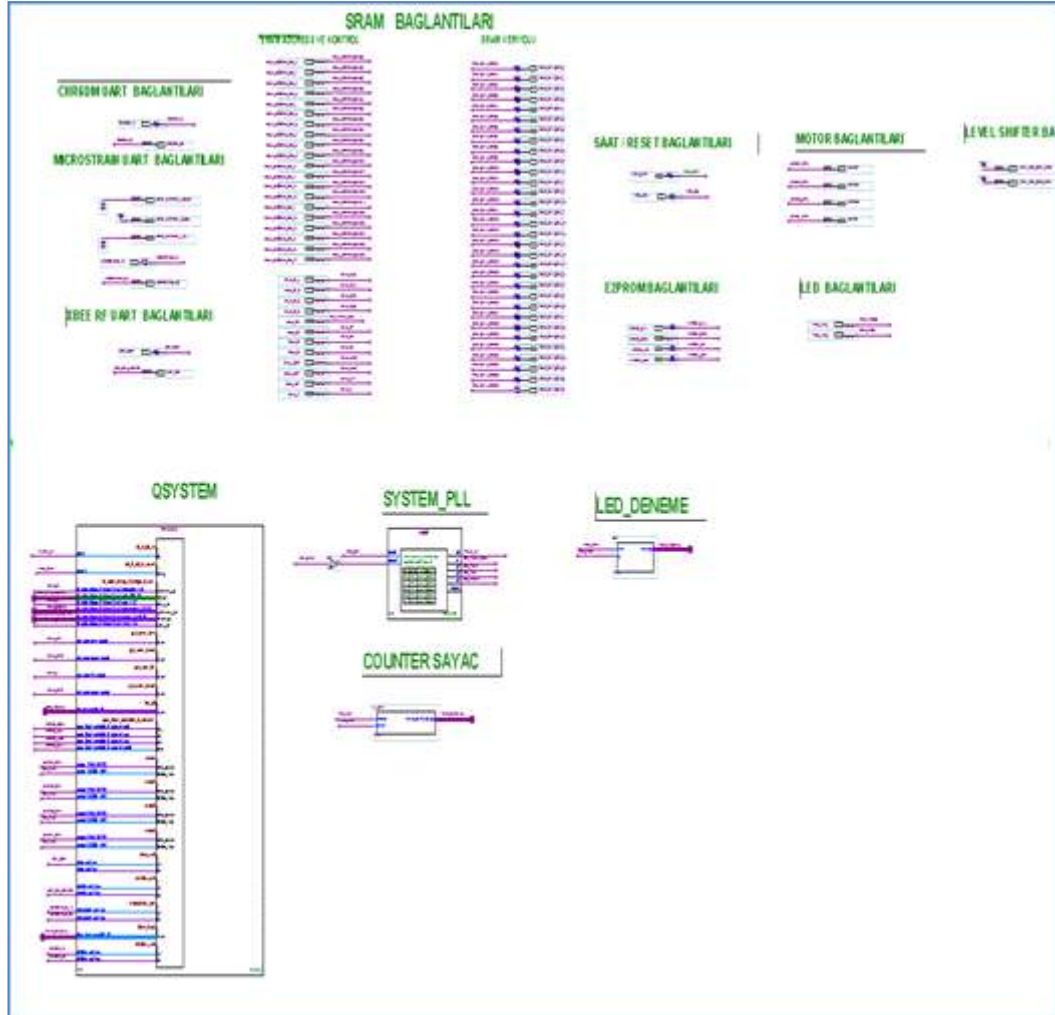
Kart'ta bir adet ALTERA firmasının Cyclone III(Altera Fpga,2012) EP3C55F484I7 adlı FPGA'i kullanılmaktadır. Düşük güç tüketimine sahiptir. Soft işlemci barındırmaktadır. 55,886 mantıksal elemente sahiptir. Kendi hafızası 2340 Kbit'tir. Donanımsal özellik olarak içinde 4 tane PLL vardır. 484 tane pine sahiptir. Elektronik paket tipi BGA(Ball Grid Array) malzemedir.



Şekil 4.5 Fpga cad çizimi

Şekil 4.5'te bütün sistemin beyni olarak nitelendireceğimiz ve aynı zamanda soft işlemcinin içinde barındırıldığı FPGA'in cad çizimi verilmiştir. FPGA'in içerisi tamamen konfigüre edilebilen bir yapıya sahiptir. İçerisinde istediğiniz pinine istediğiniz görevi atayabilirsiniz. Bu durum kart layout aşamasındaki sinyalleri çekerken işimizi oldukça kolaylaştırmıştır. FPGA içerisindeki donanımı VHDL donanım programlama dili ile konfigüre edilmektedir. FPGA içerisindeki donanım yapısını oluşturmak için ALTERA firmasının Quartus adlı FPGA tasarım programı kullanılmıştır. Quartus içerisinde oluşturulan tasarımı Şekil 4.5'te gösterildiği gibidir. FPGA içerisindeki tasarım yapısı şöyledir. İlk önce sistem de FPGA 'in pin diğer entegrelerle (SRAM, osilatör vb) olan bağlantısı için pin atamaları yapılmıştır. Pin

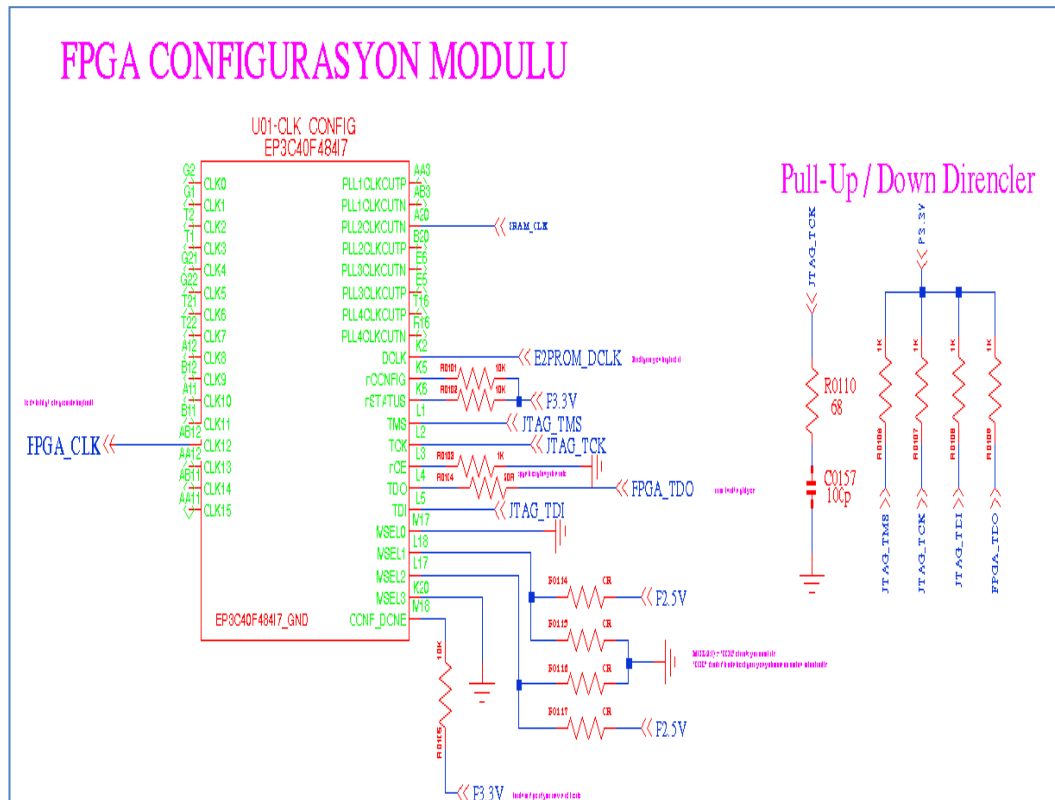
atamaları dikkat edilecek hususlar sırasıyla şunlardır; FPGA'in giriş ve çıkış pinleri belirlenmiştir.



Şekil 4.6 Quartus Fpga tasarımı

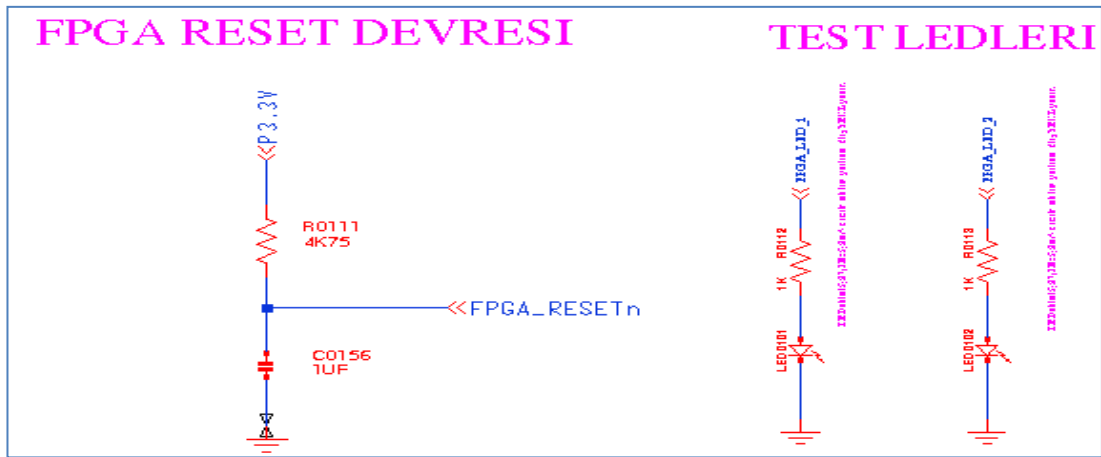
FPGA'e girecek olan saat sinyali FPGA'nin saat sinyalleri için özelleşmiş pinlerine atanmıştır. Ardından FPGA ve SRAM hattı arasındaki pin atamalarına özellikle dikkat edilmiştir. Kartın layout (kart gerçek çizimi) yapımı sırasında SRAM hatları sorun (sinyal hatlarının birbirini çaprazlaması gibi) oluşturmasın diye pin atamaları dikkat bir şekilde gerçekleştirilmiştir. SRAM hatlarının bir diğer önemi ise veri yolu ve adres yollarına sahip olduğu için bu hatları çizerken aralarında hat uzunluk farkları belli bir mesafeye kadar olmalıdır. Aksi takdirde FPGA ile SRAM arasındaki iletişimde zamanlama sorunu yaratabilir. Şekil 4.6'da yer alan diğer

blokların detayları ise şu şekildedir: Sistem_Pll adlı blok dışarıdan gelen 20Mhz lik saat sinyali işlemcinin çalışacağı 100 Mhz çeviren bloktur. Bu blok birden fazla çıkışa sahiptir. Diğer kendi yazdığımız VHDL blokları da burada oluşturulan saat sinyallerini kullanmaktadır. Sayaç adlı bloğun görevi işlemcinin ihtiyaç duyduğu hassas zamanlamayı sağlamaktır. Yazılım kodu işlemcinin içinde çalıştırıldığı zamanda yazılım kullanılarak hassas ölçüm yapılamamaktadır. Sayaç modulu vhdl kodu ile yazılan ve kendi içinde sürekli artan bir değişkene sahiptir. Bu değişken I/O üzerinden işlemciye verilmektedir. Böylelikle işlemci içinde bir işlemin ne kadar zaman tuttuğu hassas bir şekilde ölçülmektedir. Led_deneme bloğu kart üzerindeki ledler için yapılmıştır. Otopilot kartına güç verildiği zaman bu blok kart üzerindeki ledleri yakıp söndürerek kullanıcıya FPGA'nin doğru şekilde uyandığını ve çalıştığını göstermektedir. Qsys isimli blok tasarımın en önemli birimidir. Qsys bloğunu bir çeşit konfigüre edilebilen mikrokontroller olarak nitelendirebiliriz. İçerisinde işlemci, ram, genel amaçlı giriş çıkış pinleri, uart modülleri, en önemlisi kişiye özel yazılmış vhdl modülleri bulunmaktadır. Bu kısım Qsys bölümünde detaylı olarak incelenmiştir.



Şekil 4.7 Fpga konfigürasyon şeması

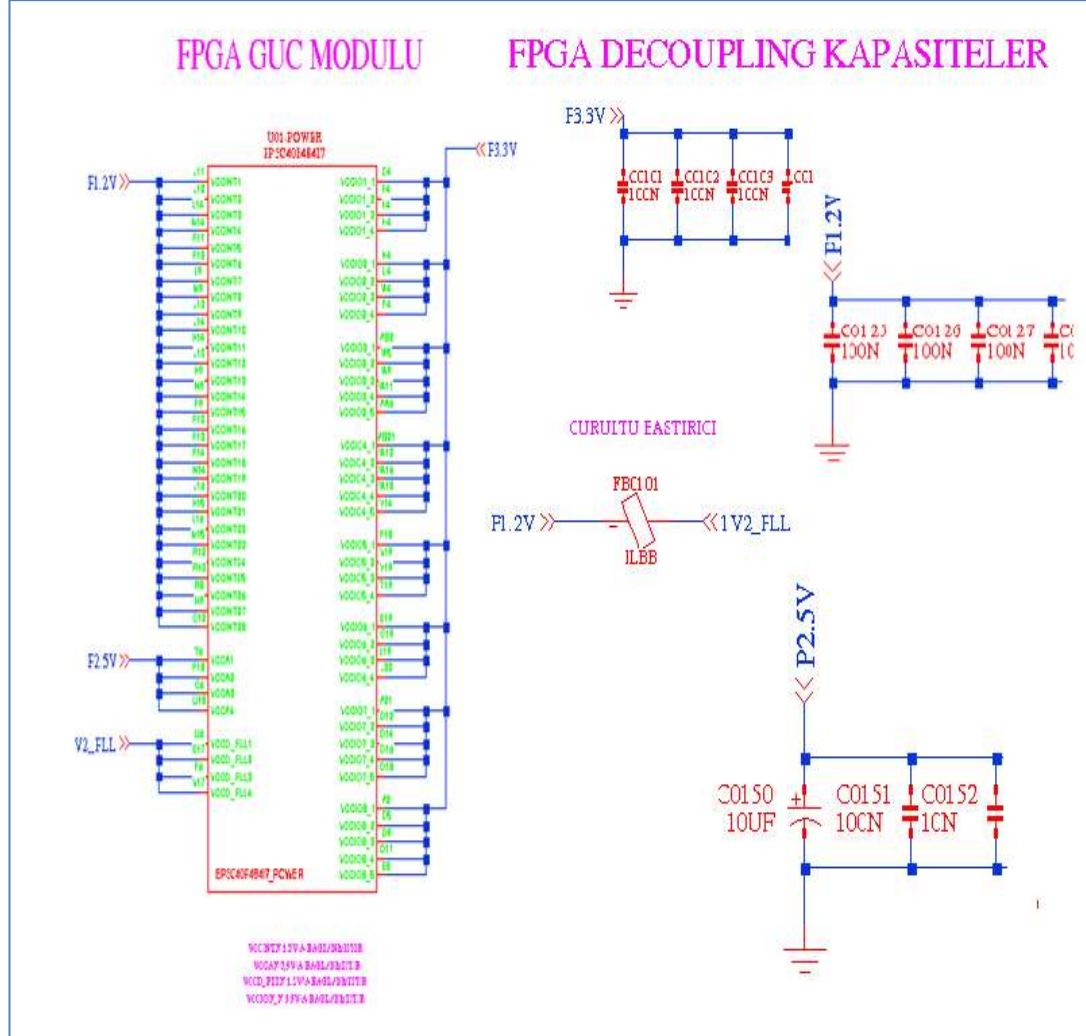
FPGA ram tabanlı bir yapıya sahiptir. Gücünü kestiğiniz zaman FPGA içerisindeki konfigürasyon verisini kaybeder. Konfigürasyon verisini yükleyebilmek için FPGA de iki tane konfigürasyon yapısı kurulmuştur. Bunlardan birincisi JTAG hattı üzerinden FPGA'e yüklemek diğeri ise FPGA'in her zaman kullanacağı yöntem olan seri E2PROM üzerinde kendi konfigürasyon verisini almak. Şekil 4.7 de bu konfigürasyonları nasıl yapıldığı şematikte anlatılmıştır. Aynı zamanda FPGA in konfigürasyon datası yüklerken hızı da ayarlanabilmektedir. Şekil 4.7 de gösterildiği gibi standart konfigürasyon hızı seçilmiştir.



Şekil 4.8 Fpga açılış reseti ve çalışma ledleri

FPGA'de bir diğer önemli düşünülmesi gereken nokta FPGA içerisindeki donanımı reset moduna sokmak ve FPGA uyandıktan sonra FPGA 'in doğru konfigüre olduğunu anlamaktır. FPGA içerisindeki vhdl kodlarını FPGA uyandıktan sonra reset modunda tutabilmek için FPGA'in bir tane pinine RC devresi kurulmuştur. Bu devrede yapılan şudur: FPGA pini kapasitörün ucuna bağlanmıştır. Sisteme güç verildiği zaman kapasitör dolana kadar pin düşük seviyede duracaktır. Böylelikle otopilot katına güç verildiği zaman FPGA içerisindeki tüm donanım reset moduna girdikten sonra çalışmaya başlayacaktır Bu durum özel olarak power-on reset durumu olarak da adlandırılmaktadır. FPGA doğru konfigüre olduğunu kullanıcıya belirtmek için ise Led ışık kullanılmıştır. Ledler FPGA uyandıktan sonra vhdl kodu tarafından yanıp söndürülmektedir. Ledlerden biri Qsys tarafından sürülmektedir. Bir diğeri ise vhdl kodu tarafından sürülmektedir. Bu anlatılanlar Şekil 4.8 de şematikte gösterilmiştir. FPGA'de bir diğer düşünülmesi gereken nokta

ise FPGA güç kısmıdır. Kullanılan FPGA sırasıyla üç tane farklı voltaja ihtiyaç duymaktadır. 1.2 Volt FPGA'in kore voltajı olarak adlandırılmaktadır. 3.3 Volt FPGA pinlerinin voltajıdır. 2.5 Volt FPGA içerisindeki kullanılan analog voltajdır. 1.2V voltajını aynı zamanda bir gürültü bastırıcıdan geçirilerek FPGA içerisindeki PLL'e verilmiştir. Şekil 4.9'da bu durumu anlatan şematik verilmiştir.



Şekil 4.9 Fpga güç modülü ve decoupling kapasitörleri

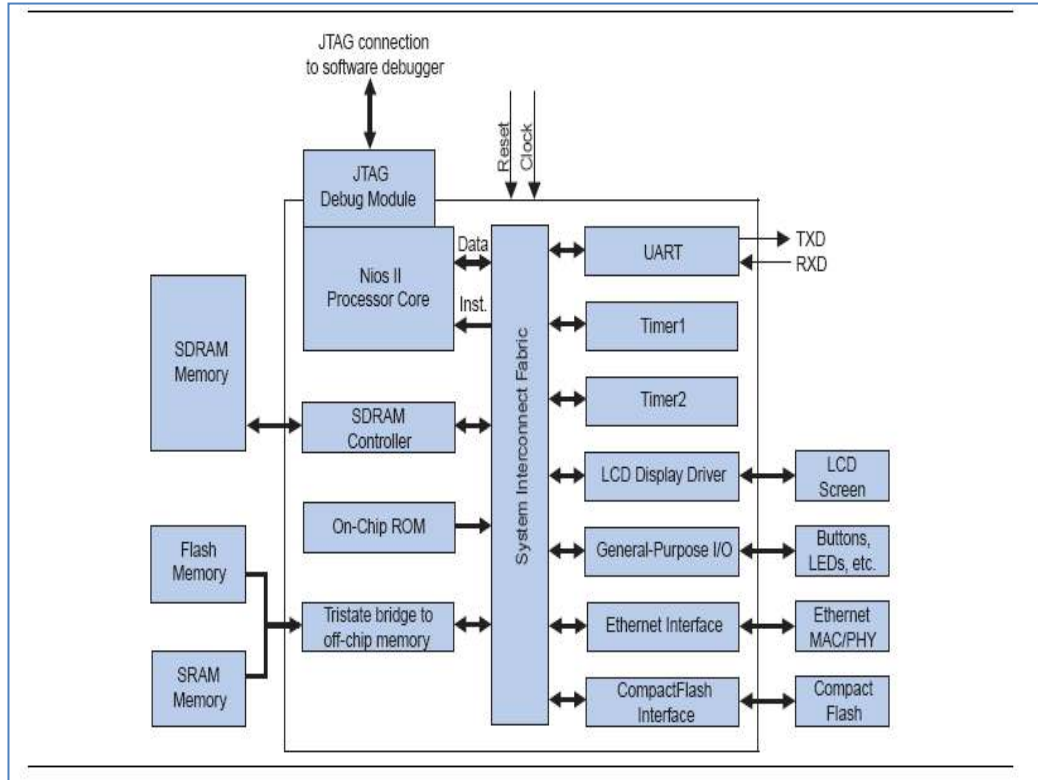
Yukarıdaki Şekil 4.9 da aynı zamanda FPGA güç voltajlarının decoupling kapasitörlerinede yer verilmiştir. Bu decoupling kapasitörlerinin amacı güç hattındaki FPGA içerisindeki transistörlerden kaynaklanan anahtarlama gürültüsünü süzmektedir.

4.1.1.2 Qsys Sistem ve NIOS II İşlemci

Qsys ,sistemi kurduğumuz yere verilen isimdir. NIOSII Qsys içerisinde kullanılan 32 bit işlemcinin ismidir (NIOS System ,2011). Qsys sistemine birçok çevre blok eklenebilir. Örneğin işlemcinin seriporttan haberleşme yapabilmesi için UART modulunun Qsys sistemine Qsys arayüzünü kullanarak eklenip derlemesi yeterlidir. Qsys sisteminde tüm çevre birimlerinin birbirleriyle haberleşmesini AVALON veri ve adres yolu üzerinden yapmaktadır (Qsys System, 2011). Çevre birimleri, AVALON veri ve adres yoluna bağlanırken çeşitli arayüzlere sahip olabilir. Bu arayüzler sayesinde birimler kolaylıkla birbiriyle anlaşabilmektedir. Örnek olarak aşağıdaki birbirleri ile anlaşılan arayüzler gösterilmiştir.

Avalon Memory Mapped Master → Avalon Memory Mapped Slave

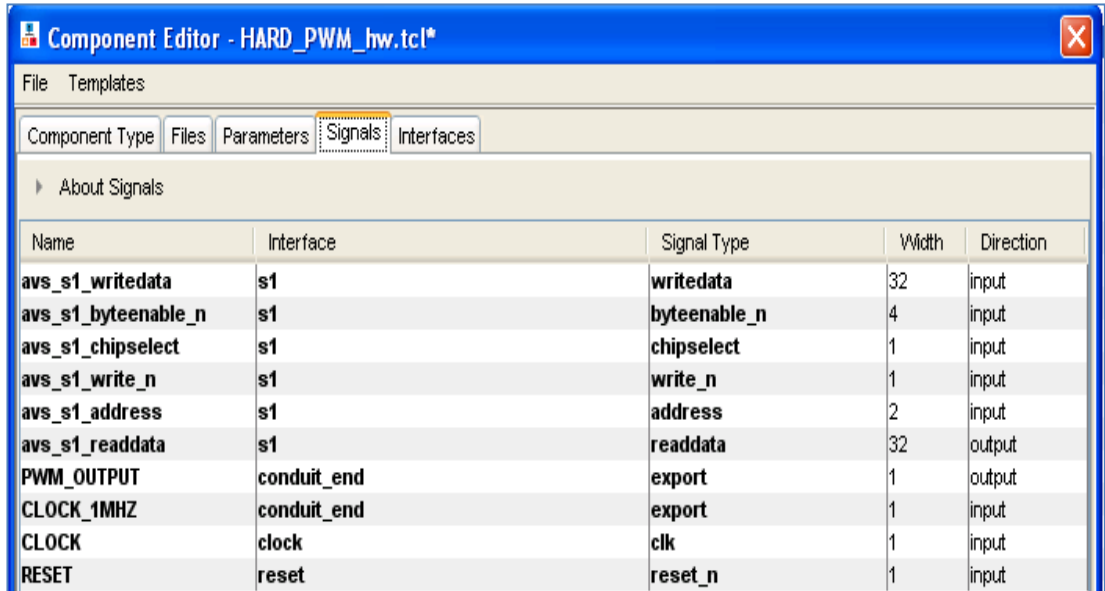
Avalon Streaming Master → Avalon Streaming Slave



Şekil 4.10 Qsys sistem örneği(Nios System, 2011)

Qsys sistemde kendi içinde hazır birimleri kullanabileceği gibi kişiye özel oluşturulan birimler de (vhdl modülleri) AVALON bus sistemine entegre edilebilir. Aynı zamanda işlemci bu sistemde olduğundan yazılım kodunun koşturulduğu yerde burasıdır. Şekil 4.10'da Qsys sisteminin daha iyi anlaşılabilmesi için bir Qsys sistem örneği verilmiştir. Örnek tasarımda görüldüğü gibi işlemci, diğer çevre birimleri AVALON adres ve data yolu üzerinden kontrol etmektedir. FPGA 'in doluluk sınırlarına kadar sisteme çevre birim eklenebilir.

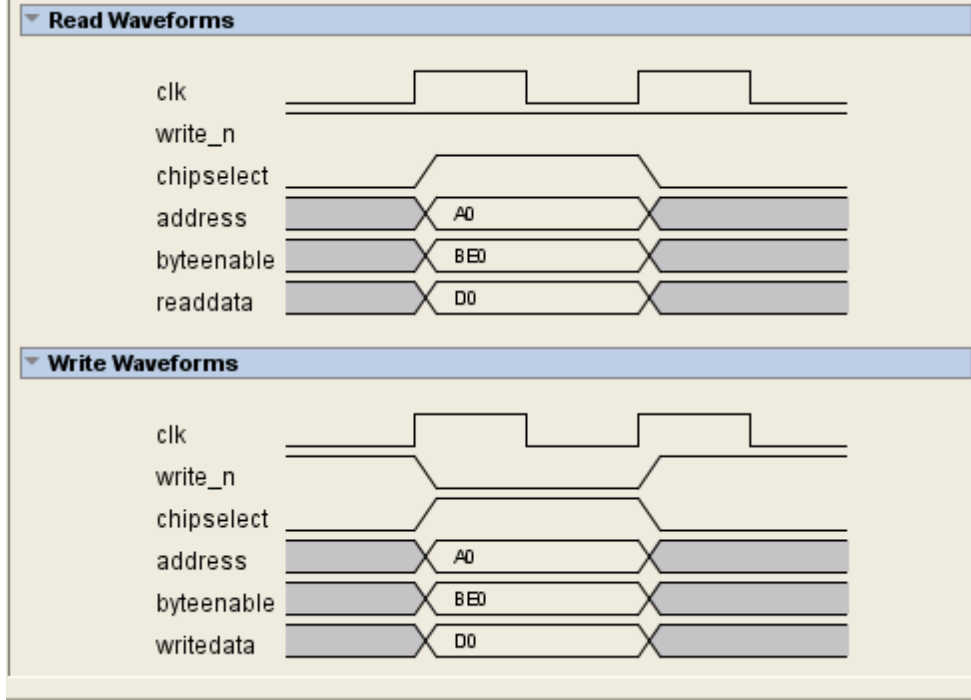
Otopilot kartı için Qsys'in tasarlandığı programın şekli aşağıda Şekil 4.13'te verilmiştir. Sistemi tasarlariken ilk eklenen kısmı NIOS II işlemci bloğudur. Daha sonra sisteme işlemcinin saat sinyali bağlanır. Bu sinyal FPGA 'de üretilen PLL bloğundan gelmektedir. Otopilot kartı üzerindeki seri E2PROM ile haberleşebilmek için sisteme EPCS Controller birimi eklenir. Bu birimin detayı E2PROM bölümünde detaylı olarak anlatılacaktır. Motor pwm sinyallerini sürebilmek için donanımsal vhd kodu yazılmıştır. Bu kodla motor pwm sinyallerinin frkansını ve 1 de kalma sürelerini değiştirilenebilir. Bu işlemleri işlemci üzerinden yapılabilmesi için yazılan vhd kodunun Qsys sistemin yani AVALON adres ve data yoluna bağlanması gerekmektedir. Bu işlemin nasıl yapıldığı Şekil 4.11'te gösterilmektedir.



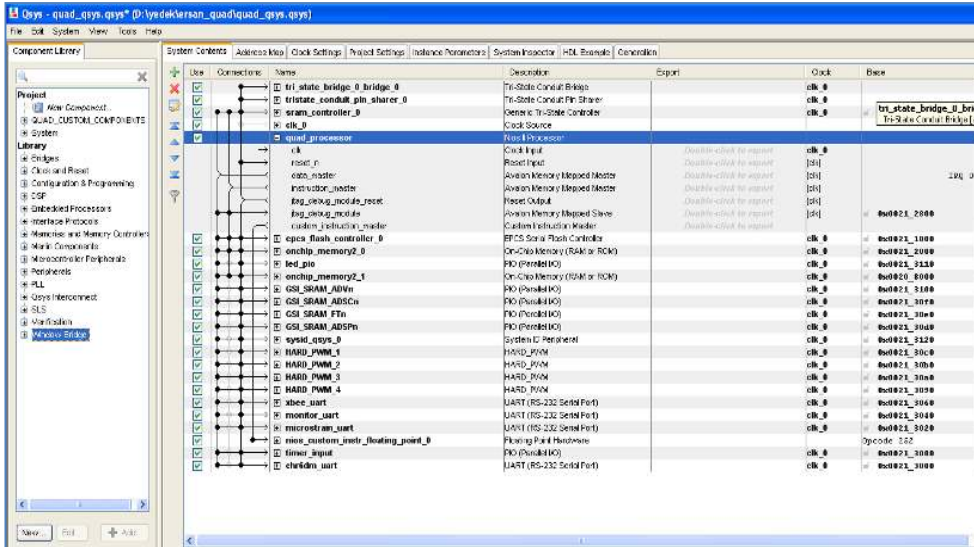
Name	Interface	Signal Type	Width	Direction
avs_s1_writedata	s1	writedata	32	input
avs_s1_byteenable_n	s1	byteenable_n	4	input
avs_s1_chipselect	s1	chipselect	1	input
avs_s1_write_n	s1	write_n	1	input
avs_s1_address	s1	address	2	input
avs_s1_readdata	s1	readdata	32	output
PWM_OUTPUT	conduit_end	export	1	output
CLOCK_1MHZ	conduit_end	export	1	input
CLOCK	clock	clk	1	input
RESET	reset	reset_n	1	input

Şekil 4.11 Qsys'de donanımsal pwm özel komponent oluşturma

Özel komponentler oluşturulurken AVALON adres ve data yoluna ne kadar sürede yazıp ne kadar sürede okuyacağı belirlenmelidir. Donanımsal pwm birimi oluşturulurken işlemci 1 adımlık saat sinyalleri ile bu birime yazıp okumaktadır. Şekil 4.12 yazma ve okuma zamanlaması gösterilmiştir.

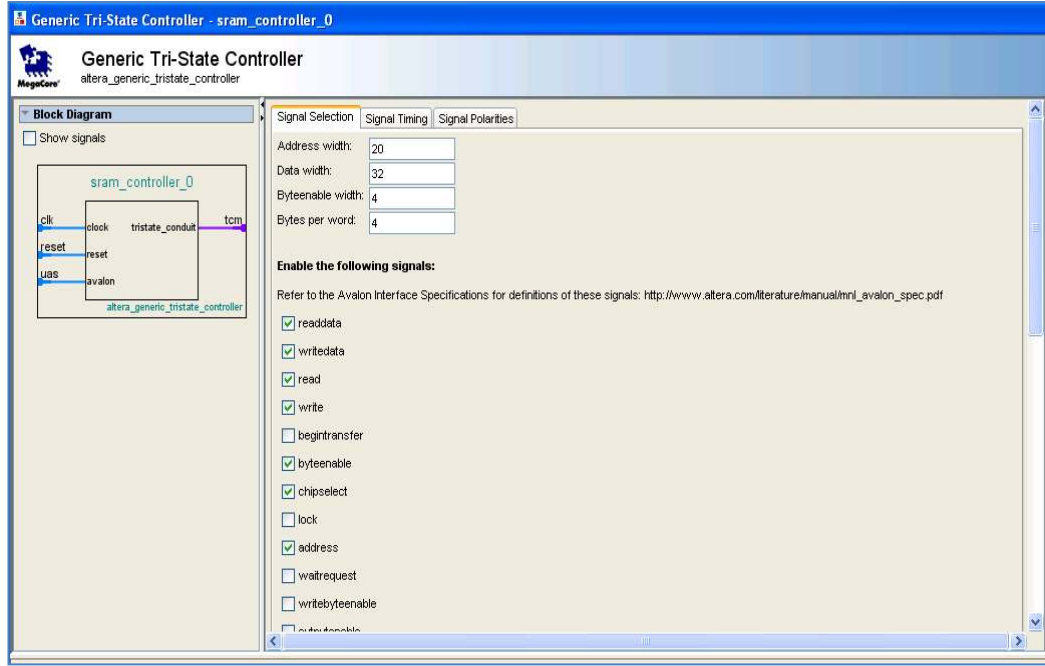


Şekil 4.12 Qsys’de donanımsal pwm Avalon arayüzü zamanlama



Şekil 4.13 Qsys tasarımı

Qsys'e eklenen diğ er bir komponent ise Generic Tri-State Kontrolördür. Bu komponentinin amacı ise SRAM ile FPGA arasındaki iletişimi sağlayabilmektir. Bu komponentinin oluşturulması Ş ekil 4.14 'te gösterilmiştir.

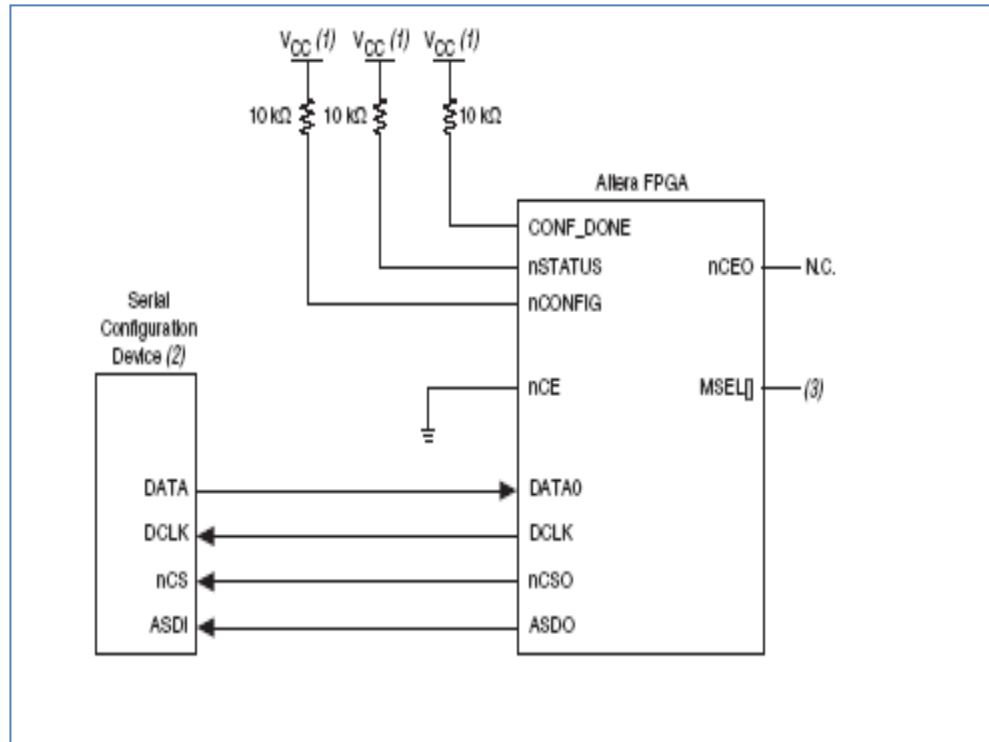


Ş ekil 4.14 Qsys generic tri-state kontrolör

SRAM ile FPGA arasındaki okuma ve yazma zamanlaması SRAM 'in kabul ettiği zaman aralıklarına bakılarak yapılmıştır. SRAM bölümünde SRAM 'den okuma ve yazma zamanlamaları çizdirilmiştir. Bir diğ er birim ise JTAG debug modülüdür. Sisteme otomatik olarak eklenmektedir. Bu modül sayesinde yazılımda çalışma zamanında hata ayıklama yapabilmektedir. 3 tane UART modülü sisteme eklenmiştir. Birinci uart modulu RF modulu için kullanılmaktadır. İkinci uart modülü CHR-6DM AHRS için kullanılmaktadır.Üçüncü uart modülü Microstrain 3DM-GX1 AHRS için kullanılmaktadır. Bütün uart nodülleri 115200 bps 'e set edilmiştir. İşlemcinin sistem zamanını alabilmesi için 32 bit lik genel amaçlı giriş çıkış pini ayrılmıştır. Yazılım ile donanım konfigürasyonları arasında senkronizasyonu sağlayabilmek için system id komponent'i konulmuştur. Farklı donanıma ait olan yazılım farklı bir donanıma atılmaya çalışıldığında sistem hata verip atmayacaktır.

4.1.2 EPCS64 (Flash) ve EPCS KONTROLLER

EPCS64 yazılım ve FPGA konfigürasyon verisinin tutulduğu yerdir. 64 Megabit lik hafızaya sahiptir (EPCS Flash ,2012). 2.7 volt ile 3.6 volt arasında çalışmaktadır. Geliştirilen sistemde 3.3V kullanılmaktadır. 100.000 kez silinip programlanabilme özelliğine sahiptir. FPGA in active serial modunda konfigure etmektedir. Sistemde güç açıldığı zaman FPGA'in DCLK pininden FLASH'a doğru saat sinyali oluşturulur. Ardından nCS pini FPGA tarafından sıfıra çekilir. FPGA komut ve adres bilgilerini ASDO pininden dışarı vermektedir. Bu komutları algılayan flash konfigürasyon verisini DATA pininden FPGA yollamaktadır. FPGA de DCLK pinindeki clock sinyalinin her düşen kenarında veriyi yakalamaktadır. EPCS Kontroller Qsys sistem içerisindeki bir modüldür. Bu modülün asıl amacı FLASH'ı JTAG üzerinden programlamaktır. Şekil 4.15 kartta kullanılan konfigürasyon yapısını göstermektedir.



Şekil 4.15 Epcs (Flash) konfigürasyon (Epcs Flash ,2012)

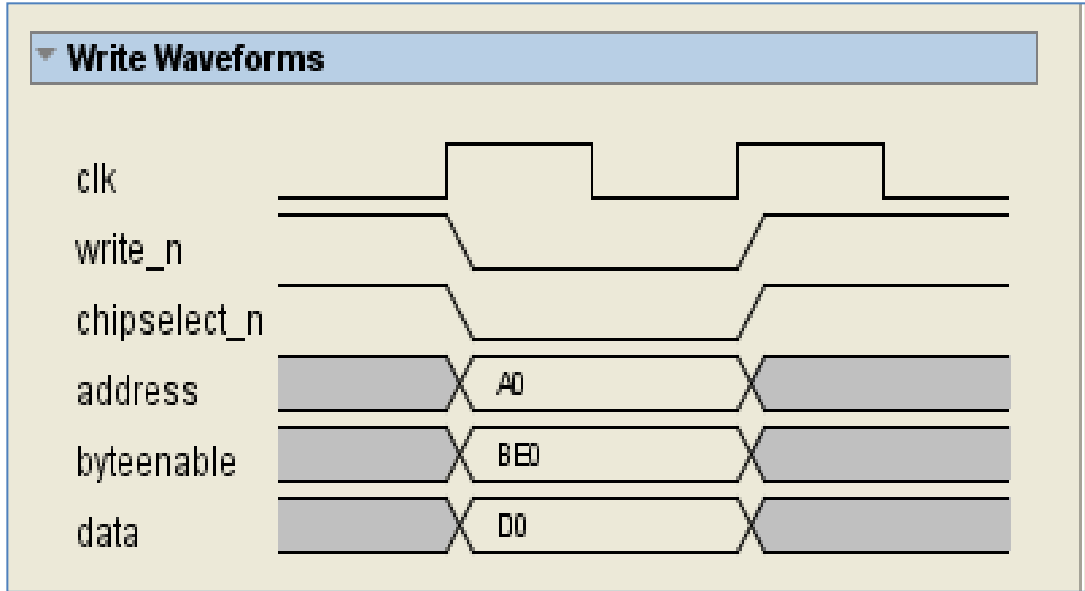
4.1.3 SRAM

Nios II işlemcinin yazılım kodunu EPCS Kontroller modülü EPCS64 (FLASH)'den alıp bu kodu SRAM üzerinde koşturmaktadır (Gsi Sram,2013). SRAM boyutu 36 megabayttır. SRAM in clock frekansı 100 Mhz dir ve işlemci frekansından 320 derece geriden gelmektedir. Böyle yapılmasının amacı ise sıcak soğuk durumlarında zamanlama sorununa yol açmaması içindir. SRAM modları aşağıda gösterilen Tablo 4.1'te mavi ile işaretlenenlere göre belirlenmiştir. Modlar sırasıyla açıklanırsa Birincisi Burst Order Control modudur, bu modda sram a bir adres verdikten sonra sırasıyla otomatik olarak adresini kendi artırmaktadır. Biz modu kullanmamakta, her seferinde adresi sram adresini kendimiz vermekteyiz. Bir diğer mod ise Output Register Control modudur. Bu modun amacı SRAM' den veri okunduktan sonra işlemciye direk olarak verilsin dıyedir. SRAM içinde bir kayıt kütüğüne yazılır ve bu kayıt kütüğünden hızlı bir şekilde okunur. Son mode ise Power Down Control modudur. Bu modun amacı ise SRAM uyku moduna geçirmektir. Elektronik kart SRAM pini yüksek voltaj değerinde tutularak SRAM hep aktif modda tutulur.SRAM in saat sinyali kesildiği zaman uyku moduna geçmektedir.

Tablo 4.1 Sram mode tablosu (Sram,2013)

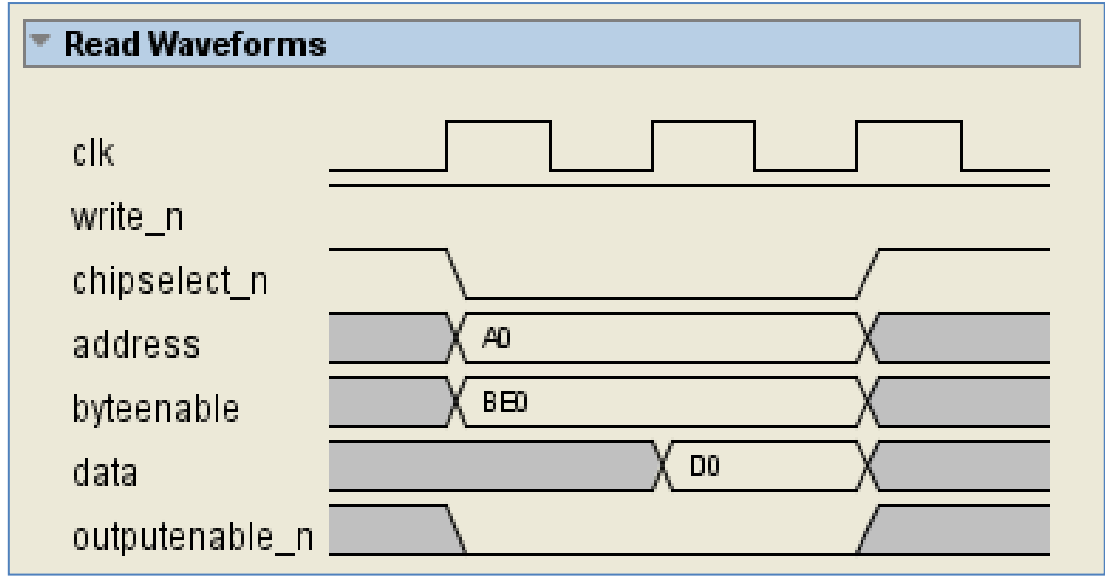
MODE NAME	PIN NAME	STATE	FUNCTION
Burst Order Control	LBO	Low	Linear Burst
		High	Interleaved Burst
Output Register Control	FT	Low	Flow Through
		High or NC	Pipeline
Power Down Control	ZZ	Low or NC	Active
		High	Standby, IDD = ISB

SRAM iletişimi için ayrı bir ip yazılmamıştır. Çünkü SRAM arayüz sinyal yapısı Qsys 'deki Avalon veri ve adres yolu ile aynı yapıdadır. Generic Tri-Sate Kontrollör bloğu ile işlemciye bağlanmıştır. Asağıdaki şekillerde işlemci ile SRAM arasındaki konuşmasının yapısı açıklanmıştır. İşlemcinin kendi ürettiği saat sinyalinin yükselen kenarında işlemci yazma enable pinini ve chip enable pini düşük seviyeye çekmektedir. Bu sinyaller aktif düşüktür. Aynı zaman aralığında işlemci adresi adres yoluna ve yazılacak veriyi de data yoluna koymaktadır. Aynı zamanda işlemci ile 32 bit ile konuştuğu için SRAM tüm bayt yazma pinlerinin düşük seviyeye çekmektedir. Şekil 4.16'te yazma sinyalinin zamanlaması gösterilmektedir.



Şekil 4.16 Sram yazma zamanlaması

İşlemcinin kendi ürettiği saat sinyalinin yükselen kenarında işlemci okuma enable pinini ve chip enable pinini düşük seviye çekmektedir. Bu sinyaller aktif düşük seviyedir. Aynı zaman aralığında işlemci adresi, adres yoluna koymaktadır. SRAM de veriyi, veri yoluna koymaktadır. Şekil 4.17'de okuma sinyalinin zamanlaması gösterilmektedir.

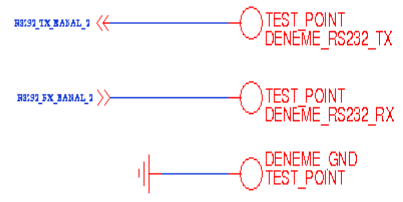


Şekil 4.17 Sram okuma zamanlaması

4.1.4 RS-232/RS-422

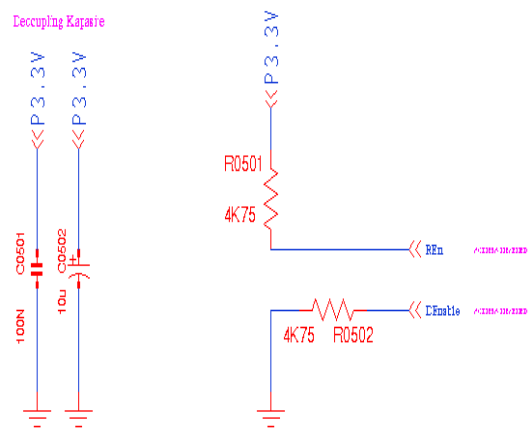
Otopilot kartında RS-232 sürücüsü olarak INTERSIL firmasının 3 kanallı transiver entegresi kullanılmıştır (RS-232 Transceivers, 2006). RS-422 entegresi olarak Linear Technology firmasının 1 adet LTC2855HDE (Full Duplex) entegresi kullanılmıştır (RS-422 Transceivers, 2007). RS-422 entegresi, çalışma sırasında aktif edilebilen terminasyon dirençlerini içerisinde barındırmaktadır. FPGA’de gerçekleştirilen kod ile kartın dış dünya ile olan yüksek hızlı seri haberleşmesinde RS-422 sürücü entegreleri üzerinden gerçekleştirilmektedir. Full duplex entegresi üzerinden otopilot kartının verileri uart protokolunda verilmektedir. Veriler toplanırken bilgisayara aktarılırken RS-422 formatından RS-232 formatına çevrilmektedir. Entegrenin FPGA’e bakan tarafları tek yönlü bağlantı iken entegrelerin konektöre bağlanan tarafları ise diferansiyel çıkıştır. Bir Megabit hızında veri taşınmaktadır. RS232 sürücüsü FPGA ile 3DM-GX1 AHRS ile arasındaki sinyal seviyesi geçişi sağlamaktadır. 3 kanaldan iki tanesi kullanılmaktadır. Kanallardan bir tanesi de bir yedek konektör üzerinden dışarıya verilmektedir. Şekil 4.18’te RS-232 devresi çizilmiştir. Şekil 4.19’da RS-422 devresi çizdirilmiştir.

1



Şekil 4.18 Rs-232 devresi

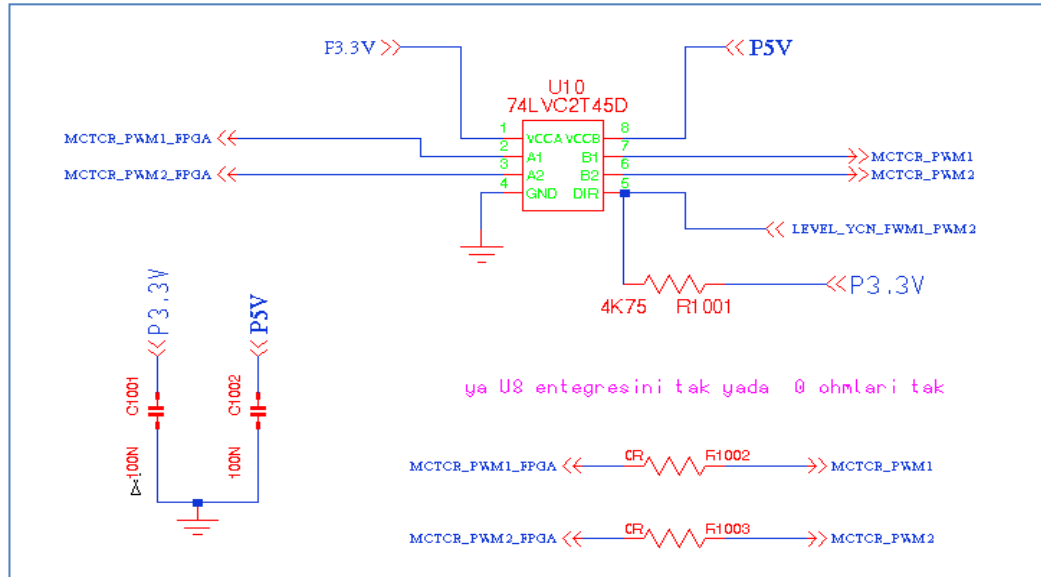
RS422 TRANCEIVERS (FULL DUBLEX)



Şekil 4.19 Rs-422 devresi

4.1.5 Seviye Kaydırıcılar

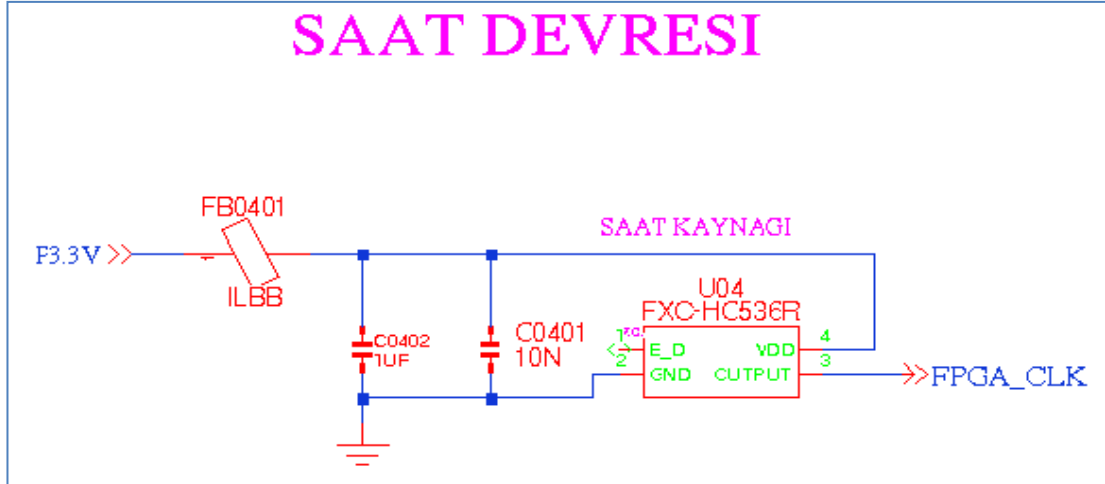
Otopilot işlemci kartında FPGA pinleri 3.3 volt ile çalışmaktadır. Motor sürücü kartlarını pwm'leri 5 volt ile çalışmaktadır. FPGA ile motor sürücü kartları arasındaki iletişimi sağlayabilmek için 3.3 volttan 5 volta çevirici kullanılmıştır. TI firmasının 74LVCT45D isimli çıkış ya da giriş olacağı ayarlanabilen ürün kullanılmıştır (Level Shifter, 2011). Şekil 4.20'de tasarlanan devre verilmiştir. Aynı zamanda bu entegre karta dizilmediği takdirde bu entegreyi atlayacak 0 ohm dirençler koyulmuştur.



Şekil 4.20 Seviye kaydırıcı devresi

4.1.6 Osilatör

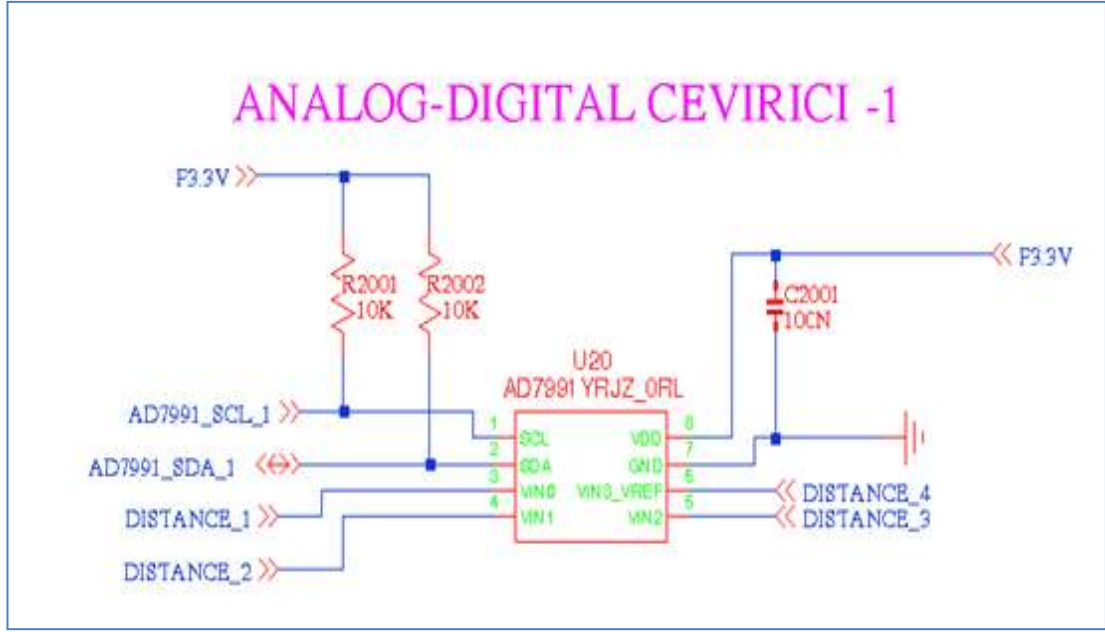
Otopilot kartında bir adet osilatör 20 Mhz lik osilatör kullanılmaktadır. FPGA sadece bu saat sinyalinde beslenmektedir. Osilatör düşük jittre sahiptir. Hassasiyeti bakımından ± 20 ppm dir. Firma adı Fox tur. Ürün kodu FXO-HC536R-20 dir (Oscillator, 2008). Pinlerinin voltajı ise 3.3 voltur. Besleme gerilimi ise 3.3 voltur. Besleme geriliminin önüne gürültü bastırıcı konmuştur. Şekil 4.21'de de osilatörün bağlantıları verilmiştir.



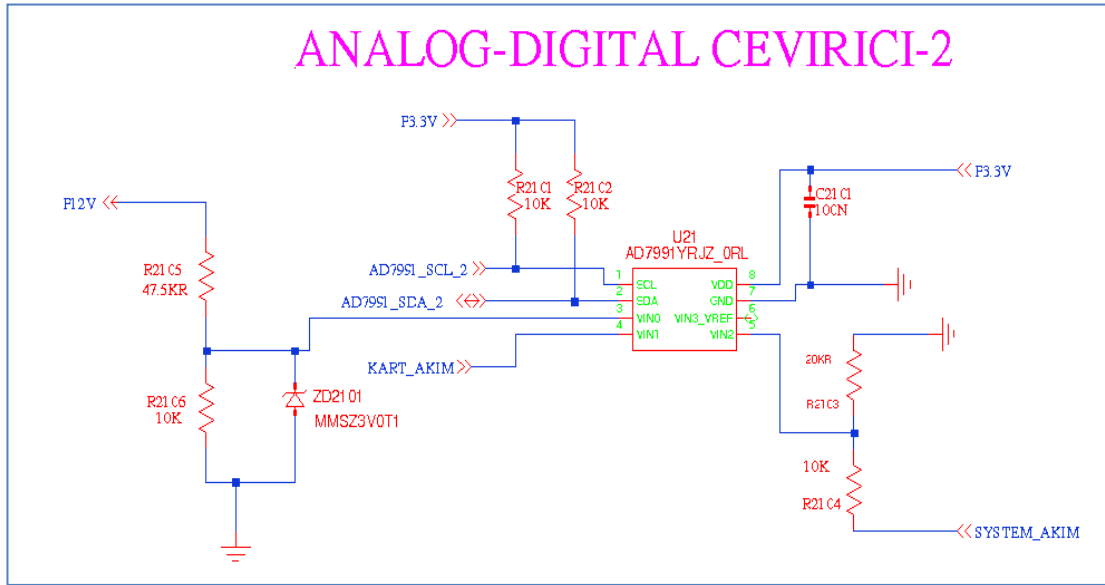
Şekil 4.21 Osilatör devresi

4.1.7 ADC Ve Akım Sensörü

Otopilot kartında iki tane Analog Devices firmasının AD7991 adlı analog-digital çeviricisi kullanılmaktadır(ADC, 2007). Bit hassasiyetleri ise 12 bittir. Bir mikrosaniyelik örnek alma hızına sahiptir. Herbir ADC 'de 4 örnek alma tane kanal vardır. ADC ile haberleşme arayüzü ise I2C dir. ADC lerden bir tanesi 4 tane analog uzaklıkölçerlerden gelen bilgiyi örneklemektedir. Diğer ADC ise 3 kanalı örneklemektedir. 1. kanal batarya girişindeki voltajı ölçmektedir,2. Kanal otopilot kartının çektiği akımı ölçmek kullanılmaktadır. Bunu şöyle yapmaktadır. Otopilot kartının güç girişinde kartı kısa devrelerden ve kaçak akımlardan korumak için koyulan hotswap kontrolör vardır. Bu entegrenin pinlerinden biri de üstünden geçen akım değerini voltaj oranında vermektedir. Böylelikle kartın üzerinden geçen akım bulunmaktadır. 3. Kanal ise tüm sistemin bataryadan çektiği akımı örneklemektedir. Bu işlem şu şekilde gerçekleştirilmiştir. Sistem bataryasına seri bağlanmış LEM firmasına ait LTS 25NP isimli akım sensörü vardır (Current Sensor, 2009). Bu sensör 80 ampere kadar ölçüm yapabilmektedir. Sensörün çıkışı ise üzerinden geçen akım ile doğru orantılı analog voltaj üretmektedir. Bu voltaj 2 ADC nin 3 kanalı tarafından sayısala çevrilmektedir. Şekil 4.22'de ve Şekil 4.23'te ADC tasarımlarının şematikleri verilmiştir.



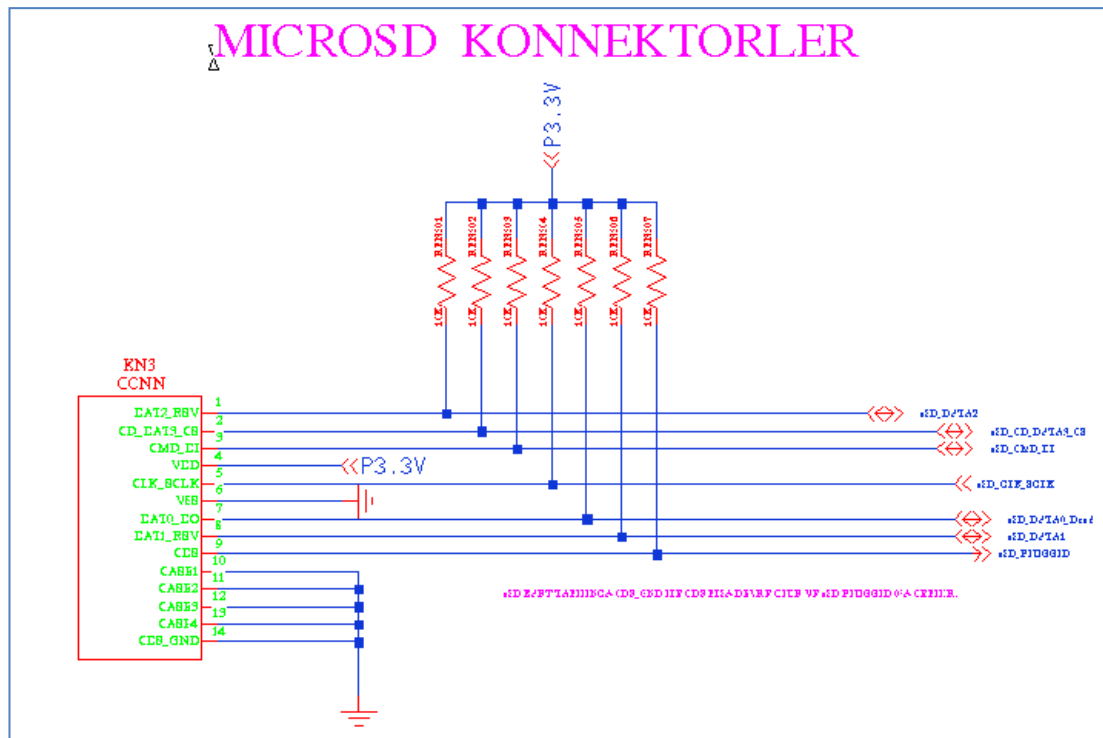
Şekil 4.22 Adc-1 devresi



Şekil 4.23 Adc-2 devresi

4.1.8 MicroSD Hafıza Kartı

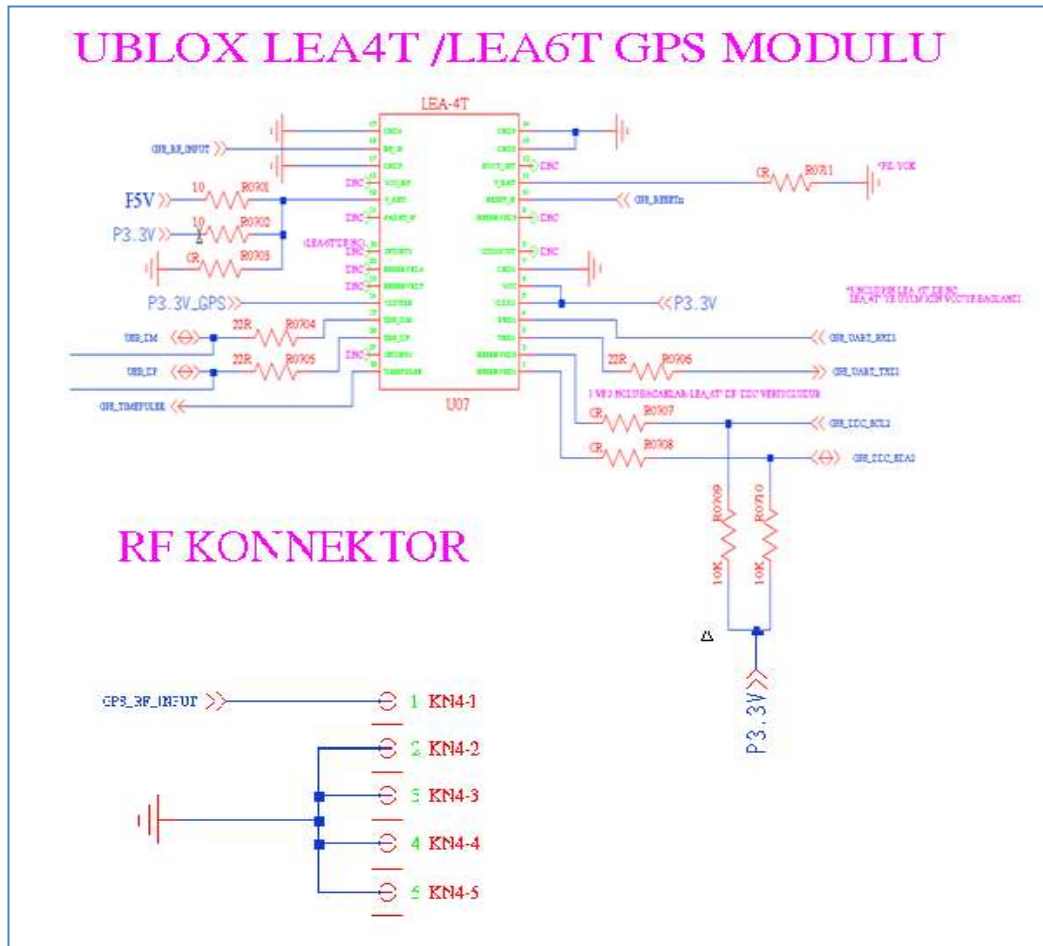
Otopilot kartında sistemde büyük hafızalı kayıt yapılması gerektiğinde Bu ihtiyacımızı karşılamak için microSD hafıza kartı kullanılmıştır. Delkin Devices firmasının SD02GHSSD-S2000-B nolu 2GB hafıza sahip kartı kullanılmıştır. Çalışma voltaj seviyesi 2.7 ile 3.6 volt arasında değişmektedir. FPGA ise SPI protokolu ile haberleşmektedir. Kart yuvasıdan çıkarıldı veya takıldı özelliğine sahiptir. Hafıza kartına yazmak engelleyecek mekanik anahtarı vardır. Şekil 4.24'te microSD konektörünün tasarımı verilmiştir. Aynı zamanda microSD kart ile hızlı iletişim kurmak istiyorsak ikinci bir paralel ve hızlı 4 veri pinine sahip bir iletişim arayüzü olarakta kullanılabilir. Veri seri yollanıp okunacağına 4 paralel pinde taşınarak sistem hızlandırılır. Paralel arayüzün hızı microSD default hızındaysa veri iletişim hızı 12.5 MegaBayt/saniye kadar ulaşabilir. Yüksek Hız modunda ise veri iletişim hızı 25 MB/sec kadar ulaşabilir.



Şekil 4.24 Microsd konektör devresi

4.1.9 GPS Modülü Ve Anteni

GPS modülü quadrotor konumunu belirleyebilmek için kullandığımız moduldür. UBLOX firmasının LEA-6T isimli 16 kanallı L1 frekansında GPS modulu kullanılmıştır(Gps Modul, 2013). Kullanılan GPS modülünün maksimum veri güncelleme hızı 4 hzdir. GPS modülü kartın üzerine yüzey monte olarak lehimlenmiştir. Birden fazla iletişim arayüzüne sahiptir. USB ve UART arayüzleri vardır. FPGA ile konuşması UART üzerinden gerçekleşmektedir. RF antene ihtiyaç duymaktadır. GPS modülünün pinlerini voltaj aralığı ve GPS modülünü besleme gerilimi 2.7 ile 3.3 volt arasında değişmektedir. Şekil 4.25'te GPS modülünün RF antenin tasarım şematikleri verilmiştir.



Şekil 4.25 Gps modülü ve rf anten devresi

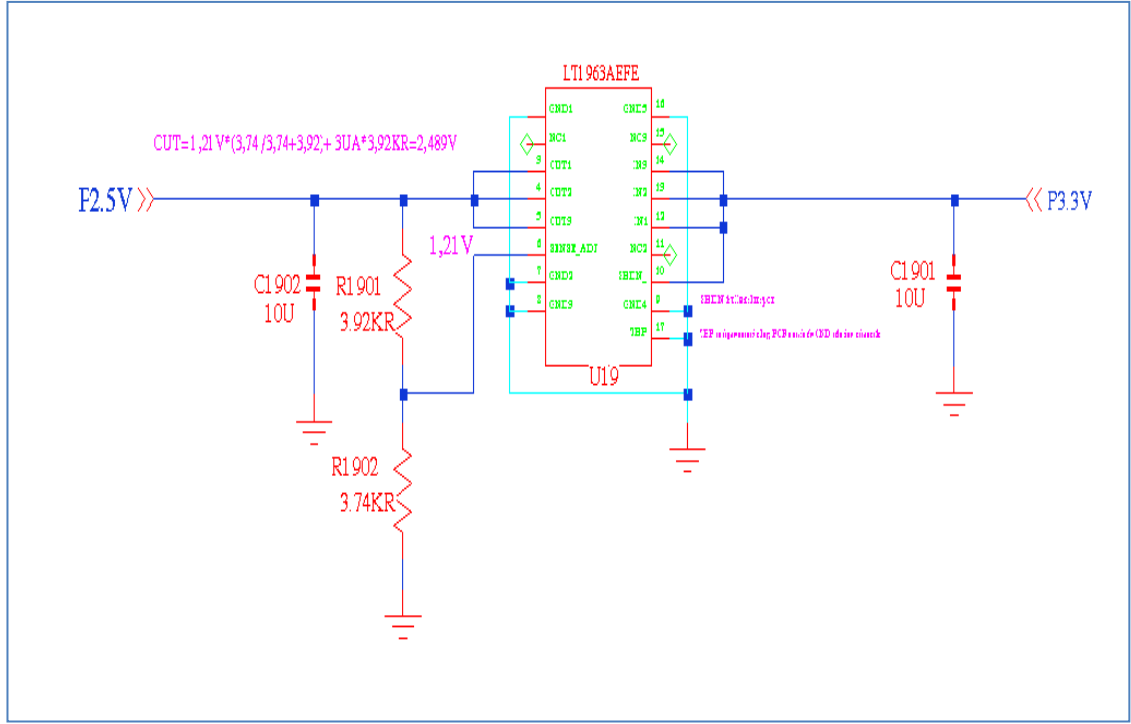
4.1.10 Güç Katı Bölümü

Otopilot kartında üretilip kullanılacak olan gerilim ve akım değerleri Tablo-4.2’de gösterilmektedir. Buna göre istenen akım ve gerilim değerlerine göre en uygun DA-DA çevirici yapısı seçilmiştir. Lineer regülatör ve anahtarlama regülatör olmak üzere iki türde DA-DA çevirici yapısı vardır.

Tablo 4.2 Voltaj ve akım ihtiyaçları tablosu

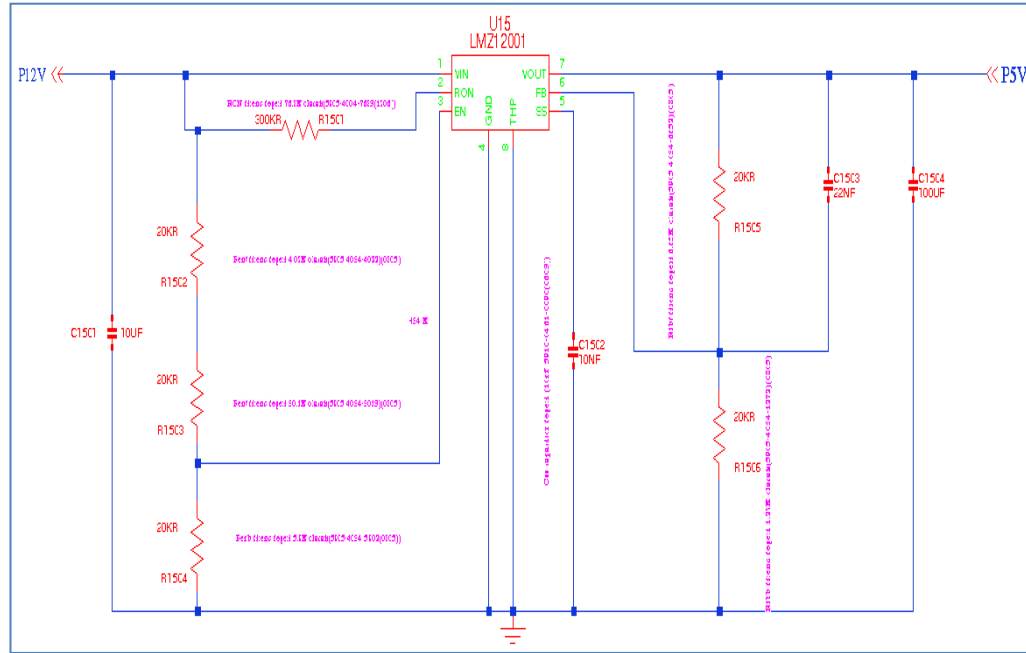
Kartta Kullanılacak Gerilimler (V)	İstenen Akım Değerleri maksimum(A)
1.2V	2
3.3V	2
5V	2
7V	2
2.5V	0.01

Lineer regülatörler temelde ayarlanabilir bir direnç gibi çalışmaktadır. Devrede bulunan seri bağlı transistör aktif bölgede çalışmaktadır. Tipik bir lineer regülatör Şekil-4.26’da gösterilmektedir. Seri bağlı transistör, giriş gerilimi ve çıkış gerilimi arasındaki gerilim farkını üzerine alacak biçimde çalışır ve üzerinde güç kayıpları oluşmaktadır. Çok yüksek akımlarda ısınma sorunu ortaya çıkacağı için düşük akımlarda tercih edilmektedir. Tablo 4-2’e göre istenen 2.5V geriliminin akım seviyesi çok düşük olduğundan tasarımda lineer regülatör kullanılmıştır. Isınma sorununun olmaması nedeni ile üretilcek olan diğer gerilimler için ise anahtarlama çevirici kullanılmıştır. Otopilot kartında 2.5 V üretmek için kullanılan entegre Linear Technology Firmasının LT1963AEFE isimli entegresidir. Şekil 4.26’da 2.5 lineer regülatörün tasarımı verilmiştir. Lineer regülatör bir diğer avantajı ise az gürültülü voltaj üretmeleridir.

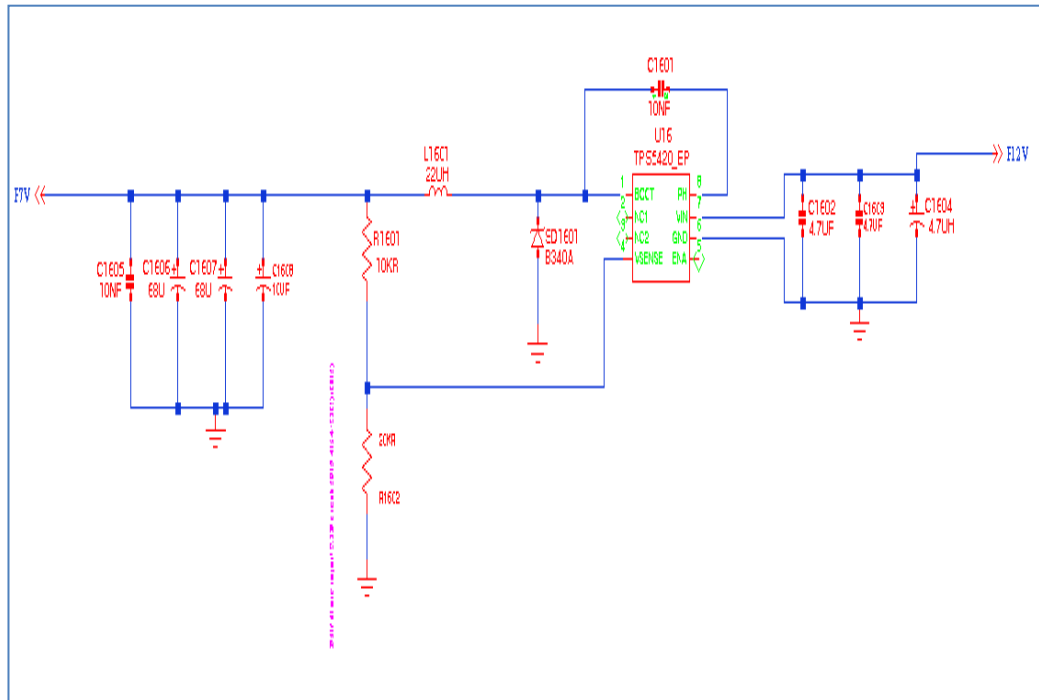


Şekil 4.26 2.5V Lineer regülatör

Anahtarlamalı çeviricilerde bulunan transistör lineer regülatörlerin aksine ya tamamen açık ya da tamamen kapalı bir şekilde çalışmaktadır. Aktif bölgede çalışma durumu söz konusu olmadığından çok düşük güç kaybı meydana gelmektedir. Kartta bulunan 1.2V, 3.3V, 5V ve 7V gerilimleri 2A gibi yüksek akım talep ettiğinden anahtarlamalı çevirici kullanılacaktır. Anahtarlamalı çeviriciler temelde alçaltıcı, yükseltici ve alçaltıcı - yükseltici türlerinde bulunmaktadır. Karta gelen giriş gerilim değeri 14.8V olması nedeni ile alçaltıcı tipte anahtarlamalı çevirici kullanılacaktır. Alçaltıcı çevirici, giriş geriliminden daha düşük seviyede bir ortalama çıkış gerilimi üretir. Anahtarın iletimde olduğu sürece, diyot ters kutuplanır ve giriş devresi hem yüke hem de endüktansa enerji sağlar. Anahtarın kesimde olduğu sürede ise, endüktans akımı diyot üzerinden akar ve üzerinde biriktirdiği enerjinin bir kısmını yüke aktarır. Kartta bulunan 1.2V, 3.3V, 5V ve 7V gerilimleri piyasada bulunan NATIONAL INSTRUMENT firmasının LMZ12003 isimli ve TI firmasının TPS5420 alçaltıcı çevirici kontrol entegreleri kullanılarak üretilmiştir. Sırasıyla şekil 4.27’de ve şekil 4.28’de LMZ12003 ile TPS5420 ile yapılan tasarımlar verilmiştir. LMZ12003 tasarımında indüktör kullanılmamıştır. İndüktör entegrenin içinde mevcuttur.



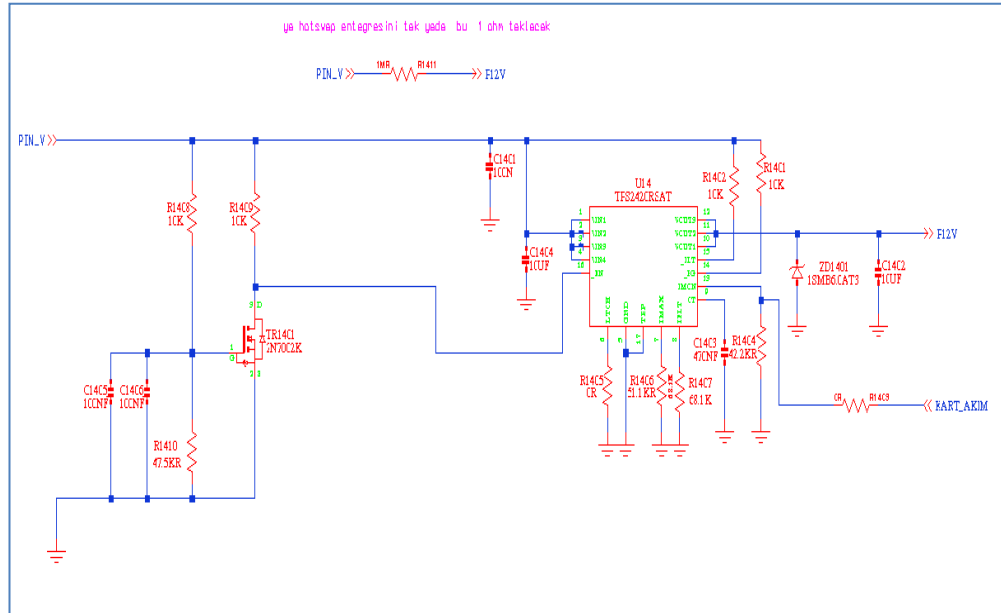
Şekil 4.27 Lmz12003 anahtarlamalı regülatör



Şekil 4.28 Tps5420 anahtarlamalı regülatör

4.1.1 Koruma Devresi

Otopilot kartı üzerinde herhangi bir kısa devre sonucunda veya fazla akım istendiğinde kart kendisini ve üzerindeki entegreleri yakmasın diye kartın güç girişine koruma devreleri konmuştur. Bu durumu gerçekleştiren entegrelere hotswap kontroller denmektedir. TI firmasının TPS2420 adlı bir yük koruma entegresi kullanılmıştır (Protection Circuit, 2009). 3V-20V aralığında inrush akımı limitlemede ve hata durumlarında devreyi açmada kullanılmaktadır. Hata durumlarında akım tamamen kesilmeden önce entegrede programlanabilir bir zamanlayıcı çalıştırmakta ve zamanlayıcı çalıştığı sürede yüke sadece programlanan maksimum akımın gitmesine izin vermektedir. Entegre bunu anahtar olarak kullandığı 30 mohmluk mosfeti lineer sürerek yapmaktadır. Bir de çok yüksek akım çeken hatalar için 2. bir akım limiti programlanmakta ve entegre akım bu seviyeye ulaşırsa hiç zamanlayıcıyı çalıştırmadan yük akımını hemen kesmektedir. Bu çift seviyeli koruma devrenin açılırken anlık olarak çektiği yüksek akımları ve overload durumları limitler fakat devreyi tamamen kapatmadığı için güvenli bir startup sağlamaktadır. Şekil 4.29’de koruma devresinin tasarımı verilmiştir.



Şekil 4.29 Koruma devresi

Güç hattına başka eleman koymadan sadece entegre ile akım okunabilmektedir. Okunan akımın hangi kazanç ile çarpılacağı programlanabilmektedir. Bunun dışında fault ve powergood pinleri ile de yükün güvenli bir şekilde çalışıp çalışmadığı izlenebilmektedir. Entegre yük akımını kestikten sonra isteğe göre ya hep kapalı kalır ya da tekrar çalışmaya programlanabilir. Giriş voltajının 3V ile 18V aralığında olması önerilmektedir. Çıkış voltajı güç hattı üzerindeki mosfet nedeniyle aşağıdaki üzerinde geçen akım ile birlikte doğru orantılı şekilde düşmektedir. Giriş voltajının tam anlamıyla yükselmeden entegrenin yüke güç vermesi durumunda giriş voltajı anlık olarak düşebilir ve bu da under voltage durumundan dolayı entegrenin kendini kapatmasına sebep olabilir. Bu nedenle entegre enable edilmeden önce giriş güç geriliminin tam olarak yükselmesinin beklenmesi önerilmektedir. Bu durumu garantilemek entegrenin enable pininin önüne girişi gücü stabile olduktan sonra entegreyi mosfetli devre kurulmuştur. Bu durumdan böylelikle kurtulunmuştur. Koruma devresi istenildiği zaman kart üzerinde atlanabilir. Kart üzerindeki TPS2420 dizdirilmeyip giriş gücü direk olarak güç regülatörlerine aktarılabilir.

4.1.12 Xbee RF Modülü

Xbee RF modülünün amacı otopilot kartı ile bilgisayar komuta kontrol yazılım arasındaki iletişim sağlamaktır (Xbee Modul, 2008). Elektronik kart üzerine standart bir konnektör ile takılmaktadır. Xbee modülü 2.4 Ghz bandında güvenilir bir RF iletişim sağlamaktadır. Şekil 4.30'ta Xbee Rf modüllerinin fiziksel gerçek fotoğrafı verilmiştir.

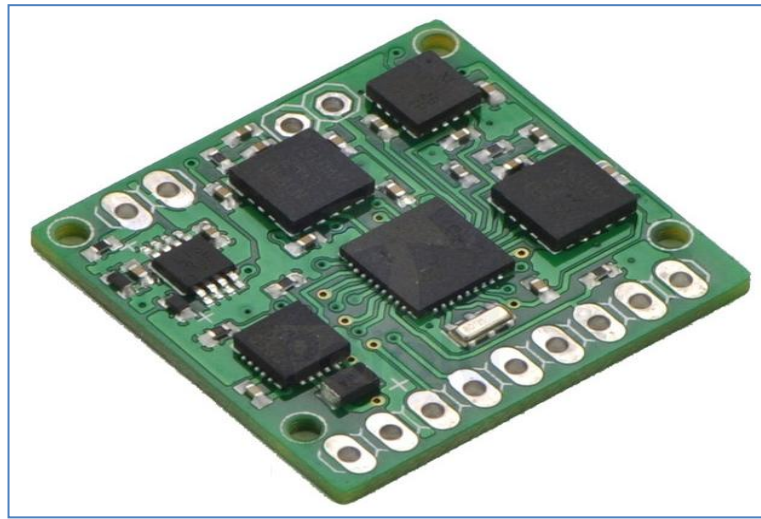


Şekil 4.30 Xbee rf modüller

Xbee RF modüllerin veri hızı 250 kbit/saniye kadar çıkabilmektedir. RF modül ile FPGA arasında uart protokolu ile 115200 bit/saniye hızında haberleşmektedir. Xbee modüllerin besleme gerilimi 3.3 voltur. Xbee modülünün pin voltajları da 3.3 voltur. FPGA bacakları ile pin uyumludur. Modul full duplextir. Aynı anda veri alıp ve yollayabilmektedir. Modülün üzerinde yüzey monte anten bulunmaktadır.

4.1.13 CHR-6DM AHRS

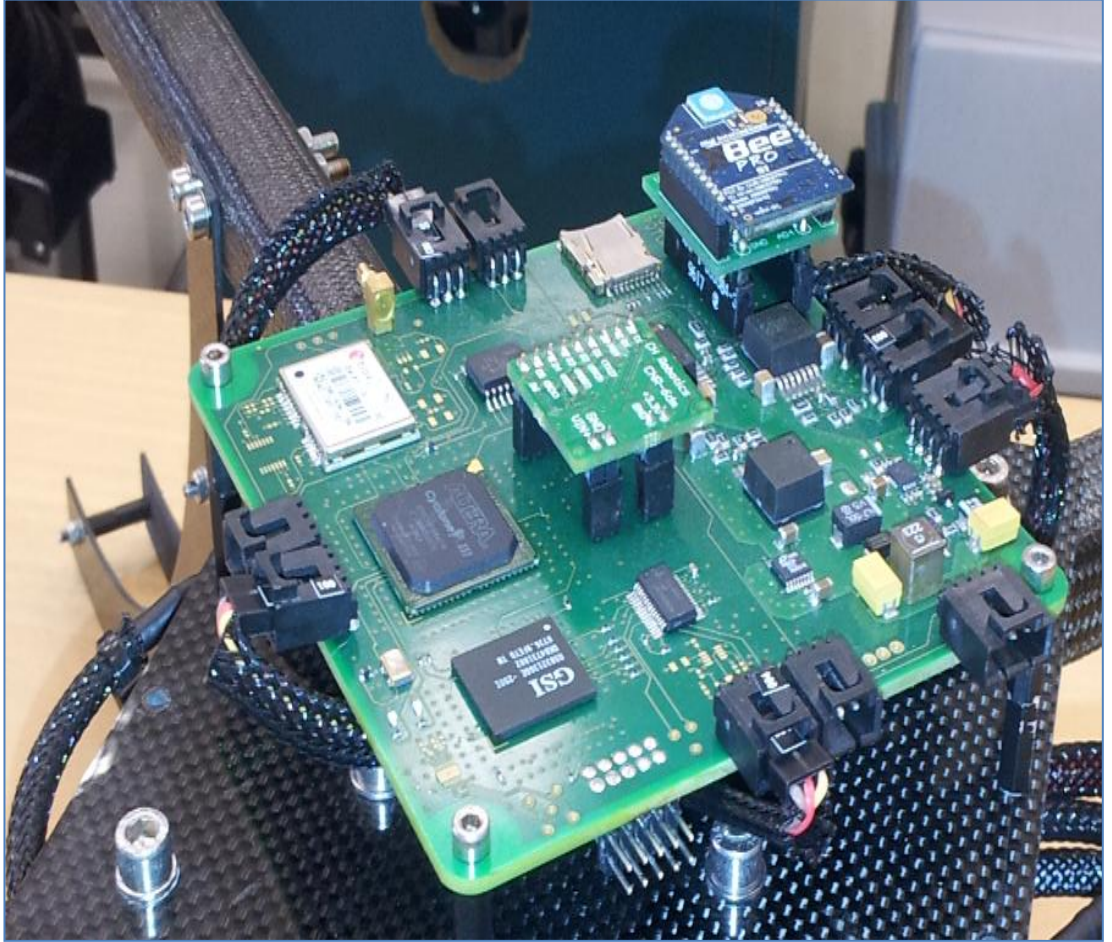
CHR-6DM kart üzerine takılan AHRS (Attitude Heading Reference System) dir. Modül şeklindedir. Otopilot kartı üzerine standart konektör üzerinden takılır. Sistemin durum açılarını en iyi şekilde alabilmesi için kartın geometrik merkezine takılmaktadır. CHR-6DM nin üzerinde 3 eksen ivmeölçer, 3 eksen dönü ölçer, 3 eksen de magnetometre bulunmaktadır (AHRS1, 2010). CHR-6DM sensörlerden aldığı bilgileri kalman filtre ile birleştirerek sistemin yuvarlanma, yunuslama ve dümen açılarını hesaplamaktadır. Aynı zamanda kendi üzerinde bulunan ham sensör verilerini de (ivme, açısal hız) arayüzü üzerinden dışarı vermektedir. FPGA ile uart protokolu ile 115200 bit/saniye üzerinden konuşmaktadır. Sensör veri çıkış oranı 20 hz den 300 hz kadar ayarlanabilir. Şekil 4.31’de AHRS nin fiziksel görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.31 Chr-6dm ahrs

4.1.14 Elektronik Kartın Dizdirilmesi ve Toplanması

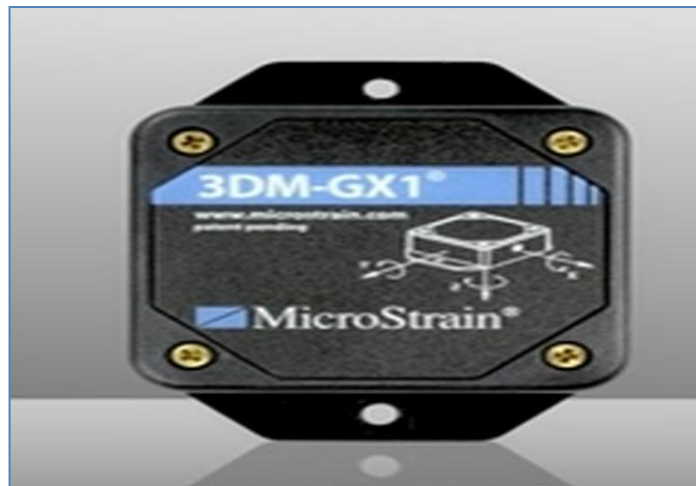
Elektronik kartın 10 katlı pcb üretimi yapıldıktan sonra malzemeler toplanmış ve malzemeler kartın üstüne BGA (fpga ve sram gibi) malzemelerden başlayarak dizdirilmiştir. Malzemeleri karta lehimlerken malzemelerin kurşunsuz olup olmadığına dikkat edilmiştir ve ona göre bit ıstma eğrisi uygulanmıştır. Kart ilk toplamasında sonra çalışmıştır. Bütün fonksiyonları beklendiği gibi cevap vermektedir. Şekil 4.31’de otopilot kartının malzemeleri dizdirildikten ve toplandıktan sonraki hali verilmiştir.



Şekil 4.32 Otopilot kartının toplanmış resmi

4.2 3DM-GX1 AHRS

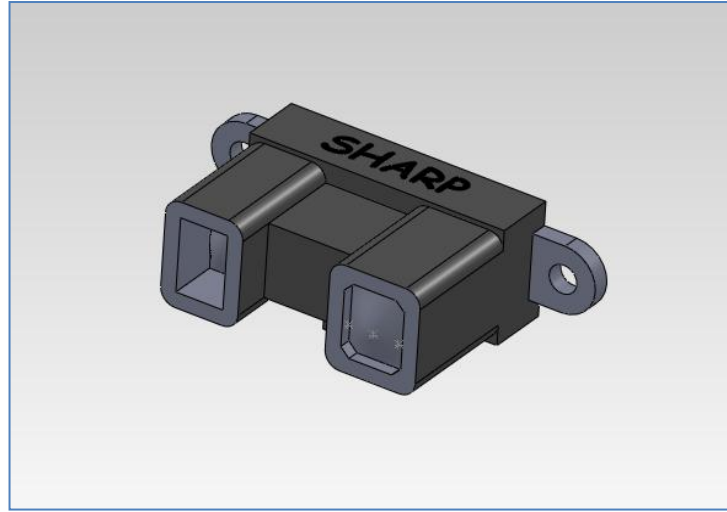
AHRS (Attitude Heading Reference System) quadrotorun durum (yuvarlanma, yunuslama, dümen) açılarını işlemciye bildiren bir sensör topluluğudur. Sistemde iki tane AHRS vardır. Birincisi (CHR-6DM) otopilot kartının üzerine takılıdır. İkincisi (3DM-GX1) ise quadrotorun mekanik aksamına titreşim izalatörleri ile bağlanmış sistemdir. İkisi de AHRS performance açısından birbirlerine yakındır. 3DM-GX1 üzerinde sensör olarak 3 eksen dönüölçer, 3 eksen ivmeölçer ve 3 eksen de magnetometre bulunmaktadır (AHRS2,2006). İçerisindeki kalman filter ile bu sensör bilgilerini birleştirerek ilgili açı değerlerini elde etmektedir. 3DM-GX1 ile FPGA arasındaki iletişim uart protokolu ile RS-232 seviyesinde olmaktadır. FPGA pinlerinin 3DM-GX1 pinlerine bağlamadan önce RS-232 pinler ilk olarak RS-232 sürücü entegresine bağlanır. Bu entegrede 3DM -GX1'in pinlerine bağlanır. 3DM -GX1'in veri çıkış oranı maksimum 100 hz olmaktadır. Arayüz protokolunun hızı 115200 bit/saniye dir. 3DM-GX1'in CHR-6DM önemli bir farkı dönüölçer çıkışlarındaki kayma ve bias bu sensörde kompanse edilmiştir. CHR-6DM 'de bias rahatlıkla gözlemlenmektedir. Veri çıkışını iki alternatif vardır. Sürekli olarak yollayabilir ya da veri istenildiği zaman cevap verebilmektedir. Besleme voltajı minimum 5.2 volt olmak üzere 12 volta kadar çıkabilmektedir. Otopilot kartından 7 volt ile beslenmektedir. Şekil 4.33'de sensörün fiziksel görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.33 3dm-Gx1 Ahrs

4.3 Analog IR Uzaklık Sensörleri

Quadrorotorun dört köşesinde dört tane analog uzaklık IR sensörleri bulunmaktadır. Bunların amacı quadrorotor hareket halindeyken yaklaştığı tarafta engel olduğunu anlayarak o tarafa gitmesini engellemektir. Quadrorotorda Sharp firmasının GP2Y0A02YK0F IR sensörü kullanılmıştır (IR Sensor, 2006). Sensörün ölçtüğü mesafe minimum 20 cm ile maksimum 150 cm arasında değişmektedir. Sensörün çıktısı analog voltajdır. Voltaj çıktısı 2.5 volt ile 0.5 volt arasında değişmektedir. 2.5 volt sistem için alarm sinyali manasına gelmektedir. Çünkü 2.5 voltun anlamı sensöre 20 cm mesafede bir engelin varlığı olmasıdır. Analog voltaj, analog- digital çeviriciler kullanılarak digitale çevirilmiş ve FPGA’de anlamlandırılmıştır. Besleme gerilimi 5 voltur. Şekil 4.34’te kullanılan analog IR sensörünün fiziksel hali verilmiştir.



Şekil 4.34 Sharp analog Ir sensör

4.4 Motorlar, Pervaneler, Batarya ve Elektronik Hız Denetleyicileri

Quadrorotorun pervanelerini döndürmek için dıştan dönen (outrunner) fırçasız dc motorlar seçilmiştir. Bu motorlar kısaca BLDC motorlar olarak bilinmektedir. BLDC motorların, yüksek hızlarda yüksek tork üretmeleri genel avantajlarıdır. Bu durum büyük çaplı ve büyük süpürme açlarına sahip pervaneler için iyi biri durum

oluşturmaktadır. BLDC motorların tork iletimi elektronik olduğu, mekanik bir kontak olmadığı için yüksek verime sahiptirler. Verimlilik yüzdeleri %70 ten başlayıp %90 a kadar çıkmaktadır. Quadrotorda kullanılan motorlar, AXI firmasının yüksek tork kabiliyetine sahip AXI 2814/22 isimli motorlarıdır(Axi Engine, 2013). Bu motorun aynı zamanda pervanelerin motorla birleştirilebilmesi için ayrıca motorlara vidalanan aparatları vardır.



Şekil 4.35 Kullanılan motor ve pervanelerin birlikte cad çizimi verilmiştir.

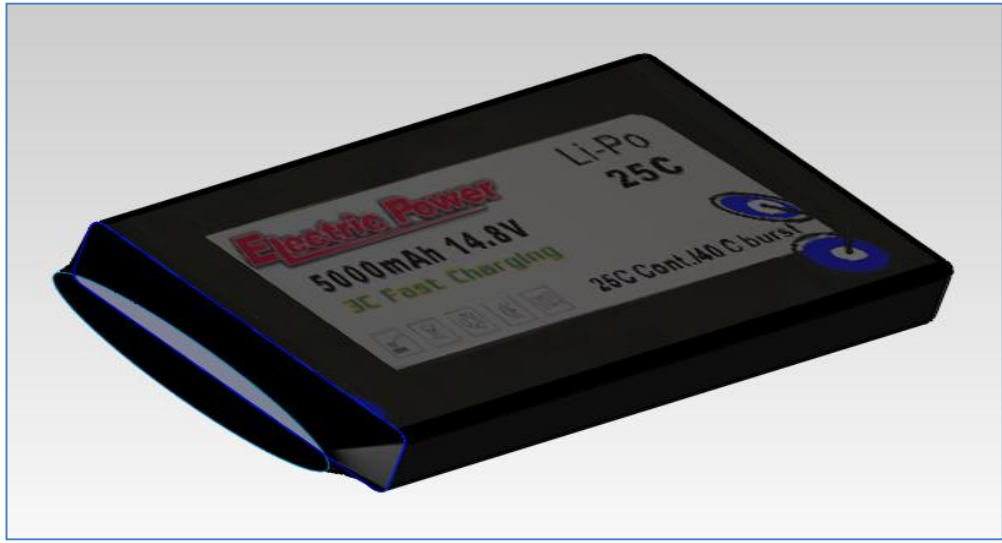
Motorlar 760 rpm/volt oranına sahiptir. ESC'lerin verebileceği maximum voltaj 14.8 dir. Dört hücreli bataryalı kullanılması tavsiye edilmiştir. Motorların full itki kuvveti de ideal olarak 11248 rpm'dir. Bir tane motorun ağırlığı 106 gram gelmektedir. Bu motorlarla 12 inçlik pervane kullanılması tavsiye edilmektedir. Motorun maksimum hızda çektiği akım 12 inçlik pervane ile 15 amperdir. Motorun verimi %82 civarında olmaktadır. Kullanılan pervaneler Graupner üreticisinin E-Prop 12x6 isimli pervanesidir. Sağ ve sol olmak üzere iki çeşit kullanılmaktadır. Sağ pervane demek sağ tarafa dönüş yönünde döndüğünde kaldırma kuvveti uygulamaktadır anlamı verilmektedir. Sol pervane demek sol tarafada dönüş yönünde döndüğünde kaldırma kuvveti uygulamaktadır anlamı verilmektedir. Kullanılan

pervaneler ince ve yüksek en ve boy (aspect ratio) oranına sahiptir. Bu da quadrotorun daha hassas hareket etmesini sağlamaktadır. Fırçasız motorları sürmek için kullanılan elektronik hız kontrolörü olarak kullanılan Phoenix Firmasının Ice 100 isimli ESC'si kullanılmıştır (Esc,2013). ESC'nin temel olarak yaptığı görev kendisine DA (DC) voltajını 3 faz AA (AC) voltajına çevirerek motoru sürmektir. ESC'ler genel olarak üç kısımdan oluşur. Birinci kısım ESC'nin kendisine gelen pwm sinyalini çözen anlamlı hale getiren mikrokontroller devresidir. İkinci kısım motor akımı sürme devresidir. Bu kısım mosfet transistörlü devrelerden oluşmaktadır. Mosfetler farklı zamanlarda açılıp kapanarak fazları birbirinden 120 derece farklı üç tane sinyal oluşturur. Üçüncü kısım ise geribildirim devresidir. Bu kısmın amacı rotor kısmının hangi açıda durduğunu anlamaktır. Geri bildirim devresi motor tipine bağlı olarak sensörlü ya da sensörsüz iki şekilde yapılabilir. ESC'lerin hız kontrolü giriş pinindeki PWM sinyalinin yüksek voltaj kalma süresi ayarlanarak motorlara verilen gücü kontrol etmektedir. Bu sinyal quadrotor da kullanılan ESC'ler için 400 hz dir. Sinyali yüksekte kalma süresi (duty cycle) %10 ile %70 arasında değişmektedir. ESC'ler çok ısındıkları için üzerlerinden olabildiğince çok hava akımı geçirilmesi gerekmektedir. Bir diğer alternatifte metal soğutucu koymaktır. Şekil 4.36'te quadrotorda kullanılan ESC'nin resmi verilmiştir.

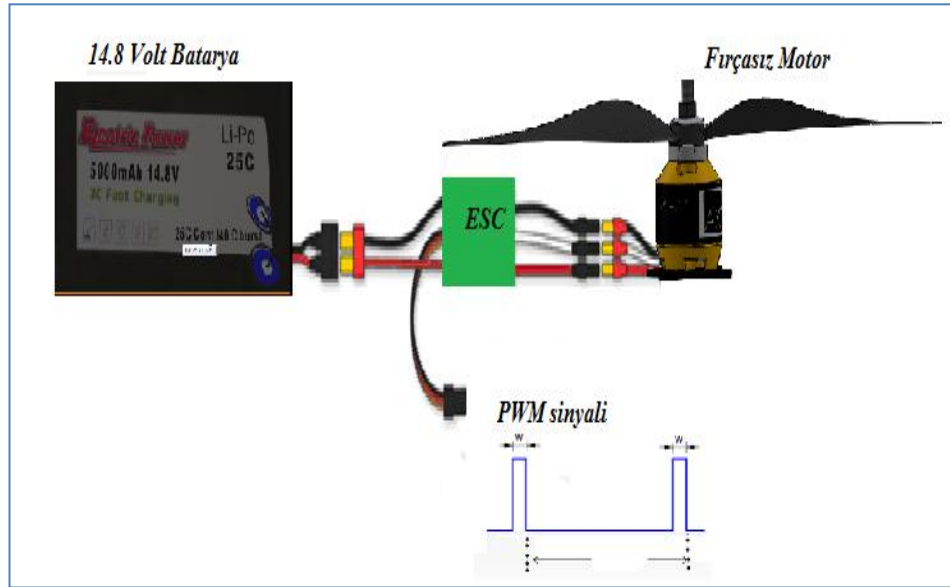


Şekil 4.36 Quadrotor Esc

Sistemde gücü sağlayabilmek için kullanılan batarya 4 hücreli Li-Po pildir. 14.8 volt çıkış sağlamaktadır. 5000 mA\saat kadar akım verebilmektedir. Sürekli olarak 25C kapasitesinde akım sağlayabilmektedir. Dolayısıyla sürekli olarak sisteme 125 amper akım sağlamaktadır. Anlık akım kapasitesi ise 200 amperdir. Şekil 4.37’da kullanılan bataryanın cad modeli verilmiştir. Şekil 4.38’te sistem bir bütün olarak verilmiştir.



Şekil 4.37 Li-Po batarya

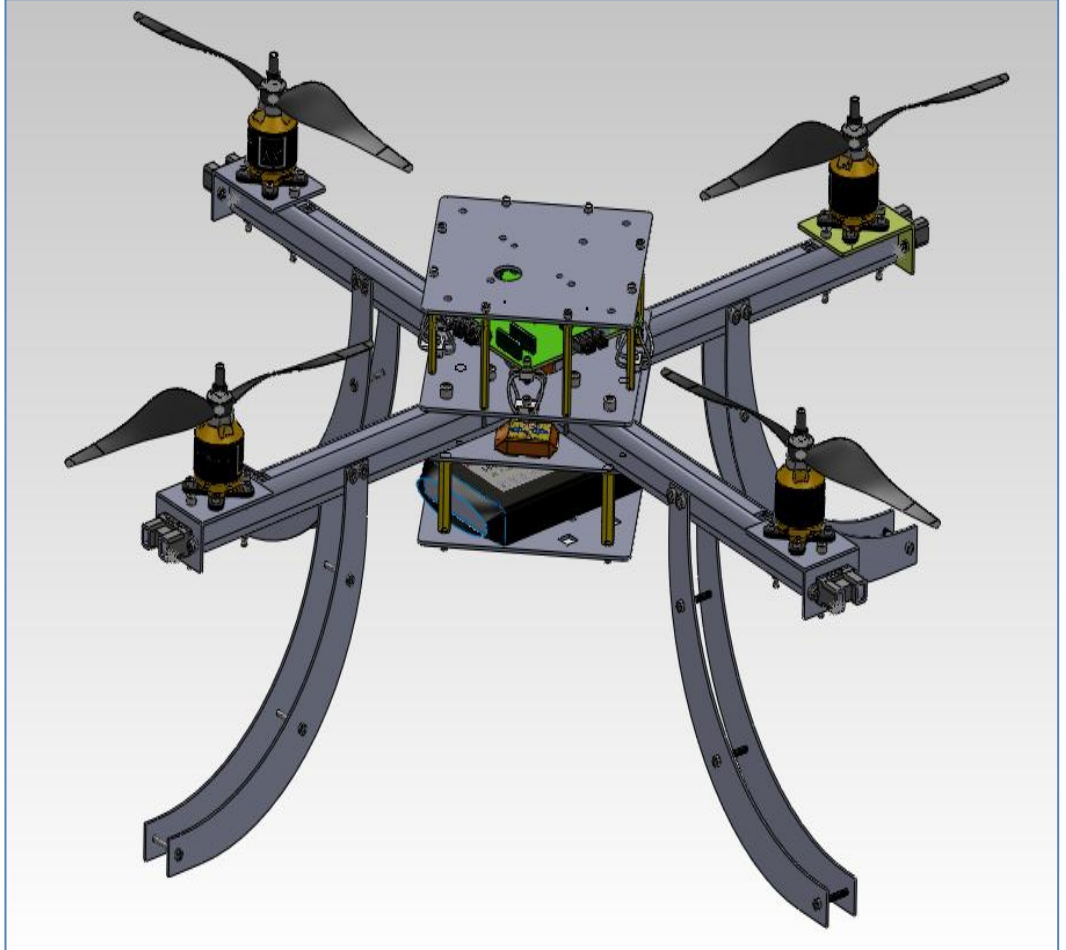


Şekil 4.38 Batarya, Esc,motor bağlantısı

BÖLÜM BEŞ

MEKANİK TASARIM VE GERÇEKLEME

Quadrotorun mekaniği üç alt bölümde incelenmiştir. Birinci alt bölümde quadrotorun iskeletinin yapısı anlatılmıştır. İkinci alt bölümde Quadrotorun tek eksen testlerinin yapıldığı düzeneğin mekaniği anlatılmıştır. Üçüncü bölümde quadrotorun serbest uçuş testi yapmadan önceki bütün eksenlerin test edildiği düzeneğin mekaniği anlatılmıştır. Quadrotor yapılmaya başlanmadan önce üç boyutlu program tasarımı ayrıntılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.1’de Quadrotorun bütün üç boyutlu bir tasarımı verilmiştir.



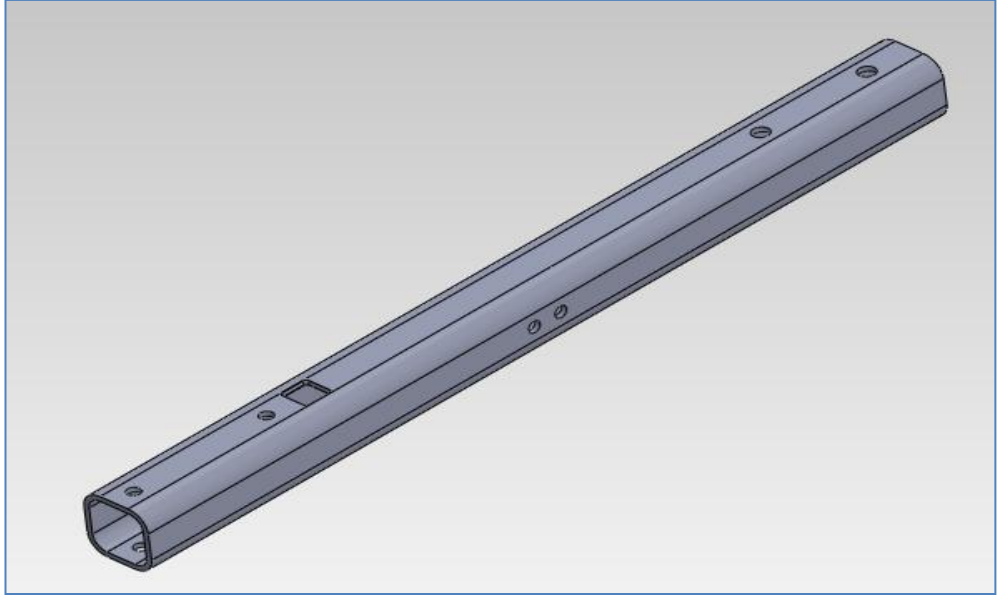
Şekil 5.1 Quadrotor üç boyut tasarımı



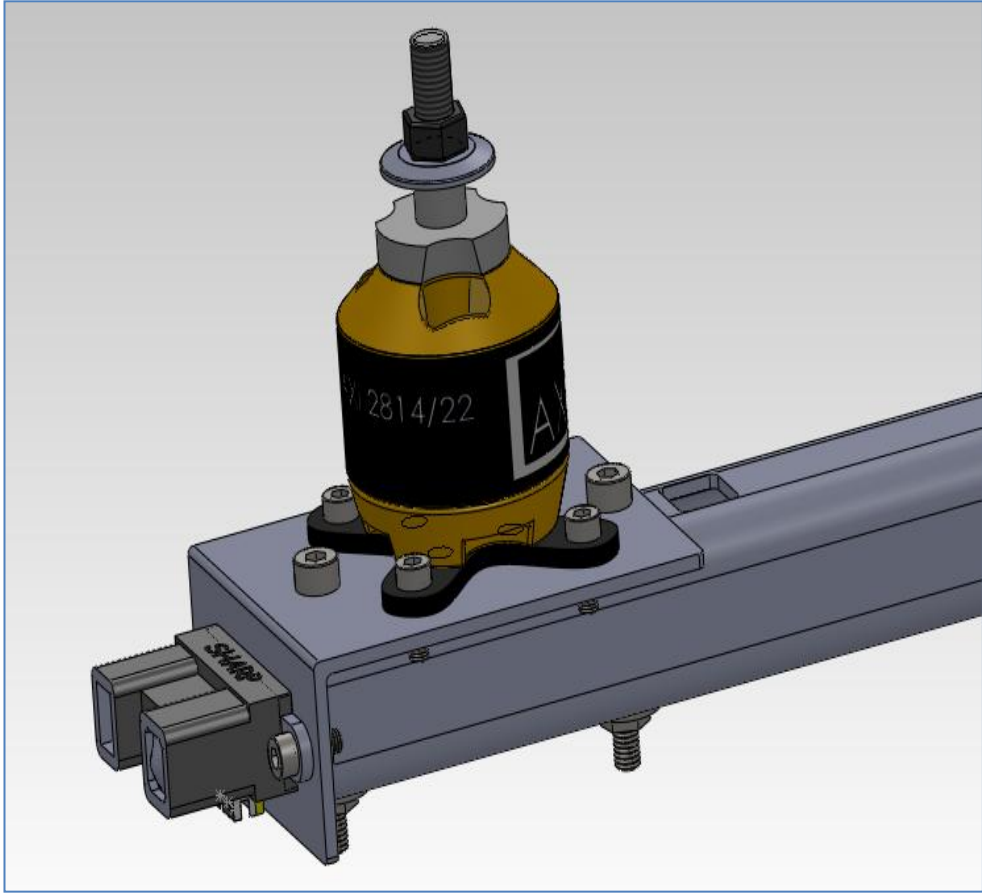
Şekil 5.2 Gerçekleştirilen Quadrotorun fotoğrafı

5.1 Quadrotor İskeleti

Bütün iskelet hafif ve dayanıklı olsun diye karbonfiber malzemeden yapılmıştır. Bütün parçalar birbirlerine vida ile bağlanmaktadır. Tüm iskelet, motorun yaydığı titreşimlerinden en az etkilenmesi amacıyla olabildiğince sağlam ve rijit yapılmıştır. İskeletin boydan boya pervane uzunlukları da dahil 80x80 cm dolaylarında olmasına karar verilmiştir. Herbir kolun uzunluğu 30 cm'dir. Kollar merkezde iki tane plaka ile M5 lik vidalar ile sekiz yerden birden bağlanmıştır. Kollar içinden motor kabloları geçebilsin diye motor bağlantı yerlerinden 0.5x0.5 cm lik delikler açılmıştır. Motorlar ile analog uzaklık sensörlerini iskelet kolları üzerine rijit bir şekilde bağlayabilmek için L harfi şeklinde olan ayrı bir karbon kesiti hazırlanmıştır. Tasarlanan parçalara ait cad çizimleri Şekil 5.3'te ve Şekil 5.4'te verilmiştir.

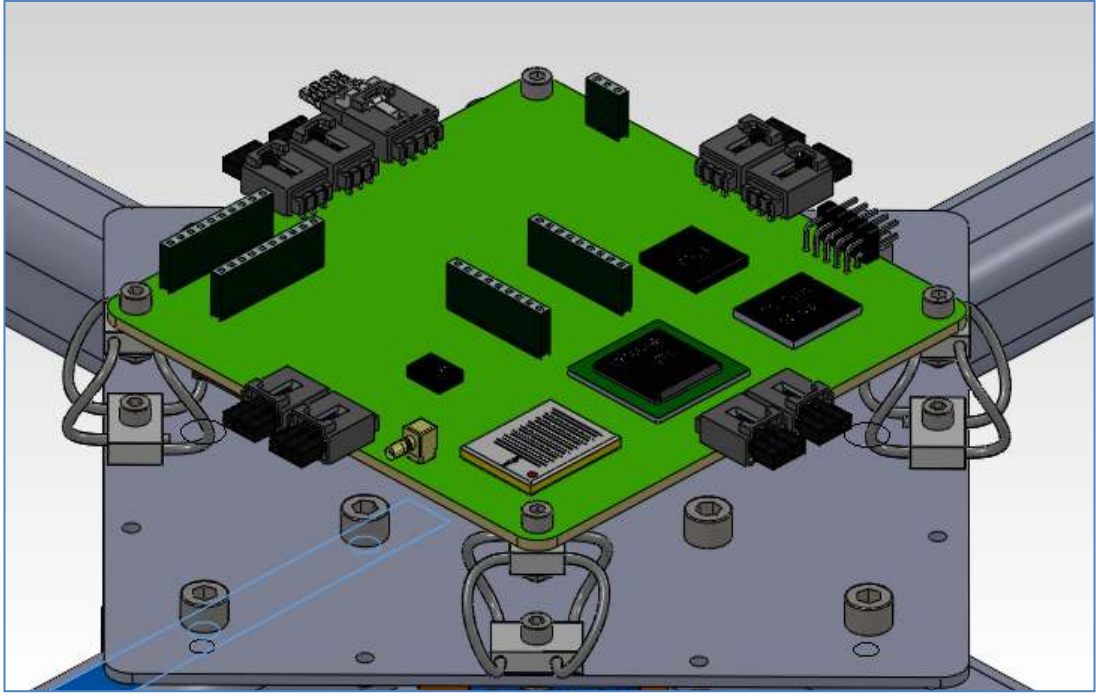


Şekil 5.3 Quadrotor kolları

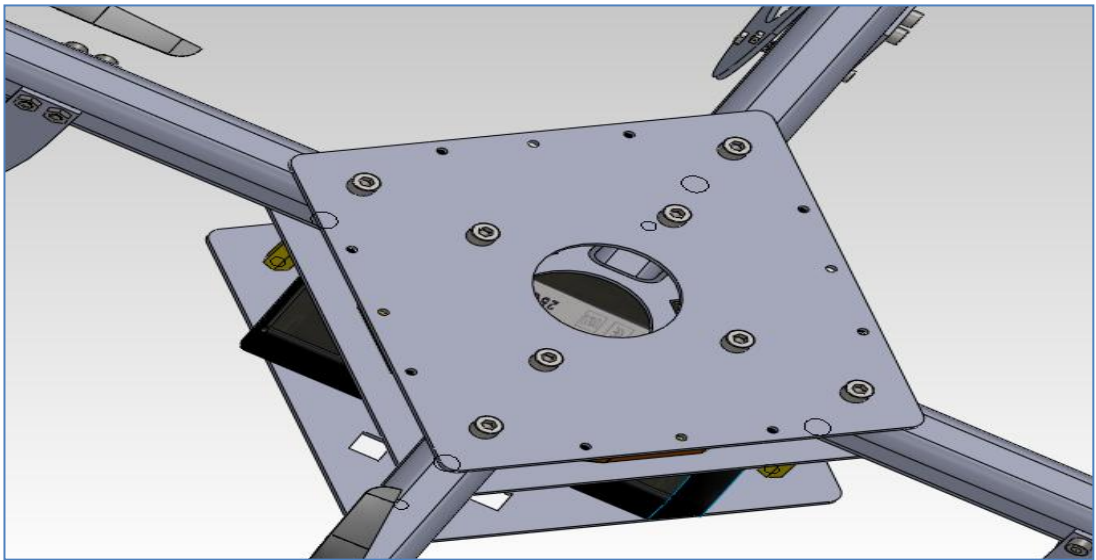


Şekil 5.4 Kolların motor ve Ir bağlantısı

Quadrotor merkezinde 4 tane birbirine paralel quadrotor plaka vardır.Orta kattaki iki tane plaka quadrotorun 4 tane kolunu birleştirmektedir. Otopilot kartı bu plakaların üstüne titreşim izolatörleri ile monte edilmektedir.Şekil 5.5'te bu durum verilmiştir.

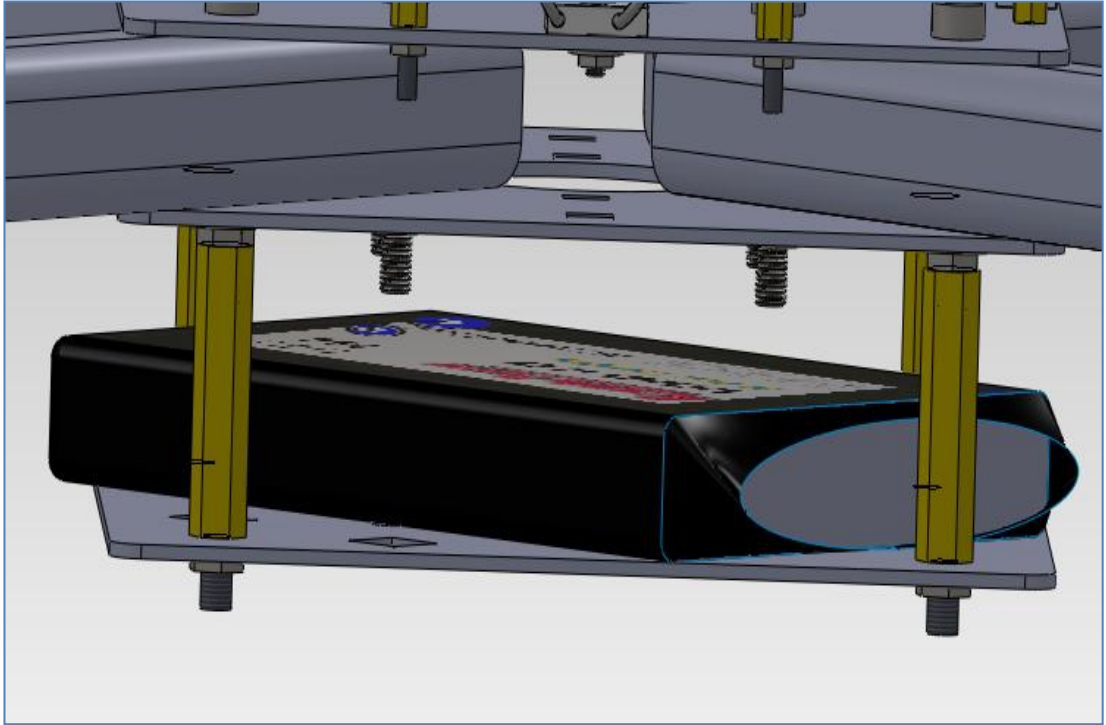


Şekil 5.5 Otopilot kartının bağlantısı



Şekil 5.6 Dört kolun iki plaka arasındaki bağlantısı

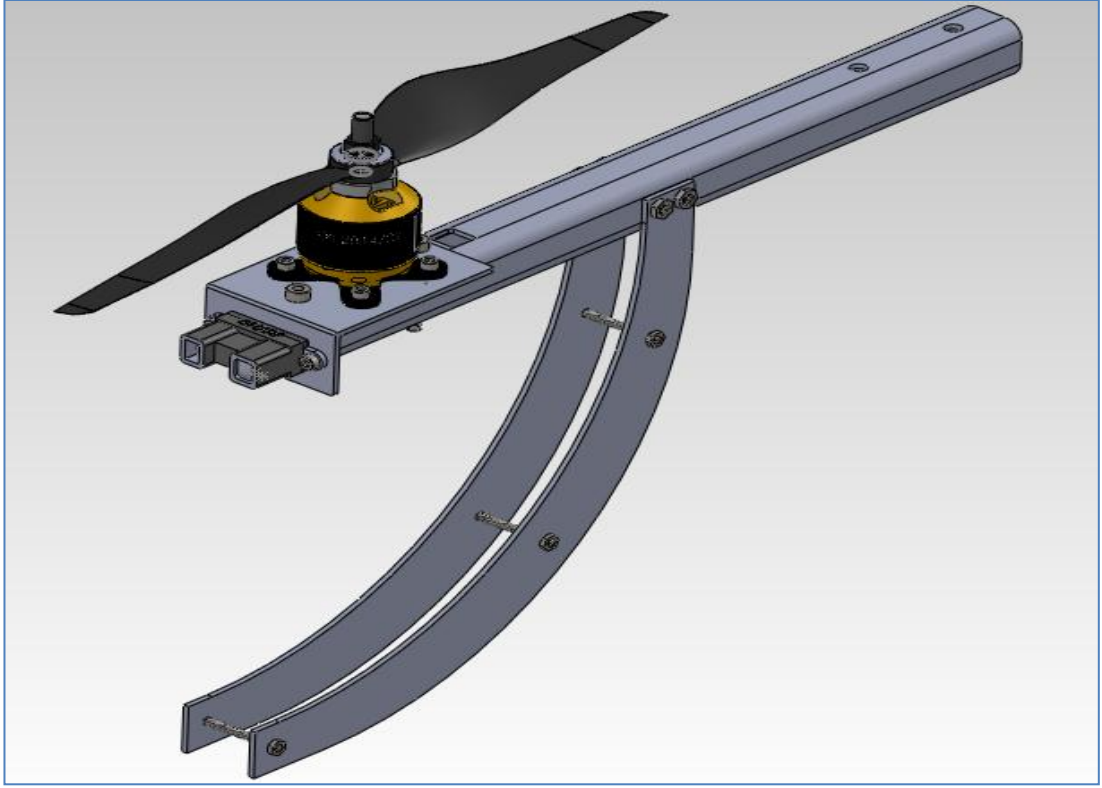
Şekil 5.6’da orta plakalarla kolların nasıl birleştirildiği gösterilmiştir. Plakaların ortasında katlar arası kablo taşıyabilmek için yuvarlak şeklinde boşluklar bırakılmıştır. Quadrotorda bataryanın koyulacağı yer en alt kat seçilmiştir. Batarya sistemde önemli bir ağırlık tuttuğu için sistemin en altına koyulmuş ve çitçitli bandlar ile sıkı bir şekilde tutturulmuştur. Şekil 5.7’de Quadrotorun alt kısmı gösterilmiştir. Aynı zamanda en alt kattaki plakada ileride kamera takılabilmesi amacı ile boşluklar bırakılmıştır. Kamera boşlukları aynı zamanda quadrotorun test düzeneklerine bağlanmasını da mümkün kılmaktadır. Orta plakalarla en alt kat arasındaki bağlantı alüminyum silindirik borularla sağlanmaktadır.



Şekil 5.7 Bataryanın bağlanması

Bir diğer iskeletteki önemli bağlantı ise bacaklardır. Bacaklar quadrotorun kollarına bağlanmıştır. Sistem ataletini artırabilmek için bacaklar, olabildiğince motorların altına kadar uzatılmıştır. Bacaklar yay şeklinde olan iki plakadan tasarlanmıştır. Bu plakalar quadrotorun kollarına sağ ve sol tarafından iki yerden bağlanmaktadır. Bu plakalar birbirlerine aralayıcılarla kenetlenmiştir. Bacakların yükseklikleri kameraya yer bırakabilmek amacıyla olabildiğince büyük tutulmuştur. Aynı zamanda, plakalar, hafif olması amacıyla ince tutulduğundan bacaklara kuvvet

geldiğinde esneme olmaması için 3 yerden aralayıcılarla birbirine kenetlenmiştir. Şekil 5.8’de bacak tasarımı verilmiştir.



Şekil 5.8 Quadrotor bacak tasarımı

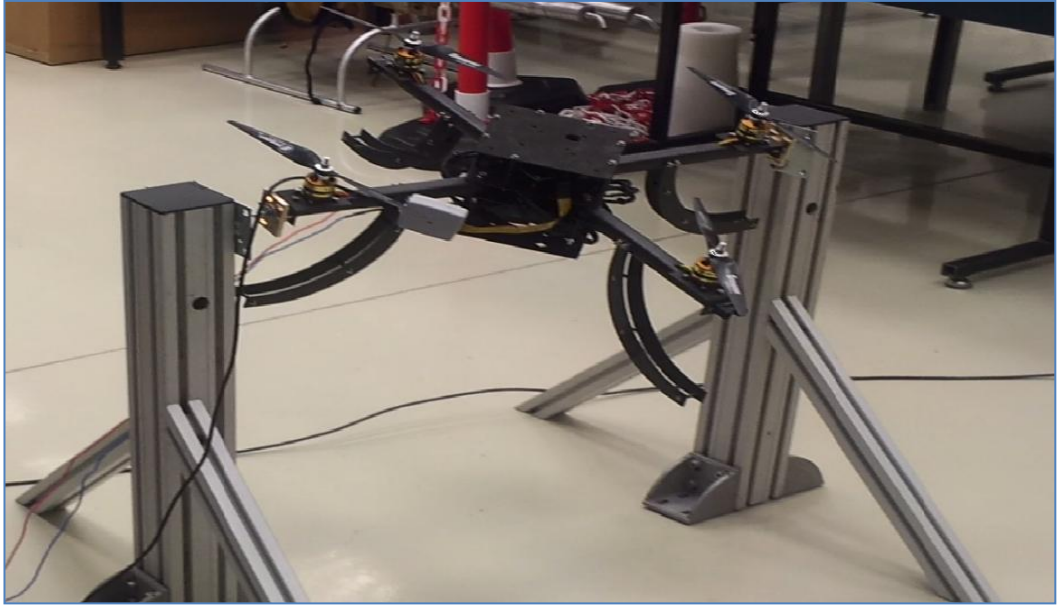
5.2 Tek Eksen Test Düzenegi

Tek eksen test düzenegi quadrotorun test düzenegine takılıp quadrotorun tek ekseninde (yunuslama veya yuvarlanma eksenleri için geçerli) çalıştırılarak testlere tutulduğu düzenektir. Düzenek Şekil 5.9’da verilmiştir. Düzenek, iki tane profilin arasında quadrotorun serbestçe hareket etmesini sağlamaktadır. Quadrotor, diğer eksenlerde kısıtlı olup sadece bir ekseninde hareket edebilmektedir. Düzenegin tasarım adımları şöyledir. Kare profil borular ilk önce yanlardan destek profilleri desteklenerek düşmesinin önüne geçilmiştir. Daha sonra profillerin her birisinin uçlarına düz delikli levhalar takılmıştır. Quadrotorun IR sensörleri çıkartılıp yerine rulmanlı yapı takılmıştır. Rulmanın ortasına üstünde vida deliği olan pin çakılmıştır. Pinler vida deliğinden levhaya tutturulmuştur. Böylelikle rulmanlarla bir tarafından

tutturularak serbest dönme kabiliyeti kazanmıştır. Quadrotor bu düzenekte 360 derece dönebilmektedir.



Şekil 5.9 Tek eksen test düzeneği



Şekil 5.10 Tek eksen quadrotor ile birlikte

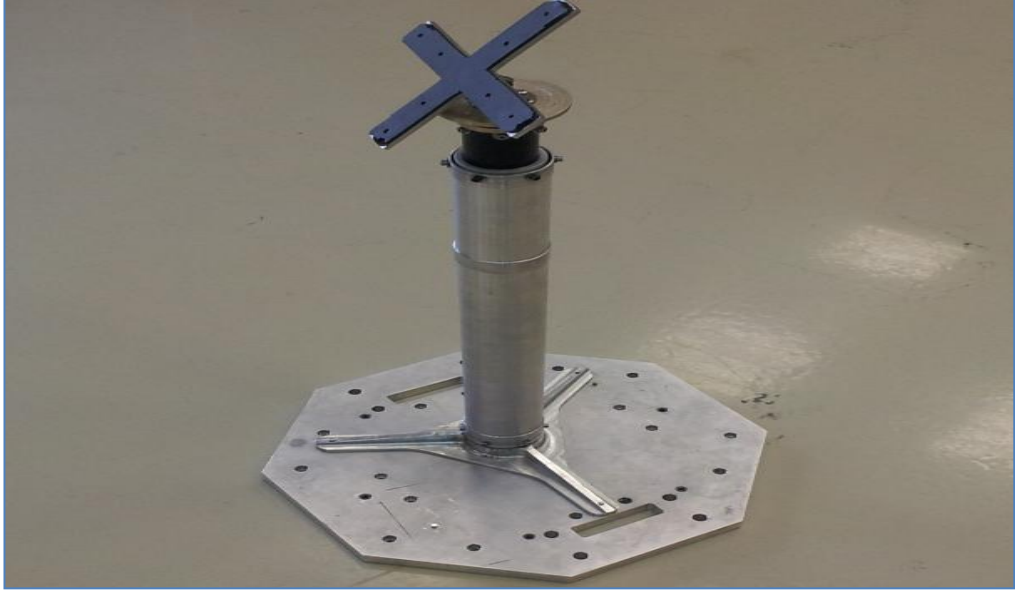
5.3 Üç Eksen Test Düzeneği

Bu düzeneğin yapılma amacı bir önceki tek eksen test düzeneğinde tek tek kontrol edilebilen eksenlerin hepsi bir arada çalıştığındaki durumu gözlemlemek için yapılmıştır. Tek eksen test düzeneğinde yuvarlanma ve yunuslama eksenleri için kontrol katsayıları bulunmuştur. Bu katsayılar diğer eksenlerin hareketi kısıtlı olduğu için tam güvenilir değildir. Çünkü tek eksen de bulunan kontrol katsayıları üç eksen test düzeneğinde biraz değişmek zorundadır. Üç eksen test düzeneğinde ilk olarak hiç test edilmemiş olan yuvarlanma ve yunuslama eksenleri kapatılıp dümen eksenini test edilmiştir. Üç eksen test düzeneğinin avantajlarında biri eksenlerin kitlenerek sadece istenilen eksen test edilebilir. Üç eksen test düzeneği tamamen alüminyumdan yapılmış olup sadece quadrotorun sisteme bağlandığı eklem noktası çelik malzemeden yapılmıştır. Düzenek tasarımında ilk tasarlanan bölüm, quadrotorun sisteme nasıl bağlanacağıdır. Bu bölümde quadrotor en alt plakasında M5 lik vida delikleri kullanılarak artı şeklinde bir alüminyum bloğa bağlanmıştır. Daha sonra bu bloğun altına yuvarlanma ve yunuslama eksenlerinde rahatça hareket edebilen mafsal takılmıştır. Quadrotorun dümen ekseninde dönebilmesi için bu mafsal bir rulmana takılmıştır. Bu rulman silindirik borunun içine yataklanmıştır. Silindirik boruda sistemin tabanı olan altıgen şeklindeki ağır alüminyum levhaya üç yerinde bağlanmıştır. Şekil 5.11’de quadrotorun üç eksene bağlantı elemanı verilmiştir.



Şekil 5.11 Üç eksen quadrotor bağlantı elemanı

Şekil 5.12’de üç eksen test düzeneğinin bütün bir fiziksel görünümü verilmiştir. Üç eksen test düzeneğinde silindirik borunun en altında takılı olduğu tabla oldukça geniş tutulmuştur. Böylelikle quadrotorun bu test düzeneği üzerindeyken ani hareketlenme sonucu devrilmesinin önüne geçilmiştir.



Şekil 5.12 Üç eksen test düzeneği



Şekil 5.13 Quadrotor üç eksen test düzeneğinde test edilirken

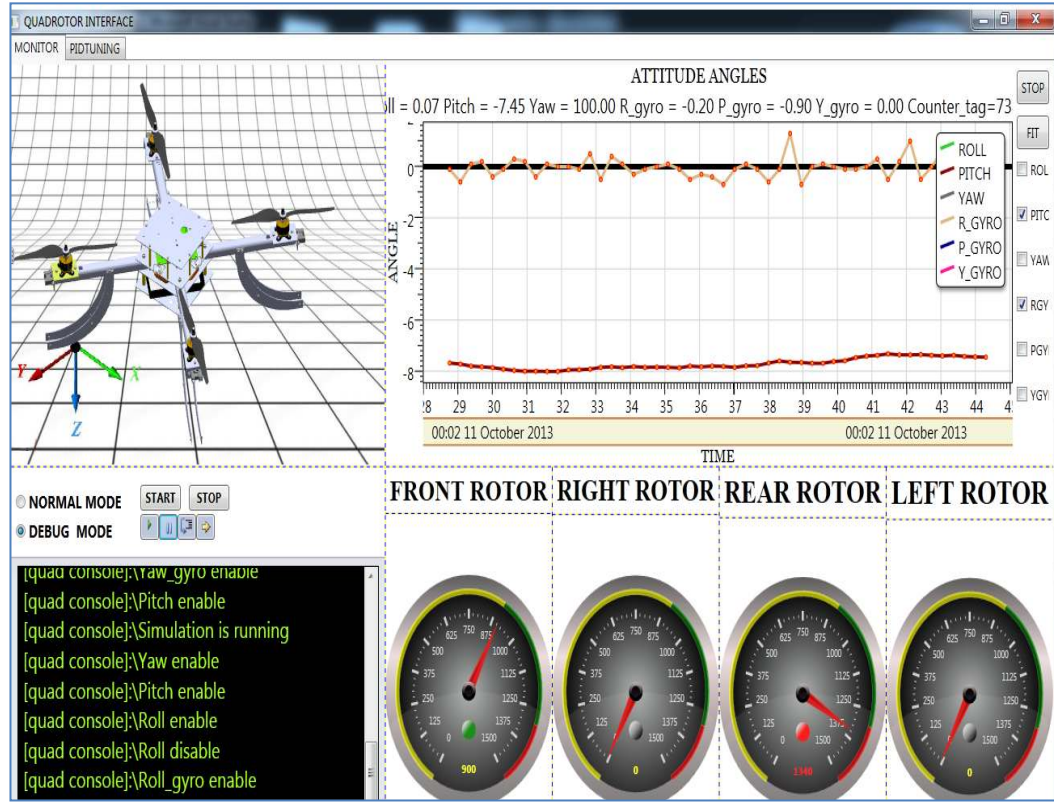


Şekil 5.14 İlk serbest uçuş denemesi

BÖLÜM ALTI

QUADROTOR ARAYÜZ YAZILIMI

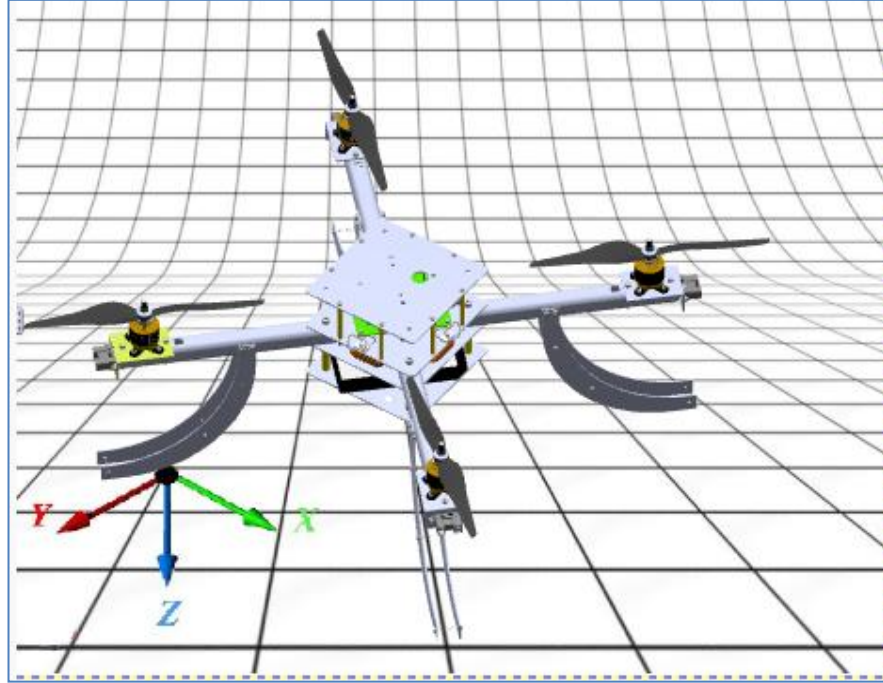
Quadrotor bilgisayar arayüzü quadrotorun hareket kontrolünde, sistem verilerinin izlenmesinde ve bu verilerin kayıt altına alınmasında kullanılmaktadır. Quadrotor arayüzü bir WPF (Windows C# dilinde) uygulaması olarak yazılmıştır. Quadrotor durum açılarını ve açısal hızlarını çalışma zamanında çizdirebilmektedir. Motor rpm değerlerini göstergeler üzerinde çalışma zamanında gösterebilmektedir. Quadrotorun hareketlerini üç boyutlu olarak gösterebilme kabiliyeti vardır. Kontrolcü katsayıları, quadrotor aktifken arayüzden değiştirilebilmektedir. Quadrotor arayüzü ana iki bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm quadrotorun verilerinin izlendiği ve kayıt altına alıp simulasyon yapan bölümdür. İkinci bölüm ise quadrotor kontrolcülerinin katsayılarının değiştirilmesi ve quadrotorun durum açılarını değiştirilmesi için olan bölümdür. Şekil 6.1’de quadrotor arayüzünün birinci bölümünün genel çerçevesi verilmiştir.



Şekil 6.1 Quadrotor veri izleme arayüzü

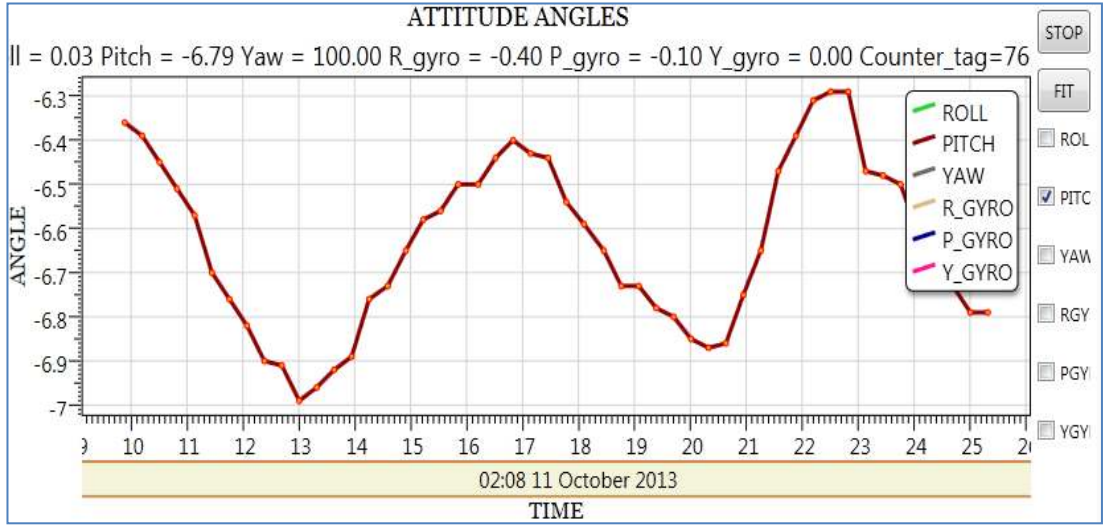
6.1 Veri İzleme Arayüzü

Data izleme arayüzü çeşitli alt bölümlerden oluşmaktadır. İlk bölüm datanın arayüze nasıl alındığıdır. Veriler RF modül üstünden gelmektedir. RF modül bilgisayara seriport yolu üzerinden 115200 bit/saniye hızı ile veri gelmektedir. Bu masüstü programı için oldukça hızlı şekilde akmaktadır. Arayüz programının her seferin data geldiğinde kesme alarak okumasını imkansız kılmaktadır. Bu sebepten dolayı arayüz programının seriport sürücü yazılımı için geniş bir tampon hafıza ayrılmıştır. Arayüze akan veri bu tampon bölgeye dolmaktadır. Arayüz yazılımı daha sonra her 100 milisaniye bir bu tampon hafızanın tamamını bir anda okumaktadır. Böylelikle quadrotordan gelen hiçbir veri kaçmamaktadır. Veri arayüz programına geldikten sonra datalar anlamlandırılmalıdır. Quadrotordan gelen datalar belli bir mesaj formatında gelmektedir. Gelen her veri paketinin başında ve sonunda ve aralarında belli bir kural vardır. Arayüz programı, tampondan alınan ham veriyi parçalayarak anlamlı verilere dönüştürür. Birinci bölümde ilk tasarlanan kısım quadrotora durum açılarını ekranda üç boyutlu olarak gösteren kısımdır aynı zamanda eksen takımlarını göstermektedir. Şekil 6.2’de tasarlanan kısım gösterilmiştir.



Şekil 6.2 Quadrotor üç boyut arayüzü

Arayüz izleme biriminde tasarlanan ikinci bir gelen verilerin çalışma zamanında çizdirilmesidir. Gelişmiş bir grafik çizici kullanılmıştır. Grafik çizim ekranı dondurulup veriler analiz edilebilmektedir. Grafik arayüzünde quadrotorun durum açıları ve eksenlerdeki açısal hızları çizdirilmektedir. Grafik çizimleri hepsi bir arada çizdirilebilir ya da sadece istenen grafik çizdirilebilir. Şekil 6.3'te grafik arayüzü yakından gösterilmiştir.



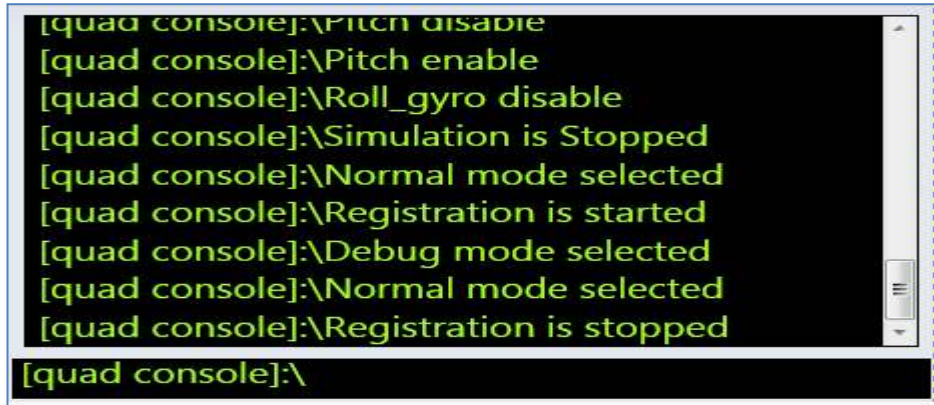
Şekil 6.3 Quadrotor grafik arayüzü

Diğer bir alt birim veri kayıt birimidir. Gelen veriler sistemde kayıt altına alınabilir sistem normal moddayken başla tuşuna basıldığı zaman ekranda zamanlayıcı çıkar. Bu zamanlayıcı kullanıcıya sistemin ne kadar kaydedileceğini göstermektedir. Dur tuşuna basıldığı zaman sistem hangi dosyaya kayıt edileceğini sormaktadır. Şekil 6.4'te kayıt arayüzü yakından gösterilmiştir.



Şekil 6.4 Quadrotor kayıt ve simulasyon arayüzü

Bir diğ er alt birim ise simulasyon aray uz birimidir. Aray uz verileri herhangi bir dosyaya kaydettikleri durumu tekrar simulasyon yapabilir. Aray uz ekranından debug mode seçilir ve kullanıcı dosyayı seçer ve simulasyon ba lar. Aray uzde bir zamanlayıcı çalışmaya ba lar, daha sonra aray uz dosyadan verileri  eker ve gerçek veriy miş gibi ekrana verir. Kullanıcı simülasyonu isteği zaman durdurup veya adım adım ilerleyip quadrotorun durumunu inceleyebilir. Bir diğ er altbirim ise konsol aray uz dur. Konsol aray uz n n iki görevi vardır. Birinci görevi aray uzde hangi işlem yapıldıysa onu konsolun komut satırına yazar. İkinci görevi ise quadrotoru durdurma,  alı tırma veya motor hızlarını hızlatma ve yavaşlatma gibi komutların  alı tırılmasıdır. Şekil 6.5'te konsol aray uz  gösterilmiştir. Aynı zamanda quadrotoun kontrol eden joystick aray uz  bu birimin içinde yer almaktadır. Quadrotor kontrolü iki yerden gerçekleştirilebilir. Birincisi konsol diğ eri ise joysticktir. Şekil 6.6'da kullanılan joystickin resmi verilmiştir.

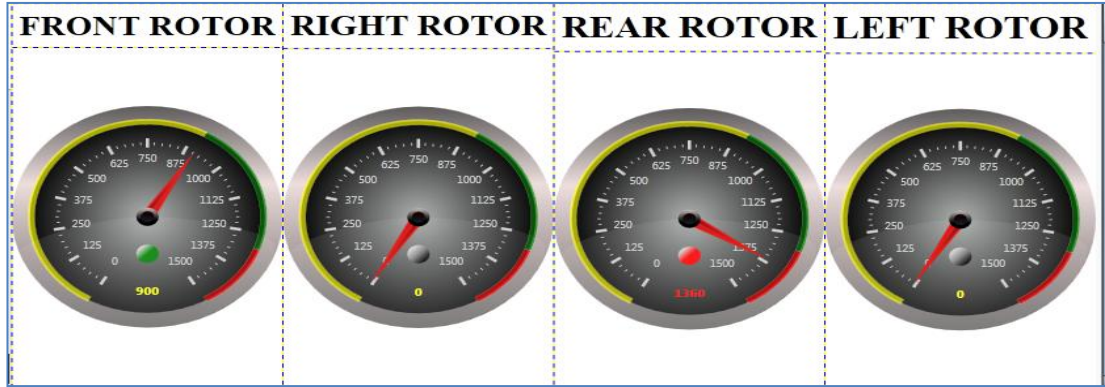


Şekil 6.5 Konsol aray uz 



Şekil 6.6 Quadrotor kontrol birimi

Bir diğer altbirim ise motor devir göstergeleridir. Tüm motorların hangi devirde döndüğünü bu göstergeler göstermektedir. Motorların yüksek mi ya da normal hızda mı döndüğünü renk cetvelleri göstermektedir. Şekil 6.7’de motor gösterge birimlerinin arayüzü gösterilmiştir.



Şekil 6.7 Motor gösterge arayüzü

6.2 Kontrol Arayüzü

Kontrolcü arayüzü birimi quadrotor içindeki bütün eksenlerdeki kontrolcü katsayılarını değiştirmek için tasarlanmıştır İlk önce eksen seçilir daha sonra seçilen eksenin parameterleri gözlenir.

Şekil 6.8 Coefficients interface control

BÖLÜM YEDİ

GÖZLEM VE SONUÇ

Bu çalışmada dört pervaneli bir insansız hava aracının tasarımı gerçekleştirilerek uçuşu sağlanmıştır. Gerçekleştirilen çalışma, bir bütün olarak, karbon fiber yapıdan oluşan iskeletin ve ilgili donanımın oluşturulmasını, FPGA tabanlı otopilot kartının tasarım ve gerçekleştirmesini, kullanıcı arayüz programının hazırlanmasını ve PID kontrol algoritmasının uygulanması aşamalarını içermektedir.

Bu çalışmada özellikle, otopilot kartında kısa devre korumalarının kullanılmasının sağladığı avantajlar ve sistem durum verilerinin gerçek zamanlı kaydının analiz çalışmaları için oluşturduğu önem gözlemlenmiştir. PID kontrolcü parametrelerinin sistem üzerinde ne tür etkiler oluşturduğu deneysel olarak gözlemlenmiş ve kalıcı durum hatası, aşım, kalıcı duruma geçme sürelerinin bu parametrelere bağımlılığı incelenmiştir. Eksen pozisyon kontrolünde, ilk aşamada tek bir kapalı döngü ile pozisyon kontrolü sağlanmaya çalışılmış, başarılı sonuçlar alınmadığından hız kontrolü kapalı döngüsü eklenerek istenen performans değerlerine ulaşılmıştır.

Mekanik modelleme gerçekleştirilerek olası hataların minimum seviyeye çekilmesi sağlanmıştır. Quadrotor 'un üzerinde koşturulması planlanan kontrol algoritmasının hayata geçirilmesi aşamasında tasarlanan test düzeneklerinin çok etkin olduğu görülmüştür. Test düzeneği olarak hem tek eksen hem de üç eksen test düzeneği kullanılmış, tek eksen testlerinin sistemin stabil kalması için yeterli olmadığı anlaşılmıştır. Ancak bu noktada üç eksen test düzeneğinin quadrotor dinamiklerini bir miktar değiştirdiği de dikkati çekmektedir. Uygun akım değerine sahip olmayan ESC'ler, aşırı ısınıp termal kapatma gerçekleştirebildiğinden motorların çektiği maksimum akımın minimum üç katı akım sağlayabilen ESC'lerin kullanılması gerekmiştir. Ayrıca RF modül iletişimde zaman zaman veri kayıplarının oluşabileceği gözlemlenmiş ve bu durumlarda sisteme geri bildirim konarak performans değerleri yukarıya çekilmeye çalışılmıştır.

Şu an sistemde küresel lokalizasyon bilgisi hesaplanmamaktadır. Bir sonraki aşama olarak bu konunun geliştirilmesi üzerine çalışılabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, istenen konum noktasına ulaşılması ve burada askıda kalması gibi farklı

kullanıcı isteklerine cevap veren yapı üzerinde de çalışmalar geliştirilebilir. Bir başka gelişim noktası ise uçuş performans değerlerini daha üst noktaya taşıyacak farklı kontrol algoritmalarının geliştirilmesidir.

KAYNAKLAR

- ADC (2007). *Analog to digital converter*, 1 Kasım 2012, http://www.analog.com/static/importedfiles/data_sheets/AD7991_7995_7999.pdf
- AHRS (2013). *Attitude and heading reference system*, 10 Temmuz 2013, http://en.wikipedia.org/wiki/Attitude_and_heading_reference_system
- AHRS1 (2010). *CHR-6dm Attitude and heading reference system*, 4 Haziran 2012, http://www.chrobotics.com/docs/chr6dm_datasheet.pdf
- AHRS2 (2006). *3DM-GX1 gyro enhanced orientation sensor*, 1 Temmuz 2012, <http://files.microstrain.com/3DM-GX1%20Datasheet%20Rev%201.pdf>
- Altera Fpga (2012). *Cyclone III device handbook*, 3 Eylül 2012, http://www.altera.com/literature/hb/cyc3/cyclone3_handbook.pdf
- Axi Engine (2013). *Axi model motor catalogue*, 18 Temmuz 2012, http://www.modelmotors.cz/download/actual%20katalog_hr.pdf
- Bouabdallah, S. (2007). *Design and control of quadrotors with application to autonomous flying*, Phd Thesis, École Polytechnique Fédérale De Lausanne
- Control PID (2012). *PID controller design*, 1 Ağustos 2013, <http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=Introduction§ion=ControlPID>
- Control System (2012). *System analysis*, 11 Ağustos 2013, <http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?aux=Home>
- Current Sensor (2009). *Current transducer LTS 25-NP*, 10 Kasım 2012, <http://www.europowercomponents.com/media/uploads/lts25-np.pdf>
- Dikmen, İ. C., Arısoy, A.ve Temeltaş, H. (2010). Dikey iniş-kalkış yapabilen dört rotorlu hava aracının (quadrotor) uçuş kontrolü. *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 4(3), 33-40.

- EPCS Flash (2012). *Serial configuration (EPCS) devices datasheet*, 7 Ekim 2012, http://www.altera.com/literature/hb/cfg/cyc_c51014.pdf
- Esc (2013). *Phoenix edge user guide*, 19 Haziran 2013, http://www.castlecreations.com/support/documents/edge_guide.pdf
- Gps Modul (2013). *u-blox 6 GPS modules*, 12 Kasım 2012, http://www.u-blox.com/images/downloads/Product_Docs/LEA-6_DataSheet_%28GPS.G6-HW-09004%29.pdf
- Gsi Sram (2013). *36Mb sync burst SRAMs*, 10 Ekim 2012, <http://www.gsitechnology.com/Datasheets/SyncBurst/36Mb/8321ExxA.pdf>
- Hoffmann, G, Rajnarayan, D. G., Waslander, S. L., Dostal, D., Jang, J. S. ve Tomlin, C. J. (2004). The standford testbed of autonomous rotorcraft for multi-agent control. *23rd digital avionics systems conference*.
- IR Sensor (2006). *Distance measuring sensor unit measuring distance: 20 to 150 cm analog output type*, 15 Temmuz 2012, http://www.sharpsma.com/webfm_send/1487
- Level Shifter (2011). *SN74LVC1G99 datasheet*, 13 Ekim 2012, <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74lvc1g99.pdf>
- Nicol, C., Macnab, C.J.B., Ramirez-Serrano, A., (2011). Robust adaptive control of a quadrotor helicopter, *IFAC Journal of Mechatronics*, 21(6), 927-938
- NIOS System (2011). *NIOS II processor reference*, 10 Eylül 2012, http://www.altera.com/literature/hb/nios2/n2cpu_nii5v1.pdf
- Oscillator (2008). *FXO-HC536R-20 datasheet*, 15 Ekim 2012, http://www.foxonline.com/pdfs/FXO_HC53.pdf
- Pounds, P., Mahony, R. ve Corke, P., (2010). Modeling and control of a large quadrotor robot, *Control Engineering Practice*, 18(7), 691-699.

- Protection Circuit (2009). *3-V to 20-V integrated fet hot swap controller*, 15 Kasım 2012, <http://www.ti.com/lit/ds/symmlink/tps2420.pdf>
- Qsys System (2011). *Qsys system design*, 5 Ekim 2012, http://www.altera.com/literature/tt/tt_qsys_intro.pdf
- RS-232 Transceivers (2006). *ICL3225, ICL3245 datasheet*, 12 Ekim 2012, <http://www.intersil.com/content/dam/Intersil/documents/fn48/fn4878.pdf>
- RS-422 Transceivers (2007). *LTC2854, LTC2855 datasheet*, 13 Ekim 2012, <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/285455fb.pdf>
- Taylor, J. W. R. (1997). *Jane's book of remotely piloted vehicles*. New York: Collier Books
- The JAviator Project (2013). *The javiator quadroter: an aerial software testbed*, 6 Haziran 2013. <http://javiator.cs.uni-salzburg.at/>
- Xbee Modul (2008). *XBee/XBee-PRO OEM RF modules*, 5 Ağustos 2012, http://ftp1.digi.com/support/documentation/900000982_A.pdf