

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**İKİ EKSENLİ UZAKTAN KOMUTALI
HEDEF TAKİP SİSTEMİNİN TASARIMI VE KONTROLÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa Işık AKYÜZ

Savunma Teknolojileri Anabilim Dalı

Savunma Teknolojileri Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. İbrahim ÖZKOL

OCAK 2021

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**İKİ EKSENLİ UZAKTAN KOMUTALI
HEDEF TAKİP SİSTEMİNİN TASARIMI VE KONTROLÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Mustafa Işık AKYÜZ
(514161017)**

Savunma Teknolojileri Anabilim Dalı

Savunma Teknolojileri Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. İbrahim ÖZKOL

OCAK 2021

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 514161017 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Mustafa Işık AKYÜZ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “İKİ EKSENLİ UZAKTAN KOMUTALI HEDEF TAKİP SİSTEMİNİN TASARIMI VE KONTROLÜ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. İbrahim ÖZKOL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üyesi Ramazan YENİÇERİ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. O. Ergüven VATANDAŞ
İstanbul Gelişim Üniversitesi

Teslim Tarihi : 17 Ocak 2021
Savunma Tarihi : 24 Ocak 2021





*Bir Sır daha var çözdüklerimizden başka , Bir Işık daha var, Işık 'lardan başka,
Hiç bir yaptığınla yetinme,Geç öteye, Bir şey daha var bütün yapıtlardan başka.
Aileme ve Sabah Güneşine.*



ÖNSÖZ

Yüksek Lisans Tez Projesi çalışmam süresince çok değerli önerileri ile katkıda bulunan danışman hocam Sn. Prof. Dr. İbrahim ÖZKOL ‘a sonsuz saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Bugünlere gelmemi sağlayan, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen AİLEME şükranlarımı bir borç bilirim.

Ocak 2021

Mustafa Işık AKYÜZ
(Mekatronik Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Literatür Araştırması	3
2. PLATFORMUN MATEMATİK MODELİ	5
2.1 Genel Bilgiler	5
2.2 Platformun Kinematik Denklemleri	8
2.2.1 Elevasyon eksen hareket denklemleri	10
2.2.2 Azimut eksen hareket denklemleri	12
2.3 Platformun Matematik Modeli	14
2.3.1 SHP matematik modeli	16
2.3.2 Motor matematik modeli	21
2.4 Kontrolcü Seçimi	24
2.4.1 PID kontrolör parametreleri	26
2.4.1.1 Manuel ayarlama yöntemi	27
3. SİMÜLASYON SONUÇLARI	31
3.1 Optimizasyon	35
3.2 Sistem Tepkisi	37
3.3 Simülasyon Çıktıları	39
4. DENEYSEL SONUÇLAR	41
4.1 Elektronik Komponent Seçim Kriterleri	43
4.1.1 Motor seçimi için genel bilgiler	43
4.1.1.1 Hibrit servo motor	43
4.1.1.2 Motorların teknik özellikleri	44
4.1.1.2.1 Azimut eksen motoru	44
4.1.1.2.2 Elevasyon eksen motoru	46
4.1.2 Motor sürücüler	47
4.1.3 IMU sensör kartı seçimi	48
4.1.4 Arduino kontrolcü seçimi	51
4.1.4.1 Arduino mega kontrolcüsü	52
4.1.4.2 Arduino nano kontrolcüsü	53
4.1.5 Encoder seçimi	54
4.1.6 Güç kaynağı seçimi	55

4.1.7 Kamera seçimi.....	56
4.1.8 Lazer noktalayıcı	58
4.1.9 Mikro limit sınırlayıcı	58
4.2 Mekanik Komponent Seçimi.....	59
4.2.1 Şalt malzemelerin seçimi	59
4.2.1.1 Kaplin seçimi.....	59
4.2.1.2 Rulman seçimi.....	59
4.2.1.2.1 Elevasyon eksen rulmanı.....	60
4.2.1.2.1 Azimut eksen rulmanı	60
4.2.1.3 Kasnak	61
4.2.1.3 Kayış.....	61
4.2.2 Solidworks prototip çizimleri.....	61
4.2.2.1 Elevasyon eksen parçası.....	61
4.2.2.2 Elevasyon taret parçası.....	61
4.2.2.3 Elevasyon referans parçası	61
4.2.2.4 Elevasyon encoder parçası	61
4.2.2.5 Azimut eksen parçası	62
4.2.2.6 Azimut alt gövde parçası.....	62
4.2.2.7 Azimut motor parçası	62
4.2.2.8 Azimut encoder parçası	62
4.2.2.9 Zemin kolon parçası	62
4.2.2.10 Zemin kapak parçası.....	62
4.2.2.11 Zemin referans parçası	63
4.2.3 Prototip montajı.....	63
4.3 Programlama Bilgileri	64
4.3.1 Görüntü işleme algoritmaları	64
4.3.2 Arduino kontrol algoritmaları	68
4.4 Deneysel Test Çıktıları	68
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	69
5.1 Özet.....	69
5.2 Öneriler.....	70
KAYNAKLAR.....	72
EKLER	75
ÖZGEÇMİŞ.....	107

KISALTMALAR

SHP	: Stabilize Hedefleme Platformu
MIMO	: Çok Girişli Çok Çıkışlı Sistem
IMU	: Ataletsel Ölçüm Birimi
CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım
CNC	: Sayısal Kontrollü Bilgisayar
WDR	: Geniş Dinamik Menzil
HSV	: Renk Tonu, Doygunluk, Parlaklık Renk Uzayı
RGB	: Kırmızı, Yeşil, Mavi Renk Uzayı
PID	: Proportional-Integral-Derivative
PI	: Proportional-Integral
P	: Proportional



SEMBOLLER

F	: Kuvvet [N]
f	: Frekans[Hz]
v	: Hız [m/s]
A_r, A_e, A_d	: Elevasyon eksenini atalet parametreleri
B_n, B_e, B_k	: Azimut eksenini atalet parametreleri
t	: Zaman
I, I_{xyz}	: Kütlesel atalet momenti
I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}	: Kütlesel atalet momenti köşegen bileşenleri
J_{eş}	: Eşdeğer kütle atalet matrisi
$\vec{H}$	: Açısal momentum vektörü
$\vec{T}$	: Tork vektörü
$\vec{w}$	: Açısal hız vektörü
G	: Zemin koordinat sistemi
A	: Elevasyon koordinat eksenini
B	: Azimut koordinat eksenini
C	: Dönüşüm matrisi
ϵ, u	: Eksen açıları[radyan]
$\dot{\epsilon}, \dot{u}$	: Eksen açısal hızları
w, Ω_m	: Açısal hız
$\dot{w}$	: Açısal ivme
ω_n	: Doğal frekans
W	: Güç birimi[watt]
A	: Akım[amper]
rpm	: Dakikadaki dönme hızı
PWM	: Darbe genişlik modülasyonu
K_p	: Kazanç parametresi
K_i	: İntegral parametresi
K_d	: Türev parametresi
Q_{i,j,k}	: Zemin bozunum açıları



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Motor Katalog Parametre Değerleri.	24
Çizelge 2.2 : PID parametrelerini bağımsız olarak artırmanın etkisi.	25
Çizelge 2.3 : Elevasyon Ekseni hızı PI kontrolörlerinin Kp performansları.	28
Çizelge 2.4 : Elevasyon Ekseni hızı PI kontrolörlerinin Ki performansları.	28
Çizelge 2.5 : Elevasyon Ekseni pozisyonu P kontrolörlerinin Kp performansları	28
Çizelge 2.6 : Azimut Ekseni hızı PI kontrolörlerinin Kp performansları.	29
Çizelge 2.7 : Azimut Ekseni hızı PI kontrolörlerinin Ki performansları.	30
Çizelge 2.8 : Azimut Ekseni pozisyonu P kontrolörlerinin Kp performansları.	30
Çizelge 2.9 : Manuel Ayarlama Yöntemi ile Belirlenen Parametreler.	30
Çizelge 3.1 : Kontrol Parametreleri.	33
Çizelge 3.2 : Bozucu Giriş altında Eksenlerin Sapma Açıları.	39
Çizelge 4.1 : SST59D5305 Motoru Teknik Özellikler Tablosu.	44
Çizelge 4.2 : 17HS8401B Motoru Teknik Özellikler Tablosu.	46



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1	: Aselsan Denizgözü stabilize hedefleme platformu	2
Şekil 2.1	: İki eksen stabilize hedefleme platform sistemi	6
Şekil 2.2	: İki eksen SHP blok diyagram genel gösterimi	15
Şekil 2.3	: Bir eksendeki Kaskat PID kontrolör genel gösterimi.....	15
Şekil 2.4	: G-B referans eksenı açısıal hız dönüşümleri	16
Şekil 2.5	: B-A referans eksenı açısıal hız dönüşümleri	16
Şekil 2.6	: Çapraz Bağlaşım tork bozunumları genel Simulink modeli	17
Şekil 2.7	: Elevasyon eksenı Çapraz Bağlaşım tork bozunumu Simulink modeli...	18
Şekil 2.8	: Azimut eksenı Çapraz Bağlaşım tork bozunumu Simulink modeli	18
Şekil 2.9	: Elevasyon eksenı iç detay diyagramı gösterimi	19
Şekil 2.10	: Azimut eksenı birinci kısım iç detay diyagramı gösterimi.....	19
Şekil 2.11	: Azimut eksenı ikinci kısım iç detay diyagramı gösterimi.....	19
Şekil 2.12	: Azimut eksenı üçüncü kısım iç detay diyagramı gösterimi	20
Şekil 2.13	: Azimut eksenı dördüncü kısım iç detay diyagramı gösterimi.....	20
Şekil 2.14	: Azimut eksenı beşinci kısım iç detay diyagramı gösterimi.....	20
Şekil 2.15	: Jeş – k eksenı üzerindeki ataletlerin Simulink modeli	21
Şekil 2.16	: DC motor sistemi şematik gösterim	21
Şekil 2.17	: DC motor Transfer Fonksiyon blok diyagramı	22
Şekil 2.18	: PID kontrolör blok diyagramı	26
Şekil 3.1	: SHP kontrol döngüsü Matlab/Simulink modeli	32
Şekil 3.2	: Elevasyon eksenı referans komut cevabı.....	34
Şekil 3.3	: Azimut eksenı referans komut cevabı	34
Şekil 3.4	: Bir eksendeki ön filtreli Kaskat PID kontrolör genel gösterimi.....	35
Şekil 3.5	: Elevasyon eksenı ön filtreli referans komut cevabı.....	36
Şekil 3.6	: Azimut eksenı ön filtreli referans komut cevabı	36
Şekil 3.7	: SHP modelinin 0.5 Hz zemin titreşim genliğı cevabı	37
Şekil 3.8	: SHP modelinin 1 Hz zemin titreşim genliğı cevabı	38
Şekil 3.9	: SHP modelinin 2 Hz zemin titreşim genliğı cevabı	38
Şekil 3.10	: SHP modelinin 4 Hz zemin titreşim genliğı cevabı	38
Şekil 3.11	: SHP modelinin 8 Hz zemin titreşim genliğı cevabı	39
Şekil 4.1	: SHP kontrol mekanizması akış şeması.....	42
Şekil 4.2	: STT59D5305 motor ölçüleri	45
Şekil 4.3	: SST59D5305 motor frekans - tork grafiğı	45
Şekil 4.4	: 17HS8401B motor teknik resmi.....	46
Şekil 4.5	: HY-DIV268N-5A kontrolörü.....	47
Şekil 4.6	: IMU sensör kartı.....	48
Şekil 4.7	: Yerçekimsiz sensör durumu	49
Şekil 4.8	: Yerçekimsiz ortamda hareket halindeki sensör durumu	49

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 4.9 : Yerçekiminde sensör durumu.....	50
Şekil 4.10 : Yerçekiminde 45 derece sağ dönüşte sensör durumu.....	50
Şekil 4.11 : Bileşke R vektörünün sensör koordinat düzleminde gösterimi.....	51
Şekil 4.12 : Arduino Mega kontrol kartı.....	52
Şekil 4.13 : Arduino Nano kontrol kartı	53
Şekil 4.14 : Delik şaftlı encoder.....	54
Şekil 4.15 : 24V DC güç kaynağı	55
Şekil 4.16 : Asus Rog Eye Pro Webcam	56
Şekil 4.17 : TF Mini Plus lazer mesafe sensörü	57
Şekil 4.18 : Lazer noktalayıcı	58
Şekil 4.19 : Mikro limit sınırlayıcı.....	58
Şekil 4.20 : Kaplin	59
Şekil 4.21 : KFL08 rulman ve ölçüleri	60
Şekil 4.22 : KFL004 rulman ve ölçüleri	60
Şekil 4.23 : Solidworks ve fiziksel prototipin montajlı görünümü.....	63
Şekil 4.24 : HSV renk grafiği	65
Şekil 4.25 : Programda kullanılan HSV renk belirleme arayüzü.....	65
Şekil 4.26 : Çekilmiş bir resmin HSV renk uzayındaki görüntüsü.....	66
Şekil 4.27 : Görüntü verilerinin değerlendirilme katmanları.....	66
Şekil 4.28 : Hedefin merkezinin işaretlenmesi	67
Şekil 4.29 : Görüş hattının hedefe çevrilmesi.....	67
Şekil C.1 : Elevasyon gövdesi atalet ve kütle merkezi.....	103
Şekil D.1 : Azimut gövdesi atalet ve kütle merkezi	103
Şekil E.1 : Elevasyon eksen parçası	104
Şekil E.2 : Elevasyon taret parçası	104
Şekil E.3 : Elevasyon referans parçası.....	104
Şekil E.4 : Elevasyon encoder parçası.....	104
Şekil E.5 : Azimut eksen parçası	105
Şekil E.6 : Azimut alt gövde parçası	105
Şekil E.7 : Azimut motor parçası.....	105
Şekil E.8 : Azimut encoder parçası	105
Şekil E.9 : Zemin kolon parçası.....	106
Şekil E.10 : Zemin kapak parçası	106
Şekil E.11: Zemin referans parçası.....	106

İKİ EKSENLİ UZAKTAN KOMUTALI HEDEF TAKİP SİSTEMİNİN TASARIMI VE KONTROLÜ

ÖZET

Hedef takip sistemlerinin stabilizasyonu dış kaynaklı titreşimlerin ve bozunumların platformun odak noktasına etkisini minimize etmeyi amaçlamaktadır. Bu şekilde görüş hattında, belirlenen hedef veya konum üzerinde takip, tahrip veya imha etme gibi farklı görev tanımları daha hassas ve güvenli bir şekilde icra edilebilecektir.

Bu tez çalışmasında, İki eksenle hareket kabiliyetine sahip, yarı otonom mekatronik bir Hedef Takip Sistemi tasarımının matematik modelinin elde edilmesi, parçalarının imal edilmesi ve fiziksel olarak tüm özellikleri ile hayata geçirilmesi hedeflenmiştir. Görüş hattı üzerine yerleştirilen bir Lazer noktalayıcı ile hedef işaretlemesi yapılabilen, Platformun Kumanda Arayüzü üzerinden uzaktan manuel kontrol edilebilen, görüntü işleme algoritmaları ve Optik görüş birimleriyle belirlenen hedefi minimum hatayla takip etmesi amaçlanmıştır. Bu hedefe yönelik gerçekleştirilen matematiksel analizler ile birlikte mekanik, elektronik ve yazılımsal çalışmalara yer verilmiştir.

Bölüm 2’de SHP’nin kinematik denklemleri formüle edilmiştir. Doğrusal olmayan dinamik denklemler formüle edilmeden önce, ilk olarak bu sistemin referans koordinat eksenleri ve dönüşüm matrisleri tanımlanmıştır. Bölüm 3 ‘te MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan modelin simülasyon sonuç grafiklerine yer verilmiştir. Kaskat PID kontrol yöntemi doğrusal olmayan sistem modeline uygulanmıştır. Kaskat PID denetleyicilerin tasarım prosedüründe, ilk olarak her iki eksenin ikincil kademesi olan hız denetleyici parametreleri ayarlanır. Ardından en iyi gerçekleşen sistem performansını elde etmek için birincil kademedeki konum kontrolör parametreleri ayarlanır ve ön filtre eklenir. Belirlenen parametrelerle sistem performansları farklı genlikteki zemin titreşimleri ve konum komutları için karşılaştırılmıştır. Bölüm 4 ‘te Solidworks tasarlanmış ve üretilmiş parçalarla montajlanan gerçek bir sistemin test sonuçlarına yer verilmiştir. Bu sayede gerçek sistem senaryolarını gözlemlemek için sanal gerçeklik yerine fiziksel dünyada oluşturulmuş elektro-mekanik bir yapı üzerindeki test sonuçlarının direkt olarak gözlemlenebileceği test ortamı elde edilmiştir.

Yapılan çalışmalarda öncelikle sistem için kullanılması düşünülen tüm komponentler detaylı teknik bilgilerle belirlenmiştir. Dahil edilen tüm parçalar ve geometrik ölçüler dikkate alınarak sistemin tümleşik bir matematiksel modeli elde edilmiş ve Matlab/Simulink programında farklı genliklerdeki titreşimlere karşı sistemin kararlılığı analiz edilmiştir. Fiziksel model için Solidworks programında konsept bir tasarım yapılmış, geometrik toleransları belirlenmiş ve teknik resimleri hazırlanarak gerekli parçalar imal ettirilmiştir. Elektronik komponentleriyle birlikte tüm montajı yapılan iki eksenli Hedef Takip Sistemi platformunun C# programında kullanıcı arayüzü ile birlikte görüntü işleme algoritmaları oluşturulmuştur. Kullanıcı arayüzü üzerinden manuel kullanım için motorlar senkron olarak sürülmüş ve kontrol testleri tamamlanmıştır. Belirlenen kontrol algoritmasıyla mikroişlemci üzerinden Otonom Hedef Takibinin final testleri yapılmıştır. Son olarak simülasyon sonuçları ile gerçek test sonuçlarının benzerlik ve farklılıkları üzerinden sonuçlar analiz edilip, yorumlanmıştır. Simülasyon analizleri önerilen kontrol yönteminin, Deneysel sonuçlar tümleşik sistem algoritmalarının doğruluğunu kanıtlamaktadır.



DESIGN AND CONTROL OF TWO-AXIS REMOTE COMMANDED TARGET TRACKING SYSTEM

SUMMARY

Stabilization of a target tracking system aims to minimize the effect of external vibrations and distortions on the focal point of the platform. In this way, different job descriptions such as tracking, destruction or destruction in the line of sight, on the specified target or location will be performed more precisely and safely.

In this thesis, it is aimed to obtain a mathematical model of a semi-autonomous mechatronic Target Tracking System design that has the ability to move in two axes, manufacture its parts and physically implement it with all its features.

It is aimed to follow the target with minimum error, which can be targeted with a laser pointer placed on the line of sight, can be controlled remotely via the Control Interface of the Platform, and determined by image processing algorithms and Optical sight units. Mechanical, electronic and software studies have been included along with the mathematical analyzes performed for this purpose.

The simulation environment offers many benefits for control system designers. For example, the scenarios of the system to be tested can be repeated many times in different parameters, the results can be optimized and in this way, it is easier to reach the desired results in the implemented system. The simulation study has mainly focused on the mathematical modeling of the two-axis SHP in order to obtain a mathematical model as realistic as possible using the Newton-Euler approach.

In Chapter 2, the kinematic equations of SHP have been formulated. Before formulating nonlinear dynamic equations, firstly the reference coordinate axes and transformation matrices of this system are defined. Angular velocity and acceleration variables between each reference coordinate axis are expressed by means of transformation matrices. After obtaining the kinematic equations, the dynamic equations of the motor and two-axis platform were written and the system model was created.

The block diagram for the stabilization cycle is introduced and the cross coupling effect is integrated into the model. In the planned scenario, only the distortions of the vibrations of different amplitudes originating from the ground and the mutual cross-coupling effect of the axes on the reference signal were analyzed. Due to this condition, certain assumptions have been made in modeling, controller design and simulations. Another goal planned is to design the controller parameters correctly and compare their performance. In the modeling of the motor, the basic motor model with electrical and mechanical parts is used. The parameter values of Cascade PID control, a traditional technique, are determined by reference to the effects of the system on the steady state error.

In Chapter 3, the simulation result graphics of the model created in MATLAB / Simulink environment are given. Cascade PID or Cascade PID control method has been applied to the nonlinear system model. In the design procedure of cascade PID

controllers, the speed controller parameters, which are the secondary stage of both axes, are set first. Next, the position controller parameters in the primary step are adjusted to achieve the best performance of the system, and then a low-pass filter pre-filter is added.

The system performances with the determined parameters are compared for different amplitude ground vibrations and position commands. In the system simulation study, ground vibrations are between 0.5 - 8 Hz. In stabilization performance, the rise time, settlement time and elimination of deterioration are important. When the specified disturbance input values are at low levels, the SHP control is successful in stabilization and tracking problems. However, the Cascade PID control has fast positioning and suppression performances for distortion at position commands lower than 0.5 rad. Gradual PI control parameters are preferred for the control system providing the best performance.

In Chapter 4, test results of a real system assembled with parts designed and manufactured in Solidworks program are given. In this way, a test environment where test results can be directly observed on an electro-mechanical structure created in the physical world instead of virtual reality was obtained to observe real system scenarios. A theoretical engineering study was supported with a practical approach by finding an application area.

Tracking along the line of sight from a fixed location, when the SHP optically detects a predetermined target during scanning, it moves to track and focus. With the written image processing and control algorithms, the tracking of the object whose motion was detected was successfully done. In tests performed at variable distances of 0 - 5 meters, it is absolutely successful in tracking and focusing objects moving at speeds up to 3m/s. When higher speeds are reached, it can deviate from the target in sudden direction changes.

Undoubtedly, the aforementioned distances and speeds are considered sufficient in the current scenario, but will not be sufficient during a real threat. In addition, it provides the reality requirements in the thesis study, but still many theoretical factors have not been discussed enough and the software subject including image processing has not been touched.

For use in future studies, some suggestions are given in this section to obtain a more realistic system simulation and to compare their performance with control and monitoring methods not mentioned in the previous sections. Theoretically, future studies could better suppress disturbances or improve system performance to respond faster to reference signals, as well as improve rigidity, tracking, and stabilization capabilities.

In the studies carried out,, first of all, all the components to be used for the system are determined with detailed technical information. With the prerequisite of being portable and light, the distances between axes are kept as low as possible. An integrated mathematical model of the system was obtained by considering all the parts and geometric dimensions included, and the stability of the system against vibrations of different amplitudes was analyzed in the Matlab / Simulink program.

Then, a concept design was made in the Solidworks program for the physical model, considering the geometric constraints, geometric tolerances were determined, technical drawings were prepared and the necessary parts were produced. The two-axis Target Tracking System, which is fully assembled with its electronic components, has been created with the user interface in the C # program of the platform and the first test of the program has been made. For manual use via the user interface, the motors are driven synchronously and the secondary control tests have been completed. Final tests of Autonomous Target Tracking were carried out on the microprocessor with the determined control algorithm. Finally, the results were analyzed and interpreted based on the similarities and differences between the simulation results and the real test results. Simulation analyzes prove the accuracy of the proposed control method and the experimental results of the integrated system algorithms.





1. GİRİŞ

Tarihte gerçekleşen iki boyutlu , coğrafya üzerinde gelişen klasik savaş alanlarının, Havacılığın ve dolayısıyla Uçakların kullanımıyla üç boyutlu, Uzay'ın yarışa dahil edilmesiyle dört boyutlu hale gelmesiyle, algılanan tehdit alanlarının çok aşırı çeşitlenmesi, insanlar arası iletişim koordinasyonu yeteneğinin, teknolojik ilerlemelerle gelişmesini beraberinde getirmiştir. Dijitalleşmeyle birlikte hareket ortamında gerçek zamanlı veri iletişimi askeri senkronizasyonu hızlandırdığından, insan merkezli karar verici konum, insan-makine arasındaki yeteneklerin seçiminde, insansız tarafının daha önemli bir konuma geleceği yöne doğru evrileceği tahmin edilmektedir [1]. Dünyanın önde gelen bilim insanları otonom karar alan robotlar hakkında Birleşmiş Milletler'e bir uyarı mektubu göndermiş, pandoranın kutusu açıldıktan sonra kapatmak zor olur diyerek çekincelerini paylaşmışlardır [2]. Bize göre ise kutu çoktan açılmış durumdadır. Bu yüzden dünyanın önde gelen ülkeleri bu konularda hali hazırda yıkıcı bir yarış içindedirler [3]. Ülkeler açısından Stratejik bir alan olarak görülen insansız kara,hava ve deniz platform teknolojilerindeki bu zorunluluğun karşılanmasında ve ticari olarak katma değerinin arttırılmasında en önemli pay şüphesiz verilen görevin en kusursuz, doğru ve hızlı şekilde yapılmasındadır. Bu noktada ise değişken dış koşulların negatif etkisinin görev şartlarına minimum yansması ve hassasiyetin korunması önem arz etmektedir.

Asimetrik tehdit alanları, tehlikeye karşı hızlı karar verme, insan reflekslerinin erişemeyeceği derecede çok kısa müdahale süresi gereksinimi, görevlerin karmaşıklığı ve zorluk tanımlarının artması gibi nedenler Robotik - Mekatronik içerikli platformlara olan ihtiyacı ve buna paralel sayılarının artmasını da beraberinde getirecektir. Değişen bu görev tanımları ve hassasiyet ihtiyaçlarıyla birlikte, Mekatronik Sistem bilgi ihtiyacının artacağı, akademik altyapımızın bu trende paralel hatta daha ileride olmasını gerektirmektedir. İki Eksenli Uzaktan Komutalı Stabilize Hedef Takip Platformu geliştirme çalışmamız bu noktadaki ihtiyacın giderilmesini sağlayacak kadrolara kaynak ve ülkemizin bilgi altyapısına katkı sunmak amacındadır. Aşağıda bir örneği verilen Stabilize hedefleme platformlarına gece görüş, termal kamera, lazer

sistemleri vb. ekipmanlar entegre edildiğinde kullanıcıya mesafe bulma, güdüm, karşı tedbir, aktif görüntüleme ve algılama gibi konularda üstünlükler sağlayabilmektedir. Bu konuda ki literatür Hedef Noktalama, Hedef Tespit, Mesafe Ölçme, Hedef İşaretleme, ve Lazer Uyarı konularında devam etmektedir. Stabilize edilmiş platformlardaki elektro optik sistemlerin kara, hava, deniz ve uzay platformlarında geniş uygulama alanları mevcuttur [26].



Şekil 1.1 Aselsan Denizgözü Stabilize Hedefleme Platformu.

1.1 Tezin Amacı

Sivil yada Askeri olarak güdüm, takip ve izleme alt başlıklarında elektromekanik stabilizasyon büyük önem arz etmektedir. Genel olarak silah sistemleri, radar cihazları, kamera platformları ve lazer güdümler gibi fayda sağlayıcı yüklerin, görüntü optimizasyonu, hedef odaklanması ve nesnenin takibi süreç iyileştirmelerinde kullanılmaktadır [4]. Görüntülenen bir hedefin hassas olarak takibi elektro-optik sistemin hareket sağlayıcı mekanizmalarının mutlak kontrolüyle mümkündür. Bozucu dış etkilerin sistem üzerindeki etkisinin minimuma indirilmesi çalışmanın hassasiyetini doğrudan etkileyecek birincil bir sorundur. Bu sorunlar zemin kaynaklı hareketlerden, tasarım dinamiklerinden veya sistemin eksenel kütle dengesizliğinden kaynaklanabilir [5]. Simülasyonlarda bu sorunun giderilmesinde, Görüş Hattı Stabilizasyonu için kütle-stabilizasyon kullanılacak ve dışarıdan gelen çeşitli bozucu etkiler altında, sistemin yönelmesini, sabit bir yere bakması ve/veya referans sinyal takip problemlerinin çözülebilmesi hedeflenmektedir. Bu tez çalışmasında iki eksenli hareket edebilen, zemine göre döner kule olarak tanımlanan taret üzerine yerleştirilen bir Lazer noktalayıcı ile Optik görüş birimleri ve platformun Kumanda

arayüzü üzerinden uzaktan kontrol imkanı sunulan, yarı otonom, belirlenen hedefi takip özelliğine sahip, stabilize bir Hedef Takip Sisteminin imal edilmesi, matematik modelinin elde edilmesi ve fiziksel olarak tüm özellikleri ile hayata geçirilmesi hedeflenmiştir. Bu hedefe yönelik gerçekleştirilen matematiksel analizler ile birlikte mekanik, elektronik ve yazılımsal çalışmalara yer verilmiştir.

1.2 Literatür Araştırması

Tezin belirlenen amacı doğrultusunda benzer uygulamalarda kullanılan kaynakların incelenmesi gerçekleştirilmiş, tezin yazımı aşamasındada bulunan yeni literatürde taranarak daha önce çalışma yapmış kişilerin deneyim ve birikiminden yararlanılmıştır. İncelenen kaynaklardan edinilen bilgiler dahilinde radar, lazer, gimbal, görüş hattı takibi gibi uygulamalarda bir veya birkaç farklı veri sensörünün dahili, stabilizasyonun hassasiyeti için çok önemli olduğu tespit edilmiştir. Görüntü işleme veya hedef izleme uygulamalarının stabilizasyon gereksinimlerini tatmin edici bir şekilde gerçekleştirmek sensör çözünürlüğünün bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır [6]. Yapılan stabilize platform çalışmaları ve gimbal sistemlerinde hedeflenen görüş hattının dengelenmesi için sistemde bulunan tüm komponent etkilerinin benzetilerek birleştirildiği tümleşik matematiksel modeller oluşturulmuştur. Bu matematiksel modele dış bozunumlar olarak kabul edilen sinyaller girdi olarak verilmiştir. Araştırılan kaynaklar bize göstermektedirki çalışmalardaki farklılıklar kontrol yönteminin performansı veya bunun seçimi üzerine yoğunlaşmıştır. Bu şekilde meydana gelebilecek bozunumlara karşı sistemin kararlılık davranışlarını analiz etmişler ve seçtikleri kontrol yöntemleriyle düzeltmeye çalışmışlardır. Golmohammad ve Homaei ise iki eksenli gimbalin stabilizasyon problemini incelemişler, kamerayı kontrol etmek ve bozunumları azaltmak için PI kontrol yaklaşımını benimsemişler, deneysel ve teorik sonuçların birbirini doğruladığı bir çalışma yapmışlardır [7]. Zhou, Yang ve Cai ise çalışmalarında kütle dengesizliği kaynaklı tork bozukluğunun, stabilize edilmiş bir platformun dinamik performansları üzerindeki etkisini minimize etmek için önerdikleri kontrol yöntemini açıklamışlardır. Platformun takip doğruluğunu ve kararlılığını geliştirmek için, PID kontrol yöntemlerine dayalı bir bileşik kontrol şeması önermişlerdir. Yöntemi doğrulamak için sırasıyla simülasyonlar ve deneyler gerçekleştirmişlerdir [8]. Poyrazoğlu ise detaylı bir şekilde oluşturduğu matematik modelinde, bozucu etkilere karşılık, LQI ve kaskat

PID kontrol yöntemlerini ayrı ayrı kullandığı simülasyonlarında çıkış sinyalinin referans sinyali ne kadar takip ettiğini incelemiş ve kontrol yöntemlerinin matematiksel kıyaslamasını yapmıştır [9]. Sarp ise deniz araçları için geliştirdiği nadir tercih edilen motorlara sahip iki eksenli platform matematik modelini ataletsel bozunumlar ile dış bozucu titreşimlerin, görüş hattı stabilizasyon performansı üzerindeki etkisini inceleyen bir çalışma yapmıştır [10].

Bu bilgiler ışığında simülasyon modelinin belirlenmesi için literatür incelenmiştir. Platform rijit bir yapı olarak düşünülerek iki eksenli kinematik hareket denklemleri elde edilmiştir. Çapraz kuplaj etkisi ile ifade edilen iki eksen ataletsel performansının birbirleri üzerindeki bozucu etkisi matematik modele yansıtılmıştır. Platformun sabitlendiği zeminden kaynaklı bozucu genlikteki değişken büyüklükteki titreşimlerin matematiksel modele eklentisi yapılmıştır. Simülasyon performansı açısından kabuller yapılmış, benzetim metodları kullanılarak platformun tümleşik matematiksel modeli elde edilmiştir. Kütle-stabilizasyon kullanılarak çıkarılan model, dış kaynaklı titreşimlerin belirlenen aralıklardaki genlikleri değiştirilerek analiz edilmiştir.

“Bilmek yeterli değil uygulamak gerek, istemek değil yapmak gerek” diyen Goethe’nin görüşünden yola çıkarak, fiziksel olarak üretilen prototip tasarım üzerinde, gerçek bir uygulamada yazılan kontrol programı teste tabi tutulmuştur. Yazılım performansı açısından görüntü işleme uygulamasında belirlenen hedefin önceden HSV renk yoğunluğu tespiti yapılmıştır. Kamera görüş hattı çalışma aralığı hassasiyeti incelenmiştir. Piyasadaki motor tiplerinden, uygun tork ve hız değerleri belirlenmiştir. IMU sensör performansını etkileyen durumlar değerlendirilmiştir.

İncelenen literatür çalışmalarından hareketle fiziksel modeli gerçekleştirilen tasarımda, Kamera görüş açısı iki eksen kesişimlerine konumlandırılmıştır. Görüntü işleme algoritması ile Hedef belirlenmiş, IMU sensör ve Sürücüler yardımıyla motorlar kontrol edilmiştir. Bu algoritmalarla platformun görüş hattının hedeften sapmasının engellenmesi amaçlanmıştır. Son olarak Fiziksel modelin gerçek davranışları ile Simülasyon modelinin çıktıları yorumlanmış, benzerlikleri ve farklılıkları değerlendirilmiş, gelecekteki çalışmalar için öneriler sunulmuştur.

2. PLATFORMUN MATEMATİK MODELİ

2.1 Genel Bilgiler

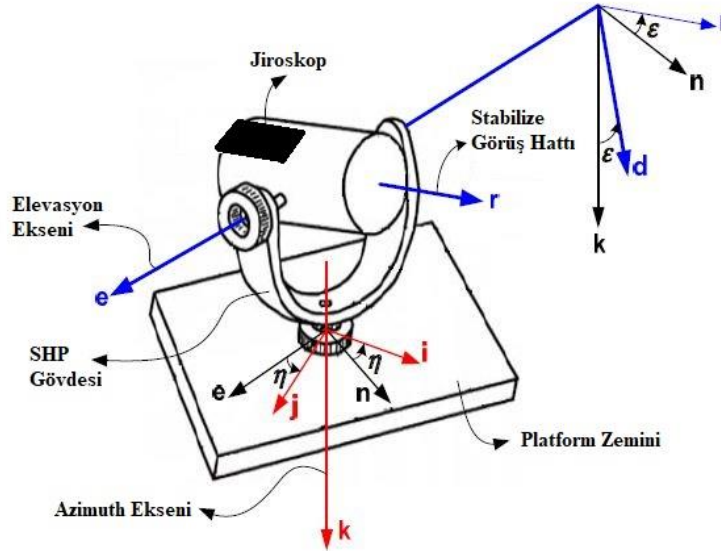
Stabilize Hedef Takip Sistemi veya diğer bir isimle Stabilize Hedefleme Platformu(SHP) genellikle, tespit edilen bir hedefin takip edilmesi sırasında karşılaşılabilecek çevre kaynaklı dış titreşimler veya dönüş hızına bağlı olarak ortaya çıkabilen ataletsel bozunumlara, karşı tork uygulayarak azaltmak, nihayetinde sıfıra yakınlaştırma amacındadır. Bu sayede hedefin takip kararlılığı artırılarak istenen sonuca ulaşmak hedeflenmektedir. Tipik olarak bir gimbal sistemine benzeyen yapıdadır. Doğrusal olmayan gimbal sistemleri, çok girişli, çoklu çıkışlı (MIMO) sistemler olarak tanımlanabilir. Yani birçok farklı referans komut sinyali aynı sisteme girerken bunlara bağlı olarak oluşan birçok sonuç sinyalide çıkış olarak gözlemlenebilir. Bu sinyallerinin birbirleri arasındaki etkilerine bağlı istenmeyen sinyal bozunumlarında ortaya çıkması söz konusu olabilmektedir. Gerçek bir çevre ortamında mevcut olabilecek sürtünme, tork dalgalanması, motor sürtünme torku, statik ve dinamik kütle dengesizlikleri gibi bazı doğrusal olmayan durumlarında matematiksel modelde hesaba katarak simülasyon gerçekçiliğini arttırmak mümkündür. Gerçekçi bir sistem modeli elde etmenin temel avantajı, fiziksel sistem eksikliğinde belirlenen kontrol yöntemleri uygulandığında sonuçlarının karşılaştırılma imkanıdır.

Bu tez projesinde tasarımı yapılan SHP fiziksel olarak gerçekleştirilip test edildiğinden dolayı MATLAB/Simulink'te yapılan simülasyonların, süresinde efektif kullanılması göz önüne alınarak mümkün olduğunca gerçekçi bir matematik model kullanılması planlanmıştır. Bu nedenle bazı varsayımlar ve kabuller yapılmış, işlem süreleri kısaltılmaya çalışılmıştır. Bu konu ileride detaylıca açıklanacaktır.

SHP platformunun modelleme çalışmasında ilk olarak referans eksen takımları ve dönüşüm matrisleri anlatılmış, kinematik denklemleri formüle edilmiştir. Bundan sonra Elevasyon ve Azimut kütle dengesizlik etkilerini içeren dinamik denklemler çıkarılmıştır. İkinci olarak motorun matematik modeli elde edilmiştir. Son olarak PID kontrolör tasarımında kullanılacak K_p , K_i ve K_d parametrelerinin değerleri için

manuel ayarlama metoduyla denemeler yapılmış , en uygunları seçilerek MATLAB/Simulink analizine geçilmiştir. Matematiksel modelde belirlenen parametreler MATLAB/Simulink'te uygun fonksiyon bloklarıyla oluşturulmuş, karışıklıkları önlemek için gerekli yerlerde altistem blokları kullanılmıştır. Bu altistem bloklarının içerikleride detaylı şekilde gösterilmiştir.

Platform sistemlerinde jiroskop, iç eksen olarakda isimlendirilen Elevasyon eksenine dik olan görüş hattının bulunduğu gövdeye sabitlenmiş ve sensörün sıfırlama, kalibrasyon ölçümleri bu konumda gerçekleştirilmiştir. Bu kısımda bulunmasının sebebi Görüş Hattında olabilecek bozunumu, herhangi başka bir matematiksel dönüşümden kaynaklı hata girdisi eklenmeden direkt olarak ölçmek ve gerçek zamanlı olarak Azimut ve Elevasyon motorlarının kontrolünde kullanılmasını sağlamaktır.



Şekil 2.1: İki Eksen Stabilize Hedefleme Platform Sistemi

Yukarıdaki şekilde eksenlere ve hedef hattına bağlı referans eksenler gösterilmektedir[11]. Bu eksenlerin ve bağlı bulundukları kütlelerin hareketleri birbirlerini etkilemektedir. Simetrik olmayan bir kütle dağılımının sonucunda Dinamik kütle dengesizliği ortaya çıkar. Dinamik dengesizlik kavramı eylemsizlik matrisi ile gösterilebilir. Bu nedenle, dönen gövdeler dönme eksenlerine göre simetrik bir kütle dağılımına sahipse, gimbaldin dinamik dengesizliği yoktur ve atalet matrisi Eş. 2.1'deki gibi köşegenseldir.

$$I_{xyz} = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Aynı şekilde gövdeler eksenlerine göre simetrik olmayan bir kütle dağılımına sahipse, gimbalin dinamik dengesizliği vardır ve eylemsizlik matrisi köşegensel değildir.

Ek olarak, SHP gövdesi, platform zemini ile Görüş Hattı arasındaki bağlantıyı sağlar. Bu nedenle, sistem performansını pratik olarak tahmin etmek için, temel hareket denklemlerini ve Görüş Hattı açısall hareketini birleştiren mekanizmalar tamamen değerlendirilip, ilerleyen işlemlerde açısall hız bağlantılarının kinematik ilişkilerden kaynaklandığı matris formlarında gösterilecektir. İki eksenin çevresindeki motor dönüşlerinin yarattığı ivmelenmelerin, eksene bağlı kütleyi harekete geçirmesinden dolayı oluşan tork bozunumuna Çapraz Kuplaj (Crosscoupling) etkisi denilmektedir. İki eksen üzerindeki dinamik hareketler, zemin titreşimlerinden bağımsız, karşılıklı olarak birbirini etkilemesi sebebiyle ortaya çıkmaktadır.

SHP'nin çalışmasında statik veya dinamik olarak değişen birçok farklı bozucu etkiye mevcuttur. Bunlar eksenler arası statik ve dinamik kütle dengesizlikleri, sürtünme kaynaklı etkiler, motorun iç sürtünmesi, motorun tork dalgalanması, sensör gürültüsü, kablo sinyal iletim gürültüsü gibi platformun doğru çalışmasını negatif yönde etkileyebilecek durumlar olarak ifade edilebilir [9].

Bu tez çalışmasının simülasyon modelinde yalnızca zeminden kaynaklı farklı genlikteki titreşimlerin ve eksenlerin karşılıklı çapraz kuplaj etkisinin, girilen radyan birimli birim basamak referans sinyal üzerindeki bozunumları analiz edildiğinden dolayı aşağıdaki şekilde bazı kabuller yapılmıştır [10].

- SHP'nin rijit bir yapıda olduğu ve referans koordinat eksenleriyle dönüş eksenlerinin bir olduğu,
- Dönüş merkezi ile ağırlık merkezi noktasının aynı olduğu kabulü ile statik bir dengesizlik durumunun mevcut olmadığı [29],
- Referans koordinat eksenlerine göre kütle dağılımının simetriklik kabulü ile dinamik bir dengesizlik durumunun mevcut olmadığı [30],
- SHP'nin, gerçek bir çevrede karşılaşılabilecek, iç veya platform dışı kaynaklı tork bozunumlarından etkilenmediği varsayılarak matematiksel model şeması belirlenmiştir.

Bu varsayımlar ışığında platformun kinematik denklemleri çıkarılmış, sadeleştirmeler yapılarak tümleşik matematiksel model oluşturulmuştur.

2.2. Platformun Kinematik Denklemleri

Şekil 2.1.'de gösterilen Stabilize Hedefleme Platformu(SHP) sistemine ait üç farklı referans koordinat eksen ve birbirleriyle olan rotasyonel ilişkisi gösterilmektedir. Bu eksenler platform zeminine sabit kabul edilen G koordinat eksen (i, j, k eksen isimleriyle temsil edilmektedir), Azimut dönüş eksenine sabit olan B koordinat eksen (n, e, k eksen isimleriyle temsil edilmektedir) ve Elevasyon dönüş eksenine sabit olan A koordinat eksenidir (r, e, d eksen isimleriyle temsil edilmektedir). Referans koordinat eksenlerinin birbirleriyle olan rotasyonel ilişki denklemleri aşağıda belirtilen Euler transformasyon matrisleri ile sağlanmaktadır [11].

$$R_z(u) = C_G^B = \begin{pmatrix} \cos u & \sin u & 0 \\ -\sin u & \cos u & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

$$R_y(\varepsilon) = C_B^A = \begin{pmatrix} \cos \varepsilon & 0 & -\sin \varepsilon \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varepsilon & 0 & \cos \varepsilon \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

C_G^B ifadesi G referans koordinat ekseninden B referans koordinat eksenine rotasyonel dönüşümü, C_B^A ifadesi ise B referans koordinat ekseninden A referans koordinat eksenine rotasyonel dönüşümü sağlayan matrisi belirtmektedir. G, B ve A referans koordinat eksenleri için ataletsel açısal hız vektör matrisleri şu şekildedir:

$$\vec{w}_{G/I} = \begin{bmatrix} w_{Gi} \\ w_{Gj} \\ w_{Gk} \end{bmatrix}, \quad \vec{w}_{B/I} = \begin{bmatrix} w_{Bn} \\ w_{Be} \\ w_{Bk} \end{bmatrix}, \quad \vec{w}_{A/I} = \begin{bmatrix} w_{Ar} \\ w_{Ae} \\ w_{Ad} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

w_{Gi}, w_{Gj}, w_{Gk} G koordinat ekseninde i, j ve k eksenlerindeki açısal hız bileşenlerini, w_{Bn}, w_{Be}, w_{Bk} B koordinat ekseninde n, e ve k eksenlerindeki açısal hız bileşenlerini, w_{Ar}, w_{Ae}, w_{Ad} A koordinat ekseninde r, e ve d eksenlerindeki açısal hız bileşenlerini göstermektedir [11].

SHP'nin Azimut ve Elevasyon dönüş eksenleri ataletsel matris gösterimi aşağıdaki şekilde ifade edilir [11].

$$J_A = \begin{bmatrix} A_r & A_{re} & A_{rd} \\ A_{re} & A_e & A_{de} \\ A_{rd} & A_{de} & A_d \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$J_B = \begin{bmatrix} B_n & B_{ne} & B_{nk} \\ B_{ne} & B_e & B_{ke} \\ B_{nk} & B_{ke} & B_k \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

A_r, A_e, A_d A koordinat ekseninde r, e ve d dönüş eksenleri atalet momentlerini; A_{re}, A_{rd}, A_{de} ifadeleri A koordinat eksenindeki çarpım atalet momentlerini; B_n, B_e, B_k B koordinat ekseninde n, e ve k dönüş eksenleri atalet momentlerini; B_{ne}, B_{nk}, B_{ke} ifadeleri B koordinat eksenindeki çarpım atalet momentlerini belirtmektedir.

$T_{Elevasyon}$ yada T_{El} , A koordinat ekseninde bulunan e-ekseni üzerindeki toplam harici dönüş torkunu, T_{Azimut} yada T_{Az} ise B koordinat ekseninde bulunan k-ekseni üzerindeki toplam harici dönüş torkunu ifade etmektedir. Bu tez çalışmasındaki amacımız SHP'nin görüş hattı eksenini (r-ekseni ile belirtilen) bozunumlardan korumak, stabilizasyonunu sağlamaktır.

Stabilizasyonun gerçekleşmesi için görüş hattı pozisyonunu sağlayan Azimut ve Elevasyon eksenindeki w_{Ae} ve w_{Ad} açısal hızlarının bozunumlardan ters tork girdileriyle korunması yani değerlerinin sıfır olacak şekilde tutulması gerekmektedir. w_{Ae} ve w_{Ad} açısal hızları, Elevasyon eksenindeki platform bloğuna sabitlenmiş jiroskop sensörü ile ölçülüp, değerlendirilebilir. Euler açıları rotasyonel ilişkisi olan iki referans koordinat eksenindeki pozisyonu tanımlamak için kullanılmaktadır. G referans koordinat eksenini ile B referans koordinat eksenindeki açısal ilişki tek bir Euler u açısı ile aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\vec{w}_{B/I} = \begin{bmatrix} w_{Bn} \\ w_{Be} \\ w_{Bk} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$w_{Bn} = w_{Gi} \cdot \cos u + w_{Gj} \cdot \sin u \quad (2.8)$$

$$w_{Be} = -w_{Gi} \cdot \sin u + w_{Gj} \cdot \cos u \quad (2.9)$$

$$w_{Bk} = w_{Gk} + \dot{u} \quad (2.10)$$

B referans koordinat eksenleri ile A referans koordinat eksenleri arasındaki açısal ilişkisi tek bir Euler ε açısı kullanılarak aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\vec{w}_{A/I} = \begin{bmatrix} w_{Ar} \\ w_{Ae} \\ w_{Ad} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$w_{Ar} = w_{Bn} \cdot \cos \varepsilon - w_{Bk} \cdot \sin \varepsilon \quad (2.12)$$

$$w_{Ae} = w_{Be} + \dot{\varepsilon} \quad (2.13)$$

$$w_{Ad} = w_{Bn} \cdot \sin \varepsilon + w_{Bk} \cdot \cos \varepsilon \quad (2.14)$$

Newton'un ilk yasası, dönme hareketine bir tork uygulanmadıkça bir cismin hızlanmayacağını veya yavaşlamayacağını ileri sürer. Newton'un ikinci yasası, bir eylemsizlik momentine sahip homojen katı bir kütleye net bir tork uygulanırsa, cismin bir açısal ivme($\dot{w}$) geliştireceğini belirtir.

$$T = I \times \dot{w} \quad (2.15)$$

Bu nedenle, prensipte, bir nesnenin eylemsizlikten kaynaklı istenmeyen dönüşünü önlemek için gereken tek şey, eksen üzerindeki uygulanmış torkların toplamının sıfır olmasını sağlamaktır [11]. Azimut ve Elevasyon hareket sistemi rijit bir gövde kabul edilerek temel hareket denklemleri direk çıkarılabilmektedir. Bu nedenle SHP üzerindeki harici tork aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\vec{T} = \frac{d}{dt} \vec{H} + \vec{w} \times \vec{H} ; \quad \vec{H} = J \cdot \vec{w} \quad (2.16)$$

Denklemden bulunan J ifadesi ataletsel matrisi, $\vec{w}$ ifadesi vektörel açısal hızı, $\vec{H}$ ifadesi ise vektörel açısal momentumu ifade etmektedir [11].

2.2.1. Elevasyon Eksen Hareket Denklemleri

SHP, rijit bir gövde olarak kabul edildiğinde Elevasyon hareket sistemi için açısal momentum aşağıdaki şekilde ifade edilir [10]:

$$\vec{H}_A = \vec{J}_A \cdot \vec{w}_{A/I} = \begin{bmatrix} A_{rr}w_{Ar} + A_{re}w_{Ae} + A_{rd}w_{Ad} \\ A_{re}w_{Ar} + A_{ee}w_{Ae} + A_{de}w_{Ad} \\ A_{rd}w_{Ar} + A_{de}w_{Ae} + A_{dd}w_{Ad} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_r \\ H_e \\ H_d \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Elevasyon referans koordinat eksenini için vektörel tork denklemi aşağıdaki şekildedir:

$$\vec{T} = \frac{d\vec{H}_A}{dt} + \vec{w}_{A/I} \times \vec{H}_A \quad (2.18)$$

$\vec{w}_{A/I}$ vektörü 2.11'deki eşitlikten ve $\vec{H}_A$ vektörü 2.17'deki eşitlikten yazılabilir:

$$\vec{w}_{A/I} = \begin{bmatrix} w_{Ar} \\ w_{Ae} \\ w_{Ad} \end{bmatrix}, \quad \vec{H}_A = \begin{bmatrix} H_r \\ H_e \\ H_d \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$\vec{H}_A$ vektörünün türevi alınarak 2.20'deki eşitlik elde edilir:

$$\frac{d\vec{H}_A}{dt} = \begin{bmatrix} \dot{H}_r \\ \dot{H}_e \\ \dot{H}_d \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Eşitlik 2.18'deki vektörel çarpım işlemi yapılarak 2.21'deki eşitlik elde edilir:

$$\vec{w}_{A/I} \times \vec{H}_A = \begin{bmatrix} w_{Ae}H_d - w_{Ad}H_e \\ w_{Ad}H_r - w_{Ar}H_d \\ w_{Ar}H_e - w_{Ae}H_r \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

2.20 ve 2.21 eşitlikleri 2.18'deki tork denkleminde yerine yazılır. A referans koordinat eksenini üzerindeki tüm eksenlerin toplam harici tork ifadesi aşağıdaki şekildedir:

$$\vec{T} = \frac{d\vec{H}_A}{dt} + \vec{w}_{A/I} \times \vec{H}_A = \begin{bmatrix} \dot{H}_r + w_{Ae}H_d - w_{Ad}H_e \\ \dot{H}_e + w_{Ad}H_r - w_{Ar}H_d \\ \dot{H}_d + w_{Ar}H_e - w_{Ae}H_r \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Elevasyon eksenini (e-eksenini) için hesaplanan toplam harici tork denklemi aşağıdaki şekildedir:

$$T_{Elevasyon} = \dot{H}_e + w_{Ad}H_r - w_{Ar}H_d \quad (2.23)$$

Eşitlik 2.23 'den aşağıdaki şekilde bir diferansiyel denklem elde edilir.

$$A_e \dot{w}_{Ae} = T_{Elevasyon} + T_{B-Elevasyon} \quad (2.24)$$

$$\begin{aligned} T_{B-Elevasyon} = & (A_d - A_r)(w_{Ar}w_{Ad}) - A_{re}(\dot{w}_{Ar} + w_{Ae}w_{Ad}) \\ & + A_{rd}(w_{Ar}^2 - w_{Ad}^2) - A_{de}(\dot{w}_{Ad} - w_{Ae}w_{Ar}) \end{aligned} \quad (2.25)$$

$T_{B-Elevasyon}$ yada T_{B-El} ifadesinin eşitliğindeki ataletsel çarpımlar, SHP'nin kontrol döngüsünde istenmeyen bozunumları oluşturan harici tork girişlerini ifade etmektedir. Elevasyon hareket sisteminin dinamik dengesizliği bulunmadığı kabul edilerek;
 $(A_{re} = A_{rd} = A_{de} = 0)$ Eş. 2.25'den sadeleştirme yapılarak, Eş. 2.24 aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$A_e \dot{w}_{Ae} = T_{Elevasyon} + (A_d - A_r)(w_{Ar}w_{Ad}) \quad (2.26)$$

Eş. 2.12 ve Eş. 2.14, Eş. 2.26'da yerine yazıldığında Elevasyon eksenindeki istenmeyen harici tork bozunum ifadesi şu şekilde elde edilir:

$$T_{B-Elevasyon} = (A_d - A_r) \left[-w_{Ad}^2 \tan \varepsilon + (w_{Bn}w_{Ad} \cdot \frac{1}{\cos \varepsilon}) \right] \quad (2.27)$$

2.2.2. Azimut Eksen Hareket Denklemleri

SHP sisteminin tamamı için hesaplanacak B referans koordinat eksenindeki vektörel açısal moment, Elevasyon ve Azimut dönüş eksenlerinin birbirleriyle olan etkileşimlerinden doğan tüm açısal momentlerin toplamıdır [10].

$$\vec{H} = \begin{bmatrix} H_n \\ H_e \\ H_k \end{bmatrix} = J_B \cdot \vec{w}_{B/I} + (C_B^A)^T \cdot J_A \cdot \vec{w}_{A/I} \quad (2.28)$$

B referans koordinat eksenindeki Tork eşitliği aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\vec{T} = \frac{d}{dt} \vec{H} + \vec{w}_{B/I} \times \vec{H} \quad (2.29)$$

Azimut eksen “k” ekseninde dönüş hareketini gerçekleştirir. “k” eksen için moment denklemi şu şekilde ifade edilir:

$$H_k = B_{nk}w_{Bn} + B_k w_{Bk} - (A_r w_{Ar} + A_{re} w_{Ae} + A_{rd} w_{Ad}) \sin \varepsilon \\ + (A_{rd} w_{Ar} + A_{de} w_{Ae} + A_d w_{Ad}) \cos \varepsilon \quad (2.30)$$

$$(\vec{w}_{B/I} \times \vec{H}_k) = w_{Bn} (B_{ne} w_{Bn} + B_e w_{Be} + B_{ke} w_{Bk} + A_r w_{Ar} + A_{re} w_{Ae} + A_{de}) \\ - w_{Be} (B_n w_{Bn} + B_{ne} w_{Be} + B_{nk} w_{Bk}) \\ - w_{Be} (A_r w_{Ar} + A_{re} w_{Ae} + A_{rd} w_{Ad}) \cos \varepsilon \\ - w_{Be} (A_d w_{Ar} + A_{de} w_{Ae} + A_d w_{Ad}) \sin \varepsilon \quad (2.31)$$

Eş. 2.30 ve Eş. 2.31'deki denklemlerle birlikte Azimut eksenini ifade eden hareket denklemini aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$J_{E\dot{s}}\dot{w}_{Bk} = T_{Azimuth} + T_{B-Azimuth} \quad (2.32)$$

$J_{E\dot{s}}$ terimi “k” eksenini üzerindeki atalet moment değerini ifade etmektedir. $T_{B-Azimuth}$ terimi ise istenmeyen ancak oluşan atalet bozunum değerlerinin toplamını ifade eder ve matematiksel denklemini aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$J_{E\dot{s}} = B_k + A_r \sin^2 \varepsilon + A_d \cos^2 \varepsilon - A_{rd} \sin(2\varepsilon) \quad (2.33)$$

$$\begin{aligned} T_{B-Azimuth} = & [B_n + A_r \cos^2 \varepsilon + A_d \sin^2 \varepsilon + A_{rd} \sin(2\varepsilon) - (B_e + A_e)] w_{Bn} w_{Be} \\ & - [B_{nk} + (A_d - A_r) \sin \varepsilon \cos \varepsilon + A_{rd} \cos(2\varepsilon)] (\dot{w}_{Bn} - w_{Be} w_{Bk}) \\ & - [B_{ke} + A_{de} \cos \varepsilon - A_{re} \sin \varepsilon] (\dot{w}_{Be} + w_{Bn} w_{Bk}) \\ & - [B_{ne} + A_{re} \cos \varepsilon + A_{de} \sin \varepsilon] (w_{Bn}^2 - w_{Be}^2) \\ & + \ddot{\varepsilon} (A_{re} \sin \varepsilon - A_{de} \cos \varepsilon) \\ & + \dot{\varepsilon} [(A_r - A_d) (w_{Bn} \cos(2\varepsilon) - w_{Bk} \sin(2\varepsilon))] \\ & + \dot{\varepsilon} [2A_{re} (w_{Bn} \sin(2\varepsilon) + w_{Bk} \cos(2\varepsilon))] \\ & + \dot{\varepsilon} [A_{de} \sin \varepsilon + A_{re} \cos \varepsilon (w_{Ae} + w_{Be}) - A_e w_{Bn}] \end{aligned} \quad (2.34)$$

Eş. 2.35'de belirtildiği gibi açısal hız farkları pozisyon hatasının türevidir. Aşağıdaki eşitsizlik ifadesi kullanılarak işlemler yapılır.

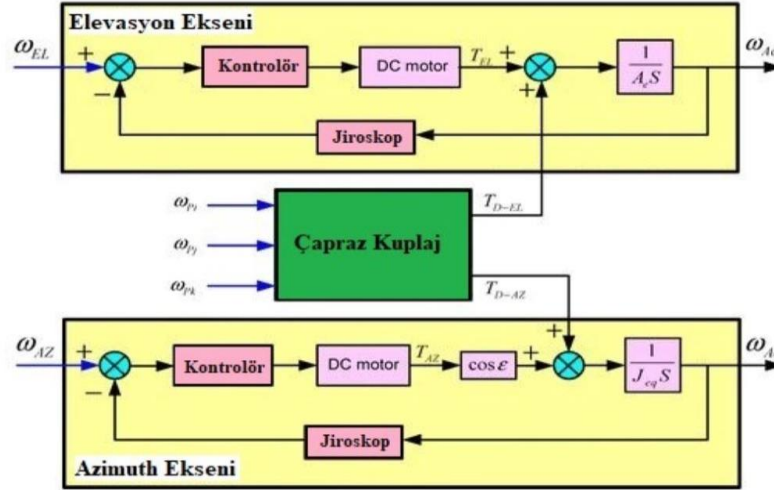
$$\dot{\varepsilon} = w_{Ae} - w_{Be} \quad (2.35)$$

Dinamik dengesizliğin olmadığı varsayıldığından denklem sadeleştirilerek aşağıdaki şekilde ifade edilir: ($A_{re} = A_{rd} = A_{de} = 0$, $B_{ne} = B_{nk} = B_{ke} = 0$ kabul edilir.)

$$\begin{aligned} T_{B-Azimuth} = & [B_n + A_r \cos^2 \varepsilon + A_d \sin^2 \varepsilon - (B_e + A_e)] w_{Bn} w_{Be} \\ & - [(A_d - A_r) \sin \varepsilon \cos \varepsilon] (\dot{w}_{Bn} - w_{Be} w_{Bk}) \\ & + \dot{\varepsilon} [(A_r - A_d) (w_{Bn} \cos(2\varepsilon) - w_{Bk} \sin(2\varepsilon))] - \dot{\varepsilon} A_e w_{Bn} \end{aligned} \quad (2.36)$$

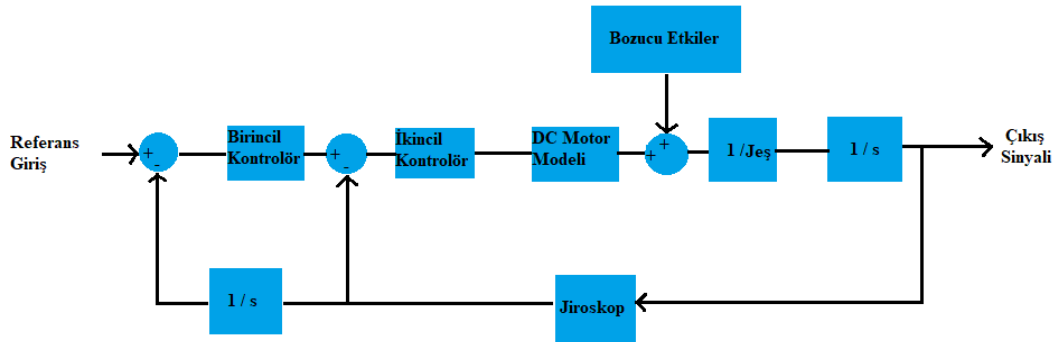
2.3 Platformun Matematik Modeli

Platformun matematik modelini elde etmeden önce neden böyle bir modele ihtiyaç duyulduğunu açıklamak gerekebilir. Günümüzde, bilim insanları çevremizdeki dünyayı daha iyi bir seviyede anlayabilmek ve sonrasında teknik sorunlara çözümler bulmak için, her şeyi matematiksel terimlerle temsil ederler. Başka bir deyişle gerçeği matematiksel bir dille ifade etmeye çalışırlar. Gerçeği matematiksel bir dille taklit etmeye yardım eden bu işlem ve düşünce şekline, “matematiksel modelleme” adı verilir. Modelleme matematiğin bilimsel bilgi üretme yöntemidir. Bu anlamda modelleme, çok yönlü bir problem çözme sürecidir. Ayrıca matematiksel modelleme yukarıda bahsedilen anlamın ötesinde, bir fenomenin gözlemlenmesi, ilişkilerin ortaya çıkarılması, matematiksel analizlerin yapılması, sonuçların elde edilmesi ve modelin tekrar yorumlanması süreçlerini içerir. Matematiksel modelleme en genel anlamıyla matematik veya matematik dışındaki bir olayı, olguyu, olaylar arasındaki ilişkileri matematiksel olarak ifade etmeye çalışma, bu olaylar ve olgular içerisinde matematiksel örüntüler ortaya çıkarma sürecidir. Bu tanım matematiksel modellemenin en genel ve liberal tanımıdır [13]. Bu tanımı göz önünde bulundurarak üretimini ve programlamasını yapmayı amaçladığımız SHP sisteminin dönüş eksenlerinde var olan tork, hız ve pozisyon bilgilerinin birbirleriyle olan ilişkilerini ve bunların var olan bozucu etkilere karşı tekrarlanabilen davranışlarının doğruluğunu öngörebilmek için bir matematiksel benzetim modeline ihtiyaç duyulmuştur. Bu anlamda kullanılması planlanan şalt malzemelerin gerçek test süreçlerindeki çıktıları hakkında öngörü sahibi olmak amaçlanmıştır. SHP’nin kinematik denklemleri yukarıdaki çalışmalarımızda elde edilmiştir. Bu denklemlerin MATLAB/Simulink ortamında matematiksel bloklar marifetiyle ifadesini gerçekleştirerek, istenilen bir komut sinyalinin birim basamak cevabının zamana bağlı grafiği izlenerek, testler gerçekleştirilecektir. Sistemin kontrolünde kullanılan PID parametrelerinin K_p , K_i ve K_d değerlerinde optimum düzeyde çalışma performansını belirlemesi için bir optimizasyon çalışması yapılarak modelleme süreci tamamlanacaktır. Bu tez çalışmasının matematik modelinde yalnızca zeminden kaynaklı farklı genlikteki titreşimlerin ve eksenlerin karşılıklı çapraz kuplaj etkisinin referans sinyal üzerindeki bozunumları analiz edilmektedir.



Şekil 2.2: İki Eksen SHP Blok Diyagram Genel Gösterimi

İki eksenli SHP sisteminin kontrol şekli, aralarında bir çapraz bağlantı birimi bulunan iki stabilizasyon döngüsünden oluşur. Her döngü bir denetleyici, bir DC motor ve geri besleme için bir jiroskop sensörü kullanılarak yukarıdaki şekilde oluşturulabilir. Sistemin simülasyon modeli Şekil 2.2 blok diyagramı referans alınarak modellenmiş ve MATLAB/Simulink ortamında simülasyona hazırlanmıştır. Yukarıdaki şekilde görülen model döngüsünün bir eksenindeki stabilizasyon modeline ek olarak, pozisyon kontrol döngüsünde seri olarak modele eklenmiştir. Bu şekilde ileride anlatılacak Kaskat PID kontrolüyle sistem cevaplarının iyileştirilmesi amaçlanmıştır.



Şekil 2.3: Bir Eksendeki Kaskat PID Kontrolör Genel Gösterimi

Araştırmacılar, bu tip sistemleri kontrol etmek için birçok farklı modern tekniği kullanmaya ve uygulamaya çalışsa da, geleneksel PID denetleyicileri, basit yapıları, ucuz maliyetleri, ayarlanabilir tasarımları ve yüksek performansları nedeniyle en çok kullanılan yaklaşım olmayı sürdürmektedir [11].

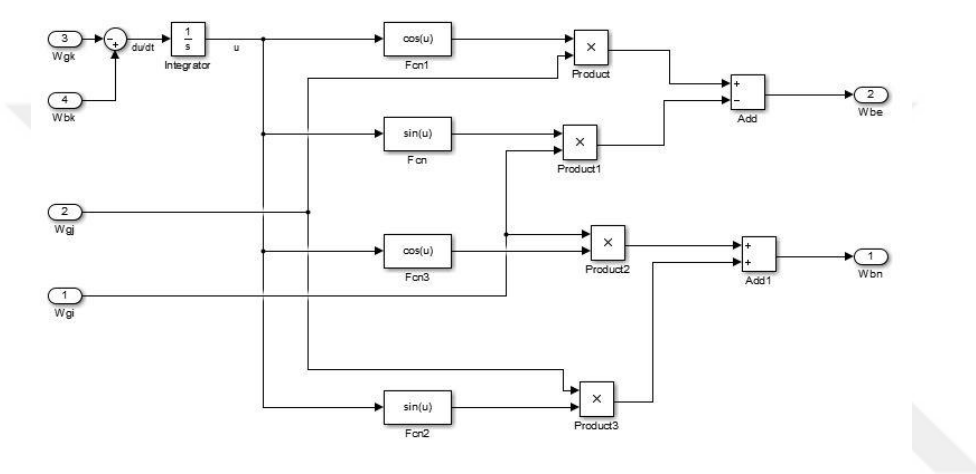
2.3.1 SHP Matematik Modeli

SHP üzerindeki eksen takımlarından hareketle Elevasyon ve Azimut açılarının pozisyon bilgisine ulaşmak için öncelikle gerekli olan açısal hızların eksen dönüşüm matrisleri MATLAB/Simulink ortamında blok diyagramlar ile ifade edilecektir[10].

$$w_{Be} = -w_{Gi} \cdot \sin u + w_{Gj} \cdot \cos u \quad (2.37)$$

$$w_{Bn} = w_{Gi} \cdot \cos u + w_{Gj} \cdot \sin u \quad (2.38)$$

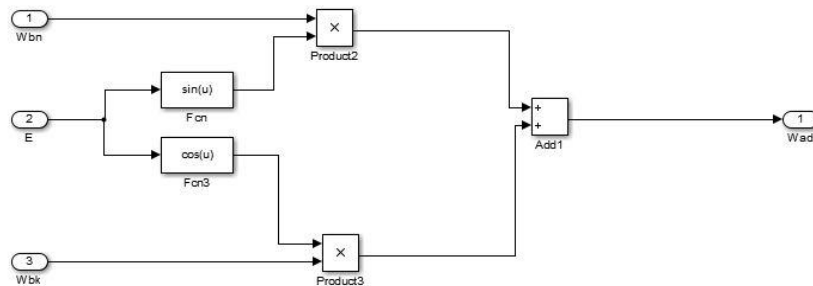
Yukarıda belirtilen G-B Referans Ekseni Açısal Hız Dönüşümü denklemlerinin matematiksel ifadesi aşağıdaki şekildedir:



Şekil 2.4: G-B Referans Ekseni Açısal Hız Dönüşümleri

$$w_{Ad} = w_{Bn} \cdot \sin \epsilon + w_{Bk} \cdot \cos \epsilon \quad (2.39)$$

Eşitsizlik 2.39’da belirtilen B-A Referans Ekseni Açısal Hız Dönüşümü denklemlerinin matematiksel ifadesi aşağıdaki şekildedir:

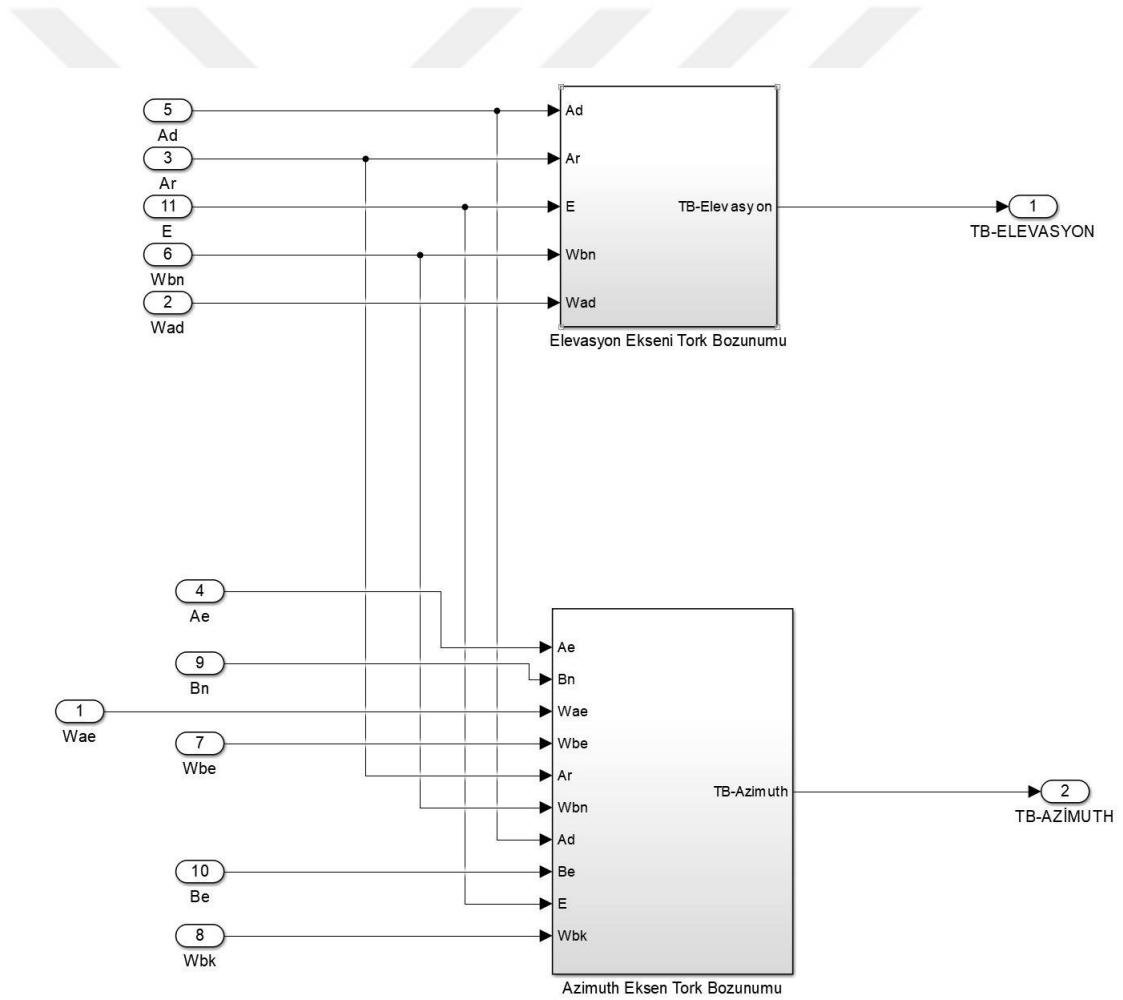


Şekil 2.5: B-A Referans Ekseni Açısal Hız Dönüşümleri

$$T_{B-Elevasyon} = (A_d - A_r) \left[-w_{Ad}^2 \tan \varepsilon + (w_{Bn} w_{Ad} \cdot \frac{1}{\cos \varepsilon}) \right] \quad (2.40)$$

$$\begin{aligned} T_{B-Azimuth} = & [B_n + A_r \cos^2 \varepsilon + A_d \sin^2 \varepsilon - (B_e + A_e)] w_{Bn} w_{Be} \\ & - [(A_d - A_r) \sin \varepsilon \cdot \cos \varepsilon] (\dot{w}_{Bn} - w_{Be} w_{Bk}) \\ & + \dot{\varepsilon} [(A_r - A_d) (w_{Bn} \cos(2\varepsilon) - w_{Bk} \sin(2\varepsilon))] - \dot{\varepsilon} A_e w_{Bn} \end{aligned} \quad (2.41)$$

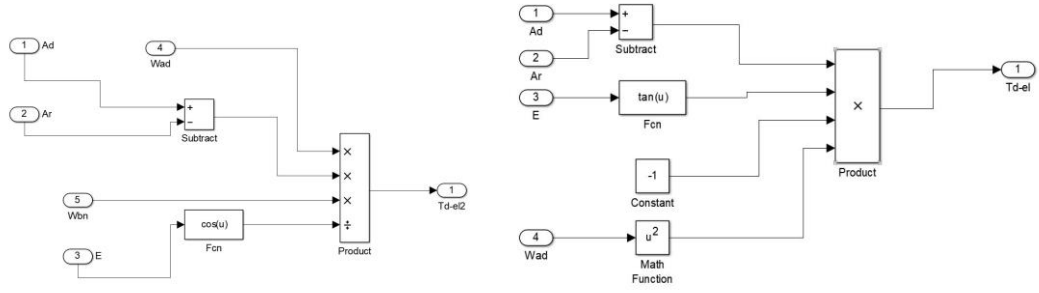
Yukarıda belirtilen Çapraz Bağlaşım tork bozunumlarının iki hareketli eksen üzerindeki tork kuvvetleri denklemlerinin genel matematiksel ifadesi aşağıdaki şekildedir. Ancak detaylandırılması ve alt blokların modeli devamında gösterilecektir.



Şekil 2.6: Çapraz Bağlaşım Tork Bozunumları Genel Simulink Modeli

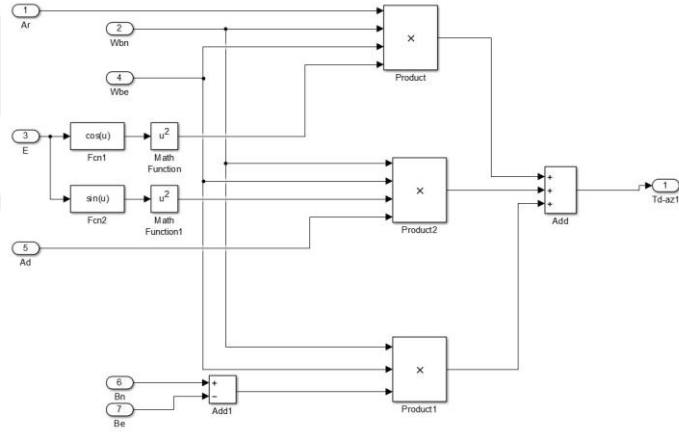


Eş. 2.40'dan yararlanılarak iki kısım halinde oluşturulan Elevasyon Ekseni üzerindeki Çapraz Bağlaşım Tork Bozunumu Simulink Modeli detayı aşağıdaki şekildeki gibidir:

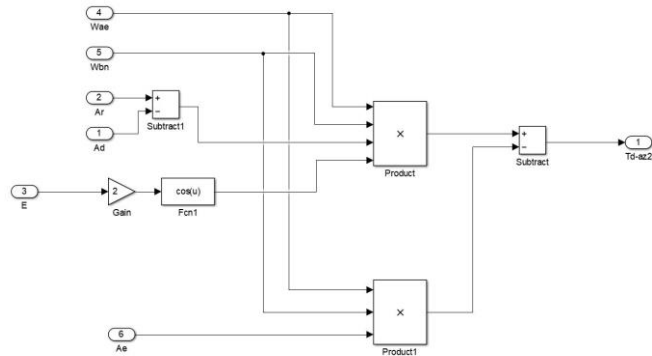


Şekil 2.9: Elevasyon Ekseni İç Detay Diyagramı Gösterimi

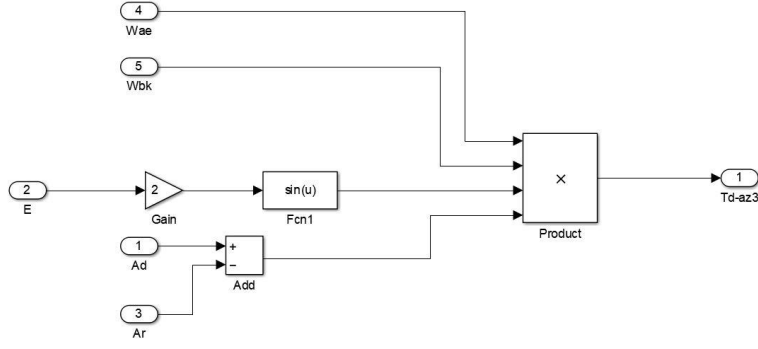
Eş. 2.41'den yararlanılarak beş kısım halinde oluşturulan Azimut Ekseni üzerindeki Çapraz Bağlaşım Tork Bozunumu Simulink Modeli detayı aşağıdaki şekildeki gibidir:



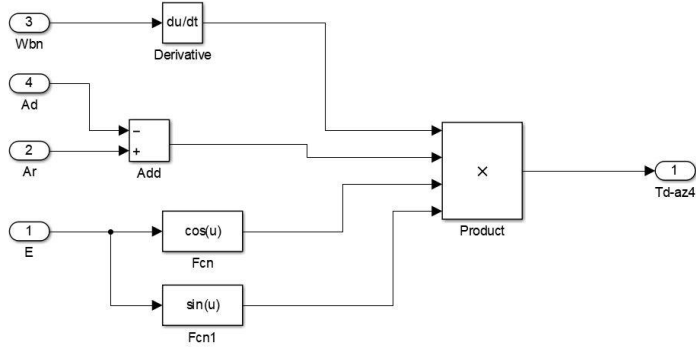
Şekil 2.10: Azimut Ekseni Birinci Kısım İç Detay Diyagramı Gösterimi



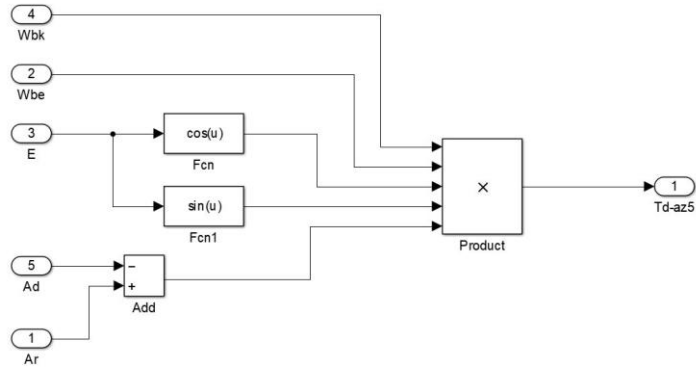
Şekil 2.11: Azimut Ekseni İkinci Kısım İç Detay Diyagramı Gösterimi



Şekil 2.12: Azimut Eksen Üçüncü Kısım İç Detay Diyagramı Gösterimi



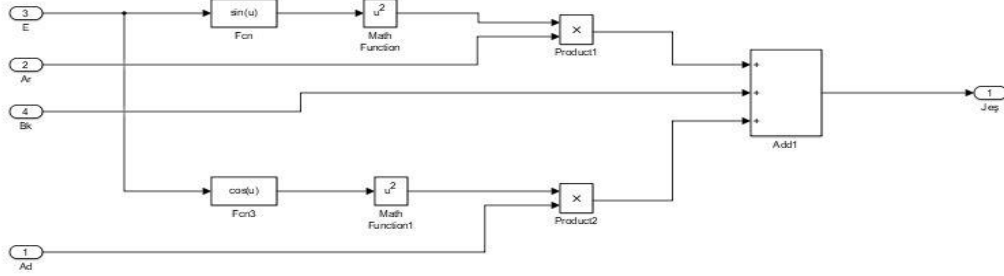
Şekil 2.13: Azimut Eksen Dördüncü Kısım İç Detay Diyagramı Gösterimi



Şekil 2.14: Azimut Eksen Beşinci Kısım İç Detay Diyagramı Gösterimi

$$J_{E\dot{s}} = B_k + A_r \sin^2 \varepsilon + A_d \cos^2 \varepsilon - A_{rd} \sin(2\varepsilon) \quad (2.42)$$

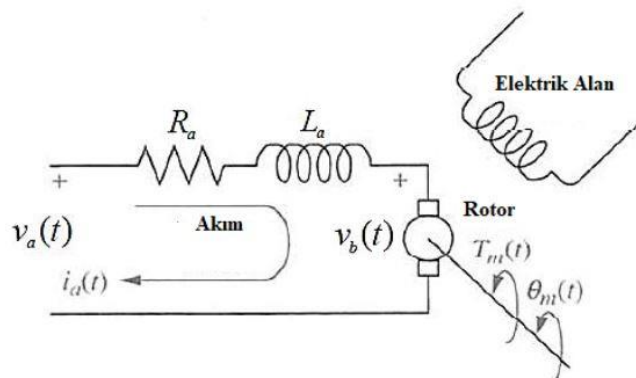
Yukarıda belirtilen $J_{E\dot{s}}$ denkleminin matematiksel ifadesi aşağıdaki şekildedir:



Şekil 2.15: Jeş – k eksenini üzerindeki Ataletlerin Simulink Modeli

2.3.2 Motor Matematik Model

Elevasyon ve Azimut açılarını belirleyecek motorlar Hibrit tip servo motorlardan seçilmiştir. Hibrit servo motor, kontrol sistemi bileşenlerine sahip bir elektrik motorudur. Herhangi bir motor bir servo sistemde bir encoder yardımıyla kullanılabilecek yapıdadırlar. Bu tip motorlar, endüstriyel robotlar, eğitim robotları, farklı vinç türleri vb. gibi birçok mekanik sistemde ve endüstriyel uygulamada ortak kullanılan bir aktüatördür. Servo motorlar özünde frensiz olmaları, frenli servolarında pahalı ve hacimli olmaları sebebiyle direkt tercih edilememiştir. DC motorlarla benzer mantıkta kullanıldığından Hibrit servo motor modelimizin benzetiminde DC motor modeli referans olarak alınmıştır.



Şekil 2.16: DC Motor Sistemi Şematik Gösterim

Şekil 2.16'daki gösterilen DC motor sistemi, elektrik, mekanik ve elektro-mekanik kısım olarak üç bölümde incelenebilir. Elektriksel kısım Kirchhoff gerilim yasası denklemlerden, mekanik kısımda Newton kurallardan elde edilir. Bu denklemlerin Laplace Transformuyla elde edilen eşitlikleri aşağıdaki şekildedir [14].

Elektriksel Kısım denklemleri aşağıdaki şekildedir:

$$V_a(t) = L_a \frac{d I_a(t)}{dt} + R_a I_a(t) + V_b(t) \quad (2.43)$$

$$I_a(s) = \left[\frac{1}{L_a s + R_a} \right] [V_a(s) - V_b(s)] \quad (2.44)$$

Mekanik Kısım denklemleri aşağıdaki şekildedir:

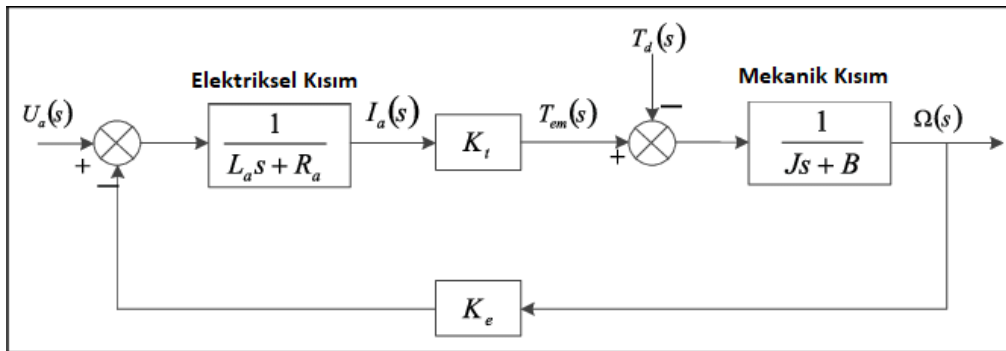
$$T(t) = J_m \frac{d w_m(t)}{dt} + B_m w_m(t) ; \quad \Omega_m(s) = \left[\frac{1}{J_m s + B_m} \right] T(s) \quad (2.45)$$

Elektro-mekanik Kısım aşağıdaki şekildedir:

$$V_b(t) = K_e w_m(t) ; \quad V_b(s) = K_e \Omega_m(s) \quad (2.46)$$

$$T(t) = K_T I_a(t) ; \quad T(s) = K_T I_a(s) \quad (2.47)$$

Yukarıda belirtilen 2.44 , 2.45 ve 2.47 eşitlikleri yardımıyla Şekil 2.17'deki blok diyagram oluşturulur. Burada Matlab/Simulink analizinde kullanacağımız, sürtünme katsayılarının ihmal edilerek sadeleştirme yapılmış olan transfer fonksiyon blog diyagramı gösterilmektedir. Katalog değerleri yerine konularak simülasyonlarda kullanılmıştır.



Şekil 2.17: DC Motor Transfer Fonksiyon Blok Diagramı

DC motorların matematik modeli bir çok bilimsel makale ve tezde iki kısımda ifade edilmiştir [14 , 15]. Şekil 2.16'deki şematik diyagram, Şekil 2.17'de bir blok diyagram olarak modellenmiştir. Bu blok diyagram, bir açık döngü sistemini temsil etmektedir ve motor, akım akışını azaltma eğiliminde olan yerleşik bir yapıya sahiptir. Blok diyagram, sistemin her bloğu arasındaki Transfer Fonksiyon ilişkisinin net bir resmini verir. Elektriksel ve Mekanik kısım olarak iki ayrı blok diyagram kullanılmıştır. Bu sayede elektriksel blok çıkışında akım ve devamında tork, mekanik blok çıkışında açısal hız parametreleride ayrı ayrı gözlemlenebilmektedir.

$$G(s) = K_t \cdot \left[\frac{1}{L_a s + R_a} \right] \cdot \left[\frac{1}{J_m s + B_m} \right] \quad (2.48)$$

$$H(s) = K_e \quad (2.49)$$

Eş. 2.50'de belirtilen geri beslemeli sistemlerin blok diyagramı formülasyonuna yukarıdaki Eş. 2.48 ve Eş. 2.49 uygulanır.

$$\frac{\Omega_m(s)}{V_a(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s) \cdot H(s)} \quad (2.50)$$

Bu şekilde giriş Gerilimi ile çıkıştaki Açısal Hız, oransal olarak ifade edilerek aşağıdaki transfer fonksiyon elde edilir [15].

$$G_{motor}(s) = \frac{\Omega_m(s)}{V_a(s)} = \frac{K_t}{J_m L_a s^2 + (J_m R_a + B_m L_a) s + B_m R_a + K_t K_e} \quad (2.51)$$

Elektriksel ve mekanik denklemlere laplace transformasyonu uygulanmış ve sonucunda giriş Gerilimine karşılık motor katalog değerlerine göre değişen, çıkıştaki Açısal Hız değerini veren transfer fonksiyon elde edilmiştir.

Kendi motor modelimiz için gereken transfer fonksiyonu elde etmek için kullanılan motor üreticisi Shinano Motor Fabrikasının motor katalog değerleri Çizelge 2.1 'de verilmiştir.

Çizelge 2.1: Motor Katalog Parametre Değerleri

Parametreler	Birimler	Semboller	Elevasyon Motoru	Azimut Motoru
<i>Direnç</i>	ohms	R_m	0.6	0.6
<i>İndüktans</i>	H	L_m	0.0022	0.0022
<i>Rotor Atalet Momenti</i>	$kg.m^2$	J_m	40×10^{-6}	40×10^{-6}
<i>Tork Sabiti</i>	N.m / A	K_t	0,12	0,6
<i>Elektrik Sabiti</i>	V / Rad/s	K_e	3.6	3.6
<i>Max. Tork</i>	N.m	T_p	0.48	2.4
<i>Tutunma Torku</i>	N.m	T_t	0.48	2.4

Elevasyon eksen motorunun transfer fonksiyon bloğu aşağıdaki gibi elde edilmiştir:

$$G_{ElevasyonMotor}(s) = \frac{T_m(s)}{V_a(s)} = \frac{K_t}{L_a s + R_a} = \frac{0.12}{0.0022s + 0.6} \quad (2.52)$$

Azimut eksen motorunun transfer fonksiyon bloğu aşağıdaki gibi elde edilmiştir:

$$G_{AzimuthMotor}(s) = \frac{T_m(s)}{V_a(s)} = \frac{K_t}{L_a s + R_a} = \frac{0.6}{0.0022s + 0.6} \quad (2.53)$$

2.4 Kontrolcü Seçimi

Günümüzde motorların işlemlerini denetlemek için çeşitli kontrol yöntemi kullanılır. PID kontrolörünün çok sayıda kontrol uygulaması için iyi performansa sahip olması onun tanınmasına önayak olmuştur. 1910'da PID kontrolünün ve 1942'de Ziegler-Nichols'un (ZN) parametreleri ayarlama yönteminin geliştirilmesinden bu yana, PID kontrolörleri, uygulama ve tasarım basitliğinden dolayı kontrol mühendisliğinde popüler hale gelmiştir. Çeşitli uygulamalarda kullanılabilme yeteneği de ünlü olmasını sağlamıştır[16]. Dahası, PID kontrolcüsü düşük bir başlangıç maliyetiyle kullanılabilir

ve parametreleri uygun şekilde ayarlanırsa çoğu sistem için sağlam ve güvenilir performans sağladığı kanıtlanmıştır. PID kontrolörleri veya PID varyasyonları (yalnızca P, PD ve PI) kontrol uygulamalarının % 90 ile % 95'inden fazlasında yaygın olarak kullanılmaktadır [16, 17]. Ancak, sınırlamaları mevcuttur. PID denetleyici, yalnızca iş gereksinimi makul derecede doğrusal ise ve işlem parametreleri değişikliği sınırlıysa tatmin edici performans sağlar.

PID, kullanıcının tanımladığı referans sinyal noktası ile sistem çıkışında ölçülen sürece bağlı çıkış değişkeni arasındaki hataya dayanan bir sinyal kontrol değişkeninin çıkışını sağlayan kontrolör türüdür. PID denetleyicisinin her bir parametresi, hatayla ilgili olarak gerçekleştirilen belirli bir işlemi ifade etmektedir.

K_p , Oransal kazanç: Sistem veya süreç kararlılığından sorumlu olan ayarlanabilir bir yükseltici görevi görür. K_p çok düşük ayarlanırsa, ölçülen çıkış sinyali, referansa yakınsayamaz. Yüksek K_p , referansın çok üstüne çıkılmasına ve salınımına neden olur.

K_i , İntegral kazanç: İntegral kontrol, K_p 'nin neden olabileceği kararlı durum hatasını azaltma yönünde katkı sağlar ve buradaki küçük bir entegrasyon süresi ile ölçülen çıkış sinyalinde hızlı bir değişimle sonuçlanır [17]. Bu nedenle, K_i , kararlı durum hatasını sıfıra yaklaştırmakla görevlidir. Bunu ise geçmiş değerlere bakarak geleceğin bir kısmını tahmin etmekle yapmaktadır. Bununla birlikte, K_i çok yüksek olarak ayarlandığında, sistem için salınımı veya kararsızlığı arttırabilir.

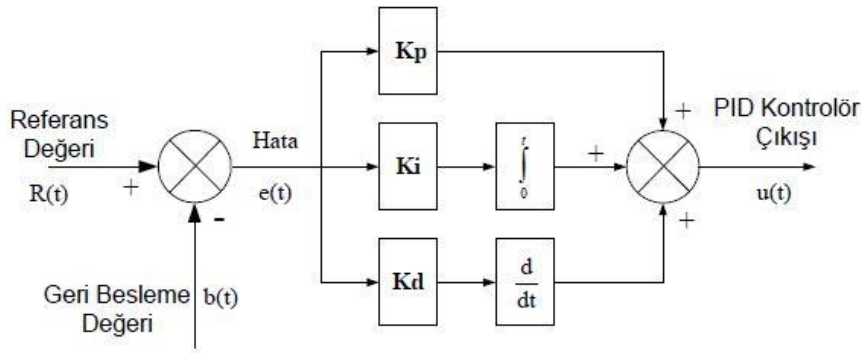
K_d , Türev kazanç: Proses devam ederken çıkış sinyali Referans sinyal noktasına yaklaştıkça yanıtı ayarlama eğiliminde olan bir türev terimidir. Bu nedenle K_d , sistem veya proses yanıtından sorumludur. K_d 'nin çok küçük olması ölçülen çıkış sinyalini agresif hale getirirken, çok büyük olması sistemin yavaş yanıt vermesine neden olur.

Çizelge 2.2: PID parametrelerini bağımsız olarak artırmanın etkisi

Kontrolör Türü	Simge	Yükselme Zamanı	Hedef Aşımı	Oturma Süresi	Kalıcı Durum Hatası
Oransal	K_p	Azalı	Artar	Kısıtlı Artar	Azalı
İntegral	K_i	Kısıtlı Artar	Artar	Artar	Çok Artar
Türev	K_d	Kısıtlı Değişir	Azalı	Azalı	Önemsiz

2.4.1 PID Kontrolör Parametreleri

PID algoritması, proses ve kontrol gereksinimlerine bağlı olarak farklı şekillerde uygulanabilmektedir. Paralel ve seri olmak üzere iki tür sistem kombinasyonu vardır. Sunulan en uygun biçim, Şekil 2.18'da gösterildiği gibi, P, I ve D elemanlarının aynı giriş sinyaline, hataya, sahip olduğu paralel biçimdir [18].



Şekil 2.18: PID Kontrolör Blok Diyagramı

PID Kontrolör blok diyagramının matematiksel olarak ifadesi aşağıdaki şekildedir:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (2.54)$$

Yukarıdaki denklemde $e(t)$ hata değeri aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$e(t) = R(t) - b(t) \quad (2.55)$$

PID denetleyicisinin parametreleri, Manuel ayarlama yöntemi, Ziegler - Nichols ayarlama yöntemi, Cohen Coon ayarlama yöntemi (açık sistem cevabı), Tyreus-Luyben ayarlama yöntemi, Murril ve Smith yöntemi, İç Model Kontrol yöntemi vb. kullanılarak ayarlanabilir [19]. Bu tez projesinde literatürdeki süreçler takip edilerek, sözü edilen yöntemlerden, ileride açıklanacağı şekilde Manuel ayarlama yöntemi kullanılarak PID katsayı değerleri belirlenmiştir. Öncelikle sistemin cevaplarını deneyimlerimize ve benzer şartlarda benzer şekillerde kullanılan sistemlerin çalışma parametrelerini tercih ederek Manuel ayarlama ile çıkış cevapları incelenmiştir. SHP sistemi kapalı bir kontrol döngüsüne sahiptir. Manuel olarak girilen katsayı değerleri belli aralıklarla performansları gözlemlenecektir. Bu sonuçlar karşılaştırılarak, en uygun olan değerlere karar verilecektir [18].

2.4.1.1 Manuel Ayarlama Yöntemi

Endüstriyel uygulamalarda en çok kullanılan kontrol stratejisinin genel ismiyle PID kontrolü olduğu söylenebilir. Yüksek frekanslı sensör gürültüsünün artmasından dolayı türev terim genellikle sıfıra ayarlanır. Bu çalışmada, bu denetleyicilerin yalnızca oransal ve integral terimleri kullanılmıştır. Kontrolörün integral terimi, adım yanıtları için sabit durum hatasını ortadan kaldırmaya yardımcı olur. Orantılı terim, sistem yanıt süresini ayarlamak için kullanılır [9].

Kaskat PID kontrolü, pozisyon döngüsünde hedef sinyali takip etmek için ilk kademe P denetleyiciden ve açısal hız döngüsünde gürültüleri ortadan kaldırmak içinde ikinci kademe PI denetleyiciden oluşur. Bu bölümde, sürekli şekilde pozisyon P ve hız PI denetleyicilerle her iki eksen içinde ayarlanması anlatılmıştır. PI denetleyicisinin transfer fonksiyon işlevinde K_p ve K_i , sırasıyla denetleyicinin orantılı ve integral kazancını ifade eder. PID Kontrolörün parametre tasarımı için takip edilecek adımlar şu şekilde sıralanabilir:

- Öncelikle Kontrol edilen sistemin transfer fonksiyonu, deneysel olarak yada modelleme yöntemiyle çıkarılır ve giriş çıkışlar arasında hangi değişkenlerin kontrol edileceği belirlenir.
- Sistemin yükseliş zamanını iyileştirici bir etken olarak K_p parametresinin eklenmesi.
- Kalıcı durum hatasının azaltılması yada kaldırılması için, K_i parametresinin eklenmesi.
- K_p , K_i ve K_d parametrelerinin sistem cevabında en iyi gözlenen çıkış elde edilene kadar iyileştirilmesi için ayarlamaların devam etmesi şeklindedir [19].

Bu tez projesinde yukarıdaki adımlar takip edilmekle birlikte yapılan literatür araştırmalarında bağlı kalınmış ve parametre tipleri bu şekilde seçilmiştir. Simülasyon yönteminde Kaskat PID veya Kademeli PID olarak ifade edilen aynı anda hem çıkış açısal hızının hemde çıkış pozisyonunun seri bağlı kontrolörler marifetiyle denetlendiği bir yapı kullanılması tercih edilmiştir. Birbirine seri bağlı, farklı K_p , K_i , K_d parametre değerlerine sahip, iki ayrı kontrol bloğu vardır. Kaskat PID tasarım prosedürünün ilk adımı, sadece açısal hız döngülerinde PI kontrolörlerinin farklı K_p ve K_i değerleri için ayarlanması ve en iyi performans gösteren kontrolörlerin seçilmesi şeklindedir [9]. Sistemin hız kontrolörleri tasarladıktan sonra, pozisyon kontrolörleri istenilen koşullara göre ayarlanır.

Elevasyon Ekseni kaskat PID kontrol tasarımında farklı K_p ve K_i değerleri için, hız kontrolörlerinin performansları (Çizelge 2.3, 2.4) ve pozisyon kontrolörlerinin performansları (Çizelge 2.5) aşağıda verilmiştir. Bu sonuçlara göre hız kontrolörünün parametreleri $K_p = 0.045$ ve $K_i = 0.85$ olarak seçildiğinde ve pozisyon kontrolör parametreleri $K_p = 40$ seçildiğinde, pozisyon adım cevabı %1.2'den az hedef aşımı, 0.2 saniyeden az oturma süresi ve % 1'den az kalıcı durum hatası olacaktır.

Çizelge 2.3: Elevasyon Ekseni hızı PI kontrolörlerinin Farklı K_p değerleri için performansları ($K_i = 0.85$)

K_p Değerleri	Hedef Aşımı(%)	Oturma Süresi(sn)	Kalıcı Durum Hatası(%)
0.005	1.880	2.050	< 1.0
0.025	1.321	0.163	< 1.0
0.045	1.172	0.127	< 1.0
0.065	1.135	0.130	< 1.0
0.085	1.140	0.115	< 1.0

Çizelge 2.4: Elevasyon Ekseni hızı PI kontrolörlerinin Farklı K_i değerleri için performansları ($K_p = 0.045$)

K_i Değerleri	Hedef Aşımı(%)	Oturma Süresi(sn)	Kalıcı Durum Hatası(%)
0.25	1.060	0.220	< 1.0
0.55	1.120	0.165	< 1.0
0.85	1.172	0.127	< 1.0
1.15	1.219	0.101	< 1.0
1.45	1.261	0.082	< 1.0

Çizelge 2.5: Elevasyon Ekseni pozisyonu P kontrolörlerinin Farklı K_p değerleri için performansları

K_p Değerleri	Hedef Aşımı(%)	Oturma Süresi(sn)	Kalıcı Durum Hatası(%)
10	0.998	0.403	< 1.0
20	0.999	0.215	< 1.0
40	1.063	0.126	< 1.0
80	1.354	0.147	< 1.0
160	1.714	0.567	< 1.0

Azimut Ekseni kaskat PID kontrol tasarımında farklı K_p ve K_i değerleri için, hız kontrolörlerinin performansları (Çizelge 2.6, 2.7) ve pozisyon kontrolörlerinin performansları (Çizelge 2.8) aşağıda verilmiştir. Bu sonuçlara göre hız kontrolörünün parametreleri $K_p = 0.1$ ve $K_i = 1.9$ olarak seçildiğinde ve pozisyon kontrolör parametreleri $K_p = 40$ seçildiğinde, pozisyon birim cevabı %1.2'den az hedef aşımı, 0.2 saniyeden az oturma süresi ve % 1'den az kalıcı durum hatası olacaktır.

Çizelge 2.6: Azimut Ekseni hızı PI kontrolörlerinin Farklı K_p değerleri için performansları ($K_i = 1.9$)

K_p Değerleri	Hedef Aşımı(%)	Oturma Süresi(sn)	Kalıcı Durum Hatası(%)
0.025	1.611	0.455	< 1.0
0.050	1.282	0.032	< 1.0
0.100	1.172	0.126	< 1.0
0.200	1.146	0.108	< 1.0
0.400	1.241	0.035	< 1.0

Çizelge 2.7: Azimut Eksenli hızı PI kontrolörlerinin Performansları ($K_p = 0.1$)

K_i Değerleri	Hedef Aşımı(%)	Oturma Süresi(sn)	Kalıcı Durum Hatası(%)
0.1	1.015	0.026	< 1.0
1	1.101	0.181	< 1.0
1.9	1.172	0.126	< 1.0
2.8	1.234	0.093	< 1.0
3.7	1.289	0.073	< 1.0

Çizelge 2.8: Azimut Eksenli pozisyonu P kontrolörlerinin Performansları

K_p Değerleri	Hedef Aşımı(%)	Oturma Süresi(sn)	Kalıcı Durum Hatası(%)
10	0.998	0.403	< 1.0
20	1.000	0.215	< 1.0
40	1.060	0.125	< 1.0
80	1.351	0.146	< 1.0
160	1.712	0.563	< 1.0

Yukarıdaki bölümde, doğrusal olmayan iki eksenli SHP modeli için parametrelerinin performansları incelenmiştir. Belirlenen manuel parametre değerleri girilerek sistem testleri aşamasına geçilmiştir.

Çizelge 2.9: Manuel Ayarlama Yöntemi ile Belirlenen Parametreler

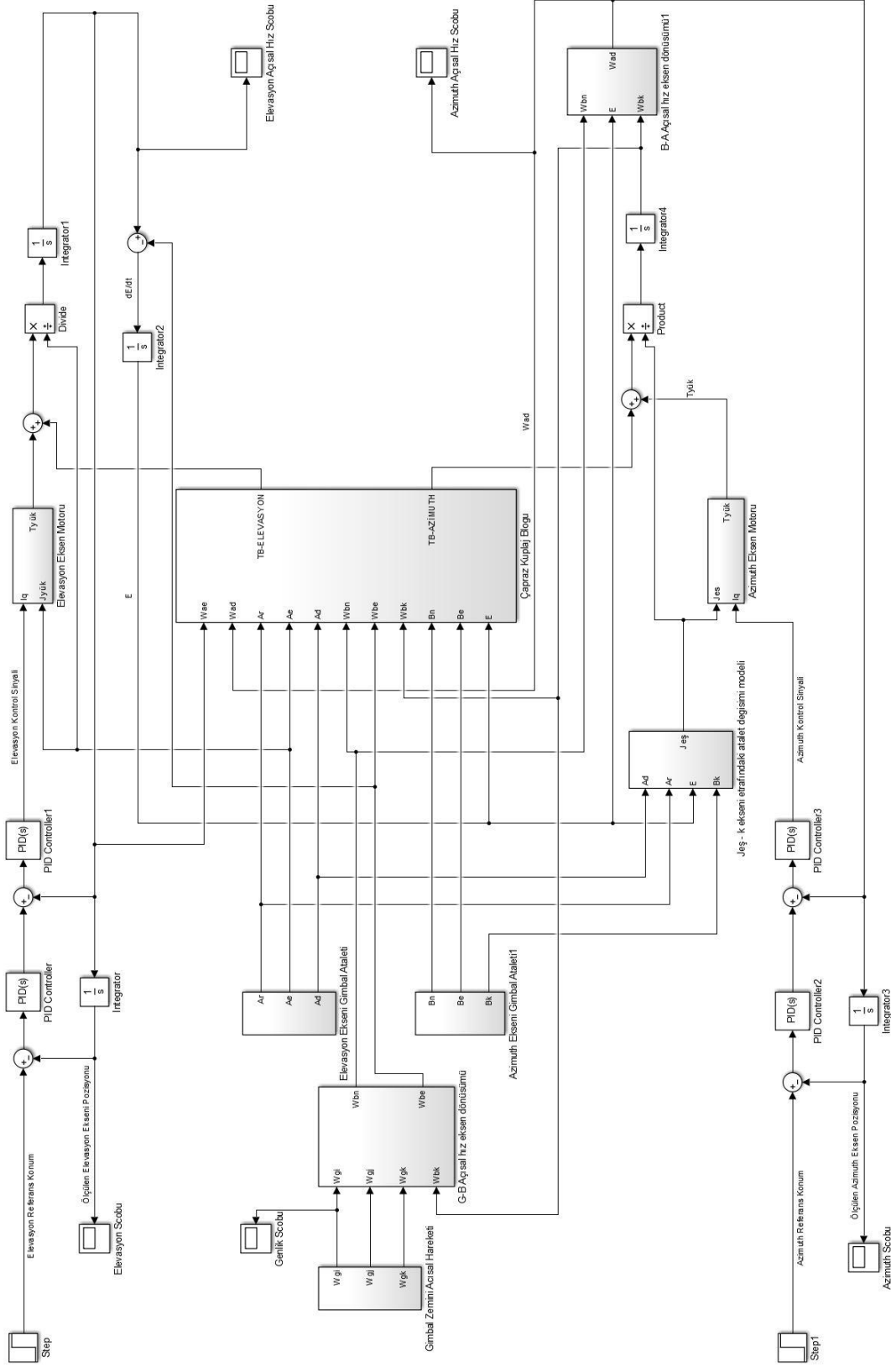
	Elevasyon Eksenli		Azimut Eksenli	
Parametreler	$P_{pozisyon}$	$PI_{hız}$	$P_{pozisyon}$	$PI_{hız}$
K_p	40	0.045	40	0.1
K_i	-	0.85	-	1.9

3. SİMULASYON SONUÇLARI

Simülasyon ortamı, kontrol sistemi tasarımcıları için birçok kolaylık sağlamaktadır. Örneğin, sistemin test edilecek senaryoları, simülasyon hesaplama süreleri nispeten kısa olduğundan birçok kez tekrarlanabilir ve bloklar kullanılarak istenen verilerin elde edilmesi kolaylaştırılmıştır.

Matematik model Newton'un ikinci yasası kullanılarak formüle edilmiştir. Stabilizasyon döngüsü için blok diyagramı tanıtılmış ve çapraz kuplaj etkisi modele entegre edilmiştir. Atalet dinamikleri ve çevresel bozunumlar modeli daha karmaşık hale getirebilir [28]. Bu tez çalışmasının simülasyon modelinde yalnızca zeminden kaynaklı farklı genlikteki titreşimlerin ve eksenlerin karşılıklı çapraz kuplaj etkisinin referans sinyal üzerindeki bozunumları analiz edilmektedir. Bu koşuldan dolayı modellemede, kontrolör tasarımı ve simülasyonlarda belirli varsayımların yapıldığı unutulmamalıdır. Bu simülasyon çalışması temel olarak, Newton-Euler yaklaşımını kullanarak mümkün olduğunca gerçekçi bir matematiksel model elde etmek amacıyla iki eksenli SHP'nin matematiksel modellemesine odaklanmaktadır [9]. Diğer bir amaç, kontrolör parametrelerini doğru tasarlamak ve performanslarını karşılaştırmaktır. Kontrolörlerin ilk performans karşılaştırması, doğrusal olmayan iki eksenli SHP'nin elevasyon ve Azimut eksen modeline farklı konum komutları uygulandığında izleme performanslarıyla ilgilidir. İkinci karşılaştırma, sabit bir konum verilen eksenlerin dışsal titreşim genliği karşısında konumunu koruma performansı yani stabilizasyonu ile ilgilidir [9]. Şekil 3.1'deki gibi MATLAB/Simulink ortamında iki eksenli SHP'nin matematik modeli blok diyagramlar ile oluşturulmuş ve kontrol yöntemi olarak Kaskat PID denetleyici kullanılmıştır. Manuel ayarlama yöntemiyle PID parametre değerlerinin belirlenmesi için simülasyon modeli üzerinde denemeler yapılmıştır. Önceki bölümdeki denemeler sonucunda Çizelge 3.1'de gösterildiği şekilde değerler elde edilmiştir.

İlk adım olarak belirlenmiş parametrelerin kontrolünde eksenlerin referans komutlara verdiği cevap incelenmiştir. Referans sinyalin yüksek frekanslı bileşenlerini baskılayacak, yani alçak geçiren filtre özelliğine sahip, Ön filtre transfer fonksiyon bloğu eklenerek optimizasyon çalışması yapılmıştır. İkinci adım olarak eksenlere sıfır pozisyon komutu verilmiş ve zeminden kaynaklı dışsal titreşimlerin mevcut pozisyon üzerindeki etkilerini gözlemlemek için simülasyon çalışmaları yapmak olmuştur.



Şekil 3.1: SHP Kontrol Döngüsü Matlab/Simulink Modeli

Elestasyon atalet matrisi **EK C**'de belirtildiği gibi CAD programı yardımıyla bulunmuştur ve aşağıdaki şekilde düzenlenmiştir.

$$J_A = \begin{bmatrix} A_r & 0 & 0 \\ 0 & A_e & 0 \\ 0 & 0 & A_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.00012 & 0 & 0 \\ 0 & 0.00008 & 0 \\ 0 & 0 & 0.00005 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Azimet atalet matrisi **EK D**'de belirtildiği gibi CAD programı yardımıyla bulunmuştur ve aşağıdaki şekilde düzenlenmiştir.

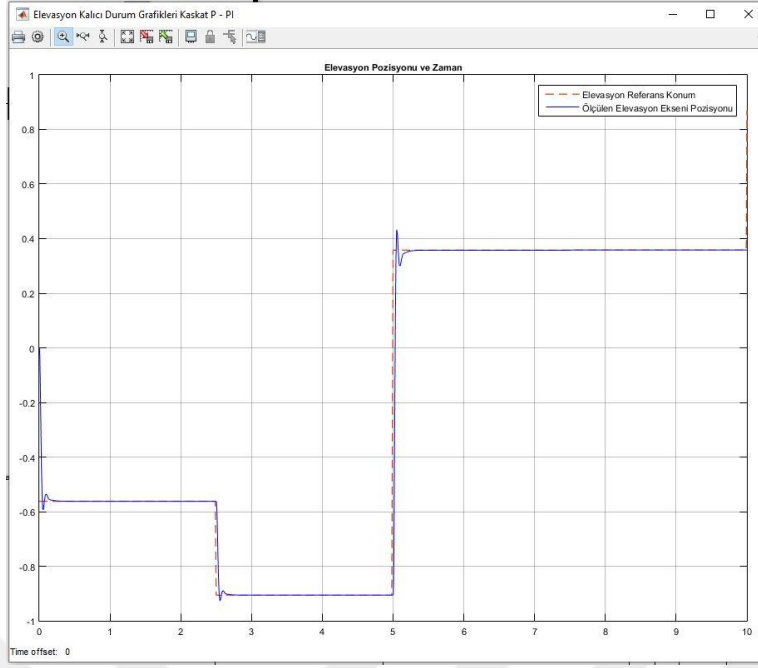
$$J_B = \begin{bmatrix} B_n & 0 & 0 \\ 0 & B_e & 0 \\ 0 & 0 & B_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0018 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0015 & 0 \\ 0 & 0 & 0.00085 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Simölasyon çalışmalarında kullanılacak kontrolör katsayı parametreleri aşağıdaki tabloda belirtilmiştir.

Çizelge 3.1 : Kontrol Parametreleri

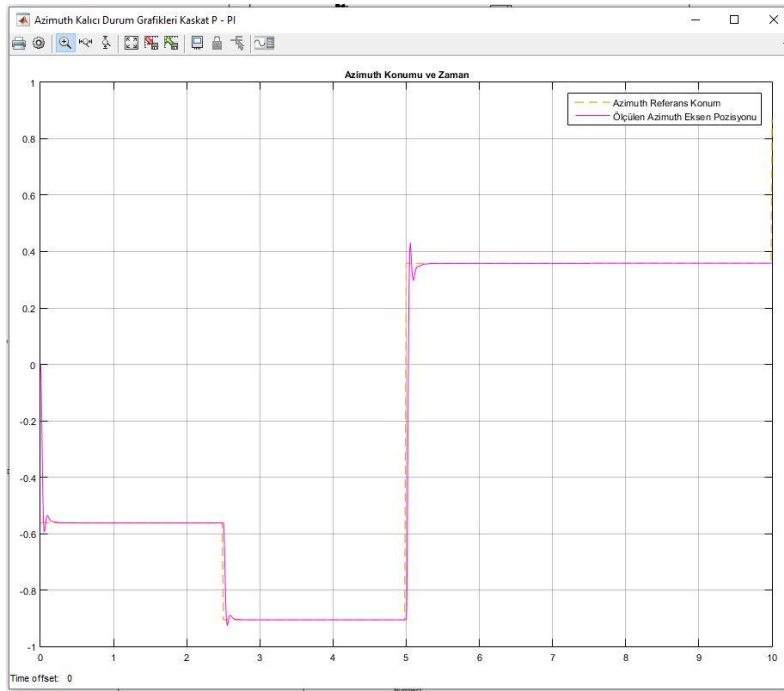
	Birincil Kontrol		İkincil Kontrol	
	K_p		K_p	K_i
Elestasyon Eksen	40		0.045	0.85
Azimet Eksen	40		0.1	1.9

Önceki bölümlerde, SHP 'nin belirtilen parametrelerdeki birim basamak cevapları sayısal veriler olarak tablolarda belirtilmişti. İlerleyen kısımda, sistem performansı, her iki eksen için, aynı sinyal üzerindeki, radyan birimli çeşitli kademelerde üç konum yer değıştirmesi içeren, referans girdisi ile değeriendirilecektir. Daha sonrasında alınan sistem cevabının optimizasyon çalışması sonucunda iyileştirilmesi hedeflenmektedir.



Şekil 3.2: Elevasyon Ekseni Referans Komut Cevabı

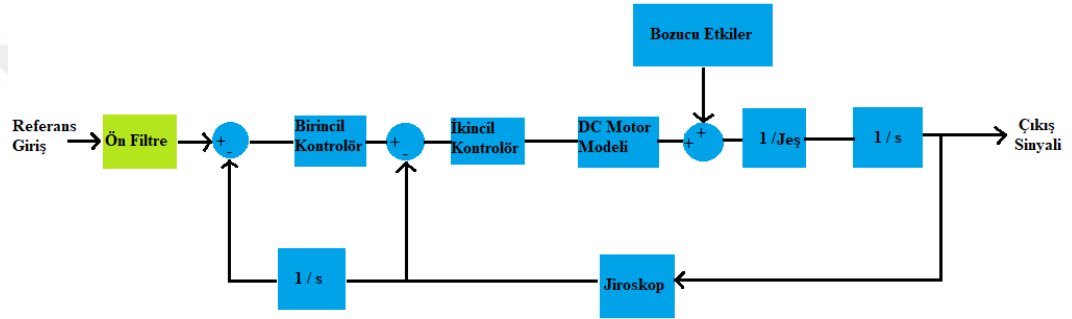
Şekil 3.2 'de, üç farklı konum izleme seviyesinden oluşan referans sinyale göre elevasyon ekseninin sistem tepkisi gösterilmektedir. Benzer şekilde, Azimut ekseninin özdeş referans sinyale sistem tepkisi Şekil 3.3'de gösterilmektedir.



Şekil 3.3: Azimut Ekseni Referans Komut Cevabı

3.1 Optimizasyon

Elevasyon ve Azimut eksenlerin cevabı, daha yüksek hızda ve ani yer değiştiren referans sinyallerde, konumlandırmanın daha fazla aşma ürettiğini ve bunun da operasyon istikrarını bozabileceği gözlemlenmiştir. Aslında, referans sinyalin yüksek frekanslı bileşenlerini baskılayacak bir ön filtre aracılığıyla çok daha düşük bir aşma elde edilebilir. Ön filtrelerin sistem modeline uygulanmasının nedeni budur [20]. Böylece sistem tepkisi her iki eksen için küçük aşmalarla gerçekleştirilebilir [27]. Yeni parametreler, ön filtrelerin eklendiği yeni sistem modeli üzerinde daha önce açıklanan adımlarla benzer şekilde ayarlanacaktır.

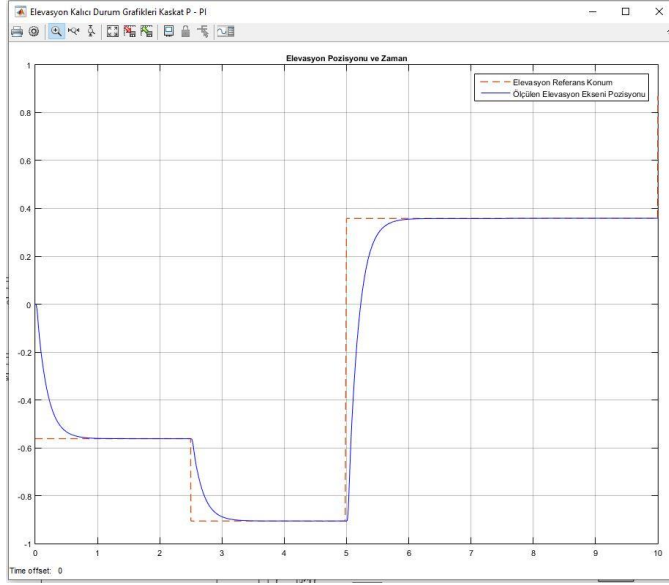


Şekil 3.4: Bir Eksendeki Ön Filtreli Kaskat PID Kontrolör Genel Gösterimi

Matematik model üzerinde sistem cevabının iyileştirilmesi çalışmaları yapılmıştır. Elevasyon ve Azimut eksenleri dönüş açıları için ön filtrenin transfer fonksiyonları, matematik modelin aşım, oturma süresi ve kalıcı durum hatası bakımından istenen bir sistem cevabı elde edebileceği şekilde nispeten optimize edilmiştir:

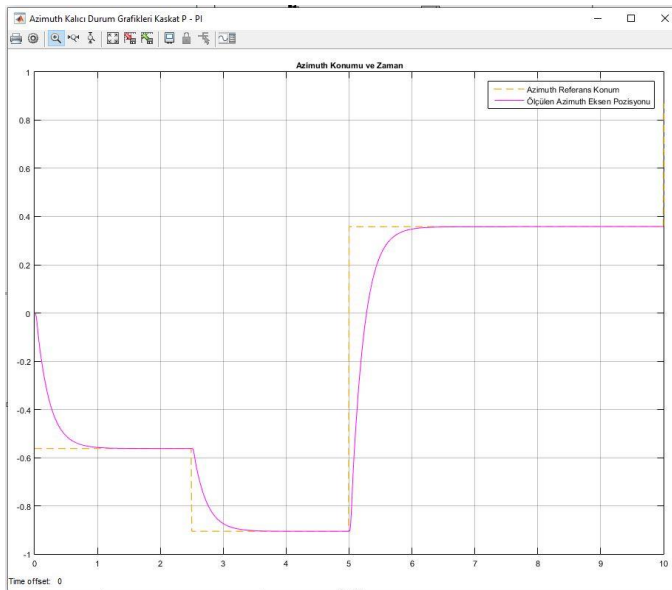
$$G_{Elevasyon\text{ÖnFiltre}}(s) = \frac{6.28}{s + 6.28} \quad (3.3)$$

$$G_{Azimuth\text{ÖnFiltre}}(s) = \frac{5.024}{s + 5.024} \quad (3.4)$$



Şekil 3.5: Elevasyon Ekseni Ön Filtreli Referans Komut Cevabı

Eşitsizlik 3.3 ve 3.4 'teki ön filtre transfer fonksiyon bloğunu kullanarak, Şekil 3.2 ve 3.3'teki belirtilen aynı referans giriş, sistem cevabını değerlendirmek ve ön filtrelerin sinyal üzerindeki etkisini kontrol etmek için matematik modele tekrar uygulanmıştır. Şekil 3.5 ve Şekil 3.6, matematik modele eklenen ön filtrelerin, her iki eksen için aşımı önemli ölçüde azaltarak operasyonu geliştirdiğini ve bu sayede çok daha kararlı bir çalışma davranışı elde edildiğini göstermektedir.



Şekil 3.6: Azimut Ekseni Ön Filtreli Referans Komut Cevabı

3.2 Sistem Tepkisi

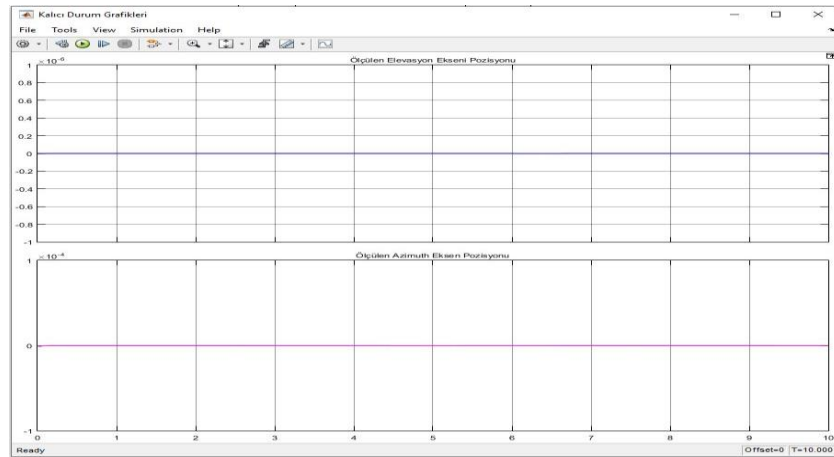
Bu bölümde eksenlere sıfır pozisyon komutu verilmiştir. Zeminden kaynaklı dışsal titreşimlerin mevcut pozisyon üzerindeki etkilerini gözlemlemek için simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Matematik modele zeminin G koordinat sistemi üzerinden aşağıdaki eşitsizliklerde belirtilen şekillerde matematiksel titreşimler uygulanmıştır.

$$Q_{i,j,k} = \pm 0.15 \sin(2 \pi f t) \quad (3.5)$$

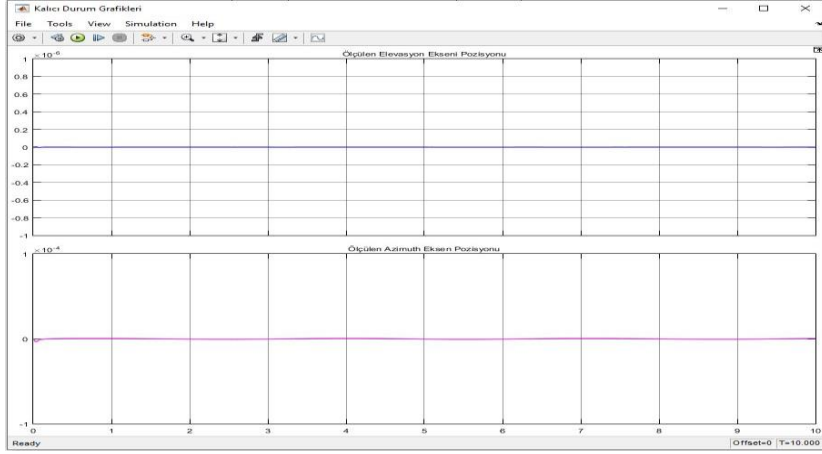
Eşitsizlik 3.5'te belirtilen f sembolü, zemine uygulanan titreşimin frekansıdır [10]. Bu eşitsizlik türev formülasyonuna sokulmuş ve Eşitsizlik 3.6'daki gibi açısal hız olarak sistem modeline uygulanmıştır.

$$w_{i,j,k} = \frac{dQ_{i,j,k}}{dt} \quad (3.6)$$

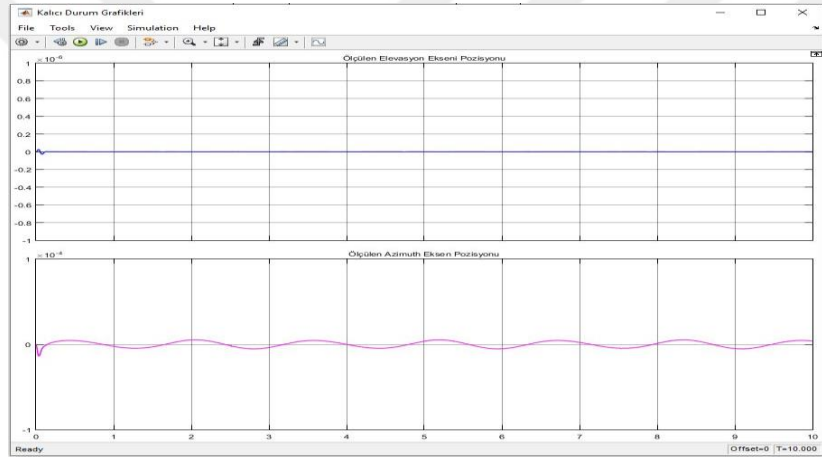
Parametre değişkeni olarak “ f ” üzerinden 0.5 Hz ile 8 Hz arasında titreşimler uygulanmış, sistem tepkisi grafiklerle ölçülmüştür. Son olarak bir çizelgede belirtilmiş ve sonuçlar kıyaslanarak yorumlar yapılmıştır.



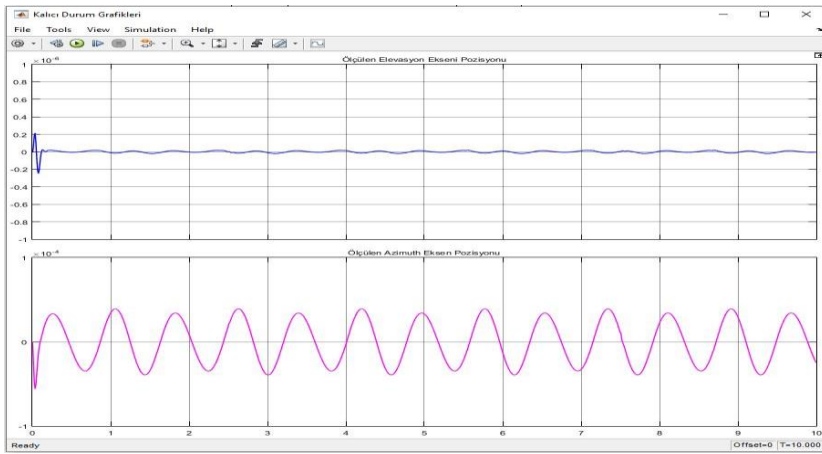
Şekil 3.7: SHP Modelinin 0.5 Hz Zemin Titreşim Genliği Cevabı



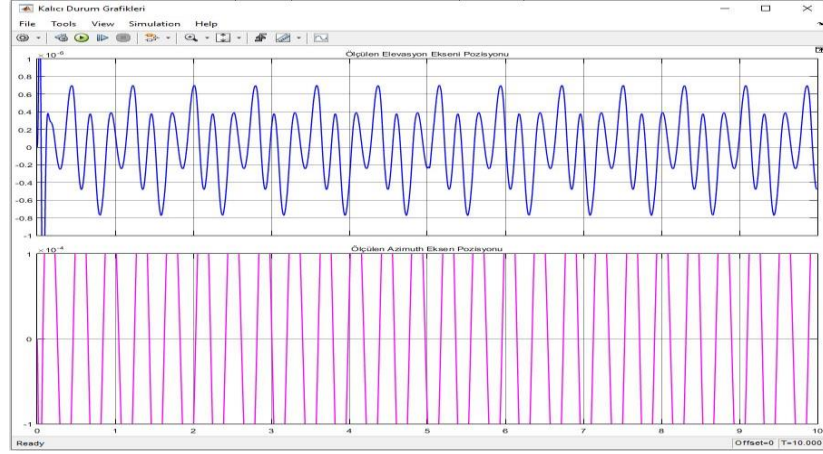
Şekil 3.8: SHP Modelinin 1 Hz Zemin Titreşim Genliği Cevabı



Şekil 3.9: SHP Modelinin 2 Hz Zemin Titreşim Genliği Cevabı



Şekil 3.10: SHP Modelinin 4 Hz Zemin Titreşim Genliği Cevabı



Şekil 3.11: SHP Modelinin 8 Hz Zemin Titreşim Genliği Cevabı

3.3 Simülasyon Çıktıları

Çizelge 3.2’de bozucu giriş olarak beş farklı kademede uygulanan frekans koşullarında Elevasyon ve Azimut eksenleri dönme açılarındaki sapma tepkisi sayısal olarak gösterilmektedir. Yukarıdaki grafikler değerlendirildiğinde zeminden kaynaklanan bozucu giriş frekansı ne kadar arttırılırsa görüş hattındaki sapma miktarıda orantılı olarak artmaktadır. Bozucu giriş uygulandığı sırada sistemin stabilizasyon yeteneği kapasitesince bozunumlar engellenmektedir. İncelenen literatürden yola çıkarak benzer koşullardaki testler sırasında miliradyan seviyelerindeki eksenlerin sapma miktarları, kabul edilebilir sınırlar olarak kullanılmıştır [10].

Çizelge 3.2 : Bozucu Giriş altında Eksenlerin Sapma Açıları

Bozucu Genliği (rad)	Bozucu Frekans (Hz)	Elevasyon Eksen Sapması (rad)	Azimut Eksen Sapması (rad)
± 0.15	0.5	$8 \cdot 10^{-10}$	$13 \cdot 10^{-7}$
± 0.15	1	$4 \cdot 10^{-9}$	$4 \cdot 10^{-6}$
± 0.15	2	$3 \cdot 10^{-8}$	$14 \cdot 10^{-6}$
± 0.15	4	$3 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{-5}$
± 0.15	8	$3 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-4}$

Simülasyon testlerinden mevcut matematiksel model üzerinde şu sonuçlar çıkarılabilir:

- 4 Hz ve üzerinde uygulanacak bozucu frekans girişlerinin, özellikle Azimut eksen hattı üzerindeki kontrol sistemi tarafından tam anlamıyla bastırılamadığı anlaşılabılır. Çapraz kuplaj etkisiyle de bu bozunum elevasyon eksenindeki sapma miktarını arttırmaktadır. Söz konusu frekans değerlerinden düşük olan durumlarda ise sistem cevabının yeterince başarılı olduğu söylenebilir.
- Çapraz kuplaj ile Azimut eksen stabilizasyon tepkisinin aşılması, zemin kaynaklı bozucu giriş frekansı ile doğru orantılı şekilde, hem elevasyon hem de Azimut eksenleri üzerindeki bozulmayı arttırmaktadır.
- Elevasyon ve Azimut eksenleri arasındaki çapraz kuplaj etkisi, Azimut gövdesi geometrisi, Azimut eksen merkezi uzaklık parametreleri ve zemin hareketlerinin sonucudur. Bu nedenle, çapraz kuplaj ilişkileri iki eksenli bir SHP matematik modeli tasarlanırken dikkate almak oldukça önemlidir.

Genel olarak yapılan tüm simülasyon çalışmaları ve iyileştirmelerden de şu sonuçlar çıkarılabilir:

- Hem Azimut hem de Elevasyon eksenleri için, farklı konum referanslarında kararlı çalışma, Kaskat PID kontrol yöntemi seçimiyle aşım, oturma süresi ve kalıcı durum hataları açısından kontrolün başarılı olduğu sonucu çıkarılabilir.
- Optimizasyon sonucu oturma süresi eksenlerde bir miktar artsada, ön filtre tasarımı eklentisi yüksek aşım oranının önemli ölçüde üstesinden gelmiştir. Şüphesiz referans konum daha yüksek değişim değerleri aldığı anda, aşım ve oturma süresi bir miktar artacaktır. Ancak yinede aşırı bir tepki olmadığından kontrolörlerin etkinliğini sağladığını göstermektedir.
- Elevasyon eksen için, hemen hemen tüm referans girdileri, çok benzer bir özellik ile sonuçlanmıştır; bu da, denetleyicinin, ön filtre elevasyon eksen döngüsüne uygulandıktan sonra kararlı ve tutarlı bir işlem gerçekleştirdiğini göstermektedir. Dolayısıyla, optimizasyon çalışması ile yapılan iyileştirmelerin, matematiksel modelin her iki ekseninin transfer fonksiyon bloğu üzerinde yüksek performanslı bir denetim sağladığı sonucuna varılacaktır.

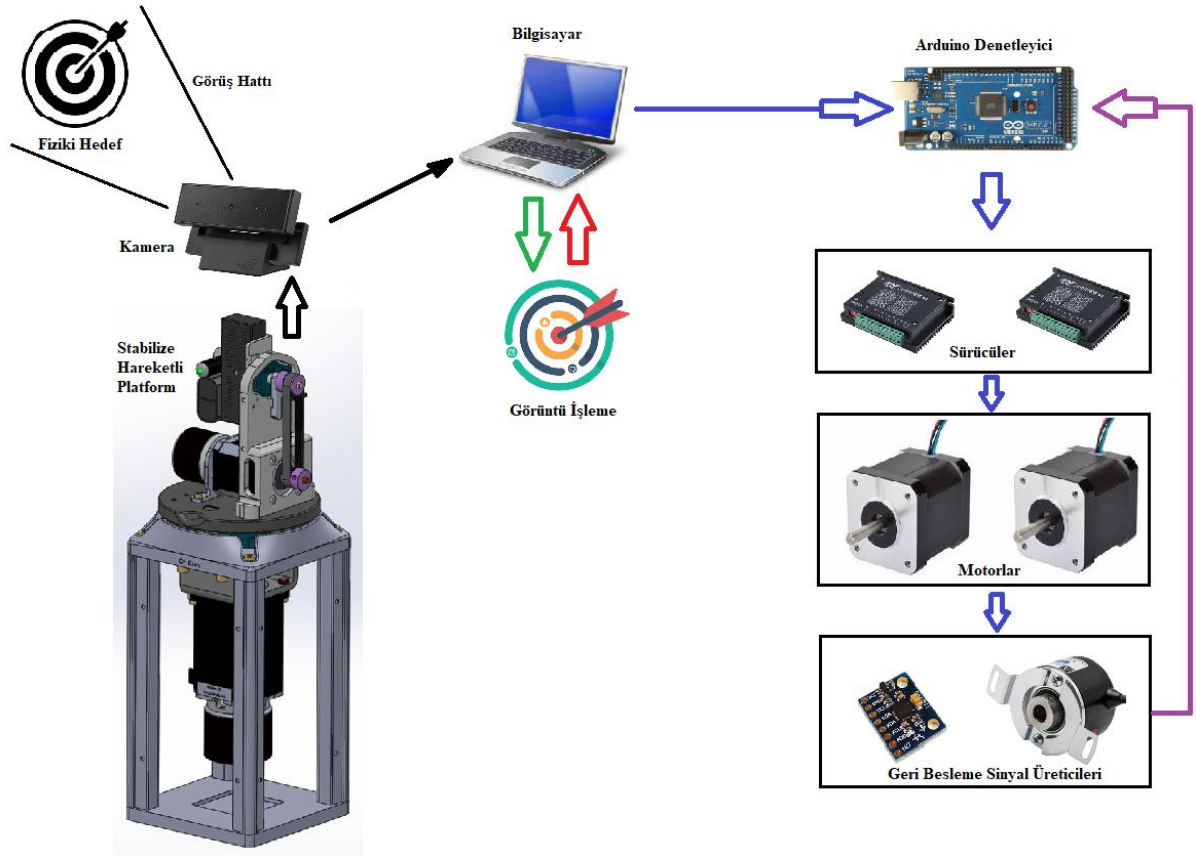
4. DENEYSEL SONUÇLAR

SHP'nin fiziksel olarak test edileceği platform donanımında kullanılan parçaların özellikleri, hangi kriterler ile seçildiği, program algoritmaları ve test sonuçları dört başlık altında incelenecektir. Bölüm 4.1 de hareketin sağlanması ve kontrolünde kullanılan elektronik komponentler hakkında bilgi verilecektir. Bölüm 4.2'de mekanikte kullanılan şalt malzemeler ve üretilen prototip çizim parçaları incelenecektir. Bölüm 4.3 de kontrol sisteminin bilgisayarda programlanması, sürücü ve uzak bilgisayarla iletişimi incelenecektir. Bölüm 4.4'te çıkarılan üretilen parçaların ve şalt malzemelerin montajlandığı fiziksel model üzerinde yapılan test sonuçları hakkında bilgiler verilecektir.

Elektronik komponent seçimi bölümünde Elevasyon ve Azimut motorlarının detaylı özellikleri ve motorlara uygun sürücüler, jiroskopik sensörün hassasiyeti, programın yazıldığı kontrolcünün kapasitesi, pozisyon bilgisi için kullanılacak encoder, optik izleme için kullanılan kamera, lazer, gibi ihtiyaç duyulan ekipmanların detaylı özellikleri anlatılmıştır.

Mekanik komponent seçimi bölümünde piyasada standart olarak hazır bulunan şalt malzemelerin teknik özelliklerine yer verilmiştir. Ayrıca SHP'nin Solidworks programında çizimi yapılan ve CNC'lerde ürettirilen parçaların işlevleri anlatılmıştır. Prototipin sanal ortam ve gerçek montajlı görsellerine yer verilmiştir.

Programlama bölümü ise iki kısımda incelenecektir. Uzaktan kontrol yapılan Bilgisayar tarafı master olarak kabul edilmiş, Arduino işlemcisi slave olarak kullanılmıştır. Gerçekleştirilen işlemlerde Görüntü işleme algoritmaları, kameranın USB port üzerinden bağlı olduğu bilgisayarda gerçekleştirilerek, işlemci kapasitesi sınırlarında yapılacak işlemlerde hızlı sonuç alınması ve referans komutların Arduino'ya iletilmesi hedeflenmiştir. Arduino kontrolcü üzerinde ise SHP'nin kontrolü için bilgisayardan gönderilen referans komutlar ilgili algoritmalarla değerlendirilerek, motor sürücülere PWM sinyalleri gönderilmiştir. Ayrıca Encoderlardan gelen sinyaller değerlendirilmiş, limit sınırlayıcılardan sıfır referansı bilgisi alınmış bilgisayara gönderilmiştir.



Şekil 4.1: SHP Kontrol Mekanizması Akış Şeması

Şekil 4.1’de SHP kontrol mekanizması akış şeması gösterilmektedir. Görüntü işleme ve programın genel testleri yapılırken öncelikle sürekli şekilde 1080p görüntü kalitesinde 60fps akış hızında ham veriler kameradan bilgisayara gönderilmiştir. Yazılmış olan görüntü işleme algoritmasında bu ham veriler değerlendirilmiş, önceden belirlenen bir yoğunlukta benzeşme var ise hedef tespitinin yapıldığı kabul edilmiştir. Daha sonrasında SHP’nin görüş hattı durumuna göre, hedefin konumu, kamera görüş hattı üzerinden değerlendirilmiş ve bilgisayardan arduino kontrolcüyeye referans sinyaller gönderilmiştir.

Arduino gelen bilgileri değerlendirerek, motorlara gidecek referans sinyalleri PWM olarak sürücülere göndermiştir. Motorlar senkron olarak hareketlendiğinde istenen pozisyona gidilip gidilmediği geri dönüş sinyalleri olarak alınıp, algoritmaya sokulmuş ve hata sinyalinden doğru pozisyon sinyali üretilerek sürücülere gönderilmiştir. İstenen pozisyona gelindiğinde bu işlem sona erdirilerek lazer işaretleyici çalıştırılmış ve görsel olarak hedef kontrolü testi yapılmıştır.

4.1 Elektronik Komponent Seçim Kriterleri

4.1.1 Motor Seçimi için Genel Bilgiler

Elektrik motoru, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren aygıttır. Her elektrik motoru biri sabit (stator) ve diğeri kendi çevresinde dönen (rotor ya da endüvi) iki ana parçadan oluşur. Bu ana parçalar, sargılar gibi elektrik akımını ileten parçalar, manyetik akıyı ileten parçalar ve vidalar ve yataklar gibi konstrüksiyon parçaları olmak üzere tekrar kısımlara ayrılır. Ayrıca boyut, şekil ve güç bakımından çok çeşitli motorlar vardır. Motorlar robotik uygulamalarda veya herhangi bir sistemde direkt ya da dişli kutularıyla (redüktörlü ya da redüktörsüz olarak) birlikte kullanılabilirler [21].

Platformun çalışma mantığı gereği hedef, optik görüş birimlerinin odağına yerleştirildiğinde motorlar mevcut açıda sabit kalmalı ve bir tutunma torkuyla salınım yapmadan mevcut pozisyonunu koruması gerekmektedir. Servo motorlar özünde frensiz olmaları, frenli servolarında pahalı ve hacimli olmaları sebebiyle direkt tercih edilememiştir. Bu nedenlerle hibrit servo diye adlandırılan motor grubu tercihi yapılmıştır.

4.1.1.1 Hibrit Servo Motor

Hibrit Servo veya Servo Step motorların da rotorlarında sabit mıknatıs bulunur. Bu motorlara hibrit denmesinin sebebi çalışma prensiplerinin sabit mıknatıslı step motorlar ve değişken relüktanslı motorların birleşiminden meydana gelmesidir. Statorlarının nüve yapıları değişken relüktanslı motorlara çok benzese de sargı bağlantıları daha farklıdır. Bu motorlar adım kararlılığı, hız ve tork gibi özellikleri kıyaslanarak sabit mıknatıslı step motorlardan daha iyi performans gösterirler. Avantajları olarak çok hassas hız ve pozisyon kontrolü, düşük rpm devirlerinde yüksek tork vermeleri gösterilebilir. Dezavantajları ise verim, feedback mekanizması içermediğinden harici olarak konum belirlenmesine gerek duymasıdır. Bipolar motorların sarımlarında ortak uç bulunmaz ve her fazı ayrı ayrı sürmek gerekir. İki yönlü beslenirler ve akım her iki yönden de akar. Daha karmaşık sürücü yapısına ihtiyaç duymalarına karşın, her fazdaki sarımların tamamı kullanıldığından motorun verebileceği torkun tamamının kullanılabilmesi güç gerektiren uygulamalarda bir avantajdır.

4.1.1.2 Motorların Teknik Özellikleri

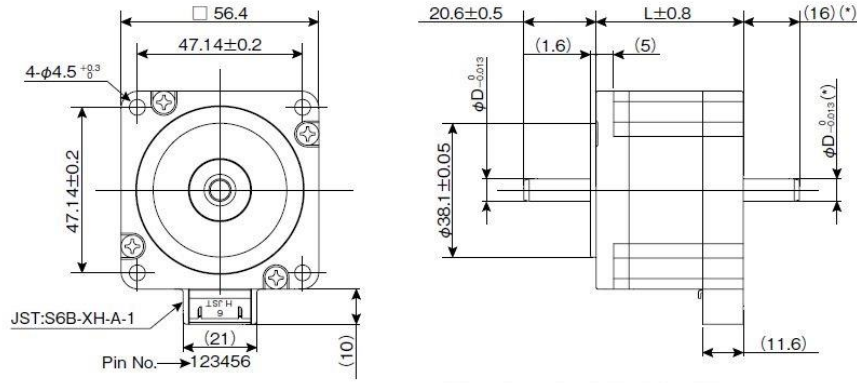
Azimut ve Elevation açılarının belirlenmesi için kullanılan motorların teknik özellikleri ve matematik model denklemlerinin elde edilmesinde kullanılacak katsayı değerleri verilmiştir. SHP çalışma mantığı gereği hedef tespit edildiğinde takip edilecek, istenilen referans açılar sağlandığında hedefe kilitlenme sağlanacaktır. Bu kilitlenme sırasında Elevasyon ve Azimut eksen açılarının sabit kalmasının sağlanması istenmektedir. Zemin titreşiminin olmadığı varsayıldığında bile eksen açılarının korunması için motorların sabit olarak bir tutunma torkuna ihtiyacı olacaktır. Bu kriterler düşünülerek seçilen motorlar ve teknik özellikleri uygun olarak değerlendirilmiştir.

4.1.1.2.1 Azimut Eksen Motoru

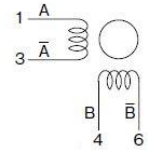
Kataloglarında SST59D5305 kodlu Servo Step motor tercih edilmiştir. Standart olarak Nema23 boyutlarındadır. Azimut eksenı üzerindeki kütle ve ataletin büyük olacağı göz önüne alınarak tutunma torku değeri yüksek olan motor grubu tercih edilmiştir.

Çizelge 4.1: SST59D5305 Motoru Teknik Özellikler Tablosu

Teknik Özellik	Birim	Değer
Adım Açısı:	deg.	1,80
Voltaj:	V	2,5
Akım:	A	4,2
Direnç:	Ω	0,6
Endüktans:	mH	2,2
Tutunma Torku:	Nm	2,4
Rotor ataleti:	$g.cm^2$	470
Motor Mili:	mm	8
Pin Sayısı:	pin	4
Ağırlık:	kg	1,1
Uzunluk:	mm	77,5

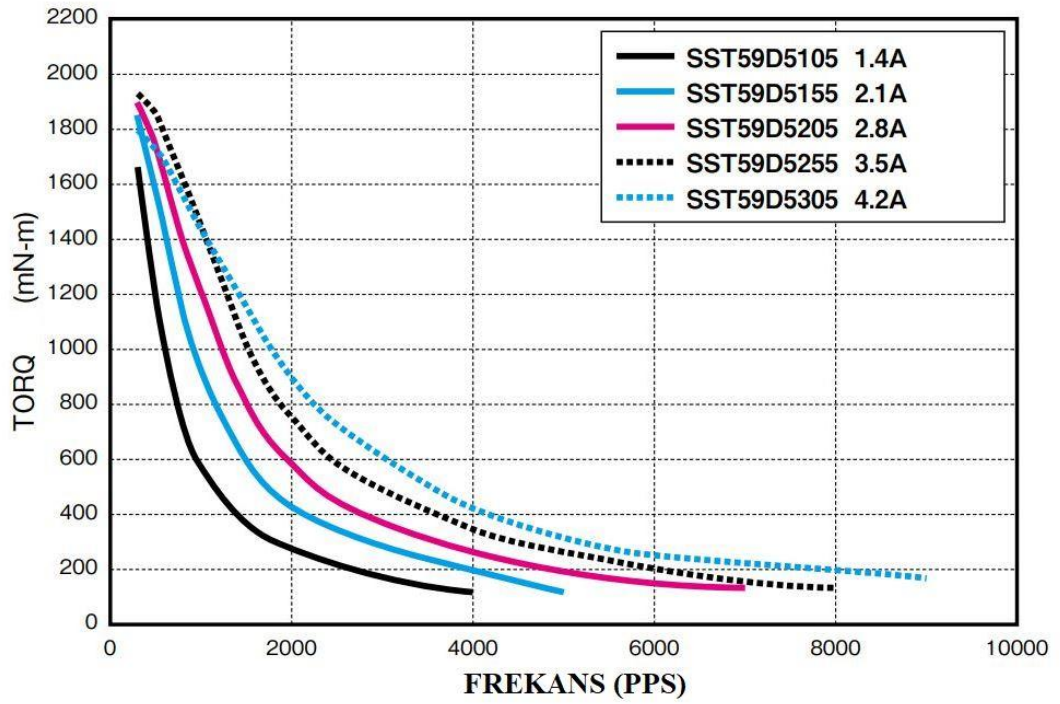


MODEL	φD (mm)
SST59D1XXX	φ6.35
SST59D2XXX	φ6.35
SST59D3XXX	φ6.35
SST59D5XXX	φ8



Şekil 4.2: SST59D5305 Motor Ölçüleri

SST59D5XXX



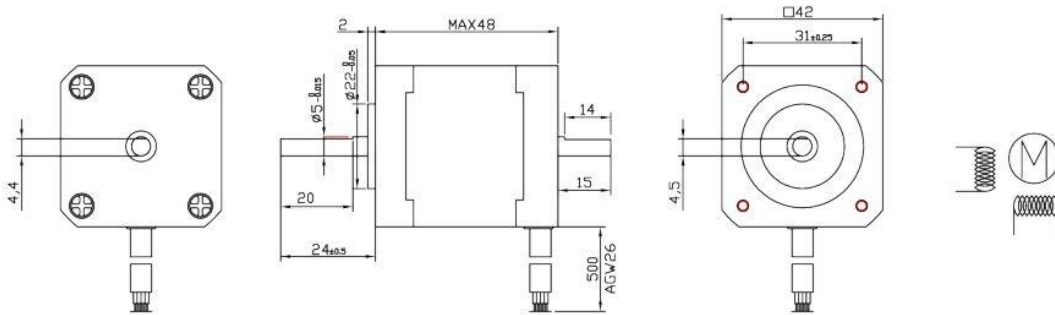
Şekil 4.3: SST59D5305 Motor Frekans - Tork Grafiği

4.1.1.2.2 Elevasyon Eksen Motoru

Kataloglarında 17HS8401B kodlu Servo Step motor tercih edilmiştir. Standart olarak Nema17 boyutlarındadır.

Çizelge 4.2: 17HS8401B Motoru Teknik Özellikler Tablosu

Teknik Özellik	Birim	Değer
Adım Açısı:	deg.	1,80
Voltaj:	V	2,5
Akım:	A	1,8
Direnç:	Ω	0,6
Endüktans:	mH	2,2
Tutunma Torku:	Nm	0,48
Rotor ataleti:	$g.cm^2$	470
Motor Mili:	mm	5
Pin Sayısı:	pin	4
Ağırlık:	Kg	0,4
Uzunluk:	mm	48



Şekil 4.4 : 17HS8401B Motor Teknik Resmi

4.1.2 Motor Sürücüler

Servo Step motorlar, çok yüksek hızlı anahtarlayabilen motor sürücülerle ve motor kontrol kartları ile kontrol edilirler. Bu motor sürücüler bağlı oldukları enkoder veya mikrokontrolcülerden PWM sinyalleri alabilir ve açık çevrim kontrol yapabilirler. Alınan her pals sinyal işlenerek motorun bir adım atması sağlanır.

HY-DIV268N-5A, 12V- 48V aralığında güç kaynağı kullanarak, 0.2 A'den 5 A'e kadar olan motorları süren iki fazlı hibrit motor sürücüsüdür. Motor torkunda dalgalanma çok küçüktür. Düşük hızda çok düzgün, gürültüsüz ve sessizdir. 3 Boyutlu yazıcılar, paketleme makinaları, oyma makinaları, CNC araçları gibi geniş bir alanda kullanılabilen bir aygıttır. HY-DIV268N-5A motor sürücü ile NEMA17, NEMA23, NEMA24 ve NEMA34 motorlar düzgün çalışmaktadır.



Şekil 4.5: HY-DIV268N-5A Kontrolörü

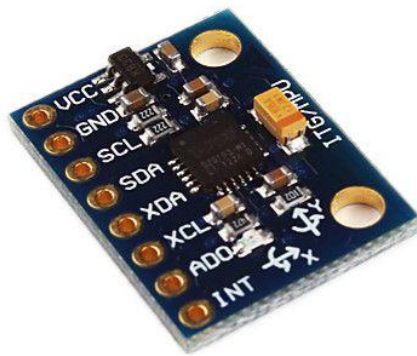
Teknik Özellikleri:

- Ortalama akım kontrolü, iki fazlı sinüsoidal sürüş akım çıkışı
- DC 12V -48V güç kaynağı, 5V ve 12V'luk regatörlerin dahili entegrasyonu
- 2 ve 4 fazlı motorlar için uyum
- Optik olarak izole giriş/çıkış sinyali

- Yüksek gerilime, düşük gerilime, yüksek akıma, aşırı ısınmaya ve kısa devreye karşı koruma
- 1, 2, 4, 8, 16 ayarlanabilir mikroadım kontrolü
- 3.generasyon breakout kartı, görüntüleme paneli, motoru kontrol etmek için kontrol pad ile donanımlı
- Soğutma ve kartın kir,toz, başka sıvıların zararından korumak için soğutucu
- Giriş gerilimi : 12 V – 48 V
- Giriş akımı 1 A – 5 A olan motorları seçilebilir
- Çıkış akımı : 0,2 A – 5A
- Çalışma Sıcaklığı : -10°C – 45°C
- Ağırlığı 220g
- Boyutlar: 7.5cm x 10.5cm x 3.5cm

4.1.3 IMU Sensör Kartı Seçimi

Sensör kartından okunan, ivme ve jiroskop verisi değerleridir. Bu verilerle zemine göre Elevasyon eksenin açısı hesaplanmaktadır. Çoklu sensör kartları olan IMU(Inertial Measurement Unit) sensörünün ivme ölçerinden ve jiroskopundan alınan değerler Arduino içindeki algoritmada karşılaştırmalı olarak gerekli matematiksel işlemlere tabi tutularak gerçekte olan ivme değeri bulunmaktadır. MPU6050 bu iki özelliği barındırdığından, boyutuda göz önünde bulundurularak tercih edilmiştir.



Şekil 4.6: IMU Sensör Kartı

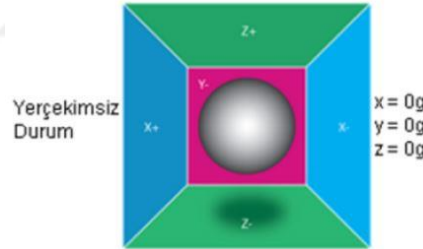
MPU-6050 çeşitli hobi, multicopter ve robotik projelerinde sıklıkla kullanılan üzerinde 3 eksenli bir jiroskop ve 3 eksenli bir açısal ivmeölçer bulunduran 6 eksenli bir IMU sensör kartıdır. Kart üzerinde voltaj regülatörü bulunduğundan 3 ile 5 V arası bir

besleme voltajı ile çalıştırılabilir. İvme ölçer ve gyro çıkışlarının her ikisi de ayrı kanallardan I²C çıkışı vermektedir. Her eksende 16 bitlik bir çözünürlükle çıkış verebilmektedir. Pinler arası boşluk standart olarak ayarlandığı için breadboard veya farklı devre kartlarında rahatlıkla kullanılabilir.

Teknik Özellikleri:

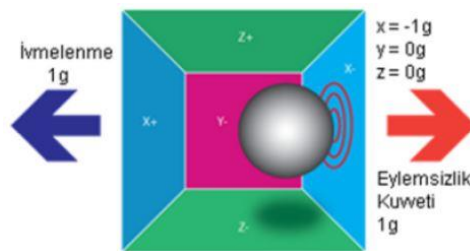
- Gyro ölçüm aralığı: + 250 500 1000 2000 ° / s
- Açısal ivme ölçer ölçüm aralığı: $\pm 2 \pm 4 \pm 8 \pm 16$ g
- İletişim: Standart I²C

İvme ölçer sensörünün çalışma prensibi aşağıdaki şekilde işlemektedir. Kapalı kutu ve küre ile anlatılan bu prensiplerle sensör değerleri oluşturulmakta ve çıkış sinyali olarak elektronik bir değere dönüştürülmektedir. İvme ölçerin iç duvar yüzeyleri küre basıncından ve manyetik alandan etkilerinin bileşkesinden yararlanarak değerler üretmektedir. Üretilen değerler sensörün bağlı olduğu platformun dünya yüzeyi ile açısı ve dünya üzerindeki mevcut konumundaki ani hız değişimlerine göre trigonometrik hesaplamalar üzerinden değişmektedir [22].



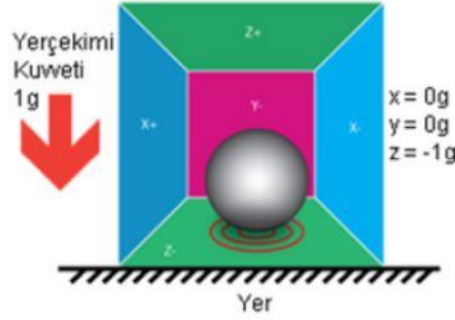
Şekil 4.7: Yerçekimsiz Sensör Durumu

Şekil 4.7’de Sensör yerçekimsiz bir ortam içinde sabit ve hareketsiz olarak bulunmaktadır. Küre üzerine bir kuvvet etkisi olmadığından hiçbir duvara temas etmemekte ve ivme değerleri sıfır olarak oluşturulmaktadır.



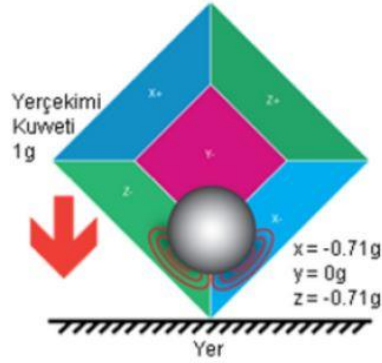
Şekil 4.8: Yerçekimsiz Ortamda Hareket Halindeki Sensör Durumu

Şekil 4.8’de yerçekimsiz ortamda, sensörün sabitlendiği kabul edilen hayali bir platform +X yönü doğrultusunda 1 g’lık bir ivme ile hareketlendiğinde, sensör içindeki küre eylemsizlik etkisinden -X yönünde 1 g’lık bir değer üretecektir. Ters yönde ve yukarı aşağı hareketlerinde de benzer şekilde değerler üretecektir.



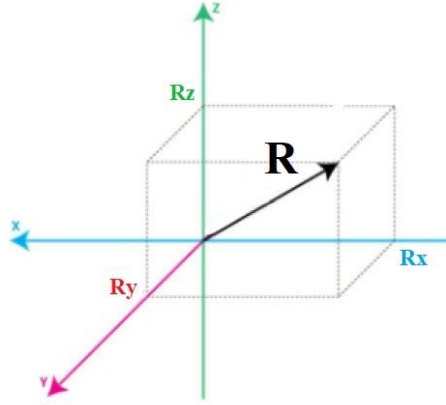
Şekil 4.9: Yerçekiminde Sensör Durumu

Şekil 4.9’da Sensör yerçekimli bir ortam içinde sabit ve hareketsiz olarak bulunmaktadır. Küre üzerine yerçekimi haricinde ekstra bir kuvvet etkisi olmadığından dolayı -Z yönü doğrultusundaki duvara temas etmekte ve -Z yönünde 1 g’lık ivme değeri oluşturulmaktadır.



Şekil 4.10: Yerçekiminde 45 Derece Sağ Dönüşte Sensör Durumu

Şekil 4.10’da Sensör yerçekimli bir ortam içinde bakış açısına göre 45 derece sağa doğru çevrilmiştir. Küre -X ve -Z duvarlarına temas etmiş ve trigonometrik olarak g kuvvetleri oluşturulmuştur.



Şekil 4.11: Bileşke R Vektörünün Sensör Koordinat Düzleminde Gösterimi

Şekil 4.11’de farklı eksen doğrultularında aynı anda devam eden ivmeler R_x , R_y ve R_z olarak ifade edilmiştir. Bileşkeleri ise R vektörüdür. R vektörünü oluşturan üç bileşenin, anlık olarak farklı değerleri oluşur ve trigonometrik olarak uç uca ekleme yapılarak bileşke bulunur. Bu değer sensörün oluşturduğu bileşke değerdir ve ölçüm aralığında tüm hassasiyetiyle oluşturulmaktadır. Bu değer değişimleri anlık olarak fazla yükselip, düşebilir. Bu durumda okunan değerler bir filtreden geçirilerek değerlendirilmesi daha doğru bir yaklaşımdır. Platformun üzerine gelen tüm bozunumların açısal etkileri, yukarıda farklı durumları anlatılan şekillerde sensör üzerinde değerlendirilmiştir. Elektronik bir değer olarak Arduino kontrolcüsüne iletilmiştir.

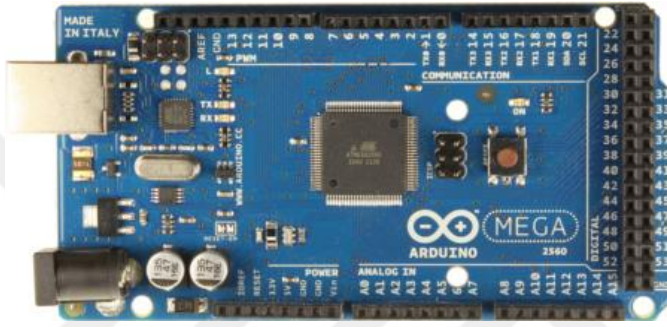
4.1.4 Arduino Kontrolcüsü Seçimi

Arduino kolay kullanılabilir ve esnek bir yazılım/donanım mimarisine sahip, açık kaynak (open source) ailesine mensup bir elektronik geliştirme kartıdır. Giriş/Çıkış (Input/Output) kartı ve Processing dilinin uygulamasını barındıran bir fiziksel programlama platformu içermektedir. Arduino kontrol kartlarının yazılımsal donanım açısından çoklu kesme(multithreading) işlemlere izin vermediği yani aynı anda iki farklı fonksiyon döngüsünün birlikte çalıştırılamadığı gözlemlenmiştir. Yapılan kontrol testleri sırasında hem senkron motor sürülmesinde hemde veri alış verişinde gecikmeler yaşandığı tespit edildiğinden dolayı, okunan sensör verilerinin bilgisayara gecikmeden gönderilmesi ve bilgisayarda yani C# programında işlenen verilerden elde edilen kontrol komutlarında motorlara gecikmesiz bir şekilde iletilmesi için veri alış verişinin ayrı iki arduino üzerinden gerçekleştirilmesine karar verilmiştir. Bu şekilde örnek olarak arduino nano analog inputundan IMU sensör verisi okunup,

değerlendirilmek üzere C#'a ayrı COM portu üzerinden aktarılırken aynı anda farklı bir COM port üzerinden C#'ta belirlenen yapılacak işlem komutları da motorları sürmek üzere arduino megaya iletilebilecektir. Gecikmesiz bir veri akışının çok önem arz eden bir konu olduğu kontrol testleri sırasında gözlemlendiği için iki ayrı arduino kullanılmasına karar verilmiştir.

4.1.4.1 Arduino Mega Kontrolcüsü Seçimi

Bu tez çalışmasında bilgisayar üzerinden gönderilen verileri alıp sistemin kontrolünü sağlamak üzere seçilmiştir.



Şekil 4.12: Arduino Mega Kontrol Kartı

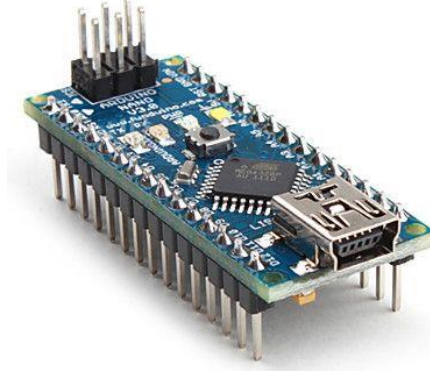
ATmega2560 (datasheet) tabanlı bir Arduino kartıdır. 54 dijital I/O pini vardır. Bunların 14 tanesi PWM çıkışı olarak kullanılabilir. 16 analog girişi, 4 UART (serial port), 16 MHz kristal osilatörü, USB bağlantısı, adaptör girişi, ICSP çıkışı ve bir reset butonu vardır. Arduino için tasarlanmış tüm eklentilere uyumludur.

Teknik Özellikler

- Mikrodenetleyici ATmega2560
- Çalışma Gerilimi 5V
- Besleme Voltajı 7-12V
- Dijital I/O Pinleri 54 (14ü PWM çıkışı)
- Analog Giriş Pin 16
- I/O Pin Akımı 40 mA
- 3.3V Pini Akımı 50 mA
- Flash Bellek 256 KB
- EEPROM 4 KB
- Clock Frekansı 16 MHz

4.1.4.2 Arduino Nano Kontrolcüsü Seçimi

Bu tez çalışmasında kullanılan tüm sensör verilerini okuyup, işlenmek üzere C# 'a göndermektir. Arduino Mega'nın işlem yükünün hafifletilmesi ve geri besleme sinyali alımlarında senkron çalışmaya yardımcı olması için seçilmiştir.



Şekil 4.13: Arduino Nano Kontrol Kartı

Arduino Nano 328, ATmega328 temelli, küçük, breadboard ve farklı platformlar ile beraber kullanılabilir. Arduino IDE'si üzerinden rahatlıkla programlanabilmektedir. DC güç beslemesi bulunmamaktadır. Buna karşın USB üzerinden besleme yapılabilir. Bununla beraber Vin pini üzerinden de 7-12V arası giriş gerilimi uygulanabilir. Arduino Nano çevre elemanları ile temel giriş çıkış uygulamalarını gerçekleştirilebilir.

Teknik Özellikler

- Mikrodenetleyeci: Atmel ATmega328
- Lojik Voltaj Seviyesi: 5V
- Giriş Gerilimi: 7-12V
- Dijital G/Ç Pinleri: 14 (6'sı PWM pinidir.)
- Analog Giriş Pinleri: 8
- Her Pinden Verebileceği Akım: 40mA
- Flash Hafıza: 32KB(2KB bootloader tarafından kullanılmaktadır.)
- Çalışma Frekansı: 16 MHz
- Ürün Boyutları: 19x43mm

4.1.5 Encoder Seçimi

Encoderlar bu tez çalışmasında kullanılan motorların referans konuma göre dönüş açısı bilgilerini okuyarak, kapalı çevrim kontrolde kullanmak üzere tercih edilmiştir.



Şekil 4.14: Delik şaftlı Encoder

Encoder sinyal üretici bir sensördür. Bir milin dönme ya da ötelenme hareketine karşılık, sayısal(dijital) bir elektrik sinyali (kare ya da sincos dalga) üreten elektromekanik bir cihazdır.

Teknik Özellikler:

- Ölçme Tipi: Optik
- Çözünürlük: 1024 pulse
- Maks. Hız: 3000 RPM
- Besleme Gerilimi: 10 ... 30 VDC veya 5 VDC
- Akım Tüketimi: 50 mA nominal
- Çıkış Tipi: Push pull
- Çıkış Sinyalleri: A, B, Z
- Çektiği Akım: 100 mA (Maksimum)
- Çalışma Sıcaklığı: -25...+85 °C
- Elektriksel Bağlantı: 5 veya 8 x 0,14 mm² ekranlı kablo
- Gövde Çapı: 50 mm
- Şaft Çapları: 8 mm
- Koruma Sınıfı: IP54

Bu tez çalışmasında kullanılan encoder artımsal tip encoderdir. Bu nedenle devredeki elektrik kesilip tekrar açıldığında referans pozisyonu için sıfır bilgisine ihtiyaç duymaktadır. Bu ekstra bilgi için limit sınırlayıcılardan yararlanılmış, montajda sıfır kabul edilen referans açısı sınırına yerleştirilmiştir.

Yön tayini ise sinyal hattı dinlenerek, A ve B çıkışlarının geliş zamanı önceliğine göre belirlenmektedir. A kanalında üretilen her kare dalganın yükseliş kenarı , B kanalı sinyalinden önce geliyorsa artı yön, tersi eksi yön kabul edilmiş ve bu bilgiyle program yazılımına dahil edilmiştir. Bu işlem hassas ve işlemci kapasitesi gerektirdiğinden yardımcı Arduino Nano kontrolcüsünde yapılmıştır.

4.1.6 Güç Kaynağı Seçimi

Güç kaynağı bu tez projesindeki motor sürücülerin beslemesinde ihtiyaç duyulan gerilimi sağlamak üzere tercih edilmiştir.



Şekil 4.15: 24V DC Güç Kaynağı

Teknik Özelliler:

- Hemen hemen her robotik projesinde kullanılan voltaj regülatörüdür.
- 220V AC aralığındaki giriş değerlerinde sabit 24V DC çıkış verir.
- Max. 20 Amper çıkış alınır.
- Dahili soğutucu sayesinde ısınma problemi olmadan çalışma yapılabilir.

4.1.7 Kamera Seçimi

Kamera, görüntüden yansıyan ışığı mercek ya da objektiften yararlanarak bir düzlemde toplayan, o düzleme konulan film veya ışığa duyarlı elektronik devre elemanları sayesinde ışık enerjisini elektrik enerjisine çevirdikten sonra çıkış sinyali veren ve gerekirse bunu kaydeden bir sistemdir. Bu tez projesinde belirlenen renk koduna sahip hedefi optik olarak tespit edecek görüntü işleme algoritmasına piksel verisi oluşturmak için ihtiyaç duyulmuştur.

Nesnelerin doğru şekil ve renklerde algılanması, kameranın dahili özelliklerine bağlıdır [31]. Kameralar karmaşık bir elektronik sistemdir. İç yapıları odaklanmayı ve yakınlaşmayı sağlayan mercekler, onların hareketini sağlayan piezoelektrik malzemelerden üretilmiş aktüatörler, alınan renk bilgisini elektronik sinyale dönüştüren algılayıcı sensörler ve bu sinyali analogdan dijitale çeviren dönüştürücüler barındırırlar.

Algılayıcı sensörler kameranın en önemli organıdır. Çünkü asıl iş olan çevredeki ışığı alıp veriye dönüştürmeyi gerçekleştirirler. Algılayıcı seçiminde üç önemli faktöre dikkat edilmelidir [31]. Bunlar algılayıcının dinamik alanı, veri hızı ve tepkisidir.

Dinamik alan yani genişlik piksel başına düşen bit sayısı ile belirlenir. Bu verinin genişliği insan gözünden daha hassas değerlerde çalışma imkanı sağlar.

Algılayıcı hızı görüntü işleme uygulamalarında dikkat edilen ikinci temel değişkendir [31]. Hız bir kameranın mevcut çevre ışığından elde edilen görüntüyü alıp sisteme iletme hızıdır. Bir saniyede üretilen kare sayısı yani FPS değeri ve pozlama süresi ile ifade edilir. Alınan görüntüdeki bir nesnenin saniyedeki hareket dönüş hızı kameranın FPS değerinden yüksek ise alınan görüntü bulanıklaşabilir veya sürelilik arzetmeyen bir görüntü akışı oluşabilir. Buda tutarsız verilerin işlenmesine dolayısıyla hatalı sonuçlar üretilmesine sebebiyet verir.

Saniyede alınan kare hızı kadar bu karelerin hepsinde doğru renk değerlerine sahip olmasında önemlidir [31]. Pozlama süresi bir algılayıcı sensörün piksel başına algılanan renk değerinin doğru elektronik sinyale çevirmesi için gerekli minimum süredir. Bu süre ne kadar kısa ise FPS değeride o kadar yüksek değerlere ulaşabilir.

Ortamdaki ışık seviyesi ne kadar yüksek ise pozlama süresi bundan o kadar pozitif etkilenecektir. Tepkisellik pozlama süresinde algılayıcının ne kadar güçlü sinyal ürettiğidir. Işıklandırmanın mümkün olmadığı durumlarda ise algılayıcının tepkiselliğinin yüksek olması doğru veri elde edilmesini kolaylaştırır. Tepkiselliğin

yüksek olmasının dezavantajı ise gürültü seviyesini arttırmasıdır. Günümüz kameralarında geniş dinamik menzilli sensörleri ile bu dezavantaj azaltılmaktadır. Kamera seçimindeki bu kritik faktörler birbirleriyle bağlantılıdır ve bir faktör için diğerinden taviz vermeyi gerektirebilir. Bununla beraber tahmin edilebilirki yukarıda bahsedilen özellikler ne kadar yüksek ve iyi olursa maliyetinde doğru orantılı artacaktır. Tüm faktörler gözönüne alınarak seçim yapılması en uygun çözüm yoludur.



Şekil 4.16: Asus Rog Eye Pro Webcam

Asus Rog Eye Pro Webcam, Full HD (1080p) çözünürlükte 60 FPS net çıkış sunan akıcı görüntüler oluşturur. WDR (Wide Dynamic Range - Geniş Dinamik Menzil) teknolojisi ve mavi cam, kızıl ötesi ışığı önler ve arkadan aydınlatmalı ortamlarda görüntünün aşırı parlak olmasını engeller. Bu dahili özelliklerinden ve küçük boyutlu yapısından dolayı tercih edilmiştir.

4.1.8 Lazer Noktalayıcı

Hedef takip platformunun görüş hattının odaklandığı uzaklığın görülebilmesi için sisteme entegre edilen lazer işaretleyicidir.



Şekil 4.18: Lazer Noktalayıcı

Kırmızı nokta lazer 650nm dalga boyunda ve 5 mW çıkış gücünde nokta tipi ışın yayan lazerdir. Odaklanabilir lens yapısına sahiptir.

Teknik Özellikler:

- Optik Güç: 5mW
- Dalga boyu: 650nm
- Boyutu: 12x35mm
- Çalışma voltajı: 3-5V
- Işın şekli: Nokta

4.1.9 Mikro Limit Sınırlayıcı

Bu tez projesinde eksen motorlarının dönüş açılarının başlangıç konumlarını belirlemek için kullanılmıştır.



Şekil 4.19: Mikro Limit Sınırlayıcı

Limit sınırlayıcılar hareket eden bir cismin hareket alanından çıkması ve kendi üzerindeki anahtarlama koluna fiziksel olarak baskı yapması sonucunda elektronik sinyal veren cihazlardır. Mekanik bir etkiyi elektriksel bilgiye çevirir.

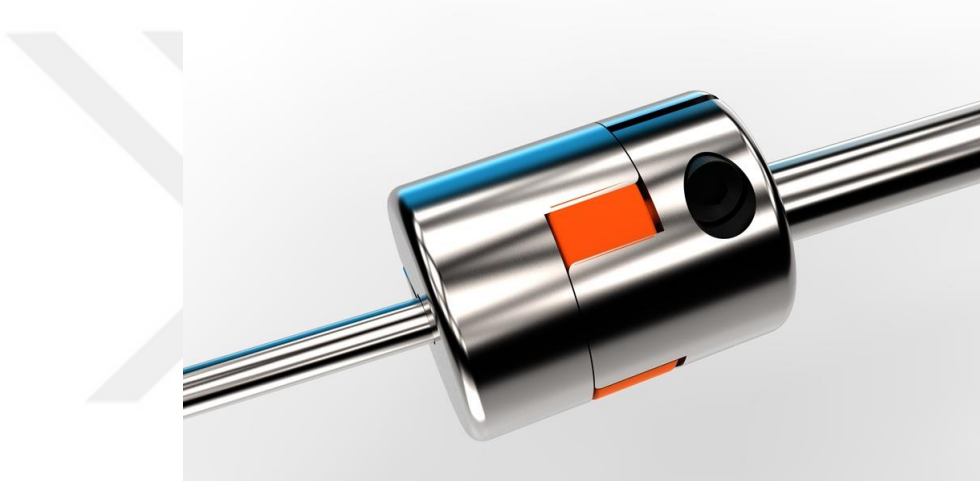
4.2 Mekanik Komponent Seçimi

4.2.1 Şalt Malzemelerin Seçimi

Platformda kullanılan piyasadan standart olarak temin edilen parçalardır.

4.2.1.1 Kaplin Seçimi

Kaplin güç aktarımını sağlayan en temel makine parçalarındandır. Farklı malzeme, tip ve ebatlarda üretilirler ve genel olarak rijit ve elastik olarak ikiye ayrılırlar. Genel olarak makine sistemlerindeki irtibat elemanları, güç kaynağı ile gücün iletileceği eleman arasında hareketi iletme adına köprü vazifesi görürler. Kaplinler mekanik bağlama için kullanılan elemanlardır [23].



Şekil 4.20: Kaplin

Bu tez projesinde Azimut açısını belirleyen motor ile döner gövde arasında güç aktarım elemanı olarak kullanılmıştır.

4.2.1.2 Rulman Seçimi

Rulmanlar yükleri radyal yönde veya eksenel yönde aktarabilir ve çoğu durumda radyal ve eksenel yüklerden oluşan bir kombinasyonun aktarımını gerçekleştirirler. Sürtünmenin azalmasına yardımcı olurlar. Rulmanların iki kilit fonksiyonu vardır: birinci olarak hareketi transfer ederler. İkinci olarak kuvvetleri aktarırlar. Bu tez projesinde motorların bağlı oldukları eksenlerdeki millerin dönel hareketlerinin rahat sağlanması için bilyalı rulmanlar tercih edilmiştir.

4.2.1.2.1 Elevasyon Eksen Rulmanı

Elevasyon ekseninde dönen milin hareketini kolaylaştırmak için tercih edilmiştir. Pratik bilgilerden hareketle hafif olmasını temin etmek için 8mm çap seçilmiştir.



Şekil 4.21: KFL08 Rulman ve Ölçüleri

4.2.1.2.2 Azimut Eksen Rulmanı

Azimut ekseninde dönen gövde milinin hareketini kolaylaştırmak için tercih edilmiştir. Pratik bilgilerden hareketle sağlam olması düşünülerek 20mm çap uygun görülmüştür.



Şekil 4.22: KFL004 Rulman ve Ölçüleri

4.2.1.3 Kasnak

Kasnaklar motorlardan aktarılan torkun lastik kayışlara iletilmesini sağlarlar. Elevasyon motor mili ile kamera platform milinde karşılıklı olarak kullanılmıştır.

4.2.1.4 Kayış

Kayışlar, kasnaklar arası iletilmek istenen torkun aktarılmasında kullanılırlar. Elevasyon motoru kasnağı ile kamera platform kasnağı arasında gergin olarak konumlandırılmıştır.

4.2.2 Solidworks Prototip Çizimleri

Platformun Solidworks programında çizimi yapılan ve CNC'lerde ürettirilen parçaların işlevleri anlatılmıştır. Prototip resimleri EK E'de verilmiştir.

4.2.2.1 Elevasyon Eksen Parçası

Kamera, mesafe sensörü ve lazer ekipmanlarının üzerine takılabilmesi için tasarlanmıştır. Malzemesi beyaz, sert delrindir. Platformun elevasyon açısı hassasiyetini etkileyecek rulman oturma yüzey ölçüleri hassas olmasına dikkat edilerek işlenmiştir.

4.2.2.2 Elevasyon Taret Parçası

Elevation açısı motoru, KFL08 rulman, mikro limit sınırlayıcı ekipmanlarının üzerine takılabilmesi için tasarlanmıştır. Malzemesi beyaz, sert delrindir.

4.2.2.3 Elevasyon Referans Parçası

Kamera platform parçasına takılarak elevation açısının referansının alınması için tasarlanmıştır. Hafiflik gözönünde bulundurularak malzemesi Alüminyum 7075 tercih edilmiş, eloksal kaplama yapılarak malzeme ömrü uzatılmıştır.

4.2.2.4 Elevasyon Encoder Parçası

Elevation motor encoderının sabitlenmesi için kullanılmaktadır. Hafiflik gözönünde bulundurularak malzemesi Alüminyum 7075 tercih edilmiş, eloksal kaplama yapılarak malzeme ömrü uzatılmıştır.

4.2.2.5 Azimut Eksen Parçası

Üst yüzeyine taret parçası, alt yüzeyine KFL004 rulmanı ve kapliniyle birlikte Azimut açısı motoru takılmak üzere tasarlanmıştır. Platformun Azimut açısı hassasiyetini etkileyecek rulman oturma yüzey ölçüleri hassas olmasına dikkat edilerek işlenmiştir. Hafiflik gözönünde bulundurularak malzemesi Alüminyum 7075 tercih edilmiş, eloksallı kaplama yapılarak malzeme ömrü uzatılmıştır.

4.2.2.6 Azimut Alt Gövde Parçası

Üst yüzeyine KFL004 rulmanı, alt yüzeyine dört adet kule kolon parçası takılmak üzere tasarlanmıştır. Hafiflik gözönünde bulundurularak malzemesi Alüminyum 7075 tercih edilmiş, siyah renk boya üzerine özel kamuflaj kaplama yapılarak çizik ve darbelerle karşı yüzeysel malzeme korunumu artırılmıştır.

4.2.2.7 Azimut Motor Parçası

Azimut açısı motorunu sabitlemek üzere tasarlanmıştır. Hafiflik gözönünde bulundurularak malzemesi Alüminyum 7075 tercih edilmiş, eloksallı kaplama yapılarak malzeme ömrü uzatılmıştır.

4.2.2.8 Azimut Encoder Parçası

Azimut açısı motorunun encoderını sabitlemek için tasarlanan parçadır. Hafiflik gözönünde bulundurularak malzemesi Alüminyum 7075 tercih edilmiş, eloksallı kaplama yapılarak malzeme ömrü uzatılmıştır.

4.2.2.9 Zemin Kolon Parçası

Platformun ağırlığını zemine iletme üzere tasarlanmıştır. Hafiflik gözönünde bulundurularak malzemesi Alüminyum 7075 tercih edilmiş, siyah renk boya üzerine özel kamuflaj kaplama yapılarak çizik ve darbelerle karşı yüzeysel malzeme korunumu artırılmıştır.

4.2.2.10 Zemin Kapak Parçası

Yan yüzeyleri kapatan parçalardır. Hafiflik gözönünde bulundurularak malzemesi Alüminyum 7075 tercih edilmiş, siyah renk boya üzerine özel kamuflaj kaplama yapılarak çizik ve darbelerle karşı yüzeysel malzeme korunumu artırılmıştır.

4.2.2.11 Zemin Referans Parçası

Platformun zemine oturtulan parçasıdır. Hafiflik gözönünde bulundurularak malzemesi Alüminyum 7075 tercih edilmiş, siyah renk boya üzerine özel kamuflaj kaplama yapılarak çizik ve darbelere karşı yüzeysel malzeme korunumu arttırılmıştır.

4.2.3 Prototip Montajı

Tüm donanımsal ve mekanik parçaların Solidworks ortamında montajı yapılmıştır. Son ölçü ve tolerans kontrolleri yapıldıktan sonra CNC’lerde işlenmesi gereken parçaların teknik resimleri hazırlanarak ürettirilmiş ve montajlanmıştır.



Şekil 4.23: Solidworks ve Fiziksel Prototipin Montajlı Görünümü

4.3 Programlama Bilgileri

4.3.1 Görüntü İşleme Algoritmaları

Görüntü işleme algoritmaları C# programı üzerinde yazılmıştır. Çalışma algoritması şu şekilde işletilmektedir. HSV renk kodlarıyla değerlendirme yapılarak, rengin belirlenen ölçütlere uygunluğu belirlenmektedir. Alınan görüntüdeki minimum piksel büyüklüğünde göz önüne alınarak karşılaştırmalar yapılmakta ve hedefin bakış açısında olup olmadığı değerlendirilmektedir. Yazılan algoritma gereği belirlenen bir hedefin takibi yapılmaktadır. Şüphesiz görüntü işleme algoritmaları daha farklı şekil ve yetkinliklerde de tasarlanabilir. Ancak bizim amacımız SHP'nin çalışma mantığına yoğunlaştığından dolayı buradaki değerlendirme faktörlerinde daha esnek davranılmıştır. Kullanılan algoritmada bu doğrultuda oluşturulmuştur.

Hedef belirleme işlemi tamamladıktan sonra görüntü üzerinde kırmızı dikdörtgen ile işaretlenmekte ve kullanıcı için farkındalık sağlanmaktadır. Bu işaret belirlenen alan içindeki hedefin büyüklüğüne göre değişmekte ve optimize olmaktadır. Dikdörtgenin ağırlık merkezi olan orta noktası, merkez olarak kabul edilerek noktasal işaretleme yapılmakta ve hedefin orjini olarak belirlenmektedir.

Alınan görüntüdeki dış çerçevenin orta noktası merkez olarak kabul edilip, kıyaslama yapılarak, bu noktasal işaretlemenin koordinatları belirlenmekte ve motorlara dönüş komutları için referans sinyaller oluşturulmaktadır. Verilen dönüş sinyalleri motorları harekete geçirip, dış çerçevenin merkezi ile hedefin orjini orta noktada üst üste geldiğinde hedefe kilitlenme sağlanmaktadır.

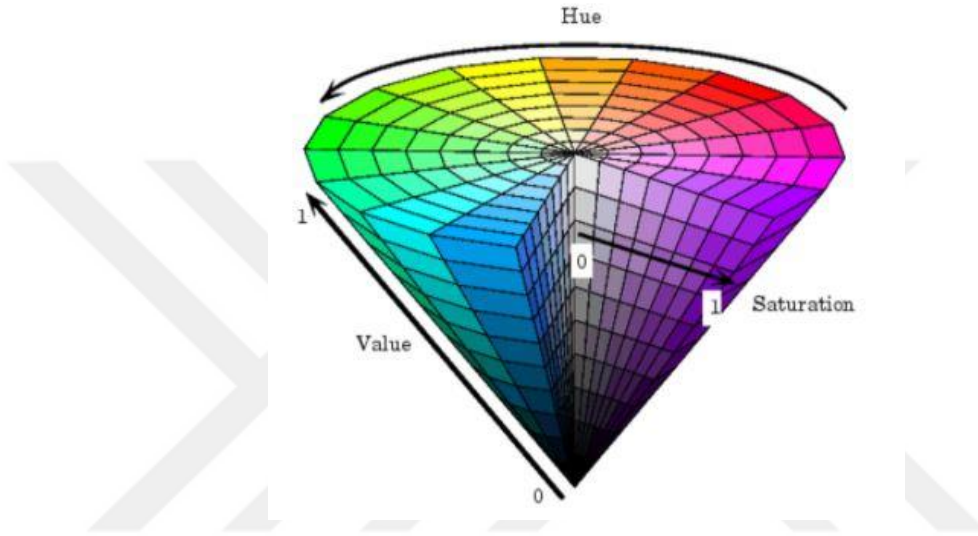
HSV renk kodlarıyla programın kullanıcı arayüzü, çalışma mantığı, komut bilgileri ve alınan görüntülerin farklı katmanlardaki özelliklerinin değerlendirilmesi aşağıda anlatıldığı şekilde oluşturulmuştur. Ancak öncelikle HSV renk uzayını açıklamamız gerekir. HSV renk uzayı 1978 yılında, bilinen kırmızı, yeşil ve mavi renk uzayına göre insan görü düzeneğine daha yakın bir yapı oluşturmak için Alvy Ray Smith tarafından tanımlanmıştır. HSV, RGB renk uzayından doğrusal olmayan bir dönüşüm ile elde edilir.

HSV renk uzayı, ingilizce terimler olan Hue, Saturation ve Value kavramlarının baş harflerinden türetilmiştir. Renkleri sırasıyla renk tonu, doygunluk ve parlaklık olarak tanımlayan bir yaklaşıma sahiptir [24].

Renk tonu, rengin baskın dalga uzunluğunu belirleyen parametredir. Örnek olarak sarı, mavi, yeşil, vb. renkler verilebilir. Yapılan uygulamalarda ise 0 - 180 arasında değişebilen değerlerde kullanılabilir.

Doygunluk, alınan görüntüdeki rengin "canlılığını" belirleyen parametredir. Yüksek doygunluğun olması canlı renklerin seçilmesinde yada düşük doygunlukta olması rengin gri tonlarına yaklaşmasına neden olur. 0 - 255 arasında değişebilen değerlere sahiptir.

Parlaklık parametresi 0 – 255 arasında değişen değerler alabilir.



Şekil 4.24: HSV Renk Grafiği

Şekil 4.24 'te HSV renk uzayının parametre değerlerinin bir yaklaşım grafiği görülmektedir. Yazılan program arayüzünde de bu grafiğe uygun şekilde ayarlanabilir barlar yardımıyla taranacak hedef renk seçimi aralığı belirtilebilmektedir.



Şekil 4.25: Programda Kullanılan HSV Renk Belirleme Arayüzü

Şekil 4.25 'daki kullanıcı arayüzü üzerinden, alınan görüntüdeki hedef tanımı yapılır. Hangi renk aralığında, hangi yoğunlukta takip yapılacağını ve minimum olarak

görüntüdeki hedef büyüklük değeri belirlenir. Burada bulunan değerler değiştirilerek farklı renk yoğunluğundaki nesnelerde değerlendirmeye tabi tutulabilmektedir. Çalışma mantığı açısından ise kendine özgü bir renk uzayı olduğundan renk ayırt etme uygulamalarında kolaylık sağlamaktadır.



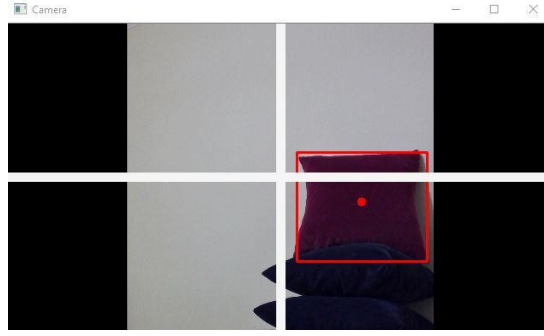
Şekil 4.26: Çekilmiş bir resmin HSV Renk Uzayındaki Görüntüsü

Yukarıda solda çekilmiş bir kuş resminin, sağdaki resimde HSV renk uzayına dönüştürüldüğünde nasıl algılandığı bir örnekte gösterilmiştir [25].



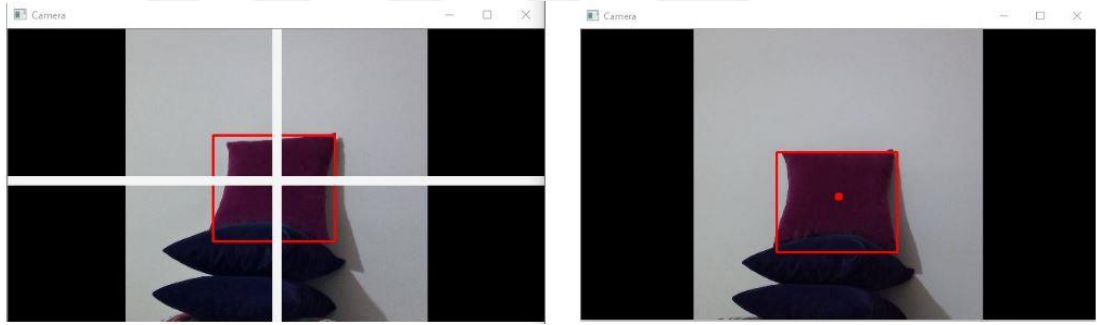
Şekil 4.27: Görüntü Verilerinin Değerlendirilme Katmanları

Yazılan programda da benzer şekilde, görüş hattından alınan ortadaki görüntüde, hedef nesne olan peluş yastık ve diğer nesneler, algoritma üzerinden değerlendirmeye tabi tutulmaktadır. Sol taraftaki görüntüde HSV uzayına çevrilen görüntü vardır. Sağ tarafta ise hedef olarak belirlenen renkteki nesnelerin pikselleri beyaza ve diğer pikseller ise siyah renge çevrilmiştir. Bu şekilde görüntü değerlendirilmesi kolaylaştırılır. Yazılan algoritma gereği tek nesne hedef olarak belirlenmektedir.



Şekil 4.28: Hedefin Merkezinin İşaretlenmesi

Şekil 4.28 ‘de belirlenen HSV renk değerindeki hedef objenin ana görüntüdeki yeri kırmızı dikdörtgen ile belirtilmiş ve merkezi işaretlenmiştir. Bulunduğu konuma uygun motor kontrol sinyalleri Arduino’ya iletilerek motorların harekete geçmesi sağlanır.



Şekil 4.29: Görüş hattının Hedefe çevrilmesi

Şekil 4.29’de gelen referans sinyallerin kontrolünde harekete geçen motorlar ile görüş hattı hedefe çevrilir, hedefin ortalanması sağlanır ve uygun yeni komutlar beklenir. Soldaki alınan görüntüde, beyaz çizgiler histerezis bölgesi olarak kabul edilmiş, bir nevi filtreleme yapılmıştır. Hedef bu bölge üzerinde ise herhangi bir komut sinyali üretilmemektedir.

Hareketli bir nesne söz konusu olduğunda yada hedef yer değiştirdiğinde ise yeni referans sinyaller üretilmekte ve hedef takibi yapılmaya devam edilmektedir. İlgili kod dökümü **EK A’** da gösterildiği şekildedir.

4.3.2 Arduino Kontrol Algoritmaları

SHP'nin görüş hattı durumuna göre, hedefin konumu, kamera görüş hattı üzerinden değerlendirilmiş ve bilgisayardan arduino kontrolcüyeye referans sinyaller gönderilmiştir. Arduino gelen bilgileri değerlendirerek, motorlara gidecek referans sinyalleri PWM olarak sürücülere gönderilmiştir. Motorlar senkron olarak sürülmüştür. Encoderdan mevcut pozisyon bilgisi alınmaktadır. Referans ile okunan sinyal arasındaki fark hata sinyali olarak değerlendirilir. Mevcut durumda ihtiyaç duyulan yeni komut sinyali üretilir. İstenilen pozisyon oluştuğunda döngü sona erdirilmekte ve lazer işaretleyici çalıştırılmaktadır.

Aynı zamanda zeminden gelen bozucu girişler platform üzerine etkimektedir. Oluşan açısal bozunumlar elevasyon ekseninde jiroskop sensörü ile tespit edilebilmektedir. İlgili kod dökümü **EK B**'de gösterildiği şekildedir.

4.4 Deneysel Test Çıktıları

Bu bölümde üretilmiş fiziksel sistem üzerinde yapılan deneysel test sonuçları ele alınacaktır.

Başlangıç olarak sistemin genel çalışma koşulları durumu araştırılmıştır. Elektronik olarak sistemin devre kurulumunda ve kablolalamada herhangi bir hata tespit edilmemiştir. Yalnızca IMU sensör verilerinin motor manyetik alanından etkilendiği tespit edilmiştir. Hedef takibi Senaryo testlerine geçilmiştir.

Görüntü işleme algoritmasıyla istenilen aralıktaki herhangi bir renk, hedef olarak doğru tespit edilebilmektedir. Bu şekilde yazılan algoritmanın doğru ve istikrarlı bir şekilde, başarılı referans sinyaller ürettiği fiziksel testlerde de ispatlanmıştır.

Arduino üzerinden motorlar, referans sinyallere uygun, eş zamanlı, istenilen hız ve yönlerde doğru şekilde sürülmüştür. Kapalı çevrim bir sistem istenilen şekilde cevaplar üretmiştir. Yazılan programdaki kontrol algoritmasının doğruluğunda bu testlerde kanıtlanmıştır.

Testler sırasında üretimden kaynaklı ölçü kaçıklıklarından, geçme toleransı boşluklarından ve sensörün montajından kaynaklı harici bozucu durumlar tespit edilmiştir. Ancak sensör gürültüsü ve çevreden gelen diğer bozucu etkilere rağmen, göreceli olarak, kontrol testlerinde istenilen başarı sağlanmıştır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu bölüm, bu tezin temel sonuçlarının bir özeti olarak düzenlenmiştir ve gelecekteki çalışmalar için bazı öneriler sunulmuştur.

5.1 Özet

Simülasyon ortamı, kontrol sistemi tasarımcıları için birçok kolaylık barındırmaktadır. Örneğin, sistemin test edilecek senaryoları farklı parametrelerde birçok kez tekrarlanabilir, sonuçlar optimize edilebilir ve bu şekilde gerçekleşen sistemde istenen sonuçlara ulaşmak kolaylaştırılır. Yapılan simülasyon çalışması temel olarak, Newton-Euler yaklaşımını kullanarak mümkün olduğunca gerçekçi bir matematiksel model elde etmek amacıyla iki eksenli SHP'nin matematiksel modellemesine odaklanmıştır.

Bölüm 2'de SHP'nin kinematik denklemleri formüle edilmiştir. Doğrusal olmayan dinamik denklemler formüle edilmeden önce, ilk olarak bu sistemin referans koordinat eksenleri ve dönüşüm matrisleri tanımlanmıştır. Dönüşüm matrisleri vasıtasıyla her bir referans koordinat eksenini arasındaki açısal hız ve ivme değişkenleri ifade edilmiştir. Kinematik denklemler elde edildikten sonra motor ve iki eksenli platformun dinamik denklemleri yazılarak sistem modeli oluşturulmuştur. Stabilizasyon döngüsü için blok diyagramı tanıtılmış ve çapraz kuplaj etkisi modele entegre edilmiştir. Planlanan senaryoda yalnızca zeminden kaynaklı farklı genlikteki titreşimlerin ve eksenlerin karşılıklı çapraz kuplaj etkisinin referans sinyal üzerindeki bozunumları analiz edilmiştir. Bu koşuldan dolayı modellemede, kontrolör tasarımı ve simülasyonlarda belirli varsayımlar yapılmıştır. Planlanan diğer bir amaç, kontrolör parametrelerini doğru tasarlamak ve performanslarını karşılaştırmaktır. Motorun modellemesinde, elektriksel ve mekanik kısımlara sahip temel motor modeli kullanılmıştır. Geleneksel bir teknik olan Kaskat PID kontrolünün parametre değerleri, sistemin kalıcı durum hatası üzerindeki etkileri referans alınarak belirlenmiştir.

Bölüm 3 ' te MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan modelin simülasyon sonuç grafiklerine yer verilmiştir. Kaskat PID veya diğer bir isimle Kademeli PID kontrol yöntemi doğrusal olmayan sistem modeline uygulanmıştır. Kaskat PID denetleyicilerin tasarım prosedüründe, ilk olarak her iki eksenin ikincil kademesi olan hız denetleyici parametreleri ayarlanır. Ardından en iyi gerçekleşen sistem performansını elde etmek için birincil kademedeki konum kontrolör parametreleri ayarlanır ve sonra alçak geçiren filtre özelliğindeki, ön filtre eklenir. Belirlenen

parametrelerle sistem performansları farklı genlikteki zemin titreşimleri ve konum komutları için karşılaştırılmıştır. Sistem simülasyonu çalışmasında, zemin titreşimleri 0.5 – 8 Hz arasındadır. Stabilizasyon performansında yükseliş süresi, oturma süresi ve bozulmaların giderilmesi önem taşır. Belirtilen bozucu giriş değerleri düşük seviyelerdeyken, stabilizasyon ve izleme problemlerinde SHP kontrolü başarılıdır. Bununla birlikte, Kaskat PID kontrolü, 0,5 rad'dan daha düşük pozisyon komutlarında, bozulmalar için hızlı konumlandırma ve bastırma performanslarında sahiptir. Kontrol sisteminde en iyi performansı sağlayan kademeli PI kontrolü parametreleri tercih edilmiştir.

Bölüm 4 'te Solidworks programında tasarlanmış ve üretilmiş parçalarla montajlanan gerçek bir sistemin test sonuçlarına yer verilmiştir. Bu sayede gerçek sistem senaryolarını gözlemlemek için sanal gerçeklik yerine fiziksel dünyada oluşturulmuş elektro-mekanik bir yapı üzerindeki test sonuçlarının direkt olarak gözlemlenebileceği test ortamı elde edilmiştir. Teorik bir mühendislik çalışması, uygulama alanı bularak, pratik bir yaklaşımla desteklenmiştir.

Sabit bir mevkiden görüş hattı boyunca izleme yapan SHP, tarama sırasında önceden belirlenen hedefi optik olarak tespit ettiğinde onu takip etmek ve odaklanmak üzere harekete geçer. Yazılan görüntü işleme ve kontrol algoritmalarıyla, hareketi tespit edilen nesnenin takibi başarılı bir şekilde yapılmıştır. 0 – 5 metre değişken mesafelerde yapılan testlerde 3 m/s 'e kadar olan hızlarda hareket eden cisimlerin takip ve odaklanmasında mutlak olarak başarılıdır. Daha yüksek hızlara çıkıldığında ani yön değişimlerinde hedeften sapabilmektedir. Şüphesiz bahsedilen mesafe ve hızlar mevcut senaryo dahilinde yeterli kabul edilsede gerçek bir tehdit sırasında yeterli olmayacaktır. Bunun yanında yapılan tez çalışmasındaki gerçeklik gereksinimlerini sağlar, ancak hala pek çok teorik etken yeterince tartışılmamış ve görüntü işleme dahil yazılımsal konuya dokunulmamış durumdadır.

5.2 Öneriler

Gelecekte yapılacak çalışmalarda kullanılmak üzere bu kısımda, daha gerçekçi bir sistem simülasyonu elde etmek ve performanslarını önceki bölümlerde bahsedilmemiş kontrol ve takip yöntemleriyle karşılaştırmak için bazı öneriler verilmiştir. Teorik olarak gelecekteki çalışmalar, bozuntuları daha iyi bastırabilir veya referans sinyallere

daha hızlı cevap vermek için sistem performansını iyileştirebilir ve ayrıca rijitlik, takip ve stabilizasyon yeteneklerini geliştirebilir.

Öncelikle sistem matematik modeline gerçek bir çevrede mevcut olan sürtünme, motor tork dalgalanması, motor sürtünme torku, statik ve dinamik kütle dengesizlikleri, sensör gürültüsü, kablo gürültüsü gibi bazı doğrusal olmayan durumlarda eklenerek simülasyon gerçekçiliği artırılabilir. Her eklenti daha gerçekçi bir sistem modeli elde etmeye yardımcı olur. Bunun temel avantajı, fiziksel sistem eksikliğinde farklı kontrol yöntemlerinin sonuçlarının karşılaştırılması, optimize edilmesi ve en uygununun seçilmesi imkanındır.

İkinci olarak fiziksel testlerde jiroskoptan alınan verilerin bir filtreden geçirilerek sistemde kullanılması olabilir. Örnek olarak Kalman veya Tamamlayıcı filtre kullanılabilir. Bu şekilde anlık yaşanan sensör değerlerindeki artış, azalışlar daha istikrarlı hala getirilerek, motorların daha doğru ve verimli kullanılması sağlanır.

Üçüncü olarak, daha hızlı ve daha sağlam sistem cevapları elde edebilecek birçok referans sinyal şekillendirme yöntemi vardır. Bu çalışmada Kaskat PID kontrolör kullanılmıştır, alternatif olarak literatürde karşılaştığımız Bulanık PID veya Kayan Kipli Kontrol yöntemi gibi farklı kontrolörler tasarlanabilir ve performansları karşılaştırılarak denetlenen sisteme en uygun olanı seçilebilir.

Son olarak, takip algoritmamız mevcut çevre şartlarında başarılı bir şekilde çalışsa bile, değişken mesafedeki her hedef senaryosu için garanti edilemez. Bu nedenle farklı durumlar için yeni bir takip algoritması tasarlanabilir. Simülasyon çalışmasında, sistem modeli parametreleri için bazı varsayımlar vardır, bu nedenle kontrolörler, sadeleştirilmiş sistem modelleri için tasarlanmıştır. Fiziksel sistem gerçekleştirildiğinde tüm sistem parametreleri gerçek testler yardımıyla ve bazı optimizasyon algoritmaları ile tanımlanabilir. Fiziksel sistemin parametreleri belirlendikten sonra sistemin matematik modeline uygulanır ve kontrolör parametreleri yeniden belirlenebilir. Teorik ve fiziksel sistem performansları birbirleri ile karşılaştırılarak sistemin matematik modelinin ne kadar gerçekçi olduğu kontrol edilebilir. Fiziksel olarak gerçekleştirilmiş ve teorik olarak modellenmiş sistemlerin davranışları arasında farklılıklar varsa, simülasyon çalışmalarının avantajlarından yararlanmak amacıyla, daha önce bilinmeyen yada eklenmemiş dinamikler modele entegre edilerek modelleme çalışması geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Url-1** <https://thinktech.stm.com.tr/uploads/raporlar/pdf/1472017132326950_satm_bb_17_0200_sektor_raporlari_geleceksavaslari_260417.pdf>, Erişim tarihi 15.08.2020.
- [2] **Url-2** <<https://www.bbc.com/turkce/haberler-41048669>>, erişim tarihi 15.09.2020.
- [3] **F.Yılmaz.** (2018) Robots are in Our Lives, *FSM Scholarly Studies Journal of Humanities and Social Sciences*, vol. 12, no. 12, pp. 110–118, 2003.
- [4] **U.Güner, J.Daşdemir,** (2019) *İki Eksen Gimbal Sistemi İçin Geri Besleme İle Doğrusallaştırma Tabanlı Denetleyici Tasarımı*, TOK2019 – 21. Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, s. 44-46.
- [5] **Hilkert, J.M.** (2008) Inertially stabilized platform technology concepts and principles. *IEEE control systems magazine*, vol. 28, no. 1, pp. 26–46.
- [6] **Masten, M. K.** (2008). Inertially stabilized platform for optical imaging systems. *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 28, pp. 47-64.
- [7] **H. Golmohammad, A. Homaei, S. Saadat.** (2007) Design and implimentation of an adaptive PI controller for a two axis gimbal system, *Iran University of Science and Technology (IUST)*, pp. 1–6.
- [8] **X. Zhou, C. Yang, T. Cai** (2016). A model reference adaptive control/PID compound scheme on disturbance rejection for an aerial inertially stabilized platform. *Hindawi Publishing Corporation Journal of Sensors*, Vol. 16, pp. 1-12.
- [9] **E. Poyrazoğlu.** (2017) *Detailed Modeling and Control of a 2- DOF Gimbal System*, Master's Thesis, METU.
- [10] **M. Sarp.** (2017) *Design of A Two Axis Line of Sight Stabilization System for Vessels*, Master's Thesis, GAZI University.
- [11] **M. Abdo, A. R. Vali, A. Toloei, and M. R. Arvan,** (2013) “Research on the crosscoupling of a two axes gimbal system with dynamic unbalance,” *International Journal of advanced robotic systems*, vol. 10, no. 10, pp. 357–370.
- [12] **A.Naderolasli, M.Ataei.** (2020). Stabilization of A Two-DOF Gimbal System Using Direct Self-Tuning Regulator. *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 12, pp. 33-44.

- [13] **T. Tutak , Y.GÜDER.** (2014) Definition, Content and Importance of Mathematical Modelling, *Turkish Journal of Educational Studies*, vol. 1, pp.173-190.
- [14] **Url-3** <http://www.ihaltas.com/courses/fbe_elk5320/eng/projects/Project_37.pdf>, erişim tarihi 21.01.2020.
- [15] **Url-4** <<https://www.engr.siu.edu/staff/spezia/Web438A/Lecture%20Notes/lesson14et438a.pdf>>, erişim tarihi 10.03.2020.
- [16] **A.Z. Alassar, I.M. Abuhadrous and H.A. Elaydi,** (2009), “Comparison between FLC and PID Controller for 5DOF Robot Arm”, The 2nd IEEE International Conference on Advanced Computer Control, Shenyang.
- [17] **A.Z. Alassar, I.M. Abuhadrous and H.A. Elaydi.** (2020) “Modeling and Control of 5DOF Robot Arm Using Supervisory Control”, The 2nd Conference on Computer and Automation Engineering, Singapore
- [18] **I. Coşkun, H. Terzioğlu.** (2007). Determining Gain(PID) Parameters Make Use of Speed Performance Curve, *Journal of Sencuk-Technic*, vol. 3, pp. 180-205.
- [19] **O. Uysal.** (2010) *Examination of dynamical behaviour of a thermal system simulating an exothermic chemical reactor*, Master’s Thesis, ITU.
- [20] **T. Şeref.** (2018) *Dynamic modeling and control of a gimbaled airborne antenna platform with mass unbalance and friction*, Master’s Thesis, METU.
- [21] **Motor** (t.y.). *Vikipedi*. Erişim:05 Şubat, 2020, https://tr.wikipedia.org/wiki/Elektrik_motoru
- [22] **S. Songül.** (2014) *Tank namlusu stabilizasyon sisteminin arduino ile uygulanması ve deneysel düzeneğinin hazırlanması*, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi.
- [23] **Url-5** <<https://gucaktarim.com/kaplin-nedir/>>, erişim tarihi 10.09.2020.
- [24] **HSV Renk Uzayı** (t.y.). *Vikipedi*. Erişim:12 Nisan, 2020, https://tr.wikipedia-on-ipfs.org/wiki/HSV_renk_uzayı
- [25] **Url-6** < <https://globalaihub.com/goruntu-isleme-renk-uzaylari-rgb-hsv-ve-cmyk/>>, date retrieved 15.08.2020.

- [26] **Url-7**<https://www.aselsan.com.tr/DENIZGOZUAHTAPOT_ElektroOptik_Kesif_Ve_Gozetleme_Sistemi_2222.pdf>, erişim tarihi 15.08.2020.
- [27] **T. Öztürk**, (2010) *Angular acceleration assisted stabilization of a 2-dof gimbal platform*, Master's thesis, METU, Ankara, Turkey.
- [28] **P. J. Kennedy and R. L. Kennedy**. (2003) Direct versus indirect line of sight (los) stabilization, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 11, no. 1, pp. 3–15.
- [29] **B. Ekstrand**. (2001) Equations of motion for a two-axes gimbal system", *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 37, no. 3, pp. 1083-1091.
- [30] **O. Hasturk, A. M. Erkmen, and I. Erkmen**. (2011) Proxy-based sliding mode stabilization of a two-axis gimbaled platform, *target*, vol. 3, no. 4, pp. 1–7.
- [31] **Url-8**< <https://infodif.com/blog/goruntu-isleme-amaciyla-optik-algilayici-kamera-seciminde-onemli-faktorler/>>, erişim tarihi 25.10.2020.

EKLER

EK A: Görüntü İşleme Kodları

EK B: Motor Kontrol Arduino Kodları

EK C: Elevasyon Gövdesi Atalet ve Kütle Merkezi

EK D: Azimut Gövdesi Atalet ve Kütle Merkezi

EK E: Solidworks Prototip Çizimleri



EK A

```
using OpenCvSharp;  
using OpenCvSharp.XFeatures2D;  
using OpenCvSharp.Tracking;
```

```
using System;
```

```
using System.Threading.Tasks;  
using System.Windows.Forms;  
using System.Diagnostics;
```

```
using System.IO.Ports;  
using System.Threading;
```

```
namespace MustafaProject  
{  
    public partial class Form1 : Form  
    {  
  
        SerialPort serialPort1;  
  
        private VideoCapture _camera;  
        private bool _isCameraStopped = true;  
        private bool _isStopSystem = false;  
  
        private Scalar _detectHSVLow = new Scalar(140, 160, 0);  
  
        private Scalar _detectHSVHigh = new Scalar(180,255,255);  
  
        private double _minTargetArea = 2500;  
  
        private bool _isTargetDetected = false;  
        private bool _isSettingOpen = false;  
        private bool _isDebugEnabled = false;  
  
        private Mat _frame = new Mat();  
        private Mat _grayFrame = new Mat();  
  
        private int _imageWidth = -1;  
        private int _imageHeight = -1;  
        private int _markerThickness = 30;  
        private Scalar _markerColor = Scalar.WhiteSmoke;  
  
        int motor1h = 0;
```

```

int motor2h = 0;

int motor1y = 0;
int motor2y = 0;

int motorDurum = 0 ;

int motorDevrede = 0;

int hedefbulundu = 0;

```

```

public Form1()
{
    InitializeComponent();
    serialPort1 = new SerialPort();
    serialPort1.PortName = "COM6";

    serialPort1.BaudRate = 9600;
    serialPort1.Open();
    serialPort1.Write("e");
}

private async void FormLoad(object sender, EventArgs e)
{
    _camera = new VideoCapture(0);
    _camera.Set(CaptureProperty.FrameWidth, 600);
    //_camera.Set(CaptureProperty.FrameHeight);
    _camera.Set(CaptureProperty.AutoFocus, 0);
    _camera.Set(CaptureProperty.AutoExposure, 0);

    await CameraCapture();
}

private void checkBox1_CheckedChanged(object sender, EventArgs e)
{
    var checkBox = sender as CheckBox;
    if(checkBox.Checked)
    {
        checkBox.Text = "Camera Stop";
        _isCameraStopped = false;
    }
    else
    {
        checkBox.Text = "Camera Start";
        _isCameraStopped = true;
    }
}

```

```

        Cv2.DestroyWindow("Camera");
    }
}

private async Task CameraCapture()
{
    await Task.Run(() =>
    {
        var capturedImage = new Mat(720, 1024, MatType.CV_8UC3);
        if(_camera != null && _camera.IsOpened())
            _camera.Read(capturedImage);
        var grayFrame = new Mat();
        using (Window cameraWindow = new Window("Camera",
capturedImage))
            using (Window maskWindow = new Window("Mask", capturedImage))
            {
                Cv2.DestroyWindow("Camera");
                Cv2.DestroyWindow("Mask");

                var blurred = new Mat();
                var hsv = new Mat();
                var mask = new Mat();
                Mat kernel = new Mat(3, 3, MatType.CV_8UC1);
                var showedImage = new Mat();

                OpenCvSharp.Point[][] contours;
                HierarchyIndex[] hierarchyIndexes;

                while (_isStopSystem == false)
                {

                    if (_isCameraStopped == false)
                    {
                        if (_camera != null)
                        {
                            _camera.Read(capturedImage);
                            Mat r = Cv2.GetRotationMatrix2D(new
Point2f(capturedImage.Cols / 2, capturedImage.Rows / 2), 90, 1.0);
                            Cv2.WarpAffine(capturedImage, capturedImage, r, new
OpenCvSharp.Size(capturedImage.Cols, capturedImage.Rows));
                            _isTargetDetected = false;
                            if (capturedImage.Empty())
                                continue;
                            if (_imageHeight == -1 || _imageWidth == -1)
                            {
                                _imageHeight = capturedImage.Height;
                                _imageWidth = capturedImage.Width;
                            }
                        }
                    }
                }
            }
        }
    }
}

```

```

Cv2.GaussianBlur(capturedImage, blurred, new Size(9, 9), 0.8);

Cv2.CvtColor(blurred, hsv, ColorConversionCodes.BGR2HSV);
Cv2.InRange(hsv, _detectHSVLow, _detectHSVHigh, mask);

Cv2.MedianBlur(mask, mask, 3);

Cv2.Erode(mask, mask,
Cv2.GetStructuringElement(MorphShapes.Ellipse, new Size(5, 5)));
Cv2.Dilate(mask, mask,
Cv2.GetStructuringElement(MorphShapes.Ellipse, new Size(5, 5)));

Cv2.Dilate(mask, mask,
Cv2.GetStructuringElement(MorphShapes.Ellipse, new Size(5, 5)));
Cv2.Erode(mask, mask,
Cv2.GetStructuringElement(MorphShapes.Ellipse, new Size(5, 5)));

Cv2.FindContours(mask.Clone(), out contours, out
hierarchyIndexes, RetrievalModes.External,
ContourApproximationModes.ApproxSimple);
if (contours?.Length > 0)
{
    for (int i = contours.Length - 1; i >= 0; i--)
    {
        var area = Cv2.ContourArea(contours[i]);
        if (area > _minTargetArea)
        {
            var boundingRect = Cv2.BoundingRect(contours[i]);
            if(_isDebugEnabled)
            {
                Cv2.Rectangle(capturedImage,
                    new Point(boundingRect.X, boundingRect.Y),
                    new Point(boundingRect.X + boundingRect.Width,
boundingRect.Y + boundingRect.Height),
                    new Scalar(0, 0, 255),
                    2);
            }

            var centerMoments = Cv2.Moments(contours[i]);
            var centerOfTarget = new
OpenCvSharp.Point((centerMoments.M10 / centerMoments.M00),
                    (centerMoments.M01 / centerMoments.M00));
            Cv2.Circle(capturedImage, centerOfTarget, 5,
Scalar.Red, -1);

            Debug.Write($"x : {centerOfTarget.X}");
            if (centerOfTarget.X <= ((_imageWidth -
_markerThickness) / 2))
            {
                Debug.WriteLine("Sol");
            }
        }
    }
}

```

```

        motor2h = 1;
        motor2y = 0;

    }
    else if (centerOfTarget.X >= ((_imageWidth +
_markerThickness) / 2))
    {
        Debug.WriteLine("Sag");
        motor2h = 1;
        motor2y = 1;
    }
    else
    {
        Debug.WriteLine("Bolge Y");

        motor2h = 0;
        motor2y = 0;
    }

    if (centerOfTarget.Y <= ((_imageHeight -
_markerThickness) / 2))
    {
        Debug.WriteLine("Ust");

        motor1h = 1;
        motor1y = 1;

    }
    else if (centerOfTarget.Y >= ((_imageHeight +
_markerThickness) / 2))
    {
        Debug.WriteLine("Alt");

        motor1h = 1;
        motor1y = 0;

    }
    else
    {
        Debug.WriteLine("Bolge X");

        motor1h = 0;
        motor1y = 0;

    }

    SendArduino();

```

```

        Debug.WriteLine("Hedef Bulundu");
        hedefbulundu = 1;

        _isTargetDetected = true;
        break;

    }

}

}

//capturedImage.Line(new OpenCvSharp.Point(_imageWidth / 2,
0), new OpenCvSharp.Point(_imageWidth / 2, _imageHeight), _markerColor,
_markerThickness); // Yatay ve Dikey Hassasiyet Çizgilerini Gösterir. Şimdilik
Gözükmesin yada Şeffaf varsa onu yaparız
//capturedImage.Line(new OpenCvSharp.Point(0, _imageHeight
/ 2), new OpenCvSharp.Point(_imageWidth, _imageHeight / 2), _markerColor,
_markerThickness);
cameraWindow.ShowImage(capturedImage);
Cv2.WaitKey(20);
}
}
}
}
});
}

private void SendArduino()
{
    if(hedefbulundu == 1)
    {
        serialPort1.Write("t");
    }

    else if (hedefbulundu == 0)

    {
        serialPort1.Write("r");
    }

    if (motorDevrede == 0)
    {

```

```
motorDurum = (motor1h * 1000) + (motor1y * 100) + (motor2h * 10) +  
(motor2y * 1);
```

```
if (motorDurum == 0)  
{  
    serialPort1.Write("0");
```

```
}
```

```
if (motorDurum == 1)  
{  
    serialPort1.Write("1");
```

```
}
```

```
if (motorDurum == 10)  
{  
    serialPort1.Write("2");
```

```
}
```

```
if (motorDurum == 11)  
{  
    serialPort1.Write("3");
```

```
}
```

```
if (motorDurum == 100)  
{  
    serialPort1.Write("4");
```

```
}
```

```
if (motorDurum == 101)  
{  
    serialPort1.Write("5");
```

```
}
```

```
if (motorDurum == 110)  
{  
    serialPort1.Write("6");
```

```
}
```

```
if (motorDurum == 111)  
{  
    serialPort1.Write("7");
```

```
}
```

```
if (motorDurum == 1000)
{
    serialPort1.Write("8");
}

if (motorDurum == 1001)
{
    serialPort1.Write("9");
}

if (motorDurum == 1010)
{
    serialPort1.Write("f");
}

if (motorDurum == 1011)
{
    serialPort1.Write("g");
}

if (motorDurum == 1100)
{
    serialPort1.Write("h");
}

if (motorDurum == 1101)
{
    serialPort1.Write("j");
}

if (motorDurum == 1110)
{
    serialPort1.Write("k");
}

if (motorDurum == 1111)
{
    serialPort1.Write("l");
}
```

```

    }

    else
    {
        serialPort1.Write("a");
    }
}

private void Form1_FormClosing(object sender, FormClosingEventArgs e)
{
    #region Form

    _isStopSystem = true;
    _camera.Release();

    serialPort1.Write("e");
    if (serialPort1.IsOpen)
        serialPort1.Close();
    #endregion
}

private void TrackerInit()
{
    if (_camera == null)
        return;
    var capturedImage = new Mat();
    using (var window = new Window("TargetDetector"))
    using (var winHSV = new Window("HSVWindow"))
    {

        CvTrackbarCallback lowHFunc = (value) => { _detectHSVLow.Val0 =
value; };
        window.CreateTrackbar("LowH",
Convert.ToInt32(_detectHSVLow.Val0), 180, lowHFunc);

        CvTrackbarCallback HighHFunc = (value) => { _detectHSVHigh.Val0 =
value; };
        window.CreateTrackbar("HighH",
Convert.ToInt32(_detectHSVHigh.Val0), 180, HighHFunc);

        CvTrackbarCallback LowSFunc = (value) => { _detectHSVLow.Val1 =
value; };
        window.CreateTrackbar("LowS",
Convert.ToInt32(_detectHSVLow.Val1), 255, LowSFunc);

        CvTrackbarCallback HighSFunc = (value) => { _detectHSVHigh.Val1 =
value; };

```

```

        window.CreateTrackbar("HighS",
Convert.ToInt32(_detectHSVHigh.Val1), 255, HighSFunc);

        CvTrackbarCallback LowVFunc = (value) => { _detectHSVLow.Val2 =
value; };
        window.CreateTrackbar("LowV",
Convert.ToInt32(_detectHSVLow.Val2), 255, LowVFunc);

        CvTrackbarCallback HighVFunc = (value) => { _detectHSVHigh.Val2 =
value; };
        window.CreateTrackbar("HighV",
Convert.ToInt32(_detectHSVHigh.Val2), 255, HighVFunc);

        CvTrackbarCallback TargetAreaFunc = (value) => { _minTargetArea =
value; };
        window.CreateTrackbar("MinTargetArea",
Convert.ToInt32(_minTargetArea), 30000, TargetAreaFunc);

        var blurred = new Mat();
        var hsv = new Mat();
        var mask = new Mat();
        Mat kernel = new Mat(3, 3, MatType.CV_8UC1);
        var showedImage = new Mat();

        OpenCvSharp.Point[][] contours;
        HierarchyIndex[] hierarchyIndexes;

        while (_isSettingOpen)
        {
            _camera.Read(capturedImage);
            Mat r = Cv2.GetRotationMatrix2D(new Point2f(capturedImage.Cols / 2,
capturedImage.Rows / 2), 90, 1.0);
            Cv2.WarpAffine(capturedImage, capturedImage, r, new
OpenCvSharp.Size(capturedImage.Cols, capturedImage.Rows));
            Cv2.GaussianBlur(capturedImage, blurred, new Size(9, 9), 0.8);

            Cv2.CvtColor(blurred, hsv, ColorConversionCodes.BGR2HSV);
            Cv2.InRange(hsv, _detectHSVLow, _detectHSVHigh, mask);

            Cv2.MedianBlur(mask, mask, 3);

            Cv2.Erode(mask, mask,
Cv2.GetStructuringElement(MorphShapes.Ellipse, new Size(5, 5)));
            Cv2.Dilate(mask, mask,
Cv2.GetStructuringElement(MorphShapes.Ellipse, new Size(5, 5)));

            Cv2.Dilate(mask, mask,
Cv2.GetStructuringElement(MorphShapes.Ellipse, new Size(5, 5)));

```

```

        Cv2.Erode(mask, mask,
Cv2.GetStructuringElement(MorphShapes.Ellipse, new Size(5, 5)));

        Cv2.FindContours(mask.Clone(), out contours, out hierarchyIndexes,
RetrievalModes.External, ContourApproximationModes.ApproxSimple);
        if (contours?.Length > 0)
        {
            for (int i = contours.Length - 1; i >= 0; i--)
            {
                var area = Cv2.ContourArea(contours[i]);
                Debug.WriteLine($"{i + 1}. area : {area}");
                if (area > _minTargetArea)
                {
                    var boundingRect = Cv2.BoundingRect(contours[i]);
                    Cv2.Rectangle(capturedImage,
new Point(boundingRect.X, boundingRect.Y),
new Point(boundingRect.X + boundingRect.Width,
boundingRect.Y + boundingRect.Height),
new Scalar(0, 0, 255),
2);
                    break;
                }
            }
        }

        }
        Cv2.CvtColor(mask, mask, ColorConversionCodes.GRAY2BGR);
        Cv2.HConcat(capturedImage, mask, showedImage);
        window.ShowImage(showedImage);
        winHSV.ShowImage(hsv);
        Cv2.WaitKey(100);
    }
}

private void SelectTargetClick(object sender, EventArgs e)
{

}

private void checkBox2_CheckedChanged(object sender, EventArgs e)
{
    if (_camera == null)
        return;
    var checkBox = sender as CheckBox;

```

```

        if (checkBox.Checked)
        {
            checkBox.Text = "Setting Close";
            _isSettingOpen = true;

            checkBox1.Checked = false;

            TrackerInit();
        }
        else
        {
            checkBox.Text = "Setting Open";
            _isSettingOpen = false;
            Cv2.DestroyWindow("TargetDetector");
            Cv2.DestroyWindow("HSVWindow");
            checkBox1.Checked = true;
        }
    }

    private void checkBox3_CheckedChanged(object sender, EventArgs e)
    {
        var checkBox = sender as CheckBox;

        _isDebugEnabled = checkBox.Checked;

        checkBox.Text = checkBox.Checked ? "Debug Off" : "Debug On";
    }

    private void button1_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        serialPort1.Write("e");
    }

    private void button2_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        serialPort1.Write("x");
    }

    private void checkBox4_CheckedChanged(object sender, EventArgs e)
    {
        if (checkBox4.Checked == true)
        {
            motorDevrede = 1;
        }

        else
        {
            motorDevrede = 0;
        }
    }
}

```

EK B

```
#include <Wire.h>
#include <I2Cdev.h>
#include <MPU6050.h>
#include <math.h>
```

```
#include <AccelStepper.h>
```

```
#define limitSwitch1 11
#define limitSwitch2 12
```

```
AccelStepper stepper1(1, 5, 6); // (Type:driver, STEP, DIR)
AccelStepper stepper2(1, 8, 9);
```

```
MPU6050 mpu;
int16_t ax, ay, az;
int16_t gx, gy, gz;
```

```
float acc_x, acc_y, acc_z;
float gyro_x, gyro_y, gyro_z;
float acc_angle_x, acc_angle_y, acc_angle_z;
float gyro_angle_x, gyro_angle_y, gyro_angle_z;
```

```
float gyrox;
float gyroy;
float gyroz;
```

```
unsigned long timer;
Kalman kalman_x;
Kalman kalman_y;
Kalman kalman_z;
float kalman_angle_x;
float kalman_angle_y;
float kalman_angle_z;
```

```
int motor1hiz =500;
int motor2hiz =500;
```

```
char gelenilk;
char gelen;
```

```
char motorgelen;
```

```
char motorgelen1;
```

```
char gelendeger1 ;  
char gelendeger2 ;  
int out1 = 31;  
int out2 = 32;
```

```
char gelendeger3 ;  
char gelendeger4 ;  
int out3 = 33;  
int out4 = 34;
```

```
char gelendeger5 ;  
char gelendeger6 ;  
int out5 = 35;  
int out6 = 36;
```

```
char gelendeger7 ;  
char gelendeger8 ;
```

```
char gelendeger9 ;  
char gelendeger10 ;
```

```
int ASYUK = 0;  
int ONAY1 = 1;
```

```
bool gelendeger11 = LOW ;  
bool gelendeger12 = LOW ;
```

```
int SASOL = 0;  
int ONAY2 = 0;  
bool gelendeger13 = LOW ;  
bool gelendeger14 = LOW ;
```

```
char gelendeger15 ;  
char gelendeger16 ;
```

```
bool hedefbulundu = LOW ;  
char gelendeger17 ;  
char gelendeger18 ;
```

```

//Encoder1

int encoderPin1 = 2;
int encoderPin2 = 3;
volatile int lastEncoded = 0;
volatile long encoderValue = 0;

float ref1 = 0.0;
float encoderValueGONDER = 0.0 ;

//Encoder2
int encoderPin3 = 20;
int encoderPin4 = 21;
volatile int lastEncoded2 = 0;
volatile long encoderValue2 = 0;
float ref2 = 0.0;
float encoderValue2GONDER = 0.0 ;

void setup() {
  Wire.begin();
  Serial.begin(9600); //9600 idi 115200

  //Serial.println("Initializing I2C devices...");
  mpu.initialize();
  kalman_x.setAngle(0);
  kalman_y.setAngle(0);
  kalman_z.setAngle(0);
  delay(20);
  timer = micros();

  pinMode(limitSwitch1,INPUT);
  pinMode(limitSwitch2,INPUT);

//Encoder1
pinMode(encoderPin1, INPUT_PULLUP);
pinMode(encoderPin2, INPUT_PULLUP);
attachInterrupt(0, updateEncoder, CHANGE);
attachInterrupt(1, updateEncoder, CHANGE);

```

```
//Encoder2
pinMode(encoderPin3, INPUT_PULLUP);
pinMode(encoderPin4, INPUT_PULLUP);
attachInterrupt(2, updateEncoder2, CHANGE);
attachInterrupt(3, updateEncoder2, CHANGE);
```

```
pinMode(out1,OUTPUT);
pinMode(out2,OUTPUT);
pinMode(out3,OUTPUT);
pinMode(out4,OUTPUT);
pinMode(out5,OUTPUT);
pinMode(out6,OUTPUT);
```

```
stepper1.setMaxSpeed(200);
stepper2.setMaxSpeed(200);
```

```
}
```

```
void loop()
{
```

```
if(Serial.available() > 0)
{
gelenilk = Serial.read();
Serial.flush();
```

```
}
```

```
if(ONAY1 == 1)
```

```
{
gelen = gelenilk;
```

```
}
else
{
gelen = 'e';
```

```
}
```

```

if(gelenilk == 'x' || gelenilk == 'e' )
{
    gelendeger9 = gelenilk;
    gelendeger10 = gelendeger9;
}

```

```

else
{
    gelendeger10 = gelendeger9;
}

```

```

if (gelendeger10 == 'e' )

```

```

{
    ASYUK = 0;
    ONAY1 = 1;
    encoderValue = 0;
    encoderValueGONDER = 0.0;
    gelendeger11 = LOW;
    gelendeger12 = LOW;

```

```

    SASOL = 0;
    ONAY2 = 0;
    encoderValue2 = 0;
    encoderValue2GONDER = 0.0;
    gelendeger13 = LOW;
    gelendeger14 = LOW;
}

```

```

if(digitalRead(limitSwitch1) == HIGH )

```

```

{
    gelendeger11 = digitalRead(limitSwitch1);
    gelendeger12 = gelendeger11;
}
else
{
    gelendeger12 = gelendeger11;
}

```

```

if (gelendeger10 == 'x' && ONAY1 == 0 && gelendeger12 == LOW )

```

```

{
    ASYUK =2;
}

```

```

if( gelendeger10 == 'x' && ONAY1 == 0 && ASYUK == 2 )
{
    if ( gelendeger12 == LOW && ASYUK == 2 )
    {
        stepper1.setSpeed(-motor1hiz);

        stepper1.runSpeed();
    }

    if ( gelendeger12 == HIGH && ASYUK == 2 )
    {
        stepper1.setSpeed(0);
        ASYUK = 1;

    }

}

if ( gelendeger10 == 'x' && ONAY1 == 0 && ASYUK == 1 )
{
    if( encoderValueGONDER >= ref1 )
    {
        stepper1.setSpeed(0);

        ASYUK = 0 ;
        ONAY1 = 1;

    }

    if( encoderValueGONDER < ref1 )
    {
        stepper1.setSpeed(motor1hiz);
        stepper1.runSpeed();
    }

}

```

```

if(digitalRead(limitSwitch2) == HIGH )

{
    gelendeger13 = digitalRead(limitSwitch2);
    gelendeger14 = gelendeger13;
}
else
{
    gelendeger14 = gelendeger13;
}

if (gelendeger10 == 'x' && ONAY2 == 0 && gelendeger14 == LOW )

{
    SASOL =2;
}

if( gelendeger10 == 'x' && ONAY2 == 0 && SASOL == 2 )

{

    if ( gelendeger14 == LOW && SASOL == 2 )
    {
        stepper2.setSpeed(-motor2hiz);
        stepper2.runSpeed();
    }

    if ( gelendeger14 == HIGH && SASOL == 2 )
    {
        stepper2.setSpeed(0);
        SASOL = 1;
    }

}

if ( gelendeger10 == 'x' && ONAY2 == 0 && SASOL == 1 )
{

    if( encoderValue2GONDER >= ref2 )
    {
        stepper2.setSpeed(0);
        SASOL = 0 ;
        ONAY2 = 1;
    }

    if( encoderValue2GONDER < ref2 )
    {

```

```

stepper2.setSpeed(motor2hiz);
stepper2.runSpeed();
}

}

```

```

if(gelenilk == 'M' || gelenilk == 'w' || gelenilk == 'v' || gelenilk == 'e')

```

```

{
    gelendeger3 = gelenilk;
    gelendeger4 = gelendeger3;
}
else
{
    gelendeger4 = gelendeger3;
}
if (gelendeger4 == 'M' ) {
    Serial.print(kalman_angle_x);
    Serial.print("+");
    Serial.print(kalman_angle_y);
    Serial.print("+");
    Serial.print(kalman_angle_z);
    Serial.print("+");
    delay(1);
}
if (gelendeger4 == 'w' ) {    }
if (gelendeger4 == 'v' ) {    }

if (gelendeger4 == 'e' ) {    }

```

```

if( gelen == 'e' || gelen == 'b' || gelen == 'd' )

```

```

{
    gelendeger1 = gelen;

    gelendeger2 = gelendeger1;
}
else
{
    gelendeger2 = gelendeger1;
}
if (gelendeger2 == 'b' )      {

```

```

digitalWrite(out1,HIGH);
    }
if (gelendeger2 == 'd' || gelendeger2 == 'e' ) {
digitalWrite(out1,LOW);
    }

```

```

if( gelen == 'e' || gelen == 'q' || gelen == 'p' )

{
gelendeger5 = gelen;

gelendeger6 = gelendeger5;
}
else
{
gelendeger6 = gelendeger5;
}
if (gelendeger6 == 'q' ) {
digitalWrite(out5,HIGH);
    }
if (gelendeger6 == 'p' || gelendeger6 == 'e' ) {
digitalWrite(out5,LOW);
    }

```

```

if( gelen == 's' || gelen == 'z' )
{
gelendeger15 = gelen;

gelendeger16 = gelendeger15;
}
else
{
gelendeger16 = gelendeger15;
}

if (gelendeger16 == 's' ) {
if ( motor1hiz < 280 )
{
motor1hiz = motor1hiz + 20;
}
    }

if (gelendeger16 == 'z' ) {

if (motor1hiz > 80 )
{

```

```

    motor1hiz = motor1hiz - 20;
}
}

```

```

if( gelen == 'r' || gelen == 't' )
{
    gelendeger17 = gelen;

    gelendeger18 = gelendeger17;
}
else
{
    gelendeger18 = gelendeger17;
}

if (gelendeger18 == 'r' ) {
    hedefbulundu = LOW ;
}

if (gelendeger18 == 't' ) {
    hedefbulundu = HIGH ;
}

```

```

if ( hedefbulundu == LOW )
{
    stepper1.setSpeed(0);
    stepper1.runSpeed();
    stepper2.setSpeed(0);
    stepper2.runSpeed();
}
else if ( hedefbulundu == HIGH )
{

    if ( gelen == 'a' || gelen == 'e' || gelen == '0' || gelen == '1' || gelen == '2' || gelen ==
'3' || gelen == '4' || gelen == '5' || gelen == '6' || gelen == '7' || gelen == '8' || gelen == '9'
|| gelen == 'f' || gelen == 'g' || gelen == 'h' || gelen == 'j' || gelen == 'k' || gelen == 'l')

    {
        motorgelen1 = gelen;
    }
}

```

```

    motorgelen = motorgelen1;
}
else
{
    motorgelen = motorgelen1;
}

if (motorgelen == 'a' )

{
    stepper1.setSpeed(0);
    stepper1.runSpeed();
    stepper2.setSpeed(0);
    stepper2.runSpeed();
}

if (motorgelen == 'e' )

{
    stepper1.setSpeed(0);
    stepper1.runSpeed();
    stepper2.setSpeed(0);
    stepper2.runSpeed();
}
if (motorgelen == '0' ) {
    stepper1.setSpeed(0);
    stepper1.runSpeed();
    stepper2.setSpeed(0);
    stepper2.runSpeed();
}
if (motorgelen == '1' ) {
    stepper1.setSpeed(0);
    stepper1.runSpeed();
    stepper2.setSpeed(0);
    stepper2.runSpeed();
}
if (motorgelen == '2' ) {
    stepper1.setSpeed(0);
    stepper1.runSpeed();
    stepper2.setSpeed(-motor2hiz);
    stepper2.runSpeed();
}
if (motorgelen == '3' ) {
    stepper1.setSpeed(0);
    stepper1.runSpeed();
    stepper2.setSpeed(motor2hiz);
    stepper2.runSpeed();
}
if (motorgelen == '4' ) {
    stepper1.setSpeed(0);

```

```

stepper1.runSpeed();
stepper2.setSpeed(0);
stepper2.runSpeed();
    }
    if (motorgelen == '5' ) {
stepper1.setSpeed(0);
stepper1.runSpeed();
stepper2.setSpeed(0);
stepper2.runSpeed();
    }
    if (motorgelen == '6' ) {
stepper1.setSpeed(0);
stepper1.runSpeed();
stepper2.setSpeed(-motor2hiz);
stepper2.runSpeed();
    }
    if (motorgelen == '7' ) {
stepper1.setSpeed(0);
stepper1.runSpeed();
stepper2.setSpeed(motor2hiz);
stepper2.runSpeed();
    }
    if (motorgelen == '8' ) {
stepper1.setSpeed(-motor1hiz);
stepper1.runSpeed();
stepper2.setSpeed(0);
stepper2.runSpeed();
    }
    if (motorgelen == '9' ) {
stepper1.setSpeed(-motor1hiz);
stepper1.runSpeed();
stepper2.setSpeed(0);
stepper2.runSpeed();
    }
    if (motorgelen == 'f' ) {
stepper1.setSpeed(-motor1hiz);
stepper1.runSpeed();
stepper2.setSpeed(-motor2hiz);
stepper2.runSpeed();
    }
    if (motorgelen == 'g' ) {
stepper1.setSpeed(-motor1hiz);
stepper1.runSpeed();
stepper2.setSpeed(motor2hiz);
stepper2.runSpeed();
    }
    if (motorgelen == 'h' ) {
stepper1.setSpeed(motor1hiz);
stepper1.runSpeed();
stepper2.setSpeed(0);

```

```

stepper2.runSpeed();
    }
    if (motorgelen == 'j') {
        stepper1.setSpeed(motor1hiz);
        stepper1.runSpeed();
        stepper2.setSpeed(0);
        stepper2.runSpeed();
    }
    if (motorgelen == 'k') {
        stepper1.setSpeed(motor1hiz);
        stepper1.runSpeed();
        stepper2.setSpeed(-motor2hiz);
        stepper2.runSpeed();
    }
    if (motorgelen == 'l') {
        stepper1.setSpeed(motor1hiz);
        stepper1.runSpeed();
        stepper2.setSpeed(motor2hiz);
        stepper2.runSpeed();
    }
}

if(gelendeger12 == HIGH)
{
    encoderValueGONDER = (( float(encoderValue) / 100 ) * 9 ) - 180 ;
}

else
{
    encoderValueGONDER = -180.0 ;
}

if(gelendeger14 == HIGH)
{
    encoderValue2GONDER = (( float(encoderValue2) / 100 ) * 9 ) - 180 ;
}

else
{
    encoderValue2GONDER = -180.0 ;
}

```

```
VeriGonder();
```

```
}
```

```
//Fonksiyonlar
```

```
void updateEncoder()  
{
```

```
    if(gelendeger12 == HIGH)
```

```
    {
```

```
        int MSB = digitalRead(encoderPin1);
```

```
        int LSB = digitalRead(encoderPin2);
```

```
        int encoded = (MSB << 1) | LSB;
```

```
        int sum = (lastEncoded << 2) | encoded;
```

```
        if(sum == 0b1101 || sum == 0b0100 || sum == 0b0010 || sum == 0b1011)  
            encoderValue ++;
```

```
        if(sum == 0b1110 || sum == 0b0111 || sum == 0b0001 || sum == 0b1000)  
            encoderValue --;
```

```
        lastEncoded = encoded;
```

```
    }
```

```
}
```

```
void updateEncoder2()  
{
```

```
    if(gelendeger14 == HIGH)
```

```

{

int MSB2 = digitalRead(encoderPin3);
int LSB2 = digitalRead(encoderPin4);

int encoded2 = (MSB2 << 1) | LSB2;
int sum2 = (lastEncoded2 << 2) | encoded2;


if(sum2 == 0b1101 || sum2 == 0b0100 || sum2 == 0b0010 || sum2 == 0b1011)
encoderValue2 ++;


if(sum2 == 0b1110 || sum2 == 0b0111 || sum2 == 0b0001 || sum2 == 0b1000)
encoderValue2 --;

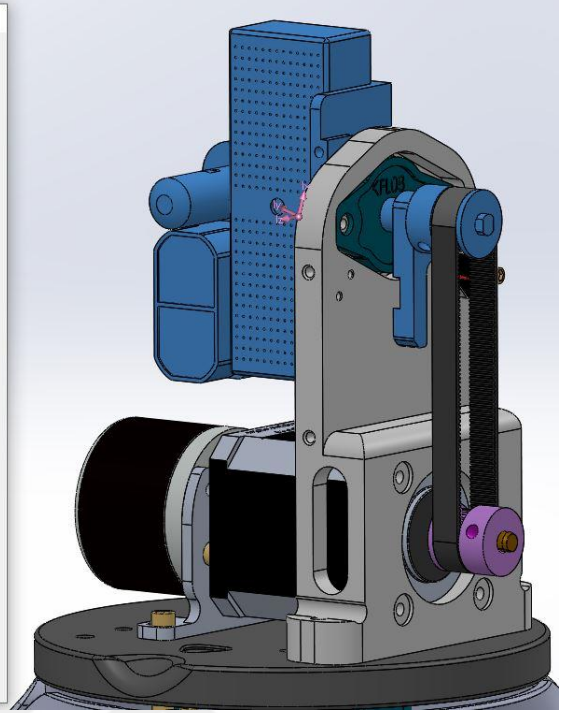
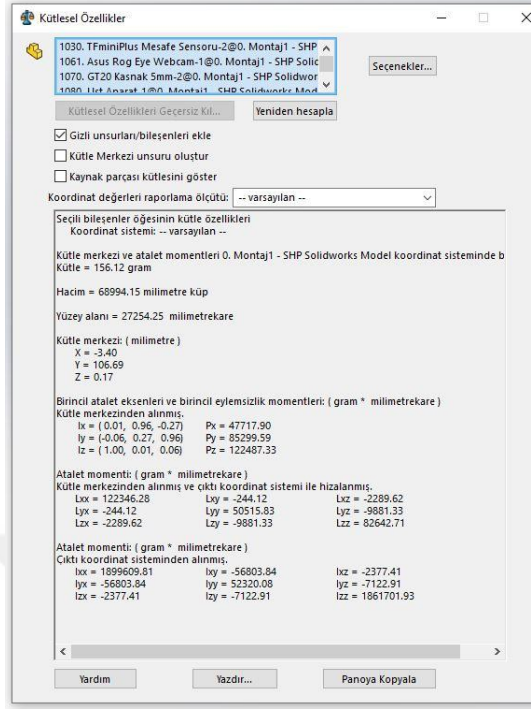

lastEncoded2 = encoded2;
}

}

void VeriGonder()
{
  Serial.print(encoderValueGONDER,3);
  Serial.print("!");
  Serial.print(encoderValueGONDER,3);
  Serial.print("?");
  Serial.print(encoderValueGONDER,3);
  Serial.print("^");
  delay(1);
}

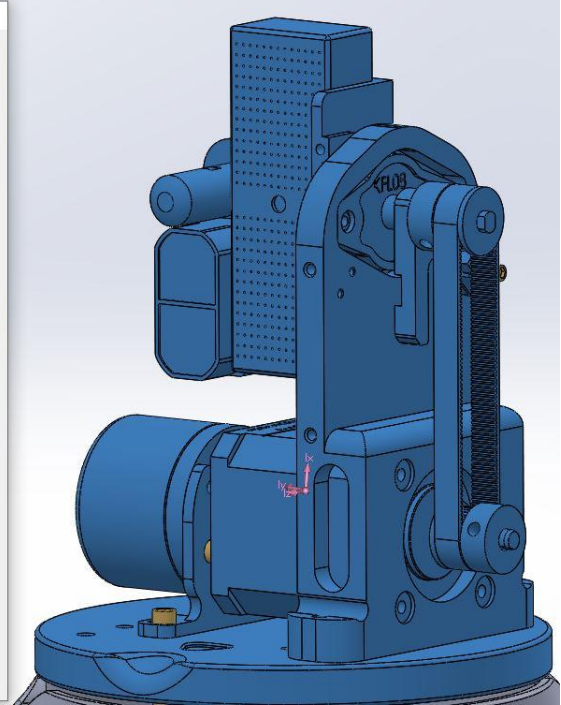
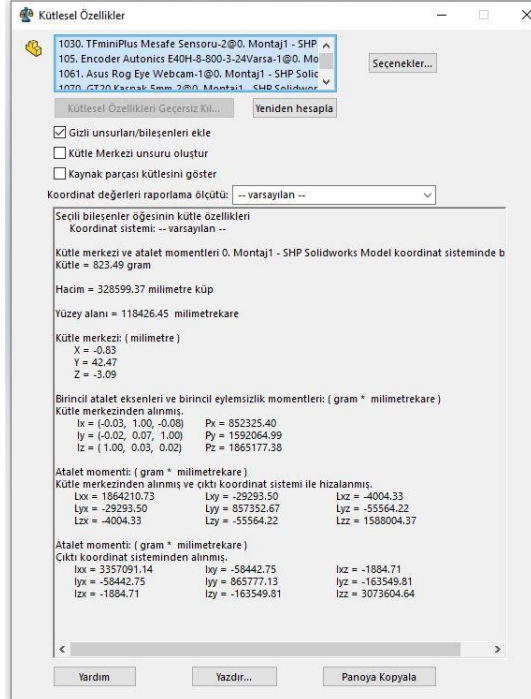
```

EK C



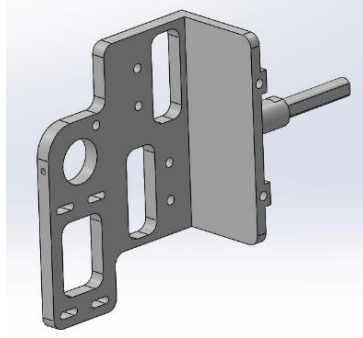
Şekil C.1: Elevasyon Gövdesi Atalet ve Kütle Merkezi

EK D

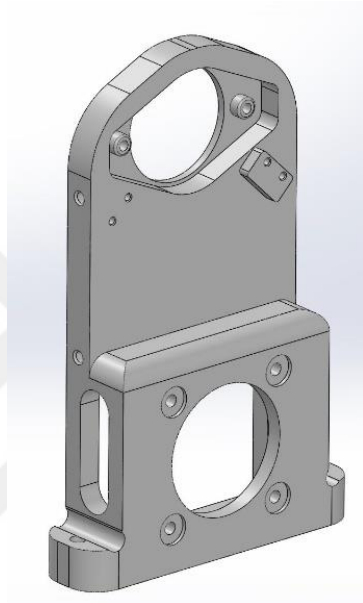


Şekil D.1: Azimut Gövdesi Atalet ve Kütle Merkezi

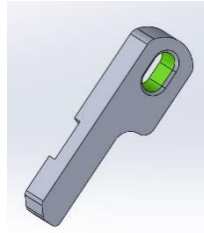
EK E



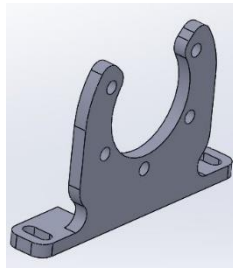
Şekil E.1: Elevasyon Eksen Parçası



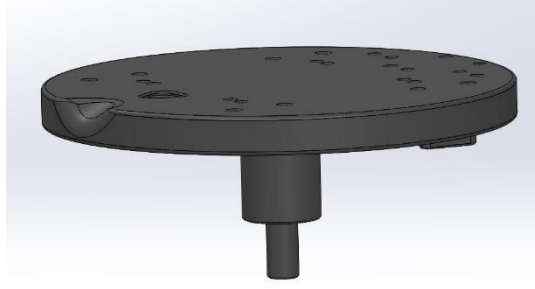
Şekil E.2: Elevasyon Taret Parçası



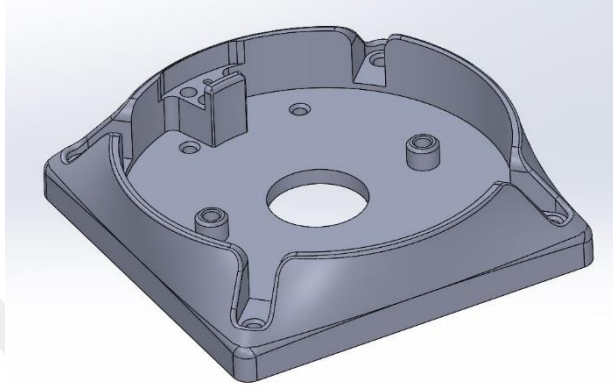
Şekil E.3: Elevasyon Referans Parçası



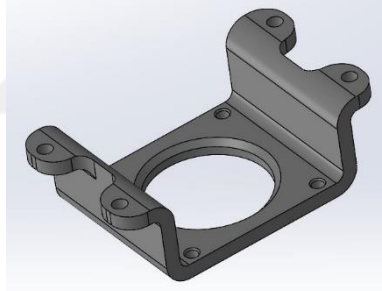
Şekil E.4: Elevasyon Encoder Parçası



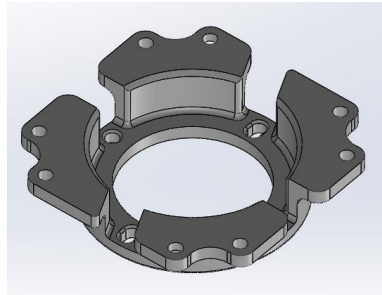
Şekil E.5: Azimut Eksen Parçası



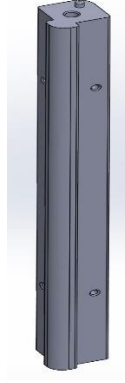
Şekil E.6: Azimut Alt Gövde Parçası



Şekil E.7: Azimut Motor Parçası



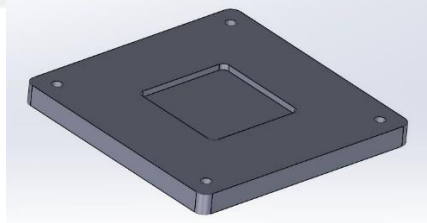
Şekil E.8: Azimut Encoder Parçası



Şekil E.9: Zemin Kolon Parçası



Şekil E.10: Zemin Kapak Parçası



Şekil E.11: Zemin Referans Parçası

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Mustafa Işık AKYÜZ

Doğum Tarihi ve Yeri :

E-posta :

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2015 yılından beri özel bir firmada Ar-Ge Tasarım Mühendisi olarak çalışmaktadır.