

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ**  
**ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ZIRHLI ARAÇLAR İÇİN GİMBAL AKTİF KORUMA SİSTEMİ**  
**TASARIMI VE KONTROLÜ**

**EFE FAZLIOĞLU**

**KOCAELİ 2019**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

**MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ**  
**ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ZIRHLI ARAÇLAR İÇİN GİMBAL AKTİF KORUMA SİSTEMİ**  
**TASARIMI VE KONTROLÜ**


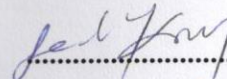
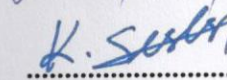
Tez çalışması süresince her zaman destekleri, yardımları, ilgisizliğini, çalışmalarına yapmış olduğu katkıları ve fikirleri sayesinde bugünlere gelebildiğime yeri yerinde olan değerli danışmanım Sn. Prof. Dr. Ahmet ERDİL'e ve çalışmalarına tecrübeleri ile katkıda bulunan Sn. Dr. Selçuk KIZIR'a teşekkür ederim. Ayrıca tez çalışmamın ilerletilmesi konusunda benden başka yardımlarını sunmuş ve çalışmamı arkadaşlarım İsmail HANCI, Ahmet Can CECELOĞLU, Ahmet BOZ ve son olarak hayatım boyunca beni destekleyen ailem için teşekkür ederim.

**EFE FAZLIOĞLU**

Haziran - 2019

EFE FAZLIOĞLU

**Prof. Dr. Ahmet ERDİL**  
**Danışman, Kocaeli Üniversitesi**  
**Dr. Öğr. Üyesi Selçuk KIZIR**  
**Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi**  
**Dr. Öğr. Üyesi Kasım SERBEST**  
**Jüri Üyesi, Sakarya Uyg. Bil. Üniversitesi**

  
.....  
  
.....  
  
.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 17.06.2019

## **ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR**

Gelişen teknoloji ile birlikte savunma sanayi ürünlerindeki gelişmeler birbiriyle yarışmaya ve birbirini etkisiz kılmaya yönelik ilerlemektedir. Bu kapsamda geliştirilen yeni nesil güdümlü silah sistemleri yüksek maliyetlerle üretilen zırhlı araçları etkisiz hale getirmekte ve ordulara zayıf vermektedir. Bu araçların kendisini savunması için geliştirilen karşı önlemlere aktif koruma sistemleri adı verilmektedir. Aktif koruma sistemlerinin farklı versiyonları kara, hava ve deniz olmak üzere üç farklı platformda da kullanılmaktadırlar. Dışarıdan gelen tehdidi etkisiz hale getiren bu sistemlerin kara platformlarında kullanılmasıyla denetimleri daha da önemli hale gelmiştir. Bu çalışmada, aktif koruma sistemleri detaylı olarak incelenmiş, gimbal yapıya sahip bir aktif koruma sisteminin katı model tasarımı yapılmış, matematiksel olarak modellenmiş ve çeşitli kontrol yöntemleriyle gerçek zamanlı kontrolleri gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışması süresince her zaman ilgilerini yakından hissettiğim, çalışmalarına yapmış olduğu katkıları ve fikirleri sayesinde bugünlere gelmemde yol gösterici olan değerli danışmanım Sn. Prof. Dr. Ahmet ERDİL'e ve çalışmalarına tecrübeleri ile katkıda bulunan Sn. Dr. Selçuk KIZIR'e teşekkür ederim. Ayrıca tez çalışmamın, üretilmesi konusunda benden asla yardımlarını esirgemeyen çalışma arkadaşlarım İsmail HANCI, Ahmet Can CECELOĞLU, Ahmet BOZ ve son olarak hayatım boyunca beni destekleyen aileme teşekkür ederim.

Haziran – 2019

Efe FAZLIOĞLU

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ .....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	viii
ÖZET.....	xi
ABSTRACT .....	viii
GİRİŞ .....	1
1. GENEL BİLGİLER.....	3
1.1. Aktif Koruma Sistemlerinin Tanımı .....	3
1.1.1. Yanıltıcı tedbir (Soft-Kill) .....	6
1.1.2. Fiziksel imha edici tedbir (Hard-Kill) .....	7
1.2. Aktif Koruma Sisteminin Çeşitleri ve Kullanım Alanları .....	8
1.3. Aktif Koruma Sisteminin Alt Sistemleri.....	10
1.3.1. Lazer algılayıcı .....	10
1.3.2. Radar .....	11
1.3.3. Atış kontrol bilgisayarı .....	12
1.3.4. Fiziksel imha edici ve yanıltıcı mühimmat.....	12
2. SİSTEM TASARIMI .....	14
2.1. Mekanik Tasarım .....	18
2.1.1. Yanca tasarımı .....	20
2.1.2. Yükseliş tasarımı.....	20
2.1.3. Mekanik donanımlar .....	21
2.1.3.1. Rulman.....	21
2.1.3.2. Döner conta.....	24
2.1.3.3. Kaplin.....	25
2.2. Elektronik Tasarım.....	26
2.2.1. Doğrudan tahrikli motor ve sürücüsü .....	26
2.2.2. Enkoder.....	26
2.2.3. Kayar halka .....	27
2.3. Gerçek Zamanlı Çalışma İçin Gerekli Test Düzeneği .....	28
3. MATEMATİKSEL DENKLEMLER VE MODELLEME.....	30
3.1. Koordinat eksenleri.....	30
3.2. Kinematik Eşitlikler .....	33
3.2.1. Açısal hız .....	33
3.2.2. Açısal ivme .....	35
3.3. Dinamik Eşitlikler .....	37
3.3.1. İç gimbal dinamiği .....	37
3.3.2. Dış gimbal dinamiği.....	40
3.4. Sistem Modeli .....	46
3.4.1. Doğru akım motor modeli.....	46
3.4.2. Sürtünme modeli.....	48
3.4.2.1. Statik sürtünme modelleri.....	48

3.4.2.2.	Dinamik sürtünme modelleri .....	50
3.4.3.	İç gimbal modeli .....	52
4.	SİSTEMİN BENZETİMİ VE GERÇEK ZAMANLI DENETİMİ .....	54
4.1.	Kontrolcü tasarımı .....	55
4.1.1.	Kaskad Klasik PID Kontrolcüsü .....	56
4.1.2.	Kaskad Adaptif Bulanık Mantık Kontrolcüsü .....	58
4.1.2.1.	Bulanık küme teorisi .....	59
4.1.2.2.	Üyelik fonksiyonları .....	59
4.1.2.3.	Bulanık mantık denetimi .....	60
4.1.2.4.	Bulanıklaştırma işlemi ve kuralları .....	62
4.1.2.5.	Bulanık model ve bulanık çıkarım .....	62
4.1.2.6.	Durulama işlemi .....	62
4.2.	Yanca Ekseninin Benzetim Ortamında Denetimi .....	63
4.3.	Yanca Ekseninin Gerçek Zamanlı Denetimi .....	69
4.3.1.	Adaptif bulanık mantık hız kontrolcüsü tasarımı .....	69
4.3.2.	Adaptif bulanık mantık pozisyon kontrolcüsü tasarımı .....	73
4.3.3.	Gerçek Zamanlı Denetim .....	77
4.3.4.	Kaskad pozisyon kontrolü için Anti-Windup testi .....	90
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	94
	KAYNAKLAR .....	96
	EKLER .....	100
	KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER .....	108
	ÖZGEÇMİŞ .....	109

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Kafes Zırhlı Personel Taşıyıcı .....	4
Şekil 1.2.	Yanılıcı Tedbir Mühimmatlı ZPT.....	7
Şekil 1.3.	Fiziksel İmha Edici Sistemin Çalışma Safhaları.....	8
Şekil 1.4.	Personel Taşıyıcı ve Kamyonlar İçin Geliştirilen Koruma Sistemleri.....	9
Şekil 1.5.	BrightArrow- General Dynamics.....	9
Şekil 1.6.	Aselsan Lazer İkaz Sistemi.....	10
Şekil 1.7.	Thales Firmasına Ait Lazer Algılayıcı Sensörü.....	11
Şekil 1.8.	RADA Elektronik Firmasına Ait Doppler Radar.....	12
Şekil 1.9.	KMW firmasına ait sis havanı lançerleri .....	13
Şekil 1.10.	Hard-Kill Mühimmat .....	13
Şekil 2.1.	Tasarımı Yapılan Gimbal Aktif Koruma Sistemi .....	14
Şekil 2.2.	Sistemin Ana Ölçüleri.....	15
Şekil 2.3.	Sistemin Ağırlık Merkezi ve Ataleti .....	15
Şekil 2.4.	Sistemin Bağlantı Yüzeyine Göre Ataleti.....	16
Şekil 2.5.	Sistemin Yanca Bütününün Değerleri .....	16
Şekil 2.6.	Sistemin Yükseliş Bütününün Değerleri.....	17
Şekil 2.7.	Ana Muharebe Tankı Üzerinde Çift AKS .....	17
Şekil 2.8.	AKS Gövde Bütünü .....	18
Şekil 2.9.	Gövde Bütünü Kesit Görünüşü.....	18
Şekil 2.10.	Gimbal Kesit Görünüşü .....	19
Şekil 2.11.	Yanca Bütünü Kesit Görünüşü .....	20
Şekil 2.12.	Yükseliş Bütünü Kesit Görünüşü.....	21
Şekil 2.13.	AKS Rulman Kuvvetler .....	22
Şekil 2.14.	Trelleborg Turcon Döner Conta.....	25
Şekil 2.15.	SUNGİL-Mikro Esnek Kaplin Seçimi.....	25
Şekil 2.16.	Doğrudan Tahrikli Servo Motor Yapısı.....	26
Şekil 2.17.	Mutlak Enkoder .....	27
Şekil 2.18.	Kapsül Tipi Kayar Halka Görseli .....	28
Şekil 2.19.	Xpc Target Modül Kullanımı.....	29
Şekil 2.20.	Örnek PC104 Tabanlı 'Single Board Computer' .....	29
Şekil 3.1.	2 Serbestlik Dereceli AKS'nin Eksen Takımları.....	31
Şekil 3.2.	Doğru Akım Motor Modeli.....	46
Şekil 3.3.	Statik Sürtünme Modelleri (a) Coulomb Sürtünmesi (b) Coulomb ve Viskoz Sürtünme Kombinasyonu (c) Coulomb, Yapışma (stiction) ve Viskoz Sürtünme Kombinasyonu(d) Stribeck Etkisi Eğrisi .....	49
Şekil 3.4.	İç Gimbal Blok Diyagramı.....	52
Şekil 3.5.	Dış Gimbal Blok Diyagramı .....	53
Şekil 4.1.	PID Denetleyici Yapısı .....	56
Şekil 4.2.	Çok Döngülü Geleneksel PI Kontrolcü .....	58
Şekil 4.3.	Üyelik Fonksiyonu Tipleri.....	60
Şekil 4.4.	Bulanık Mantık Sistem Yapısı .....	61
Şekil 4.5.	Adaptif Bulanık Mantık PID Kontrolcü Blok Diyagramı.....	63

Şekil 4.6. Kaskad Adaptif Bulanık Mantık Kontrolcü Blok Diyagramı .....	63
Şekil 4.7. Sistemin Benzetim Modeli.....	64
Şekil 4.8. f-min-search Optimizasyon Fonksiyonu Grafiği .....	65
Şekil 4.9. Benzetim Adaptif Bulanık Mantık PI Simulink Diyagramı .....	65
Şekil 4.10. Hata (E) Üyelik Fonksiyonu .....	66
Şekil 4.11. Hatanın Değişimi (EC) Üyelik Fonksiyonu.....	67
Şekil 4.12. $K_p$ Üyelik Fonksiyonu.....	67
Şekil 4.13. $K_i$ Üyelik Fonksiyonu .....	68
Şekil 4.14. Yanca Ekseni Pozisyon Kontrolü .....	68
Şekil 4.15. Bulanık Mantık Kontrolcü $K_p$ ve $K_i$ Değişimleri.....	69
Şekil 4.16. Hız Hatasının (E) Üyelik Fonksiyonu.....	71
Şekil 4.17. Hız Hatasının Değişiminin (EC) Üyelik Fonksiyonu .....	71
Şekil 4.18. $K_p$ Üyelik Fonksiyonu.....	72
Şekil 4.19. $K_i$ Üyelik Fonksiyonu .....	72
Şekil 4.20 Hata ve Hatanın Değişimine Göre $K_p$ Yüzey Gösterimi .....	73
Şekil 4.21 Hata ve Hatanın Değişimine Göre $K_i$ Yüzey Gösterimi .....	73
Şekil 4.22. Pozisyonun Hata (E) Üyelik Fonksiyonu .....	74
Şekil 4.23. Pozisyon Hata Değişimi (EC) Üyelik Fonksiyonu .....	75
Şekil 4.24. $K_p$ Üyelik Fonksiyonu.....	75
Şekil 4.25. $K_i$ Üyelik Fonksiyonu .....	76
Şekil 4.26. Hata ve Hata Değişimine Göre $K_p$ Yüzey Gösterimi.....	76
Şekil 4.27. Hata ve Hata Değişimine Göre $K_i$ Yüzey Gösterimi .....	77
Şekil 4.28. Gerçek Zamanlı Adaptif Bulanık Mantık PI Simulink Gösterimi .....	77
Şekil 4.29. Hız Komutu ve Sistem Cevabının Grafiği .....	78
Şekil 4.30. Yükselme Zamanı Grafiği.....	79
Şekil 4.31. Sistemin Hata Grafiği .....	80
Şekil 4.32. Adaptif Bulanık Mantık PI $K_p$ Kazancı .....	80
Şekil 4.33. Adaptif Bulanık Mantık PI $K_i$ Kazancı.....	81
Şekil 4.34. Sistemin Akım Zaman Grafiği.....	82
Şekil 4.35. Pozisyon Referans ve Sistem Cevabının Grafiği .....	83
Şekil 4.36. Pozisyon Kontrolçüsü Yükselme Grafiği .....	84
Şekil 4.37. Kaskad Pozisyon Hatası.....	85
Şekil 4.38. Kaskad Pozisyon Kontrolcü Bulanık Mantık $K_p$ Çıkışı.....	85
Şekil 4.39. Kaskad Pozisyon Kontrolcü Bulanık Mantık $K_i$ Çıkışı .....	86
Şekil 4.40. Kaskad Pozisyon Kontrolcü $K_p$ Çıkışı.....	86
Şekil 4.41. Kaskad Pozisyon Kontrolcü $K_i$ Çıkışı .....	87
Şekil 4.42. Sistemin Akım Grafiği.....	87
Şekil 4.43. Kaskad Hız Referans Grafiği .....	89
Şekil 4.44. Kaskad Hız Kontrolcü $K_p$ Çıkışı.....	89
Şekil 4.45. Kaskad Hız Kontrolcü $K_i$ Çıkışı .....	90
Şekil 4.46. Anti-Windup Simulink Blok Diyagramı.....	91
Şekil 4.47. Adaptif Bulanık Mantık Pozisyon Referansı ve Sistem Cevabı .....	91
Şekil 4.48. Anti-Windup Testi Pozisyon Kontrolcü Çıkışı.....	92
Şekil 4.49. Anti-Windup Testi Saturasyon Öncesi ve Sonrası.....	93
Şekil 4.50. Pozisyon Kontrolcü Saturasyon Sonrası Çıkış .....	93
Şekil A.1. Kaskad Kontrolcü Simulink Blok Diyagramı.....	101
Şekil B.1. Pozisyon Kontrolcü Simulink Blok Diyagramı .....	102
Şekil C.1. Hız Kontrolcü Simulink Blok Diyagramı .....	103
Şekil D.1. Gerçek Zamanlı Sistemin Yanca Kontrolü Simulink Bloğu.....	104

Şekil E.1. Kaskad Bulanık Mantık Denetleyici Simulink Blok Diyagramı.....	105
Şekil F.1. Kontrolcü Sinyallerinin Karşılaştırma Fonksiyonu.....	106
Şekil G.1. f-min-search Optimizasyon Fonksiyonu.....	107





## TABLULAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Rulman Yükleri.....	24
Tablo 3.1. Sürtünme Değerleri.....	52
Tablo 4.1. Yanca Ekseni Parametreleri.....	54
Tablo 4.2. PID Parametrelerinin Sisteme Etkisi .....	57
Tablo 4.3. Kural Tablosu .....	66
Tablo 4.4. Hız Kontrolcüsü PI Parametreleri.....	70
Tablo 4.5. Hız Kontrolcü Kural Tablosu .....	70
Tablo 4.6. Kaskad Kontrolcülerin PI Parametreleri.....	74
Tablo 4.7. Pozisyon Kontrolcü Kural Tablosu.....	74
Tablo 4.8. Hız Kontrolcüsü Akım ve Hata Sayısal Karşılaştırması.....	82
Tablo 4.9. Hız Kontrolcüsü Karşılaştırma Tablosu .....	83
Tablo 4.10. Pozisyon Kontrolcüsü Akım ve Hata Sayısal Karşılaştırması.....	88
Tablo 4.11. Pozisyon Kontrolcüsü Karşılaştırma Tablosu.....	88

## SİMGELER VE KISALTMALAR

$a_{r1}$	: Yoldan gimbale etki eden radyal ivmelenme, ( $m/s^2$ )
$a_{e1}$	: Yoldan gimbale etki eden eksenel ivmelenme, ( $m/s^2$ )
$a_{r2}$	: Araçtan gimbale etki eden radyal ivmelenme, ( $m/s^2$ )
$a_{e2}$	: Araçtan gimbale etki eden eksenel ivmelenme, ( $m/s^2$ )
$a_{eT}$	: Toplam eksenel ivme, ( $m/s^2$ )
$a_{rT}$	: Toplam radial ivme, ( $m/s^2$ )
$a_{yanca}$	: Yanca eksenel ivmelenmesi, ( $der/s^2$ )
$a_O$	: Dış gimbale ivmesi, ( $m/s^2$ )
$a_{OE}$	: Dış gimbale yere göre ivmesi, ( $m/s^2$ )
$a_{OEx}$	: Dış gimbale yere göre ivmesinin x eksenel bileşeni, ( $m/s^2$ )
$a_{OEy}$	: Dış gimbale yere göre ivmesinin y eksenel bileşeni, ( $m/s^2$ )
$a_{O Ez}$	: Dış gimbale yere göre ivmesinin z eksenel bileşeni, ( $m/s^2$ )
$a_{IE}$	: İç gimbale yere göre ivmesi, ( $m/s^2$ )
$a_{IEx}$	: İç gimbale yere göre ivmesinin x eksenel bileşeni, ( $m/s^2$ )
$a_{IEy}$	: İç gimbale yere göre ivmesinin y eksenel bileşeni, ( $m/s^2$ )
$a_{IEz}$	: İç gimbale yere göre ivmesinin z eksenel bileşeni, ( $m/s^2$ )
$A$	: Yanca açısı, ( $^{\circ}$ )
$a_I$	: İç gimbale ivmesi, ( $m/s^2$ )
$D_{statikdengesiz}^I$	: İç gimbale durağan haldeki yük dengesizliği, (Nm)
$D_{dinamikdengesiz}^I$	: İç gimbale hareket halindeki yük dengesizliği, (Nm)
$D_{statikdengesiz}^O$	: Dış gimbale durağan haldeki yük dengesizliği, (Nm)
$D_{dinamikdengesiz}^O$	: Dış gimbale hareket halindeki yük dengesizliği, (Nm)
$E$	: Yükseliş açısı, ( $^{\circ}$ )
$F_E$	: Yer referans eksenel
$F_M$	: Yer ve gimbale arasındaki referans eksenel
$F_B$	: Gimbale tabanı referans eksenel
$F_O$	: Dış gimbale referans eksenel
$F_I$	: İç gimbale referans eksenel
$F_{OI}$	: Dış gimbale iç gimbale uyguladığı kuvvet, (N)
$F_{IO}$	: İç gimbale dış gimbale uyguladığı kuvvet, (N)
$F_{BO}$	: Gimbale gövdesinin dış gimbale uyguladığı kuvvet, (N)
$F_C$	: Coulomb sürtünme kuvvet katsayısı
$F_N$	: Normal yük kuvveti, (N)
$F_{sc}$	: Coulomb sürtünme kuvveti, (N)
$F_{sv}$	: Viskoz sürtünme kuvveti, (N)
$F_v$	: Viskoz sürtünme katsayısı
$F_{st}$	: Stribeck kuvveti, (N)
$F_{Eksenel}$	: Yükseliş bütünü eksenel kuvveti, (N)
$F_{Radyal}$	: Yükseliş bütünü radial kuvveti, (N)
$F_{Aksenel}$	: Yanca bütünü eksenel kuvveti, (N)
$F_{Aradyal}$	: Yanca bütünü radial kuvveti, (N)

$g^E$	: Yer referans eksen takımına göre yer çekimi vektörü
$g^I$	: İç gimbalin yer çekimi vektörü
$g$	: Yer çekimi ivmesi, ( $m/s^2$ )
$H_o$	: Dış gimbalin pivot noktasındaki açısal momentum değişimi, (N.m.s)
$H_I$	: İç gimbalin pivot noktasındaki açısal momentum değişimi, (N.m.s)
$I_{yanca}$	: Yanca bütünüünün ataleti, ( $kg.m^2$ )
$i_a$	: Motorun armatüründen geçen akım, (A)
$J$	: Toplam atalet, ( $kg.m^2$ )
$J_i$	: İç gimbalin pivot noktasındaki atalet matrisi
$J_o$	: Dış gimbalin pivot noktasındaki atalet matrisi
$K_v$	: EMK sabiti, (V)
$K_t$	: Tork sabiti, ( $V/(rad/sn)$ )
$L_a$	: Sarım endüktansı, (L)
$M_T$	: Toplam moment, (N.m)
$M_{fr}$	: Sürtünme torku, (N.m)
$M_C$	: Coulomb kuvveti, ( $C^2m^{-2}N^{-1}$ )
$M_{IO}$	: İç gimbalin dış gimble uyguladığı moment, (N.m)
$M_{IOx}$	: İç gimbalin dış gimble x ekseninde uyguladığı moment
$M_{IOy}$	: İç gimbalin dış gimble y ekseninde uyguladığı moment
$M_{IOz}$	: İç gimbalin dış gimble z ekseninde uyguladığı moment
$M_{BO}$	: Gimbal gövdesinin dış gimble uyguladığı moment, (N.m)
$M_{BOx}$	: Gimbal gövdesinin dış gimble x ekseninde uyguladığı moment
$M_{BOy}$	: İç gimbalin dış gimble y ekseninde uyguladığı moment
$M_{BOz}$	: İç gimbalin dış gimble z ekseninde uyguladığı moment
$M_{mO}$	: Dış gimbal motorunun torku, (N.m)
$M_{mI}$	: İç gimbal motorunun torku, (N.m)
$M_{frOI}$	: iç ve dış gimballer arasındaki sürtünme torku, (N.m)
$m_o$	: Dış gimbalin kütlesi, (kg)
$m_I$	: İç gimbalin kütlesi, (kg)
$M_{OI}$	: Dış gimbalin iç gimble uyguladığı moment, (N.m)
$M_W$	: Açısal hız matrisi
$r_{PGI}$	: İç gimbalin pivot noktasından ağırlık merkezine pozisyon vektörü
$r_{PGIx}$	: Pozisyon vektörünün x eksenindeki bileşkesi
$r_{PGIy}$	: Pozisyon vektörünün y eksenindeki bileşkesi
$r_{PGIz}$	: Pozisyon vektörünün z eksenindeki bileşkesi
$r_{PGO}$	: Dış gimbalin pivot noktasından ağırlık merkezine pozisyon vektörü
$r_{PGOx}$	: Pozisyon vektörünün x eksenindeki bileşkesi
$r_{PGOy}$	: Pozisyon vektörünün y eksenindeki bileşkesi
$r_{PGOz}$	: Pozisyon vektörünün z eksenindeki bileşkesi
$T$	: Dönüşüm matrisi
$T_L$	: Motorun ürettiği tork, (N.m)
$V_{bemf}$	: Ters emk sabiti, (V)
$V_{ex}$	: Referans gerilim, (V)
$V_S$	: Stribeck hızı
$V$	: Hız, ( $rad/sn$ )
$Z$	: Kılcalların ortalama bükülme sayısı
$\delta_s$	: Stribeck şekil faktörü
$\mu$	: Coulomb sürtünme kuvveti, (N)

$\theta$	: Motor şaftının açısal hızı, (rad)
$\Sigma M$	: Toplam moment, (N.m)
$\Delta H_I$	: İç gimbalin pivot noktasındaki açısal momentum değişimi, (N.m.s)
$\Delta H_O$	: Dış gimbalin pivot noktasındaki açısal momentum değişimi, (N.m.s)
$\Psi$	: Yunuslama açısı, (°)
$\theta$	: Yuvarlanma açısı, (°)
$\phi$	: Sapma açısı, (°)
$\omega_{OE}$	: Dış gimbalin yere göre açısal hızı, (°)
$\omega_{OEx}$	: Dış gimbalin x eksenindeki açısal hız bileşeni, (°)
$\omega_{OEy}$	: Dış gimbalin y eksenindeki açısal hız bileşeni, (°)
$\omega_{OEz}$	: Dış gimbalin z eksenindeki açısal hız bileşeni, (°)
$\omega_{IE}$	: İç gimbalin yere göre açısal hızı, (°)
$\omega_{IEx}$	: İç gimbalin x eksenindeki açısal hız bileşeni, (°)
$\omega_{IEy}$	: İç gimbalin y eksenindeki açısal hız bileşeni, (°)
$\omega_{IEz}$	: İç gimbalin z eksenindeki açısal hız bileşeni, (°)

### **Kısaltmalar**

AKS	: Aktif Koruma Sistemi
APS	: Active Protection System (Aktif Koruma Sistemi)
ERA	: Explosive Reactive Armour (Reaktif Zırh)
ATGM	: Anti Tank Guided Missile (Güdümlü Anti Tank Füze)
LRF	: Laser Range Finder (Lazer Mesafe Ölçer)
LD	: Laser Designate (Lazer Hedef İşaretleyici)
ID	: Indirect Radiation (Dolaylı Işıma)
LBR	: Laser Beam Rider (Lazer Hüzmesi)
EFP	: Explosive Formed Penetrator (Parçacık Tesirli Patlayıcı)
FLC	: Fuzzy Logic Controller (Bulanık Mantık Kontrolcü)

## ZIRHLI ARAÇLAR İÇİN GİMBAL AKTİF KORUMA SİSTEMİ TASARIMI VE KONTROLÜ

### ÖZET

Gelişen teknolojinin etkisiyle savunma sanayisindeki tehdit ve önlem teknolojisinde rekabet ortaya çıkmıştır. Savaş sahalarında ve meskun mahal ortamlarında kullanılan zırhlı araçlar çeşitli tehditlere hedef olmaktadır. Aktif Koruma Sistemleri (AKS), savaş sahalarındaki zırhlı personel taşıyıcı ve tankların, durumsal farkındalığını sağlamak ve beka kabiliyetlerini arttırmak için geliştirilmektedirler. AKS dışarıdan gelecek tehdidi tespit eder ve savunduğu platformu koruyacak tedbirleri alır. Tehdit, güdümsüz roketler veya güdümlü anti-tank füzeleri olabilir. AKS'nin lançer mekanizmaları bulunduğu platformda 360° koruma sağlayabilecek sistemler olarak tasarlanır. AKS'lerin yüksek hızlarda gelen tehditlere en kısa reaksiyon süresinde karşılık verebilmesi gerekmektedir. Bundan dolayı bu sistemler iki serbestlik derecesine sahip gimbal yapılarda tercih edilmektedir. Gimbal'in faydalı yükü mühimmat taşıyıcı olarak kullanılan lançerlerdir. Bu çalışmada AKS görevi görecektir 2 serbestlik dereceli bir gimbal tasarımı yapılmıştır. Gimbal aktif koruma sistemindeki yanca ekseninin kısa zamanda istenilen pozisyonlara yönlendirilmesi bir denetim problemi olarak ele alınmış ve çalışmalar yapılmıştır. Belirtilen kapsamda bir gimbal AKS'nin eksen takımları tanımlanmış ve bu eksen takımlarına göre hareket denklemleri çıkartılmıştır. Lagrange-Euler yöntemi kullanılarak gimbalin dinamik denklemleri elde edilmiştir. Gimbal sisteminin matematiksel denklemleri kullanılarak MATLAB SİMULİNK ortamında sistem modeli oluşturulmuştur. Sistemi kontrol etmek için Kaskad Adaptif Bulanık Mantık PID kontrolcü ve Kaskad Klasik PID kontrolcü algoritmaları tasarlanmıştır. Ardından sistemin hem benzetimi hem de gerçek zamanlı kontrolü her iki kontrol algoritması ile kontrol edilmiştir. AKS'deki dış gimbalin en geç tepki vereceği pozisyon olan 0 ile 180 derece arasında pozisyon kontrolü yapılmıştır. Kontrolcüler bu iki pozisyon arasındaki açı değerlerinde çalıştırılmış ve performansları karşılaştırılmıştır. Bu bağlamda tasarlanan denetim sistemi algoritmalarıyla AKS'nin pozisyon kontrolünün iyileştirilmesi sağlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Aktif Koruma Sistemi (AKS), Gimbal, Kaskad Adaptif Bulanık Mantık PID Kontrolcüsü, Kaskad Klasik PID Kontrolcü, Lançer.

## **DESIGN AND CONTROL OF GIMBAL ACTIVE PROTECTION SYSTEM FOR ARMoured VEHICLES**

### **ABSTRACT**

Due to the advancing technology, threat and defense technology competition has emerged in the defense industry. Various threats target armored vehicles which used in battlefield and residential areas. Active Protection Systems (APS) are developed to provide situational awareness of armored personnel carriers and tanks in the battlefields and to increase their survivability. APS detects the threat coming from outside and takes measures to protect the platform which it defends. Threats can be unguided rockets or anti-tank guided missiles. APS's launcher mechanisms are designed as systems that can provide 360 ° protection on the platform where it is located. APSs must be able to respond to threats at high speeds in the shortest reaction time. Therefore, these systems are preferred in gimbal structures with two degrees of freedom. The payload of the gimbal is the launchers used as an ammunition carrier. In this study, a gimbal design with 2 degrees of freedom was made to work as an APS ammunition launcher. Direction of the azimuth axis of the gimbal active protection system to the desired positions in a short time has been considered as a control problem and studies have been done. In this context, the axes of a gimbal APS are defined and the equations of motion according to these axes are extracted. Using the Lagrange-Euler method, the dynamic equations of the gimbal are obtained. System model was created in MATLAB-SIMULINK by using mathematical equations of Gimbal system. Cascade Adaptive Fuzzy Logic PID controller and Cascade Conventional PID controller algorithms are designed to control the system. Then both the simulation and the real-time control were controlled by both control algorithms. Position control of outer gimbal in the APS was performed at between 0 and 180 degree where APS will react at the latest. Controllers were operated at the angle values between these two positions and their performance was compared. In this context, the position control of outer gimbal in the APS has been improved with the designed control system algorithms.

**Keywords:** Active Protection System (APS), Gimbal, Cascade Adaptive Fuzzy Logic PID Controller, Cascade Conventional PID Controller, Launcher.

## GİRİŞ

Dünya üzerindeki bütün orduların ellerinde bulundurdukları kara gücünün temeli piyade birlikleridir. Tank ve paletli zırhlı personel taşıyıcıların temel görevleri bu piyade birliklerini korumak ve birliklerin istenilen bölgelere güvenli ulaşımını sağlamaktır. Zırhlı araçların kullanımı kadar beka kabiliyetleri de yüksek önem arz etmektedir. Zırhlı araçlar hedef olmayı engellemek ya da zorlaştırmak, düşmanın kendisine isabet edecek bir atış konumuna geçmesini engelleyecek veya hedef haline gelen zırhlı aracın bu durumdan mümkün olduğunca az hasar alarak kurtulmasının sağlanması gerekmektedir. Aktif koruma sistemleri zırhlı araçların bu tehditlere karşı beka kabiliyetlerini arttıran sistemlerdir. Özellikle savaş alanlarında zırhlı araçlara gelebilecek roket, güdümlü füze gibi tehditleri bertaraf etmek için kullanılmaktadırlar. Aktif koruma sistemlerinin tarihteki gelişimlerine bakıldığında dünyadaki ilk örnek Rusların 1977 ve 1982 yılları arasında geliştirmiş olduğu Drozd adı verdikleri aktif koruma sistemidir. Drozd ilk olarak Sovyet Afganistan savaşında T-55A tanklarına entegre edilerek kullanıldı. Sistem anti-tank mühimmatlara karşı %80 oranında başarı sağladı. Drozd aktif koruma sistemi geliştirildiği yıllarda maliyeti 30.000 \$ olduğu görülmektedir [1]. Aktif koruma sistemleri farklı yapılarda olabilir. Tarihteki ilk örneklere bakıldığında koruyacağı platforma sabit bir şekilde monte edilen podları ile görevini icra ettiği görülmektedir [2]. Fakat günümüzde koruyacağı platformun etrafında 360 derecelik yarım küre koruma hattı sağlayabilmek için genellikle 2 serbestlik dereceli sistemler olarak tasarlanırlar. Tasarımı için platformun üzerinde çoğunlukla bir gimbal yapısında olması tercih edilir. Gimbal tercihindeki en önemli sebep istenilen açığa en kısa sürece ve en yüksek doğrulukta yönelerek reaksiyon süresinin minimize edilmek istenmesidir.

Bu çalışma kapsamında belirli gereksinimler göz önünde tutularak gimbal bir yapıya sahip aktif koruma sistemi tasarlanmıştır. 2 serbestlik dereceli bir gimbal yapısal tasarımı yapılmış ve katı modelleme programlarıyla 3 boyutlu modeli oluşturulmuştur. Gerekli hesaplamalar yapılarak mekaniğin alt sistemleri belirlenmiş ardından alt sistemlerin isterlerine göre tasarım gerçekleştirilmiştir. Sistemin en önemli hareket

ekseni olan yanca ekseninin denetim çalışmaları çalışmaları yapılmıştır. Bu sistemdeki yanca elektrik motorunun kontrolü Klasik Oransal-integral-türev (PID) kontrolcü ve Adaptif Bulanık Mantık PID Kontrolcü (Adaptive Fuzzy Logic Controller) ile yapılmıştır. Bu iki kontrolcü kaskad yapıda tasarlanarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu tezde yapılan çalışmalar 5 ana başlık altında incelenmiştir.

1. bölümde aktif koruma sistemlerinin yapısına, dünyadaki örneklerine ve kullanım alanlarına değinilmiştir. Aktif koruma sistemlerinin alt sistemleriyle ilgili bilgiler verilmiş ve farklı firmalara ait alt sistemlerin ürünleri anlatılmıştır.

2. bölümde aktif koruma sisteminin sistem tasarımı anlatılmıştır. 3 boyutlu katı modellemesi yapılan sistemin mekanik tasarım detaylarına değinilmiştir. Modelleme yapılırken dikkat edilen hususlar, katı modelde kullanılan malzemeler ve modelin askeri standartlara uygunluğuna değinilmiştir. Kullanılan elektronik altyapı anlatılmış ve ekipmanlar tanıtılmıştır.

3. bölümde gimbal yapıya sahip olan aktif koruma sisteminin matematiksel denklemleri anlatılmıştır. Sırasıyla referans eksenler, kinematik eşitlikler ve dinamik eşitlikler elde edilmiştir.

4. bölümde gimbal bir sistemin aktif koruma sistemi gereksinimleri göz önünde bulundurularak sistem modellenmiş, farklı kontrolcüler kullanılarak sistem benzetimi yapılmış ve gerçek sistemde de karşılaştırılabilir olması için aynı kontrolcülerle aynı testler yapılmıştır.

5. bölümde bütün bu çalışmalar sonucunda elde edilen bilgiler yorumlanmıştır. İleride yapılabilecek iyileştirmeler ve çalışmalar sunulmuştur.



## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Aktif Koruma Sistemlerinin Tanımı

Savaş sahalarında kullanılan zırhlı araçlar beka kabiliyetlerini sağlayabilmek için zırhlarının yanı sıra reaktif zırhlardan (ERA) faydalanmaktadırlar. GÜdümlü Anti-Tank füzelerinin (ATGM- Anti Tank Guided Missiles) gelişmesiyle reaktif zırhlar savaş sahalarında yetersiz kalmaya başlamıştır. Bu nedenle reaktif zırhtan doğacak zaafiyeti giderebilmek için zırh kalınlıklarının artırılma ihtiyacı ortaya çıktı. Yeni nesil ana muharebe tankları yaklaşık olarak 60-70 ton ağırlıkları arasında olmaktadır. Zırh kalınlığının artırılması zırhlı araçları daha da ağırlaştırarak hareket kabiliyetlerini düşürmektedir. Bu nedenle zırhlı araçlar ağırlıklarının hafifletilebilmesi için zırh kalınlıkları en fazla tabanda en az ise tavan bölgesinde olacak şekilde konfigüre edilmektedir. Fakat geliştirilen ATGM'ler tepeden dalış olarak ta tabir edilen hedefine yaklaşık 15-20 metreden yani tankı üst kaidesinden etkisiz hale getirebilmektedirler. Aktif Koruma Sistemlerine bir diğer alternatif ise kafes yöntemidir. Korunacak aracın üzeri özel yapılmış bir kafes zırh ile örülerek saldırı anında üzerine gelen tehdit mühimmatın araçtan önce kafeslere çarparak yıkıcı etkisini zayıflatılması esasına dayalı olarak çalışır. Zırhlı araçların nakliyesinde çoğunlukla hava yolu kullanılmaktadır. Üzerinde kafes zırh bulunan bir zırhlı araç uçağa yüklenmeden önce hava taşımacılığı alan öncelikli olduğundan kafes zırh sökülür ve ulaştığı yerde tekrar entegrasyonu yapılır. Bu sökülme ve takılma işlemi yaklaşık 100 saat sürecek bir vakit kaybı yaratmakta ve aracın istenen alana intikal sürecini geciktirmektedir. Bunun yanında kafes zırh rpg mühimmatlarına karşı başarılı olurken bazı ATGM'lere karşı etkisiz kalmaktadır [3]. Kafes zırh (slat-armor) yöntemi günümüzde de kullanılmaktadır.

Şekil (1.1)'de kafes zırhlı personel taşıyıcı görülmektedir [4].



Şekil 1.1. Kafes Zırhlı Personel Taşıyıcı

Zırh ve kafes sisteminde bulunan zafiyetler aktif koruma sistemlerinin geliştirilmesine zemin hazırlamıştır.

Literatürde aktif koruma sistemleri ve savunma sistemleri için farklı çalışmalar yapılmıştır ve bu sistemlerin kontrol yöntemleri çalışılmıştır. Aktif koruma sistemleri için literatür taraması aşağıda anlatılmıştır.

P. We V. Fleck ve P. Y. Chanteret [5], yaptıkları çalışmada Rus yapımı ARENA isimli aktif koruma sisteminin yapısını anlatmıştır. ARENA aktif koruma sisteminde kullanılan mühimmat modelini incelemişlerdir. Bu mühimmat modelinin analizini yapmışlardır. Aktif koruma sistemlerinin yeterli ölçütünü test edecek bilgisayar tabanlı ATHENA isimli bir analiz metodundan bahsetmişler.

C. Döğüşgen, E. Kılıçaslan ve Ö. Ertekin [6], yaptıkları çalışmada bir kara platformu için aktif koruma sisteminin nasıl olacağını, özelliklerini, çalışma mantığını ve çeşitlerini anlatmışlardır. Ateşlenen bir roketin parametrelerini kullanarak aktif koruma sisteminin bu roketi etkisiz hale getirmesi için gerekli hesaplamaları yapacak algoritmayı oluşturmuşlar.

H. Kamışlı, M. Salamcı ve B. Özkan [7], yaptıkları çalışmada 2 serbestlik derecesine sahip bir savunma sisteminin dinamik denklemlerini Newton-Euler yöntemini kullanarak çıkarmışlar. Bu denklemlerden yola çıkarak sistemin durum-uzayını elde etmişler. Sistemin denetimini için PID ve hesaplanan tork denetçisi kontrolcülerini

tasarlamışlar. Sistem benzetimi yaparak iki kontrolcünün karşılaştırmasını yapmışlar.

A. Feickert [8], yaptığı çalışmada Aktif Koruma Sistemlerini detaylı bir şekilde incelemiş ve geçmişteki örneklerle çalışma mantığını anlatmış. Alt sistemlerine ve günümüzdeki aktif koruma sistemlerini tanıtmış. Aktif koruma sistemlerini aldatmak için tasarlanan silahlara değinmiş.

Vivek.R, Dr. J. Roopchand [9], yapmış olduğu çalışmada aktif koruma sistemlerinin günümüzdeki örneklerini anlatmış ve gelecekte gerekli olacak ek önlemleri açıklamış. Tehitlerin güdüm çeşitlerini ve gelecekteki tiplerini anlatmış. Alt sistemlerin reaksiyon sürelerini, dünyadaki aktif koruma sistemi üreticilerini ve ürünlerini anlatmış.

B. Özkan [10], yapmış olduğu çalışmada 2 serbestlik dereceli bir fırlatma sistemini 2 bütüne ayırarak incelemiş. Lagrange-Euler yöntemini kullanarak hareket denklemlerini çıkarmış. PID kontrol ve Hesaplamalı Tork Yöntemini kullanarak kontrolcü tasarımları yapmış. Çeşitli atış senaryoları altında bu iki kontrolcünün başarımlarını karşılaştırmış.

Z. Dziopa, I. Krzysztofik ve Z. Koruba [11], yaptıkları çalışmada 2 serbestlik dereceli bir savunma sistemi mühimmatının hareketli bir kara platformu üzerindeki davranışını analiz etmişler. Sistemin matematiksel modelini çıkarmışlar. Atış sırasında kule ve mühimmatın ivme ve hız bilgilerini analiz etmişler.

Gimbal yapılardan oluşan askeri sistemler için literatürde pek çok kontrolcü tasarımı çalışmaları mevcuttur. Gimbal ve iki serbestlik dereceli sistemler için literatür taraması aşağıdaki gibidir.

Valentine Obiora ve Ifeyinwa E. Achumba [12], yaptıkları çalışmada hava araçlarında gözlem ve keşif amaçlı kullanılan gimbal yapıya sahip bir görüş sistemini Bulanık Mantık PID kontrolcü (Fuzzy Logic PID Controller) ile hız ve pozisyon kontrolü yapmışlar. Gimbalin dinamik denklemlerini Euler-Lagrangian metodunu kullanarak kinetik enerji ve potansiyel enerji farkından elde etmişler. Sistem modeli olarak doğru akım motor modelini kullanmışlar. Ve bu model üzerinde benzetim yapmışlar.

R. J. Rajesh ve Dr. C. M. Ananda [13], yaptıkları çalışmada insansız hava araçlarında görüş sistemi olarak kullanılacak 2 serbestlik derecesine sahip bir gimballi

incelemişler. Geliştirdikleri PID kontrolcüyle gimbal eksenleri için pozisyon kontrolcüsü tasarlamışlar. Sistem modelini doğru akım motoru üzerinden elde etmişler. PID parametrelerini Ziegler Nichols ve Cohen Coon methodlarını kullanarak bulmuşlar.

M. Abdo, A. Vali, A. Toloei ve M. Arvan [14], yaptıkları çalışmada gimbal yapıdan oluşan bir tarayıcı kameranın pozisyon kontrolünü geliştirdikleri bulanık mantık PID kontrolcü ile yapmışlar. Kinetik ve dinamik denklemlerini çıkarmışlar. Transfer fonksiyonunu oluşturdukları modelin stabilizasyon çalışmasını yapmışlar.

T. Öztürk [15], yapmış olduğu çalışmada 2 eksen bir gimbal platformu incelemiş. Sistemin kinematiklerinden elde ettiği dönüşüm matrisleriyle dinamik eşitliklerde açışal hız ve ivme bilgilerine ulaşmış. Gimbalin sistem benzetimini bu dinamik denklemler vasıtasıyla bulmuş. Gimbalin iki eksen arasında oluşacak sürtünme değerlerini matematiksel modelleyerek sistem modeline dahil etmiş. Yapılan bu çalışmada Öztürk ivme geri beslemesiyle stabilizasyon hassasiyetini iyileştirmeyi başarmış.

E. Poyrazoğlu [16], yapmış olduğu çalışmada 2 serbeslik dereceli bir gimbal sisteminin detaylı modellemesini yapmış. Gimbalin çalışmasında kullanılan alt sistemleri, motor modeli ve jiroskop biriminin modellerini çıkarmış. Gimbal kinetik ifadelerinden yola çıkarak dinamik denklemleri ortaya koymuş. Poyrazoğlu geliştirmiş olduğu Kaskad PI kontrolcü ile iç gimbal ve dış gimbalin elektrik motorlarının pozisyon kontrolünü sağlamış.

Aktif koruma sistemleri işlevlerine göre 2 gruba ayrılmaktadır. Hayati öneme sahip bu sistemler dışarıdan gelen tehdidi yanıltma-saptırma amaçlı (soft-kill) ve gelen tehdit mühimmatını imha etme amaçlı (hard-kill) olmak üzere ikiye ayrılırlar.

### **1.1.1. Yanıltıcı tedbir (Soft-Kill)**

Soft-Kill koruma konsepti hedef işaretleme sistemlerine karşı sis veya termal parçacıklarla kara muharebe aracının etrafında gizlenme örtüsü oluşturur. Kara platformuna yönlendirilmiş düşman tehdidini fiziksel hasara uğratmadan aldatma, karıştırma gibi tekniklerle hedefinden saptırarak bertaraf edilmesi yöntemine dayalı çalışmaktadır. Yanıltıcı tehdidin ilk örneklerinde sis perdesi oluşturmak için, tankın

yakıt deposundan egzoz borusuna dökülen yakıtın yanmasından yararlanılmıştır. Fakat günümüz teknolojisinde araç gövdesine veya kule sistemine entegre edilmiş lançerler aracılığı ile sis havanı atışı yapılarak sis perdesi oluşturulması sağlanmaktadır. Soft - Kill sistemi temel olarak üzerine gelen güdüm işaretlerini tespit eden elektro-optik algılayıcılar, sis veya termal parçacık bombaları gibi karşı önlem mühimmatları, lançerler ve atış kontrol bilgisayarından meydana gelmektedir. Bunun yanında lazer ve kızılötesi güdümlü mühimmatların, yanıltıcı sinyallerle saptırılmasını sağlayan sinyal karıştırıcılar (jammer) gibi sistemlerde Soft-Kill aktif koruma sistemleri içinde yer almaktadır. Şekil (1.2)'de KMW firmasına ait 4X4 zırhlı aracın Soft-Kill testindeki termal parçacık havanlarının ateşlendiği görülmektedir.[17]

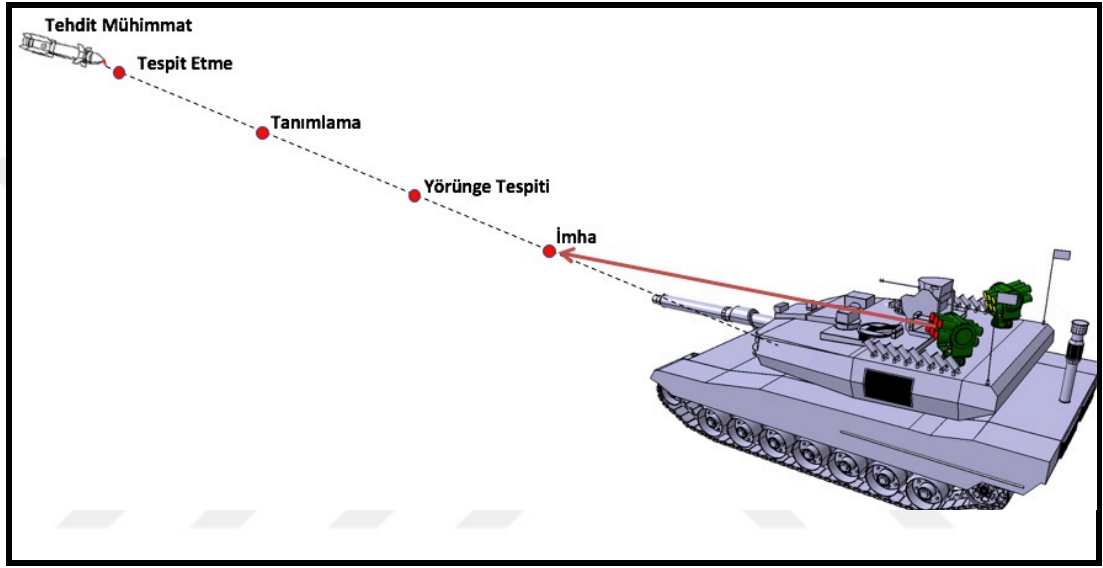


Şekil 1.2. Yanıltıcı Tedbir Mühimmatlı ZPT

### 1.1.2. Fiziksel imha edici tedbir (Hard-Kill)

Fiziksel imha etme özelliğine sahip aktif koruma sistemleri dışarıdan gelecek farklı güdüm tekniklerine sahip mühimmatları etkisiz hale getirerek bulunduğu platformu koruma görevini yerine getirir. Sistem içinde bulunan güdüm işaretlerini algılayan sensörler, gelen mühimmatın hız, yön ve açı bilgilerini almamızı sağlayan doppler radar sensörleri bulunur. Fiziksel imha edici aktif koruma sistemi; sensör verilerini işleyerek mühimmatın etkisiz hale getirilmesi gereken uygun şartları hesaplayan atış kontrol bilgisayarından, akıllı mühimmatlardan ve lancer mekaniğinden meydana gelmektedir. Gelişmiş güdümlü anti-tank mühimmatları uzak mesafelerden ateşlenebilmekte ve yüksek hızlarla hedefine yönlenebilmektedir. Örnek olarak tehdidi oluşturacak silahlara baktığımızda şimdiye kadar savaş sahasında yaygın olarak kullanılan AT-11 Sniper lazer ışını (laserbeam) ile güdümlenmektedir ve 5000 metre etkili menziline sahiptir. AT-13 Metis-M füzesi tel güdümü sayesinde sürekli kontrolü

yapılabilir, 255 m/s hıza ve 5500 m etkili menzile sahiptir. TOW 2A 2750 metre menzile 235 m/s hıza sahiptir.[18] Fiziksel imha edici aktif koruma sisteminin çalışma safhaları Şekil (1.3)'te gösterildiği gibidir. Fiziksel imha edici tedbir olarak kullanılan mühimmatlar parçacık etkili olduklarından patladıklarında etrafındaki piyade birliklerine zarar verebilirler. Bu durumun engellenmesi için tehdit mühimmat tespit etme safhasındayken aktif koruma sistemi siren sesi ile etrafındaki piyade birliklerini uyarır. Piyade birlikleri önlemler alarak kendilerini bu tehlikeden korurlar.



Şekil 1.3. Fiziksel İmha Edici Sistemin Çalışma Safhaları

## 1.2. Aktif Koruma Sisteminin Çeşitleri ve Kullanım Alanları

Zırhlı araçlara entegre edilmiş olan aktif koruma sistemleri yoğun olarak savaş sahalarında kullanılmaktadır. İhtiyaç gereği çoğunlukla tanklar ve zırhlı personel taşıyıcılarında kullanılsalarda küçültülerek daha modüler hale getirilen aktif koruma sistemleri 4x4 araçlar başta olmak üzere iş makinaları ve binek araçlarda da kullanılmaktadırlar. Örnek olarak Rheinmetall firmasının 4X4 araçlar ve iş makinalarında kullanılmak amacıyla ürettiği aktif koruma sistemi Şekil (1.4)'te gösterilmiştir.



Şekil 1.4. Personel Taşıyıcı ve Kamyonlar İçin Geliştirilen Koruma Sistemleri

Bu örneklerin yanında aktif koruma sistemleri daha modüler hale getirilerek kule sistemleri üzerinde de kullanılmaktadırlar. Şekil (1.5)'te General Dynamics firmasına ait aktif koruma sistemi konsept tasarımı gösterilmiştir.



Şekil 1.5. Bright Arrow- General Dynamics

### 1.3. Aktif Koruma Sisteminin Alt Sistemleri

İmha edici aktif koruma sistemlerinin fiziksel imha edici tedbir (Hard-Kill) yapısı temelde 4 adet birimden oluşmaktadır. Sistemin sinir ucu olarak nitelendirilen lazer algılayıcılar ve doppler radarlar dışarıdan yönelen tehditleri ilk fark eden ve aksiyon alan sistemlerdir. Bu sensörlerden gelen bilgileri işleyen bir atış kontrol bilgisayarı bulunur. Gelen düşman mühimmatı etkisiz hale getirecek mühimmatı göndermek için çoğunlukla gimbal'den oluşan bir lançer taşıma platformu bulunur.

#### 1.3.1. Lazer algılayıcı

Aktif koruma sisteminin başarı sağlayabilmesi için dışarıdan gelecek tehdidin cinsine ve güdümlü bir tehdit ise güdüm çeşidine hazırlıklı olması gerekmektedir. Özellikle anti-tank mühimmatlarının güdüm işaretleri farklı optik bantlardaki Lazer Mesafe Ölçer (LRF – Laser Range Finder), Lazer Hedef İşaretleyici (LD – Laser Designate), Dolaylı Işıma (ID-Indirect Radiation) ve Lazer Hüzmesi (LBR-Laser Beam Rider) gibi tehditleri üzerindeki optik sistemlerinin dedektörleri sayesinde tespit ve teşhis ederek atış kontrol bilgisayarına ileten elektronik sistemlerdir.



Şekil 1.6. Aselsan Lazer İkaz Sistemi

Bir kara aracının AKS'sinde kullanılan lazer algılayıcıların 360 derece algılama yapabilmesi hedeflenir. Bu nedenle Şekil (1.6)'daki Aselsan ürünü gibi lazer uyarı sistemi türlerinde sensörlerin yanca ve yükseliş bakış açıları dikkate alınarak entegrasyon sağlanır.[21]



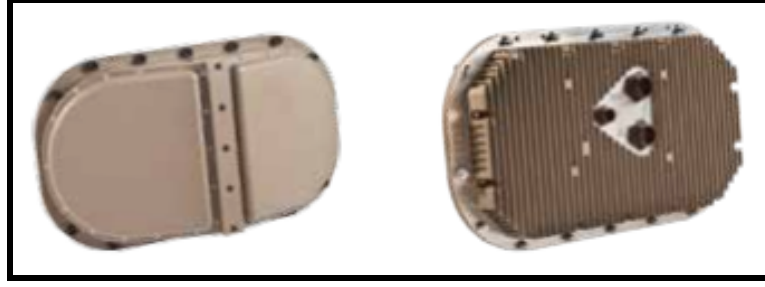


Şekil 1.7. Thales Firmasına Ait Lazer Algılayıcı Sensörü

Günümüzdeki bazı sensörler aracın köşe noktalarına yatayda yaklaşık +90-190 derece dikeyde ise +40-40 derece görüş açlarına sahip olabilmektedirler. Şekil (1.7)'de Thales firmasına ait lazer algılayıcı görülmektedir.[22] Günümüzdeki lazer algılayıcıların tepki süresi yaklaşık 20 ile 800 milisaniye arasında lazer algılama menzilleri ise 5-15 km arasında değişmektedir.[23]

### 1.3.2. Radar

Günümüzde yaygın bir radar türü olan doppler radarlar, doppler etkisini kullanarak belirli mesafelerdeki nesnelerin hız verisinin üretilmesini sağlayan özel radarlardır. Nesneye gönderilen mikrodalga sinyalinin geri yansımalarıyla arasındaki frekans farkını analiz eder. Bu analiz sonucunda hedefin hızının radyal bileşenini hassas bir şekilde tespit eden elektronik radar sistemleridir [24]. Aktif koruma sistemlerinde darbeli doppler (Pulse Doppler) radar olarak bilinen çeşitleri kullanılmaktadır. Darbeli doppler radar, nabız zamanlama tekniklerini kullanarak bir hedef aralığını belirleyen ve hedef nesnenin hızını belirlemek için geri dönen sinyalin doppler etkisini kullanan bir radar sistemidir. Pulse-Doppler radarı ayrıca radar astronomi, uzaktan algılama ve haritalamada kullanılan sentetik diyafram radarının temelidir. Hava trafik kontrolünde, uçakları dağınıklığından ayırmak içinde kullanılırlar[25]. Şekil (1.8)'de İsrail'e ait RADA firmasının geliştirmiş olduğu mühimmat tespit radarı görülmektedir [26].



Şekil 1.8. RADA Elektronik Firmasına Ait Doppler Radar

### 1.3.3. Atış kontrol bilgisayarı

Mühimmat atışı yapılmadan önce çevresel faktörlerden aldığı verileri, mühimmatın balistik verilerini göz önünde bulundurarak işleyen ve bunlarında sonucunda tehdit mühimmatın izleyeceği yörüngeyi belirleyen elektronik birimlerdir. Atılacak olan mühimmatın izleyeceği yörünge için gimbal içerisinde bulunan elektrik motorlarını kontrol eden sürücülere ihtiyaçları olan komutları gönderir.

Atış kontrol bilgisayarları çevresel şartlarla ilgili bilgileri meteorolojik sensörlerden alır. Eğer sistemde elektro-optik görüş sistemi varsa bu birimden gündüz görüş kamerası, termal kamera ve lazer mesafe ölçer bilgilerini elde eder. Bunların yanında ataletsel ölçme birimleri jiroskop ve ivme ölçerler yardımıyla da anlık değişimler balistik hesaplamalarda kullanılır. Atış kontrol bilgisayarı çoğu zaman atış sisteminin dahil olduğu askeri araçlarda tek başına bulunur ve aracın jiroskop sisteminden gelen verileride kullanarak atış yapılan sistemin maksimum doğrulukta görevini yerine getirmesini sağlar.

### 1.3.4. Fiziksel imha edici ve yanıltıcı mühimmat

Aktif koruma yanıltıcı tedbir (soft-kill) sistemlerinde yanıltıcı mühimmat olarak sis ve termal parçacık havanları bulunur. Şekil (1.9)'da KMW firmasının yanıltıcı tedbir sistemi (wegmann-protection system) 76mm'lik sis havanları gösterilmiştir.



Şekil 1.9. KMW firmasına ait sis havanı lançerleri

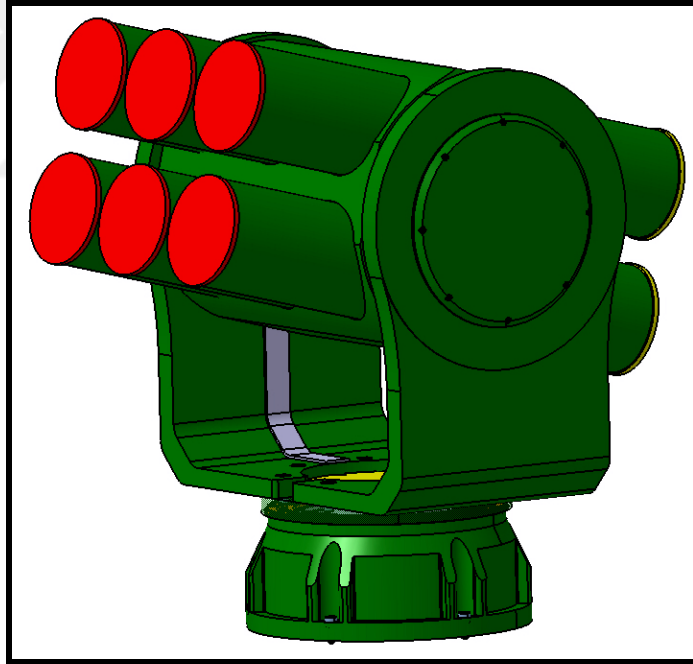
Hard-kill sistemlerde ise parçacık etkili mühimmatlar bulunmaktadır. Parçacık etkili mühimmatlar günümüzdeki AKS'lerde gereksinime göre tasarlanmıştır. Genellikle bir pod içerisine yerleştirilen fiziksel imha edici tedbir (Hard-kill) mühimmatları parçacık etkili patlayıcılardan (EFP-Explosive Formed Penetrator) oluşmaktadır. Şekil (1.10)'da gösterilen Denel firmasının Mongoose1 isimli ürünüdür.[27] İlgili mühimmat SAAB aktif koruma sisteminde kullanılmaktadır.



Şekil 1.10. Hard-Kill Mühimmat

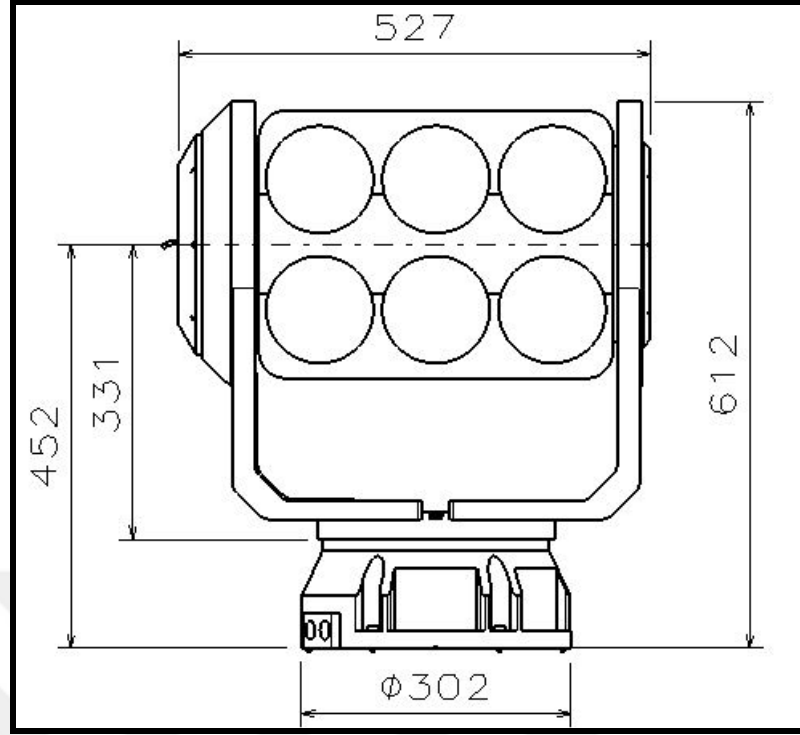
## 2. SİSTEM TASARIMI

Tasarım çalışmasında sistemin askeri standartlara uygunluğu göz önünde tutulmuştur ve birimler bu standartlara göre seçilmiştir. Zırhlı araçlarda kullanılan aktif koruma sistemleri kullanımlarından dolayı koruyacakları araçların kaidelerine veya tavanlarına entegre edilirler, bu yüzden sistemler zorlu savaş sahalarında düşman ateşiyle vurulma ve yanma gibi durumlarla karşı karşıya kalabilirler. Bu bağlamda tasarım çalışması yapılırken seçilecek malzeme ve ekipmanlar bu zorlu koşullara uygun seçilmiştir ve tasarlanmıştır. Sistemin tasarım çalışmaları mekanik ve elektronik olarak iki bölümde incelenmiştir. Tasarımı yapılan sistemin katı model görseli Şekil (2.1)'deki gibidir.



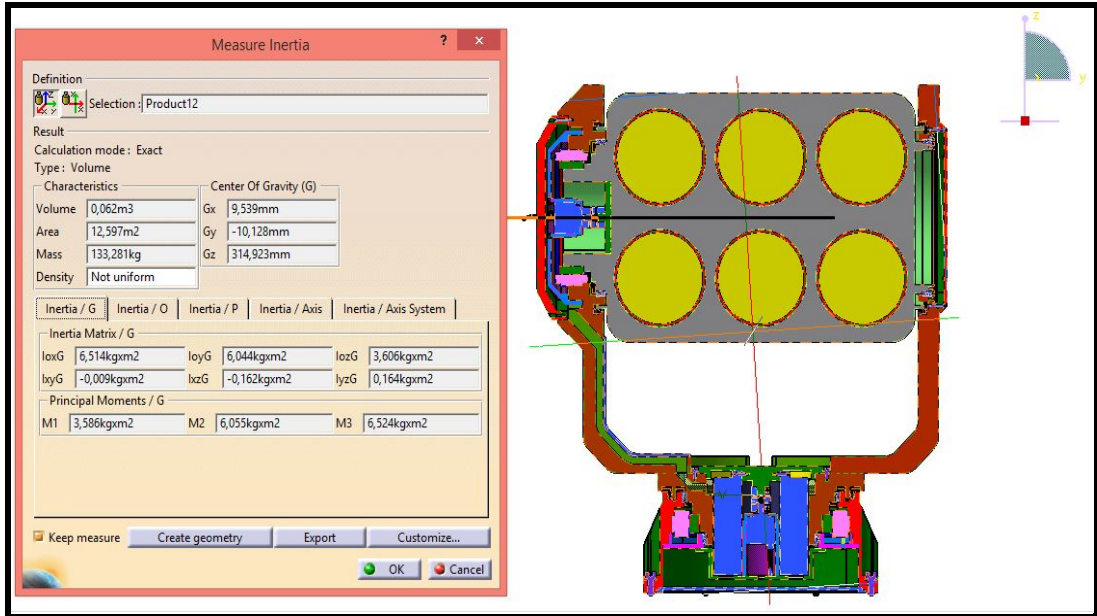
Şekil 2.1. Tasarımı Yapılan Gimbal Aktif Koruma Sistemi

Tasarlanan bu sistemin ana ölçüleri Şekil (2.2)'deki gibidir. Sistem tasarlanırken düşük silüete sahip olması ve hafif olması tasarım kriteri olarak dikkate alınmıştır.



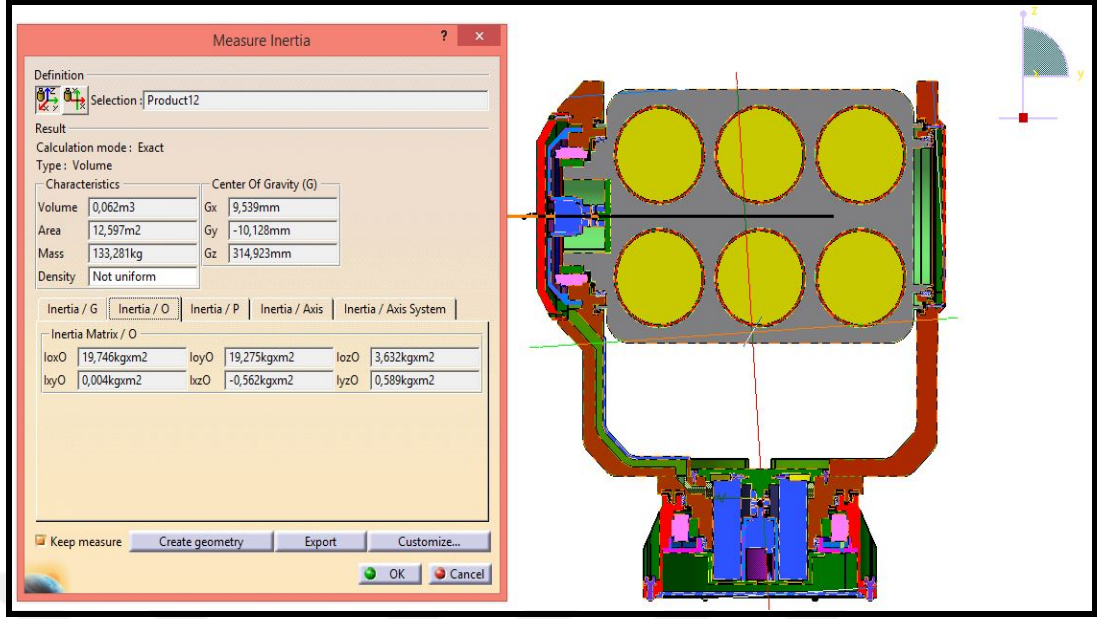
Şekil 2.2. Sistemin Ana Ölçüleri

Sistemin ağırlık bilgisi, ağırlık merkezi koordinatları ve ağırlık merkezine göre atalet momenti değerleri Şekil (2.3)'teki gibidir.



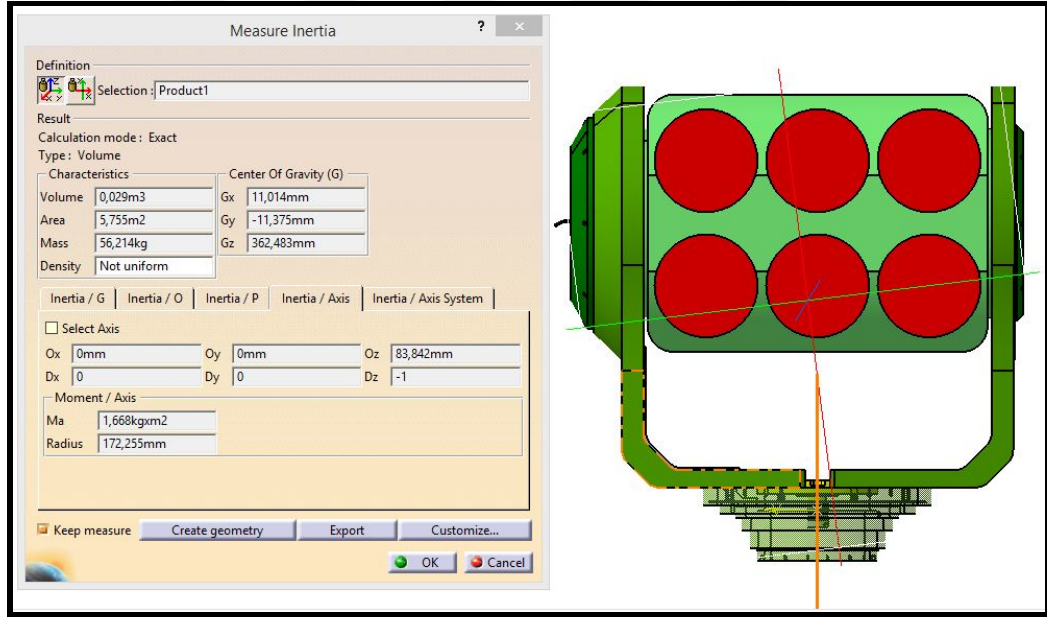
Şekil 2.3. Sistemin Ağırlık Merkezi ve Ataleti

Sistemin koruyacağı platform ile bağlantı noktası olan gimbal tabanına göre ataleti Şekil (2.4)'teki gibidir.



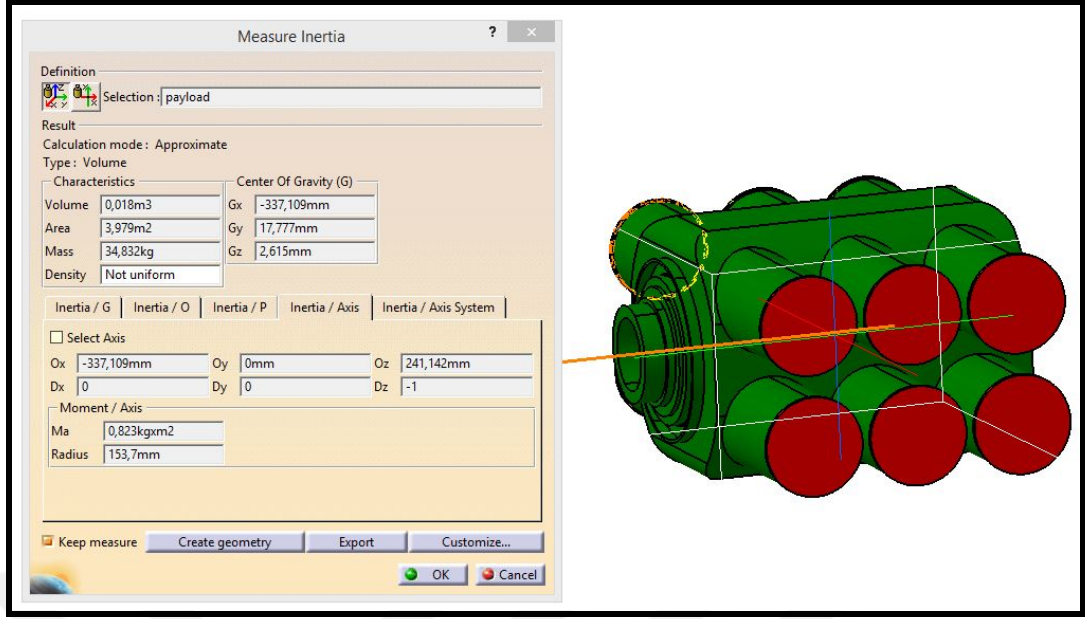
Şekil 2.4. Sistemin Bağlantı Yüzeyine Göre Ataleti

Sistemin yanca bütününe ait atalet ve ağırlık değerleri Şekil (2.5)'deki gibidir.



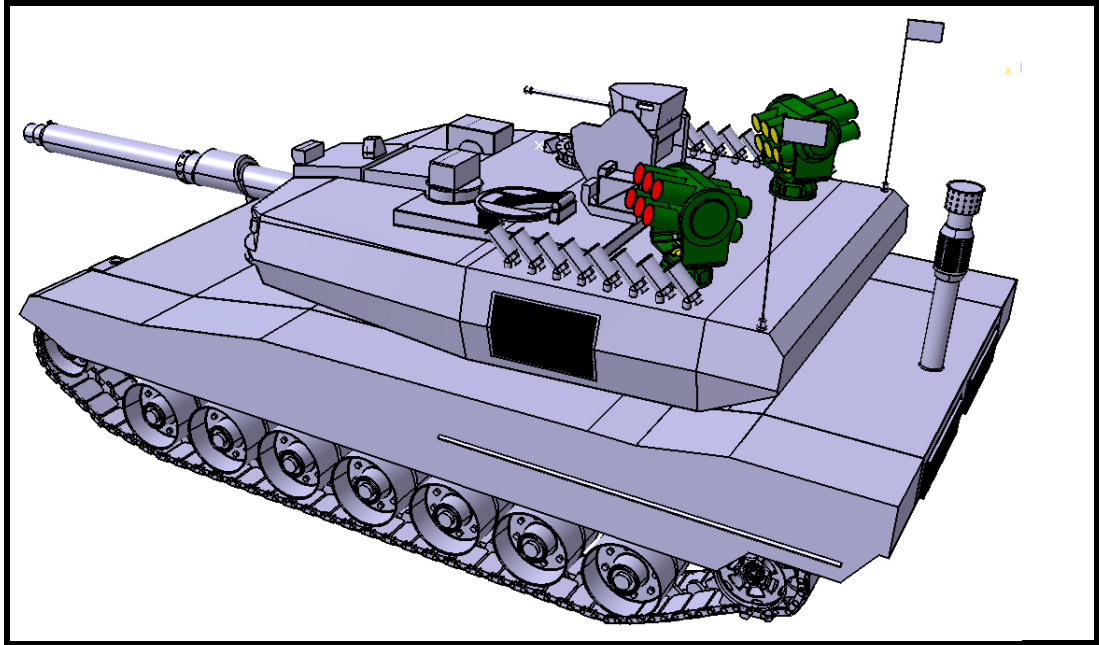
Şekil 2.5. Sistemin Yanca Bütününe Değerleri

Sistemin yükseliş bütününe ait atalet ve ağırlık değerleri Şekil (2.6)'daki gibidir.



Şekil 2.6. Sistemin Yükseliş Bütününün Değerleri

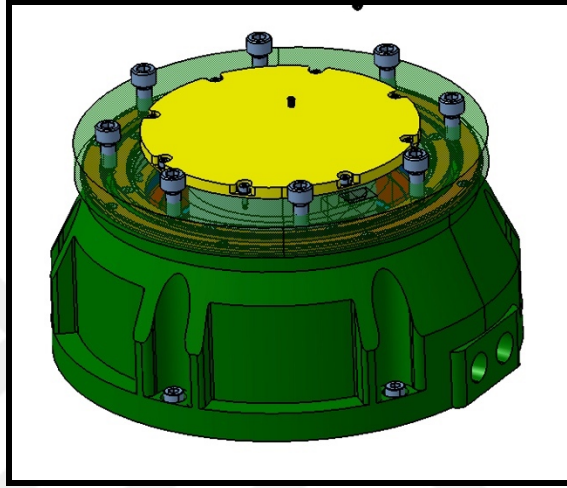
Tasarlanan aktif koruma sistemi Şekil (2.7)'de görüldüğü gibi bir ana muharebe tankının üzerinde 360 derece koruma sağlamak ve hızlı karşılık verebilmesi amacıyla 2 adet olacak şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 2.7. Ana Muharebe Tankı Üzerinde Çift AKS

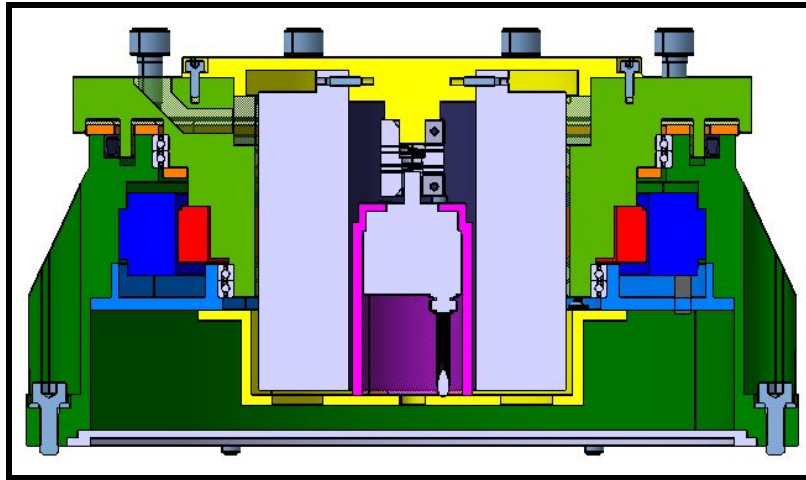
## 2.1. Mekanik Tasarım

Gimbal aktif koruma sistemi CATIA katı modelleme programında tasarlanmıştır. Çalışma 1:1 ölçekte ve talaşlı üretim esaslarına uygun modellenmiştir. Model temel olarak yükseliş ve yanca bütünlerinden oluşmaktadır. Bu bütünlerin yanında sistemi araca bağlayan, elektronik kart ve haberleşme ekipmanlarını içerisinde bulunduran bir gövde tasarımı bulunmaktadır.



Şekil 2.8. AKS Gövde Bütünü

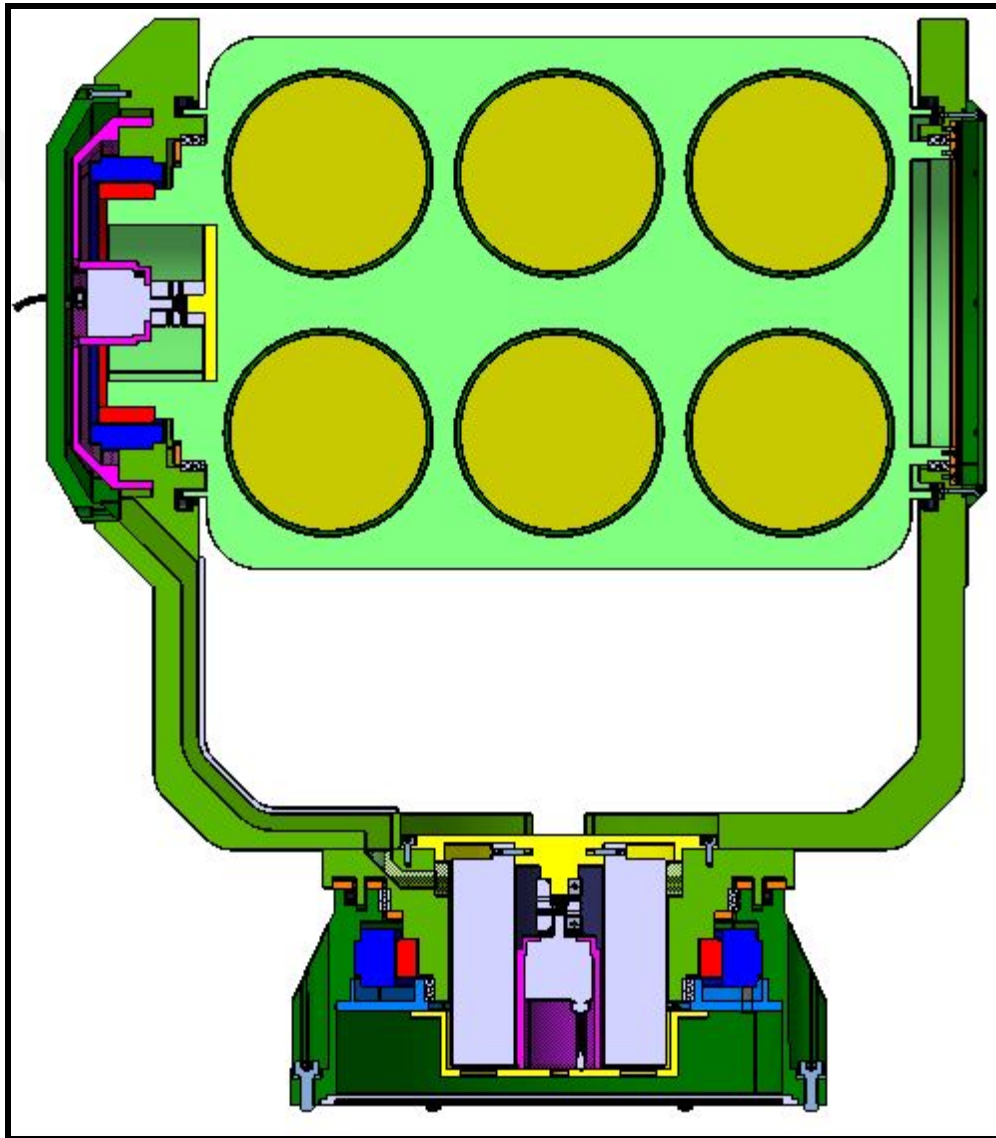
Tasarlanan sistemin gövdesinin rijit olması için araç tavanına 6 adet metrik 10 civata ile bağlanmıştır. Şekil (2.9)'da gözüktüğü gibi gövde bütününün alt kısmında elektronik kart ve kablajlar için alanlar bırakılmıştır.



Şekil 2.9. Gövde Bütünü Kesit Görünüşü



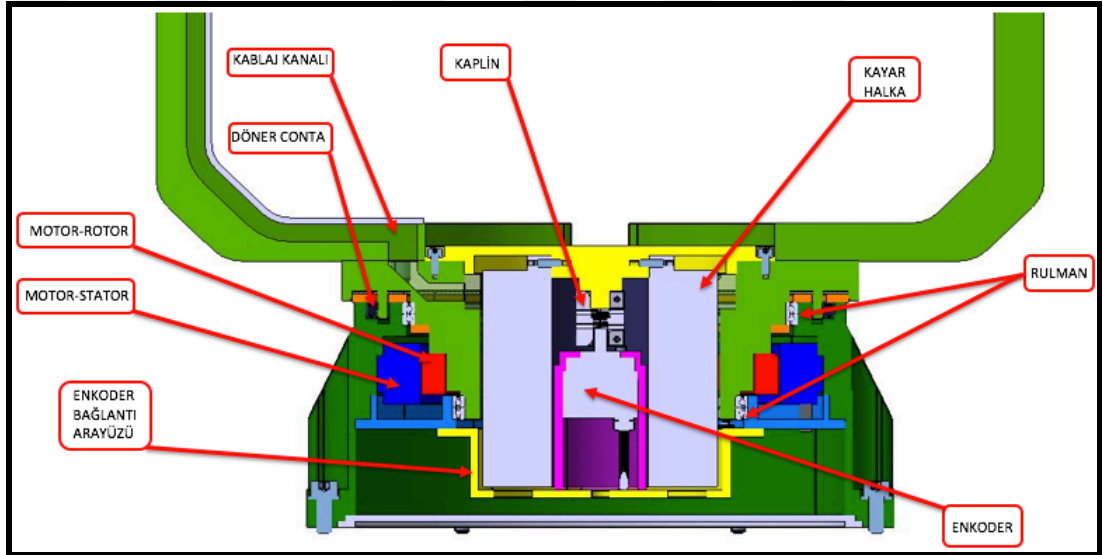
Her iki bütünü tasarımını kendi serbestlik eksenlerinde 360 derece dönebilecek şekilde yapılmıştır. Atış yapıldığında sistemin en az bozucu etkiye maruz kalması için podlar gimbal tabanına olabildiğince yakın olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu sayede atış şokundan oluşacak atalet değerinin düşürülmesi sağlanmıştır. Ve buna ek olarak iç gimbal ve dış gimbalın ağırlık merkezleri çakışık olacak şekilde tasarım yapılmıştır. Yüksek pozisyon doğruluğunun sağlanması için enkoderler aktarım mekanizması olmaksızın eyleyicilerin rotor boşluğundan geçip doğrudan faydalı yüklere kaplin vasıtasıyla bağlıdır.



Şekil 2.10. Gimbal Kesit Görünüşü

### 2.1.1. Yanca tasarımı

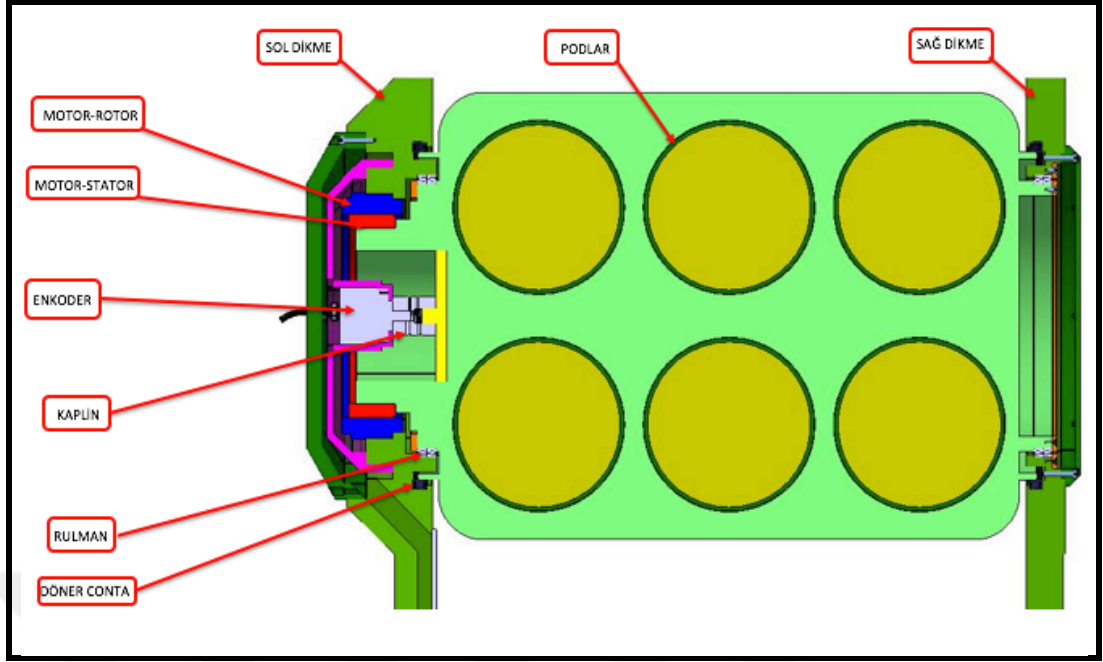
Sistemin dış gimbalini oluşturan hareket eksenini yanca bütünüdür. Gimbal sisteminin iki serbestlik derecesini oluşturan bütünlardan birisidir. Yanca ekseninde doğrudan tahrikli bir fırçasız servo motor vardır. Motorun stator kısmı gimbal gövdesine bağlıyken rotor kısmı yanca bütününe bağlanmıştır. Motor açısal kontaklı rulman çiftleri ile yataklanmıştır. Kayar halka aynı şekilde stator'u gimbal gövdesine, rotoru ise yanca eksenine olacak şekilde bağlantı elemanlarıyla bağlıdır. Yanca ekseninin açısının okunması için kullanılan yanca enkoder'i yüksek hassasiyetlerle işlenen bir arayüz parçasıyla sistemin yanca dönme merkezine yerleştirilmiş ve buradan kaplin yardımıyla yanca kompleksinin tabanına bağlanmıştır.



Şekil 2.11. Yanca Bütünü Kesit Görünüşü

### 2.1.2. Yükseliş tasarımı

Sistemin iç gimbalini oluşturan bir diğer serbestlik derecesini oluşturan bütün yükseliş bütünüdür. Yanca bütününde olduğu gibi yükseliş bütününde de doğrudan tahrikli fırçasız servo motor kullanılmıştır. Aynı şekilde açısal kontaklı rulman çiftleri ile motorun gövdeye yataklaması yapılmıştır. Gimbal gövdesinden kayar halka yardımıyla yanca bütününe gelen güç kablajları yükseliş bütününe yine bir diğer kayar halka ile ulaştırılmıştır. Aktif koruma sistemine arkadan bakıldığında (“sistemin atış yönü olan podların kırmızı yönü önü olduğu kabul ediliyor.”) motor ve açı algılayıcı sol dikme içerisine, kayar halka ise sağ dikme içerisine yerleştirilmiştir.



Şekil 2.12. Yükseliş Bütünü Kesit Görünüşü

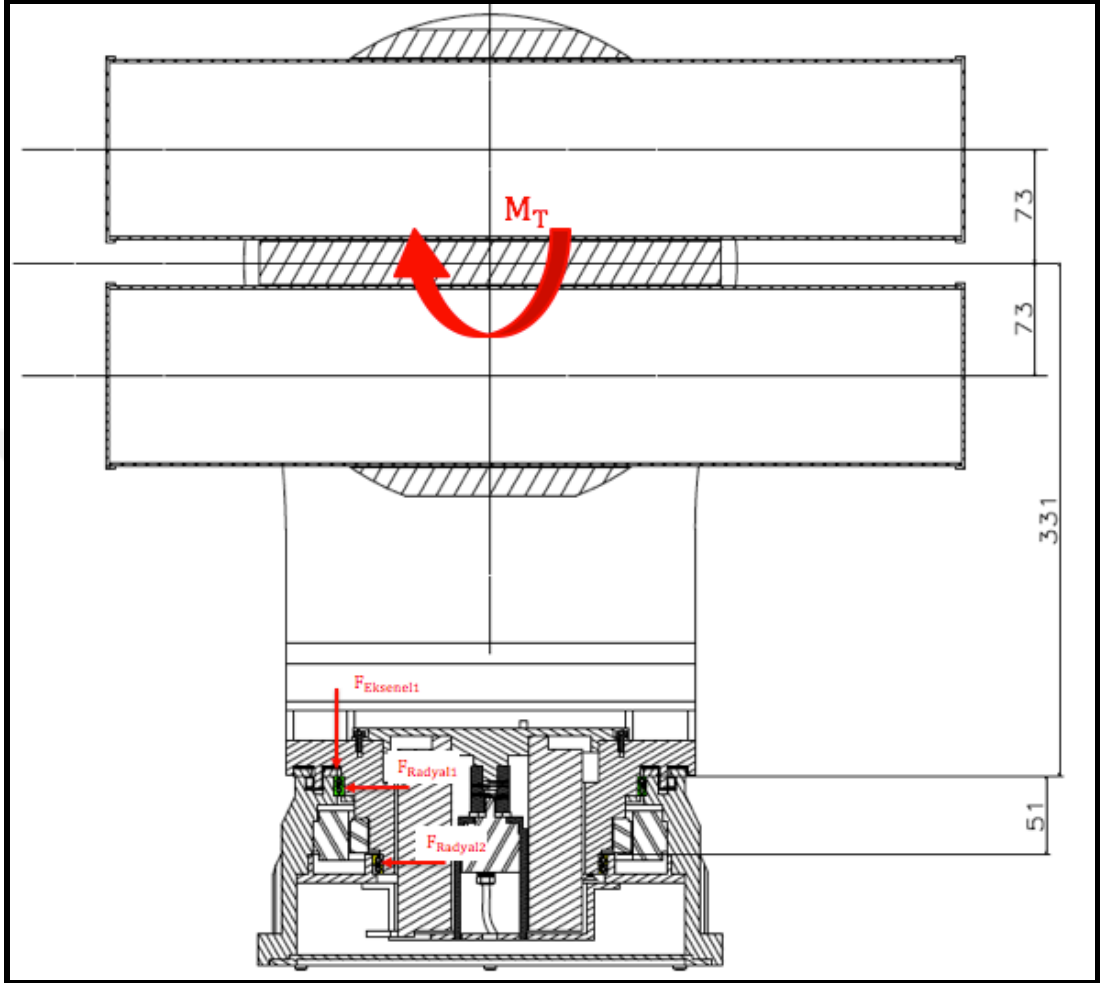
### 2.1.3. Mekanik donanımlar

Tasarımda genel olarak talaşlı imalat ve lazer kesim parçaları kullanılmıştır. Bu parçaların yanında mekanik bağlantı elemanlarıyla birlikte mekanik donanımlarda kullanılmıştır. Kullanılan mekanik donanımlar ve seçim kriterleri alt başlıklarda ifade edilmiştir.

#### 2.1.3.1. Rulman

Gimbal aktif koruma sistemi hareket bütünü yapısına göre gimbal tabanı, yanca hareketini sağlayan dış gimbal bütünü ve yükseliş hareketini sağlayan iç gimbal bütünü olmak üzere üç bütünden oluşur. Statik durumda dış gimbal bütünü, gimbal tabanına aksel bir kuvvet uygular, iç gimbal ise dış gimbal bağlantı noktasına radyal bir kuvvet uygulamaktadır. Sistem atış yaptığı sırada iç ve dış gimbal bağlantı noktasında yine radyal bir kuvvet oluşurken, dış gimbal ve gimbal gövdesi arasında aksel kuvvetin yanında radyal kuvvette oluşur. Aktif koruma sisteminde kullanılan mühimmatlar podlu mühimmat olduğundan itki gücü göz ardı edilebilir. Fakat araç hareketlerinde gimballer üzerine radyal yükler biner. Bundan dolayı dış gimbal ve gimbal gövdesi arasında 2 farklı pozisyonda 2'şer adet ince kesit rulman çifti vardır ve araç hareketinden oluşacak radyal kuvvete karşı dirençli olabilmesi için sırt-sırta

(back to back) düzeninde yerleştirilmiştir. Dış gimbal ile gimbal gövdesi arasında kullanılacak olan sabit bilyalı rulmanlar Şekil (2.13)'deki gibi yerleştirilmiştir.



Şekil 2.13. AKS Rulman Kuvvetler

Gimbal aktif koruma sistemi maksimum 250 °/sn hızla dönecektir. Gimbal gövdesinin üzerine binen toplam yük Şekil (2.5)'te gösterildiği gibi 56 kg'dır. İç gimbalin toplam ağırlığı Şekil (2.6)'da görüldüğü gibi 35 kg'dır.

Gimbal gövdesine binen 56 kg'lık yük statik durumda tamamıyla aksel yük olarak sisteme nüfuz eder. Aktif koruma sisteminin aracın tavanına bağlı olduğu kabul edilmektedir. Rulman seçimi için en kötü senaryolar dikkate alındığında, araç 45 derece eğimli bir yolda gittiği varsayılarak yoldan kaynaklanan bir ivmelenme ve araçtan kaynaklanan bir ivmelenmeye maruz kalacaktır. Bu iki ivmenin toplamı bize gimbalin yatay ve dikey ivmelenme değerlerini verecektir.  $a_{r1}$  ve  $a_{e1}$  eğimli yoldan kaynaklanan gimbal'e etki eden radyal ve aksel ivmelenmedir.  $a_{r2}$  ve  $a_{e2}$  aracın

maksimum yatay açısında ve mühimmatın ateşlenmesiyle oluşacak sırasıyla radyal ve eksenel ivmelenmedir. Yanca bütünü için rulman hesabı aşağıdaki gibidir.

Radyal ivmelenmeler;

$$a_{r1}=g \times \sin(45) = 6,937 \text{ m/s}^2 \quad (2.1)$$

$$a_{r2}=18,000 \text{ m/s}^2 \text{ (Kabul-test çalışmalarından)} \quad (2.2)$$

$$a_{rT}=a_{r1}+a_{r2}=24,937 \text{ m/s}^2 \quad (2.3)$$

Eksenel ivmelenmeler;

$$a_{e1}=g = 9,810 \text{ m/s}^2 \quad (2.4)$$

$$a_{e2}=3 \times g = 29,430 \text{ m/s}^2 \quad (2.5)$$

$$a_{eT}=a_{e1}+a_{e2}=39,240 \text{ m/s}^2 \quad (2.6)$$

$$F_{\text{Eksenel}}=m \times a_{eT}=2197 \text{ N} \quad (2.7)$$

$$F_{\text{Radyal}}=m \times a_{rT}=1396 \text{ N} \quad (2.8)$$

Yükseliş kompleksinin ataletinden oluşacak olan moment değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır. Yanca ve yükseliş eksenini  $500 \text{ der/s}^2$  ivmelenmeye sahiptir.

$$\left(\frac{500}{180} \times \pi\right) = 8,727 \text{ rad/s}^2 \quad (2.9)$$

$$M_T=I_{\text{yanca}} a_{\text{yanca}} = 1,668 \times 8,727 = 14,56 \text{ Nm} \quad (2.10)$$

Yükseliş bütünü yataklamak için kullanılan rulmanların hesaplaması aşağıdaki gibi yapılmıştır.

$$F_{\text{Aksenel}}=m \times a_{rT}=875 \text{ N} \quad (2.11)$$

$$F_{\text{Aradyal}}=m \times a_{eT}=1400 \text{ N} \quad (2.12)$$

$$M_T=I_{\text{yükseliş}} a_{\text{yükseliş}}=0,823 \times 8,727=7,17 \text{ Nm} \quad (2.13)$$

Yanca ve yükseliş eksenli rulman seçimleri için gerekli olacak yükler Tablo (2.1)'deki gibidir.

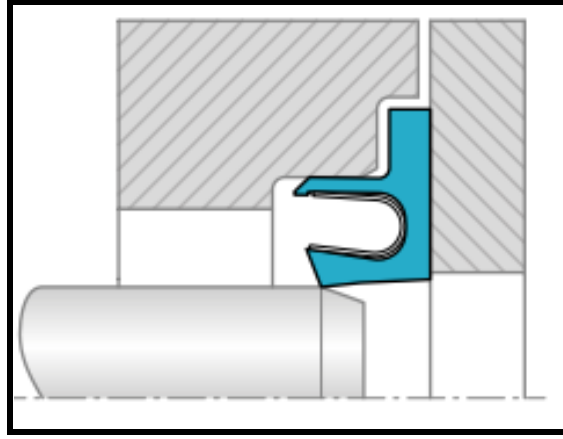
Tablo 2.1. Rulman Yükleri

Yanca Bütünü	Yanca Bütünü	Yükseliş Bütünü	Yük	Birim
Eksenel	2197	875	2197	N
Radyal	1396	1400	1396	N
Moment	7,18	7,17	7,18	Nm

Elde edilen aksenal, radyal kuvvetleri ve yükseliş ekseninin maksimum ivmesinde ortaya çıkacak momenti karşılayacak şekilde rulman seçimi yapılmıştır. Yükseliş bütününde kullanılan rulman yataklaması aynı tipte olduğundan yükseliş eksenli içinde aynı şekilde işlemler yapılarak rulman seçimi yapılmıştır.

### 2.1.3.2. Döner conta

Sistem bütünü içerisinde elektronik kartlar ve sensörler olacağı için bu ekipmanların toz, yağmur gibi dış etmenlerden korunması gereklidir. Bu gereksinimin sağlanabilmesi için bütünlüklerin dışarıyla ilk temas noktalarında döner contalar kullanılmıştır. Döner contalar sistem sürtünmesini arttırdığından dolayı sistemin hızına doğrudan etki etmektedirler. Bundan dolayı döner conta seçiminde sürtünme katsayıları dikkate alınmıştır.



Şekil 2.14. Trelleborg Turcon Döner Conta

### 2.1.3.3. Kaplin

Sistemin hareketini enkoderlerden doğru alabilmek için enkoder ve bütünlükler arasındaki bağlantının boşluksuz ve simetrik bağlanması gerekir. Çalışmamızda enkoder mili ile bütünlükleri birbirine bağlamak için radyal esnek kaplin kullanılmıştır. Çalışmada SUNGİL firmasına ait SRBM-16C 6X12 ürünü tercih edilmiştir. Kaplin seçimi yapılırken kullanılacak enkoderin kendi milinde oluşturduğu atalet değeri dikkate alınmıştır.

**SRB Series**  
**Radial Beam Flexible Coupling**

Please, download CAD DATA from [www.sungilifa.com](http://www.sungilifa.com)

**SRBM- C**  
[CLAMP TYPE]

※ Material : High strength aluminum alloy (Al 7075-T6)

**SRBM- C**  
[SET SCREW TYPE]

※ Material : High strength aluminum alloy (Al 7075-T6)

**SRBMS- C**  
[CLAMP TYPE]

※ Material : Stainless steel

**Dimensions & Performance**

Product Number	Dimension (mm) (±0.3)				Fastening Bolt M	Fastening Torque (N·m)	Max. RPM (min <sup>-1</sup> )	Max. Torque (N·m)	Rated Torque (N·m)	Torsional Stiffness (N·m/rad)	Moment of Inertia (kg·m <sup>2</sup> )	Mass (g)	Permissible Misalignment		
	D	L	L <sub>1</sub>	F									Angle (°)	Parallel (mm)	End-Play (mm)
SRBM-12C	12.7	14	5	2.5	M2	0.5	35,000	0.4	0.2	60	$7.88 \times 10^{-8}$	3.2	1	0	±0.15
SRBM-16C	16	16	6	2.95	M2.6	1	27,000	0.8	0.4	130	$2.3 \times 10^{-7}$	6.3	1	0	±0.15
SRBM-19C	19.1	17	6.31	3.1	M2.6	1	20,000	1.2	0.6	160	$5.0 \times 10^{-7}$	9.2	1	0	±0.15
SRBM-22C	22.2	20	7.4	3.65	M3	1.7	18,000	2.0	1.0	180	$1.1 \times 10^{-6}$	15	1	0	±0.15

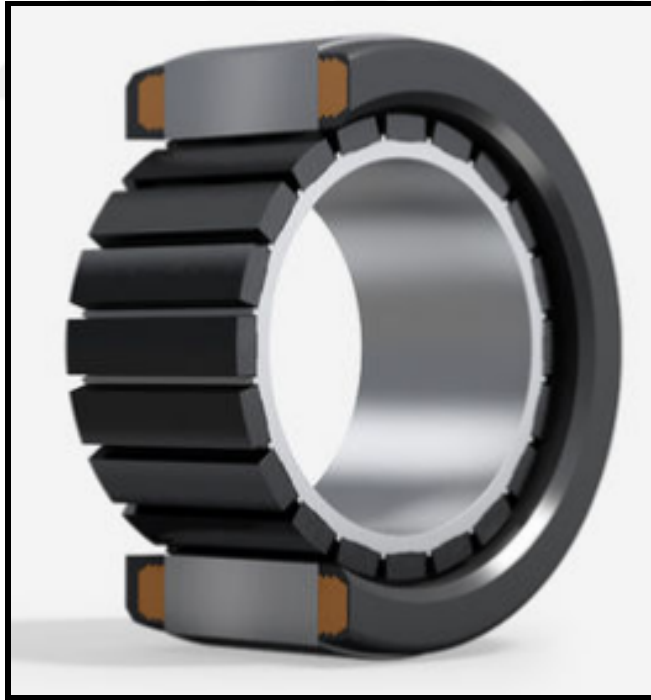
Şekil 2.15. SUNGİL-Mikro Esnek Kaplin Seçimi

## 2.2. Elektronik Tasarım

Aktif koruma sisteminin reaksiyon süresi gereksinimi göz önünde bulundurularak daha hızlı bir sistem olması gerektiğinden doğrudan tahrikli fırçasız doğru akım eyleyiciler kullanılmıştır. Sistemin gerçek zamanlı uygulamasının gerçekleştirilebilmesi için elektronik donanımlardan oluşan bir düzenek oluşturulmuştur. Temelde bilgisayar, sensörler ve motordan oluşan bu düzenek ayrıntılı bir biçimde bu bölümde anlatılmıştır.

### 2.2.1. Doğrudan tahrikli motor ve sürücüsü

Sistemde yanca ve yükseliş bütünlerini hareket ettirmek için uygulanacak tahrik servo eyleyiciler tarafından oluşturulmaktadır. Kullanılacak eyleyiciler pozisyon doğruluğu ve yüksek hız isterinden dolayı doğrudan tahrikli doğru akım eyleyicileri seçilmiştir. Fırçasız ve sürekli mıknatıslı yapısından dolayı iç sürtünmeleri oldukça düşük olan bu eyleyiciler sisteme yüksek hız avantajı sağlar.



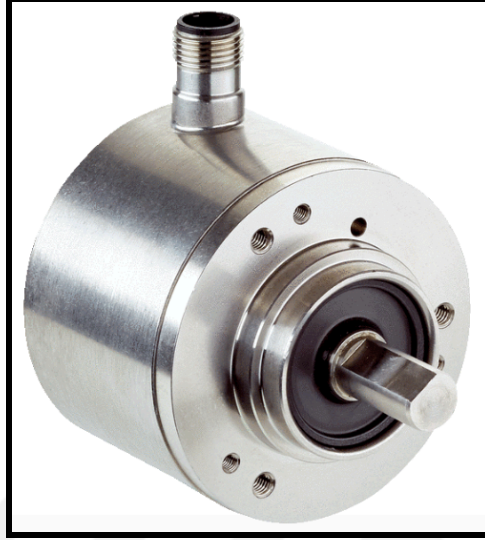
Şekil 2.16. Doğrudan Tahrikli Servo Motor Yapısı

### 2.2.2. Enkoder

Dönme hareketi yapan bir sistemin paralelinde elektrik sinyali üreten cihazlardır. Tasarımı yapılan bu sistemde dış gimbal ve iç gimbalin pozisyon bilgisine ulaşmak



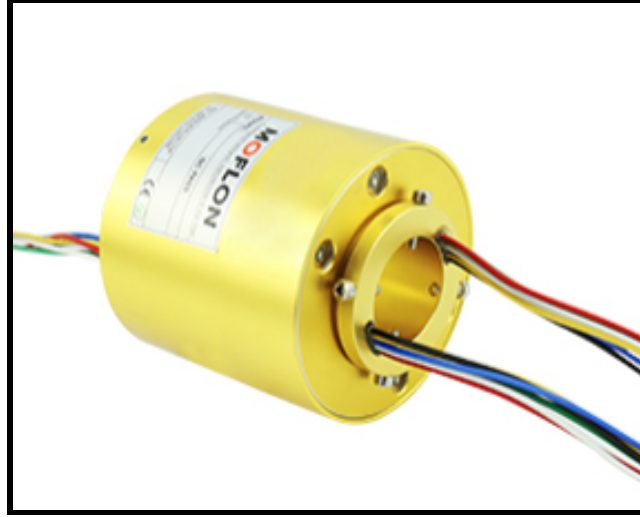
için 2 adet kullanılmıştır. Bu çalışmada 16 bit çözünürlüğe sahip “Single Turn Encoder” olarak isimlendirilen mutlak enkoder kullanılmıştır. 4.5V–32V gerilim aralığına sahip, radyal kablajlı Şekil (2.17)’de görünen SICK DFS60 ürünüdür.



Şekil 2.17. Mutlak Enkoder

### 2.2.3. Kayar halka

Gimbal tasarımında en kritik nokta gimbal gövdesinde bulunan elektronik kartların iç ve dış gimbal içerisinde bulunan sensörlerle sağlıklı bir şekilde veri iletimine sahip olmasıdır. Sensörlerden gelen kabloların kontrol kartına iletebilmesi gerekir. Esnek kablo kullanımı gimbal yapısının hareket kabiliyetini kısıtlar ve dönme hareketini engeller. Ve sistemin aynı yönde birden çok tur atma durumunda kablolar zarar görür. Bu gibi sistemlerde ucuzluğu ve kullanım kolaylığından dolayı kayar halka çözümü kullanılmaktadır. Kontak bileziği kullanılarak hareketli aksamlardaki asılı bir biçimde sallanan, serbest harekete engel olan kablolar ortadan kaldırılabilir. Bu çözümde ise elektrik sinyallerinde oluşabilecek gürültüyü veya eklemlerde oluşabilecek sürtünme miktarını artırma gibi dezavantajlar ortaya çıkabilmektedir.[28] Bu çalışmada iç gimbal’e gidecek haberleşme ve elektrik kablajlarının iletimini sağlamak amacıyla kayar halka kullanılmıştır. Kayar halkaların kullanım alanlarına göre birden çok çeşidi bulunmaktadır. Tasarımı yapılan bu sistemde yanca bütününe pozisyonunu okumak için kullandığımız açı algılayıcısı, sisteme aktarım mekanizmaları olmaksızın doğrudan bağlanmalıdır. Bunun için kapsül tipi kayar halka kullanımı, ortasındaki boşluktan açı algılayıcısının bütüne doğrudan bağlanmasını sağlamıştır.



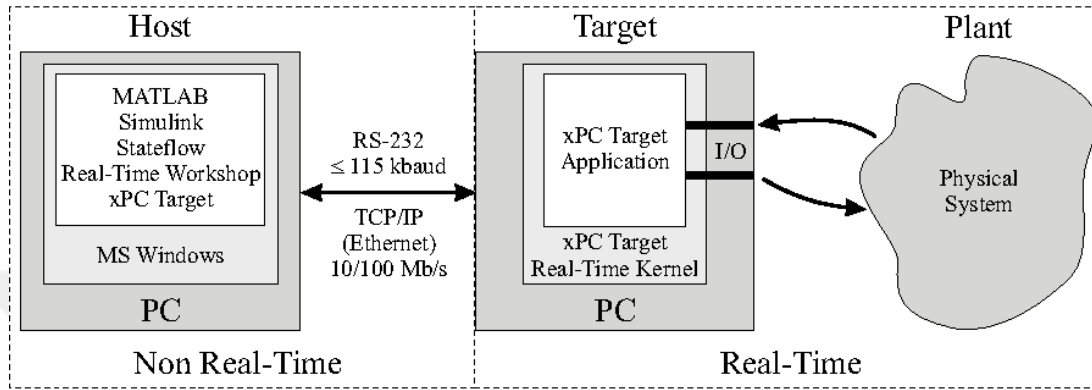
Şekil 2.18. Kapsül Tipi Kayar Halka Görseli

Kayar halka seçiminde hız, kanal sayısı, kanalların güç iletimi dikkate alınmıştır. Aktif koruma sisteminin yükseliş eksenini  $-10+40$  derece arasında hareket isteri olacağından yükseliş eksenini için kayar halka kullanımına gerek yoktur. Esnek kablo ile gerekli atış pozisyonları sağlanabilir. Şekil (2.18)'de Moflon firmasına ait kapsül tipi kayar halka gösterilmiştir.[29]

### 2.3. Gerçek Zamanlı Çalışma İçin Gerekli Test Düzenegi

MATLAB-Simulink ortamında oluşturulan model derlenme işlemi sonrasında “xPC Target” modülü sayesinde kontrol kartına yükleme işlemi yapılır. Gerçek zamanlı sistemler üzerinde gerçekleştirilen yazılımların ürün bazında prototip, test birimleri ve merkezi haberleşme kaynakları olarak kullanıma olanak veren XPC Target modülü, talep edilen örnekleme frekansında tasarlanan kontrolcünün ilgili sistemde ürün haline getirilmesi ve veri işleme işlemleri için uygun bir sistemdir. Şekil (2.19)'da XPC Target modülünün kullanım şekli ifade edilmiştir. Model üzerinde “Giriş/Çıkış” blokları eklememizi, simulink aracılığı ile ilgili donanım üzerinde çalıştırılacak kodun dönüşüm sağlanmasını ve yüklenmesini sağlar. Alınan sensör verilerini ve sistem üzerine gönderilen komut sinyallerini ilgili birimlere gönderim için CAN-BUS, UDP Ethernet ve UART RS-422 haberleşme protokolleri kullanılmıştır. Gerçek zamanlı çalışan bu sistem, 1 ms örnekleme zamanında çalıştırılmıştır. Sistem hareketinin algılanması için test düzenegi için Bölüm 2.2.2'de belirtilen açı algılayıcı kullanılmıştır. Sistem üzerinde gerçek zamanlı uygulamaların yapılabilmesi için kontrol kartı ve haberleşme için ise bir takım elektronik altyapıya ihtiyaç vardır.

Kontrol bilgisayarı olarak “Single Board Computer” olarak isimlendirilen bilgisayar birimi kullanılmıştır. Şekil (2.20)’de örnek bir Single Board Computer yapısı gösterilmiştir. Kullanılan kontrol bilgisayarı PC/104 formatlı ve analog/dijital I/O kanallarına sahiptir. Bu birim kendi çekirdeğine sahip olduğu için; kontrol ve haberleşme yazılımlarını gerçek zamanlı olarak sorunsuz olarak çalıştırabilir.



Şekil 2.19. Xpc Target Modül Kullanımı



Şekil 2.20. Örnek PC104 Tabanlı 'Single Board Computer'

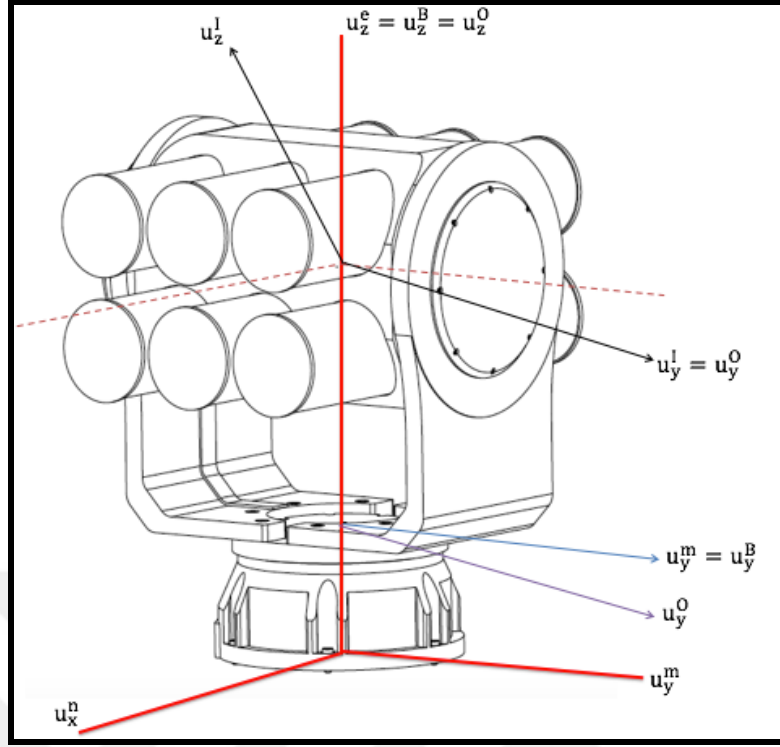
### **3. MATEMATİKSEL DENKLEMLER VE MODELLEME**

2 Serbestlik dereceli gimbal sistemlerinin matematiksel ifadeleri dış gimbal, iç gimbal ve gimbal tabanını içerir. Kararlı bir kontrolcü tasarımı için sistem dinamiklerinin doğru şekilde modellenmesi gerekir. Sistemin dinamik modellenmesi ne kadar iyi olursa kontrol algoritmasının başarısı da o kadar iyi olacaktır. Dinamik modelleme kinematik ifadelerin bulunması ve ardından kinematik ifadelerin türetilmesiyle ortaya çıkar. Kinematik denklemlerin elde edilebilmesi için hareketi oluşturan bütün referans eksenlerinin, Euler açılarının ve dönüşüm matrislerinde bulunması gerekir. 2 Serbestlik dereceli sistemlerin açısal ivme ve açısal hızları kinematik eşitliklerle ifade edilir [30].

Bu çalışmada ilk olarak koordinat eksenleri tanımlanmıştır. Bu eksenlerin arasındaki ilişki dönüşüm matrisleriyle ortaya konulmuştur. Kinematik eşitlikler çıkarılarak açısal hız ve açısal ivmeler belirlenmiştir. Ardından iç ve dış gimballerin conta ve rulmanlarında oluşacak eksenel sürtünmelerde dikkate alınarak sürtünme ifadeleri belirlenmiştir.

#### **3.1. Koordinat eksenleri**

2 eksen gimbal aktif koruma sisteminin 3 farklı koordinat ekseni vardır. Bu eksenler platform ekseni, dış gimbal ekseni ve iç gimbal eksenidir. Bütün referans eksen takımlarının orjinleri üstüste olduğu varsayılmıştır. Bütün eksenler birbirlerine dönüşüm matrisleriyle bağlıdırlar. Gimbalin bir kara aracında olduğu varsayılarak hesaplamalar yapılmıştır. Platform ekseni yunuslama, yuvarlanma ve sapma (Roll-Pitch-Yaw) açılarından oluşmaktadır. Platform ekseninin serbestlik derecesi olan bu açılara Euler açıları denir.



Şekil 3.1. 2 Serbestlik Dereceli AKS'nin Eksen Takımları

Eksenler :

- (F<sub>E</sub>) = Yer referans eksenini
- (F<sub>M</sub>) (F<sub>N</sub>) = Yer ve gimbal arasındaki referans eksenleri
- (F<sub>B</sub>) = Gimbal tabanı referans eksenini
- (F<sub>O</sub>) = Dış gimbal referans eksenini
- (F<sub>I</sub>) = İç gimbal referans eksenini

Eksen takımları üzerindeki bir vektörü bir başka eksen takımına yansıtmak için dönüşüm matrisleri kullanılır. 6 farklı referans eksenine sahip bu sisteme ait dönüşüm matrisleri aşağıdaki gibi gösterilir.

$$F_E \xrightarrow{\psi} F_M \xrightarrow{\theta} F_N \xrightarrow{\phi} F_B \xrightarrow{A} F_O \xrightarrow{E} F_I \quad (3.1)$$

Burada Euler açıları olarak isimlendirilen  $\psi$ ,  $\theta$ ,  $\phi$ , A, E sırasıyla yunuslama, yuvarlanma, sapma, yanca ve yükseliş açılarını ifade eder.

$$R_{XY} = R_{YX}^T \quad (3.2)$$

$$R_{BE} = R_{BN} R_{NM} R_{ME} \quad (3.3)$$

$$R_{EM}(\psi)=R_{ME}^T(\psi)=\begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$R_{MN}(\theta)=R_{NM}^T(\theta)=\begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$R_{NB}(\phi)=R_{BN}^T(\phi)=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Gimbal tabanı ve dış gimbal eksen takımı arasındaki dönüşüm matrisi;

$$R_{BO}(A)=R_{OB}^T(A)=\begin{bmatrix} \cos(A) & -\sin(A) & 0 \\ \sin(A) & \cos(A) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

İç gimbal ve dış gimbal eksen takımları arasındaki dönüşüm matrisi;

$$R_{OI}(E)=R_{IO}^T(E)=\begin{bmatrix} \cos(E) & 0 & \sin(E) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(E) & 0 & \cos(E) \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Bir dönüşüm matrisinin (T) türevinin nasıl alınacağı ile ilgili temel bilgiler aşağıda verilmiştir.

$$T^T T = I \quad (3.9)$$

$$T^T \frac{dT}{dt} = -\frac{dT^t}{dt} T = -\left(T^T \frac{dT}{dt}\right)^T \quad (3.10)$$

$T^T \frac{dT}{dt}$  Terimi ters simetrik bir matristir ve  $M_w$  ile ifade edilir.

$$M_W = \begin{bmatrix} 0 & -W_z & W_y \\ W_z & 0 & -W_x \\ -W_y & W_x & 0 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$M_W$  matrisi açısal hız vektörü ile ilgilidir.

$$W = [W_x \ W_y \ W_z]^T \quad (3.12)$$

Bir transformasyon matrisinin türevi Eşitlik (3.13)'teki gibi ifade edilir.

$$\frac{dT}{dt} = M_W \cdot T \quad (3.13)$$

### 3.2. Kinematik Eşitlikler

Gimbal aktif koruma sisteminin kinematik eşitliklerinden elde edilecek açısal hız ve açısal ivme bilgileri sistem dinamiğinin bulunmasını sağlayacaktır. Bu kısımda iç gimbal ve dış gimbal için ayrı ayrı açısal hız ve açısal ivme bilgileri elde edilmiştir.

#### 3.2.1. Açısal hız

Gimbal açısal hızları bulunurken rotasyon matrisleriyle Denklem (3.1)'de belirtilen sıraya göre eksen dönüşümleri uygulanmıştır.  $W_{OE}$  dış gimbalin yere göre açısal hızını,  $W_{IE}$  iç gimbalin yere göre açısal hızını temsil etmektedir.

$$W_{OE} = [W_{OE_x} \ W_{OE_y} \ W_{OE_z}]^T \quad (3.14)$$

$$W_{OE} = W_{OB} + W_{BN} + W_{NM} + W_{ME} \quad (3.15)$$

$$W_{OE} = \dot{\alpha}u_z + \dot{\phi}R_{OB}u_x + \dot{\theta}R_{OB}R_{BN}u_y + \dot{\psi}R_{OB}R_{BN}R_{NM}u_z \quad (3.16)$$

$$W_{OE} = \begin{bmatrix} W_{OE_x} \\ W_{OE_y} \\ W_{OE_z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{A} \end{bmatrix} + R_{OB} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + R_{OB} R_{BN} \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + R_{OB} R_{BN} R_{NM} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$W_{OE_x} = \dot{\phi} \cos \phi + \dot{\theta} \cos \phi \sin A + \dot{\psi} (\cos \theta \sin A \sin \phi - \cos A \sin \theta) \quad (3.18)$$

$$W_{OE_y} = -\dot{\phi} \sin \phi + \dot{\theta} \cos \phi \cos A + \dot{\psi} (\sin A \sin \theta + \cos A \cos \theta \sin \phi) \quad (3.19)$$

$$W_{OE_z} = \dot{A} + W_{\text{dist}O_z} \quad (3.20)$$

Bozucu etki dış gimbal'e z eksenini boyunca etki etmektedir.

$$W_{\text{dist}O_z} = -\dot{\theta} \sin \phi + \dot{\psi} \cos \phi \cos \theta \quad (3.21)$$

İç gimbalin yere göre açısal hızı benzer şekilde bulunur.

$$W_{IE} = \begin{bmatrix} W_{IE_x} \\ W_{IE_y} \\ W_{IE_z} \end{bmatrix}^T \quad (3.22)$$

$$W_{IE} = \dot{E} u_y + R_{IO} W_{OE} \quad (3.23)$$

$$W_{IE} = \begin{bmatrix} W_{IE_x} \\ W_{IE_y} \\ W_{IE_z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{E} \\ 0 \end{bmatrix} + R_{IO} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{A} \end{bmatrix} + R_{IO} R_{OB} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + R_{IO} R_{OB} R_{BN} \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$+ R_{IO} R_{OB} R_{BN} R_{NM} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}$$

$$W_{IE_x} = \dot{\phi} \cos E \cos A - \dot{\psi} (\sin E \cos \phi - \cos E \sin A \sin \phi) + \dot{\theta} (\sin E \sin \phi + \cos E \sin A \cos \phi - \dot{A} \sin E) \quad (3.25)$$



$$W_{IE_y} = \dot{E} + W_{distI_y} \quad (3.26)$$

Bozucu etki iç gimbal'e y eksenini boyunca etki etmektedir. İç gimbale etki eden bozucu  $W_{distI_y}$  olarak ifade edilir.

$$W_{distI_y} = -\dot{\phi} \sin A + \dot{\theta} \cos A \cos \phi + \dot{\psi} \cos A \sin \phi \quad (3.27)$$

$$W_{IE_z} = \dot{\phi} \sin E \cos A + \dot{\psi} (\cos E \cos \phi + \sin E \sin A \sin \phi) - \dot{\theta} (\cos E \sin \phi - \sin E \sin A \cos \phi) + \dot{A} \cos E \quad (3.28)$$

### 3.2.2. Açısal ivme

Bu bölümde gimbal aktif koruma sistemi'nin açısal ivmeleri elde edilmiştir. İç ve dış gimballerin yere göre açısal ivmeleri, açısal hızlarının zamana göre birinci dereceden türeviyle elde edilmiştir.

Dönüşüm matrislerinin türevleri aşağıdaki gibidir.

$$\dot{R}_{IO} = M_{W_{IO}} R_{IO} = \begin{bmatrix} 0 & -W_{IO_z} & W_{IO_y} \\ W_{IO_z} & 0 & -W_{IO_x} \\ -W_{IO_y} & W_{IO_x} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos E & 0 & -\sin E \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin E & 0 & \cos E \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

$$= \begin{bmatrix} W_{IO_y} \sin(E) & -W_{IO_z} & W_{IO_y} \cos(E) \\ W_{IO_z} \cos(E) - W_{IO_x} \sin(E) & 0 & -W_{IO_z} \sin(E) - W_{IO_x} \cos(E) \\ W_{IO_y} \cos(E) & W_{IO_x} & W_{IO_y} \sin(E) \end{bmatrix} \quad (3.29a)$$

$$\dot{R}_{OB} = M_{W_{OB}} R_{OB} = \begin{bmatrix} 0 & -W_{OB_z} & W_{OB_y} \\ W_{OB_z} & 0 & -W_{OB_x} \\ -W_{OB_y} & W_{OB_x} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(A) & \sin(A) & 0 \\ -\sin(A) & \cos(A) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

$$= \begin{bmatrix} W_{OB_z} \sin(A) & -W_{OB_z} \cos(A) & W_{OB_y} \\ W_{OB_z} \cos(A) & W_{OB_z} \sin(A) & -W_{OB_x} \\ -W_{OB_y} \cos(A) - W_{OB_x} \sin(A) & -W_{OB_y} \sin(A) + W_{OB_x} \cos(A) & 0 \end{bmatrix} \quad (3.30a)$$

$$\dot{R}_{BN} = M_{W_{BN}} R_{BN} = \begin{bmatrix} 0 & -W_{BN_z} & W_{BN_y} \\ W_{BN_z} & 0 & -W_{BN_x} \\ -W_{BN_y} & W_{BN_x} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & \sin(\phi) \\ 0 & -\sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & -W_{BN_z} \cos(\phi) - W_{BN_y} \sin(\phi) & -W_{BN_z} \sin(\phi) + W_{BN_y} \cos(\phi) \\ W_{BN_z} & W_{BN_x} \sin(\phi) & -W_{BN_x} \cos(\phi) \\ -W_{BN_y} & W_{BN_x} \cos(\phi) & W_{BN_x} \sin(\phi) \end{bmatrix} \quad (3.31a)$$

$$\dot{R}_{NM} = M_{W_{NM}} R_{NM} = \begin{bmatrix} 0 & -W_{NM_z} & W_{NM_y} \\ W_{NM_z} & 0 & -W_{NM_x} \\ -W_{NM_y} & W_{NM_x} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & -\sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

$$= \begin{bmatrix} W_{NM_y} \sin(\theta) & -W_{NM_z} & W_{NM_y} \cos(\theta) \\ W_{NM_z} \cos(\theta) - W_{NM_x} \sin(\theta) & 0 & -W_{NM_z} \sin(\theta) - W_{NM_x} \cos(\theta) \\ W_{NM_y} \cos(\theta) & W_{NM_x} & W_{NM_y} \sin(\theta) \end{bmatrix} \quad (3.32a)$$

$$\dot{R}_{ME} = M_{W_{ME}} R_{ME} = \begin{bmatrix} 0 & -W_{ME_z} & W_{ME_y} \\ W_{ME_z} & 0 & -W_{ME_x} \\ -W_{ME_y} & W_{ME_x} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\psi) & \sin(\psi) & 0 \\ -\sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

$$= \begin{bmatrix} W_{ME_z} \sin(\psi) & -W_{ME_z} \cos(\psi) & W_{ME_y} \\ W_{ME_z} \cos(\psi) & W_{ME_z} \sin(\psi) & -W_{ME_x} \\ -W_{ME_y} \cos(\psi) - W_{ME_x} \sin(\psi) & -W_{ME_y} \sin(\psi) + W_{ME_x} \cos(\psi) & 0 \end{bmatrix} \quad (3.33a)$$

Dış gimbal açısız ivmesi aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$a_{OE} = [a_{OE_x} \quad a_{OE_y} \quad a_{OE_z}]^T \quad (3.34)$$

$$\frac{d\omega_{Oe}}{dt} = a_{Oe} = \ddot{\eta}u_z + \ddot{\phi}R_{OB}u_x + \dot{\phi}\dot{R}_{OB}u_x + \ddot{\theta}(R_{OB}R_{Bn})u_y + \dot{\theta}(\dot{R}_{OB}R_{Bn} + R_{OB}\dot{R}_{Bn})u_y \quad (3.35)$$

$$+ \ddot{\psi}(R_{OB}R_{Bn}R_{nm})u_z + \dot{\psi}(\dot{R}_{OB}R_{Bn}R_{nm} + R_{OB}\dot{R}_{Bn}R_{nm} + R_{OB}R_{Bn}\dot{R}_{nm})u_z$$

İç gimbal açışal ivmesi aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$a_{Ie} = [a_{Iex} \quad a_{Iey} \quad a_{Iez}]^T \quad (3.36)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\omega_{IO}}{dt} = a_{Ie} = & \ddot{\epsilon}u_y + \ddot{\eta}R_{IO}u_z + \dot{\eta}\dot{R}_{IO}u_z + \ddot{\phi}(R_{IO}R_{OB})u_x + \dot{\phi}(\dot{R}_{IO}R_{OB} + R_{IO}\dot{R}_{OB})u_x \\ & + \ddot{\theta}(R_{IO}R_{OB}R_{Bn})u_y + \dot{\theta}(\dot{R}_{IO}R_{OB}R_{Bn} + R_{IO}\dot{R}_{OB}R_{Bn} + R_{IO}R_{OB}\dot{R}_{Bn})u_y \\ & + \ddot{\psi}(R_{IO}R_{OB}R_{Bn}R_{nm})u_z \\ & + \dot{\psi}(\dot{R}_{IO}R_{OB}R_{Bn}R_{nm} + R_{IO}\dot{R}_{OB}R_{Bn}R_{nm} + R_{IO}R_{OB}\dot{R}_{Bn}R_{nm} \\ & + R_{IO}R_{OB}R_{Bn}\dot{R}_{nm})u_z \end{aligned} \quad (3.37)$$

### 3.3. Dinamik Eşitlikler

Karmaşık sistemlerin kontrolünün başarılı olabilmesi için sistemin bozucu etkilerinde dahil olduğu bir sistem modelinin oluşturulması gerekir. Sistem modelinin gerçek sistemle benzerliği dinamik eşitliklerin performansı ile doğru orantılıdır. Literatürde gimbal platformların dinamik eşitliklerinin çıkarılmasında çoğunlukla Newton-Euler ve Euler-Lagrangian yöntemleri kullanılmaktadır. [31-32-33] Bu çalışmada sistem iç gimbal ve dış gimbal olmak üzere iki parça olarak ele alındı. Dinamik eşitliklerin türetilmesinde Newton-Euler yöntemi kullanıldı. Newton Euler eşitlikleri sırasıyla doğrusal momentlerin değişimi kuvvetlerin toplamına, açışal momentlerin değişimi torkların toplamına eşit olma esasına dayalıdır. Benzetim çalışması sırasında buradaki dinamik eşitliklerden yararlanıldı.

#### 3.3.1. İç gimbal dinamiği

Yükseliş ekseni için Newton eşitliği aşağıdaki gibidir.

$$m_I a_I = F_{OI} + m_I g \quad (3.38)$$

$$F_{OI}=m_I(a_I-g) \quad (3.39)$$

Burada  $m_I$  iç gimbalin ağırlığını,  $a_I$  iç gimbalin ağırlık merkezinin lineer ivmesini,  $F_{OI}$  dış gimbalin iç gimbal üzerine uyguladığı kuvveti,  $g$  yerçekimi ivmesini simgeler. İç ve dış gimballerin dönme eksenleri çakışık olarak kabul edilmektedir. Bu bağlamda pivot noktasına göre Euler eşitliği aşağıdaki gibi yazılmaktadır.

$$H_I=J_I W_{IE} \quad (3.40)$$

$$\Sigma M = \Delta H_I \quad (3.41)$$

$$J_I \cdot a_{IE} + W_{IE} \times (J_I \cdot W_{IE}) = M_{OI} + D_{\text{statikdengesiz}}^I \quad (3.42)$$

$$D_{\text{statikdengesiz}}^I = r_{PG_I} \times (m_I g^I) \quad (3.43)$$

Euler eşitliğindeki  $H_I$  iç gimbal açısal momentumunu,  $J_I$  iç gimbalin pivot noktasındaki atalet matrisini,  $W_{IE}$  iç gimbalin yere göre açısal hızını,  $\Sigma M$  toplam momenti,  $\Delta H_I$  iç gimbalin pivot noktasındaki açısal momentum değişimini,  $a_{IE}$  iç gimbalin yere göre açısal ivmesini,  $M_{OI}$  İç gimbal üzerine dış gimbalden uygulanan moment,  $D_{\text{statikdengesiz}}^I$  iç gimbalde statik yük dengesizliğinden oluşan bozucu etkiyi,  $r_{PG_I}$  pivot noktasından iç gimbalin ağırlık merkezine olan pozisyon vektörünü ifade etmektedir. Daha önceki bölümlerde elde ettiğimiz açısal hız ve ivmelerinde kullanılacağı Denklem (3.42)'deki matrisler detaylı olarak açıldı.

İç gimbalin atalet matrisi;

$$J_I = \begin{bmatrix} J_{xx}^I & J_{xy}^I & J_{xz}^I \\ J_{yx}^I & J_{yy}^I & J_{yz}^I \\ J_{zx}^I & J_{zy}^I & J_{zz}^I \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

$M_{m_I}$  ve  $M_{fr_{OI}}$  ile gösterilen değerler motor torku ve iç/dış gimballer arasındaki sürtünme torklarını ifade etmektedir.

$$M_{OI} = \begin{bmatrix} M_{OI_x} \\ M_{m_I} + M_{fr_{OI}} \\ M_{OI_z} \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

Hareket eksenini yükseliş eksenine olduğundan  $M_{OI_x}$  ve  $M_{OI_z}$  dikkate alınmaz. Pivot noktasından ağırlık merkezine olan pozisyon vektörü aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$r_{PG_I} = [r_{PG_{I_x}} \quad r_{PG_{I_y}} \quad r_{PG_{I_z}}]^T \quad (3.46)$$

Yer çekimi vektörü yer referans eksen takımına göre denklem aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$g^E = -g u_z \quad (3.47)$$

$$g^I = -g (R_{IO} R_{OB} R_{BN} R_{NM} R_{ME}) u_z \quad (3.48)$$

$$g^I = -g \quad (3.49)$$

$$\begin{bmatrix} -\cos(A) \sin(\theta) \cos(E) + \sin(A) \sin(\phi) \cos(\theta) \cos(E) - \cos(\phi) \cos(\theta) \sin(E) \\ \sin(A) \sin(\theta) + \cos(A) \sin(\phi) \cos(\theta) \\ -\cos(A) \sin(\theta) \cos(E) + \sin(A) \sin(\phi) \cos(\theta) \cos(E) + \cos(\phi) \cos(\theta) \sin(E) \end{bmatrix} \quad (3.49a)$$

İç gimbal için Euler eşitliği yukarıdaki ifadelerle göre yeniden yazıldığında;

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} J_{xx}^I & J_{xy}^I & J_{xz}^I \\ J_{yx}^I & J_{yy}^I & J_{yz}^I \\ J_{zx}^I & J_{zy}^I & J_{zz}^I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{IE_x} \\ a_{IE_y} \\ a_{IE_z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_{IE_x} \\ W_{IE_y} \\ W_{IE_z} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} J_{xx}^I & J_{xy}^I & J_{xz}^I \\ J_{yx}^I & J_{yy}^I & J_{yz}^I \\ J_{zx}^I & J_{zy}^I & J_{zz}^I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_{IE_x} \\ W_{IE_y} \\ W_{IE_z} \end{bmatrix} \\ & = \begin{bmatrix} M_{OI_x} \\ M_{m_I} + M_{fr_{OI}} \\ M_{OI_z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_{PG_{I_x}} \\ r_{PG_{I_y}} \\ r_{PG_{I_z}} \end{bmatrix} \times m_I \begin{bmatrix} g_x^I \\ g_y^I \\ g_z^I \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.50)$$

Eşitlik (3.50) açıldığında;

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} J_{xx}^I a_{IE_x} + J_{xy}^I a_{IE_y} + J_{xz}^I a_{IE_z} \\ J_{yx}^I a_{IE_x} + J_{yy}^I a_{IE_y} + J_{yz}^I a_{IE_z} \\ J_{zx}^I a_{IE_x} + J_{zy}^I a_{IE_y} + J_{zz}^I a_{IE_z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_{IE_x} \\ W_{IE_y} \\ W_{IE_z} \end{bmatrix} \\
& \times \left( \begin{bmatrix} J_{xx}^I W_{IE_x} + J_{xy}^I W_{IE_y} + J_{xz}^I W_{IE_z} \\ J_{yx}^I W_{IE_x} + J_{yy}^I W_{IE_y} + J_{yz}^I W_{IE_z} \\ J_{zx}^I W_{IE_x} + J_{zy}^I W_{IE_y} + J_{zz}^I W_{IE_z} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} W_{IE_x} \\ W_{IE_y} \\ W_{IE_z} \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} M_{OI_x} \\ M_{m_I} + M_{fr_{OI}} \\ M_{OI_z} \end{bmatrix} \quad (3.51) \\
& + \begin{bmatrix} r_{PG_{I_x}} \\ r_{PG_{I_y}} \\ r_{PG_{I_z}} \end{bmatrix} \times m_I \begin{bmatrix} \cos(E) \sin(\theta) + \cos(\theta) \sin(E) \\ 0 \\ \sin(E) \sin(\theta) - \cos(E) \cos(\theta) \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

İç gimbalin hareket eksenini, sistemin yükseliş eksenini olduğundan y eksenini iç gimbalin dinamik eşitliğini verir.

$$\begin{aligned}
& J_{yx}^I a_{IE_x} + J_{yy}^I a_{IE_y} + J_{yz}^I a_{IE_z} + W_{IE_z} (J_{xx}^I W_{IE_x} + J_{xy}^I W_{IE_y} + J_{xz}^I W_{IE_z}) \\
& - W_{IE_x} (J_{zx}^I W_{IE_x} + J_{zy}^I W_{IE_y} + J_{zz}^I W_{IE_z}) = M_{m_I} + M_{fr_{OI}} \times m_I (r_{PG_{I_z}} g_x^I - r_{PG_{I_x}} g_z^I) \quad (3.52)
\end{aligned}$$

İç gımbal y eksenindeki moment  $J_{yy}^I$  ve açısal ivmesi  $a_{IE_y}$  olduğunu dikkate alırsak;

$$J_{yy}^I a_{IE_y} + D_{dinamikdengesiz}^I = M_{m_I} + M_{fr_{OI}} + D_{statikdengesiz_y}^I \quad (3.53)$$

$$\begin{aligned}
& D_{dinamikdengesiz}^I = J_{yx}^I a_{IE_x} + J_{yz}^I a_{IE_z} + W_{IE_z} (J_{xx}^I W_{IE_x} + J_{xy}^I W_{IE_y} + J_{xz}^I W_{IE_z}) \\
& - W_{IE_x} (J_{zx}^I W_{IE_x} + J_{zy}^I W_{IE_y} + J_{zz}^I W_{IE_z}) \quad (3.54)
\end{aligned}$$

$$D_{statikdengesiz_y}^I = m_I (r_{PG_{I_z}} g_x^I - r_{PG_{I_x}} g_z^I) \quad (3.55)$$

$$\begin{aligned}
& D_{statikdengesiz_y}^I = g m_I (r_{PG_{I_z}} (\cos(E) \cos(\theta) - \sin(E) \sin(\theta)) \\
& + r_{PG_{I_x}} (\cos(E) \sin(\theta) + \cos(\theta) \sin(E))) \quad (3.56)
\end{aligned}$$

### 3.3.2. Dış gımbal dinamiği

Yanca eksenini için Newton eşitliği aşağıdaki gibidir;

$$(m_O+m_I)(a_O-g)=F_{BO}+F_{IO} \quad (3.57)$$

$$F_{IO}=-F_{OI} \quad (3.58)$$

$$F_{BO}-F_{OI}=(m_O+m_I)(a_O-g) \quad (3.59)$$

Newton eşitliğinde bulunan  $m_O$  dış gimbalin ağırlığı,  $m_I$  iç gimbal ağırlığı,  $a_O$  dış gimbalin ağırlık merkezinin lineer ivmesi,  $g$  yerçekimi ivmesi,  $F_{BO}$  gimbal tabanından dış gimbal üzerine uygulanan kuvvet,  $F_{OI}$  dış gimbalden iç gimbal üzerine uygulanan kuvveti temsil etmektedir.

İç ve dış gimballerin dönme eksenleri çakışık olarak kabul edilmektedir. Buna göre pivot noktasına göre Euler eşitliği aşağıdaki gibi yazılmaktadır.

$$H_O=J_O W_{OE}+R_{OI}H_I \quad (3.60)$$

$$H_O=J_O W_{OE}+R_{OI} (J_I W_{IE} \quad (3.61)$$

$$\Sigma M=\Delta H_O \quad (3.62)$$

$$J_O \cdot a_{OE} + \dot{R}_{OI} \cdot J_I \cdot W_{IE} + R_{OI} \cdot J_I \cdot a_{IE} + \omega_{Oe} \times (J_O \cdot \omega_{Oe} + R_{OI} \cdot J_I \cdot \omega_{Ie}) = M_{BO} + M_{IO} + D_{statikdengesiz}^O \quad (3.63)$$

$$D_{statikdengesiz}^O = r_{PGO} \times ((m_O+m_I)g) \quad (3.64)$$

Pivot noktasına göre Euler eşitliğinde  $H_O$  dış gimbalin açısal momentumu,  $J_I$  iç gimbalin pivot noktasındaki atalet matrisi,  $J_O$  dış gimbalin pivot noktasındaki atalet matrisi,  $R_{OI}$  dış gimbal ile iç gimbal arasındaki dönüşüm matrisi,  $\Delta H_O$  dış gimbalin pivot noktasındaki açısal momentum değişimi,  $M_{IO}$  dış gimbal üzerine iç gimbalden uygulanan moment,  $M_{BO}$  dış gimbal üzerine gimbal tabanından uygulanan moment,  $D_{statikdengesiz}^O$  dış gimbaldeki statik yük dengesizliğinden oluşan bozucu etki momentini ifade eder.

Eşitlik (3.63)'deki ifadeler detaylı olarak aşağıda incelenmiştir. İlk olarak Dış gimbalin pivot noktası etrafındaki atalet matrisi belirtilmiştir.

$$J_O = \begin{bmatrix} I_{xx}^O & I_{xy}^O & I_{xz}^O \\ I_{yx}^O & I_{yy}^O & I_{yz}^O \\ I_{zx}^O & I_{zy}^O & I_{zz}^O \end{bmatrix} \quad (3.65)$$

Dış gimbale iç gimbalden uygulanan moment aşağıdaki gibi 3X1 matristen oluşmaktadır.

$$M_{IO} = \begin{bmatrix} M_{IO_x} \\ M_{IO_y} \\ M_{frIO} \end{bmatrix} \quad (3.66)$$

$M_{frIO}$  iç gimbal ve dış gimbal arasındaki sürtünme torkudur. Hareket eksenini yanca eksenini olduğundan  $M_{IO_x}$  ve  $M_{IO_y}$  dikkate alınmaz. Gimbal tabanının dış gimbale uyguladığı moment aşağıdaki gibi ifade edilir. Motordan dış gimbal dönüş eksenine uygulanan moment  $M_{mO}$  ile ifade edilir. Yanca eyleyicisi ile dış gimbal'in pivot noktası arasındaki sürtünme momenti  $M_{frBO}$  ile ifade edilir. Aynı şekilde hareket eksenini dışında kaldığından  $M_{BO_x}$  ve  $M_{BO_y}$  dikkate alınmaz.

$$M_{BO} = \begin{bmatrix} M_{BO_x} \\ M_{BO_y} \\ M_{mO} + M_{frBO} \end{bmatrix} \quad (3.67)$$

Pivot noktasından dış gimbalin ağırlık merkezine olan pozisyon vektörü  $r_{PGO}$  ile ifade edilir.

$$r_{PGO} = [r_{PGO_x} \quad r_{PGO_y} \quad r_{PGO_z}]^T \quad (3.68)$$

$$g^O = -g(R_{OB}R_{Bn}R_{nm}R_{me})u_z \quad (3.69)$$

$$g^O = -g \begin{bmatrix} -\cos\eta \sin\theta + \sin\eta \sin\phi \cos\theta \\ \sin\eta \sin\theta + \cos\eta \sin\phi \cos\theta \\ \cos\phi \cos\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_x^O \\ g_y^O \\ g_z^O \end{bmatrix} \quad (3.70)$$



Denklem (3.63)'deki Euler eşitliği detaylı olarak aşağıdaki gibi düzenlenmiştir.

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} I_{xx}^O & I_{xy}^O & I_{xz}^O \\ I_{yx}^O & I_{yy}^O & I_{yz}^O \\ I_{zx}^O & I_{zy}^O & I_{zz}^O \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{Oe_x} \\ a_{Oe_y} \\ a_{Oe_z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\sin \epsilon & 0 & \cos \epsilon \\ 0 & 1 & 0 \\ -\cos \epsilon & 0 & -\sin \epsilon \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{xx}^I & I_{xy}^I & I_{xz}^I \\ I_{yx}^I & I_{yy}^I & I_{yz}^I \\ I_{zx}^I & I_{zy}^I & I_{zz}^I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{Ie_x} \\ \omega_{Ie_y} \\ \omega_{Ie_z} \end{bmatrix} \\
& + \begin{bmatrix} \cos \epsilon & 0 & \sin \epsilon \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \epsilon & 0 & \cos \epsilon \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{xx}^I & I_{xy}^I & I_{xz}^I \\ I_{yx}^I & I_{yy}^I & I_{yz}^I \\ I_{zx}^I & I_{zy}^I & I_{zz}^I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{Ie_x} \\ a_{Ie_y} \\ a_{Ie_z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_{Oe_x} \\ \omega_{Oe_y} \\ \omega_{Oe_z} \end{bmatrix} \\
& \times \left( \begin{bmatrix} I_{xx}^O & I_{xy}^O & I_{xz}^O \\ I_{yx}^O & I_{yy}^O & I_{yz}^O \\ I_{zx}^O & I_{zy}^O & I_{zz}^O \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{Oe_x} \\ \omega_{Oe_y} \\ \omega_{Oe_z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \epsilon & 0 & \sin \epsilon \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \epsilon & 0 & \cos \epsilon \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{xx}^I & I_{xy}^I & I_{xz}^I \\ I_{yx}^I & I_{yy}^I & I_{yz}^I \\ I_{zx}^I & I_{zy}^I & I_{zz}^I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{Ie_x} \\ \omega_{Ie_y} \\ \omega_{Ie_z} \end{bmatrix} \right) \\
& = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ M_{mO} + M_{frIO} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ M_{frIO} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_{PG_{Ox}} \\ r_{PG_{Oy}} \\ r_{PG_{Oz}} \end{bmatrix} \times -g(m_O + m_I) \begin{bmatrix} g_x^O \\ g_y^O \\ g_z^O \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.71}$$

Eşitlik (3.71)'i açarsak;

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} I_{xx}^O a_{Oe_x} + I_{xy}^O a_{Oe_y} + I_{xz}^O a_{Oe_z} \\ I_{yx}^O a_{Oe_x} + I_{yy}^O a_{Oe_y} + I_{yz}^O a_{Oe_z} \\ I_{zx}^O a_{Oe_x} + I_{zy}^O a_{Oe_y} + I_{zz}^O a_{Oe_z} \end{bmatrix} \\
& + \begin{bmatrix} -\sin \epsilon \left( I_{xx}^I \omega_{Ie_x} + I_{xy}^I \omega_{Ie_y} + I_{xz}^I \omega_{Ie_z} \right) + \cos \epsilon \left( I_{zx}^I \omega_{Ie_x} + I_{zy}^I \omega_{Ie_y} + I_{zz}^I \omega_{Ie_z} \right) \\ 0 \\ -\cos \epsilon \left( I_{xx}^I \omega_{Ie_x} + I_{xy}^I \omega_{Ie_y} + I_{xz}^I \omega_{Ie_z} \right) - \sin \epsilon \left( I_{zx}^I \omega_{Ie_x} + I_{zy}^I \omega_{Ie_y} + I_{zz}^I \omega_{Ie_z} \right) \end{bmatrix} \\
& + \begin{bmatrix} \cos \epsilon \left( I_{xx}^I a_{Ie_x} + I_{xy}^I a_{Ie_y} + I_{xz}^I a_{Ie_z} \right) + \sin \epsilon \left( I_{zx}^I a_{Ie_x} + I_{zy}^I a_{Ie_y} + I_{zz}^I a_{Ie_z} \right) \\ I_{yx}^I a_{Ie_x} + I_{yy}^I a_{Ie_y} + I_{yz}^I a_{Ie_z} \\ -\sin \epsilon \left( I_{xx}^I a_{Ie_x} + I_{xy}^I a_{Ie_y} + I_{xz}^I a_{Ie_z} \right) + \cos \epsilon \left( I_{zx}^I a_{Ie_x} + I_{zy}^I a_{Ie_y} + I_{zz}^I a_{Ie_z} \right) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_{Oe_x} \\ \omega_{Oe_y} \\ \omega_{Oe_z} \end{bmatrix} \\
& \times \begin{bmatrix} I_{xx}^O W_{Oe_x} + I_{xy}^O W_{Oe_y} + I_{xz}^O W_{Oe_z} \\ I_{yx}^O W_{Oe_x} + I_{yy}^O W_{Oe_y} + I_{yz}^O W_{Oe_z} \\ I_{zx}^O W_{Oe_x} + I_{zy}^O W_{Oe_y} + I_{zz}^O W_{Oe_z} \end{bmatrix} \\
& + \begin{bmatrix} \cos \epsilon \left( I_{xx}^I W_{Ie_x} + I_{xy}^I W_{Ie_y} + I_{xz}^I W_{Ie_z} \right) + \sin \epsilon \left( I_{zx}^I W_{Ie_x} + I_{zy}^I W_{Ie_y} + I_{zz}^I W_{Ie_z} \right) \\ I_{yx}^I W_{Ie_x} + I_{yy}^I W_{Ie_y} + I_{yz}^I W_{Ie_z} \\ -\sin \epsilon \left( I_{xx}^I W_{Ie_x} + I_{xy}^I W_{Ie_y} + I_{xz}^I W_{Ie_z} \right) + \cos \epsilon \left( I_{zx}^I W_{Ie_x} + I_{zy}^I W_{Ie_y} + I_{zz}^I W_{Ie_z} \right) \end{bmatrix} \\
& = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ M_{mO} + M_{frIO} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ M_{frIO} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_{PG_{Ox}} \\ r_{PG_{Oy}} \\ r_{PG_{Oz}} \end{bmatrix} \times (m_I + m_O) \begin{bmatrix} g_x^O \\ g_y^O \\ g_z^O \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.72}$$

Denklem (3.72)'yi açtığımızda aşağıdaki sonuçlar ortaya çıkar.

$$\begin{aligned}
& I_{zx}^O a_{Oe_x} + I_{zy}^O a_{Oe_y} + I_{zz}^O a_{Oe_z} - \cos \epsilon \left( I_{xx}^I \omega_{Ie_x} + I_{xy}^I \omega_{Ie_y} + I_{xz}^I \omega_{Ie_z} \right) \\
& - \sin \epsilon \left( I_{zx}^I \omega_{Ie_x} + I_{zy}^I \omega_{Ie_y} + I_{zz}^I \omega_{Ie_z} \right) - \sin \epsilon \left( I_{xx}^I a_{Ie_x} + I_{xy}^I a_{Ie_y} + I_{xz}^I a_{Ie_z} \right) \\
& + \cos \epsilon \left( I_{zx}^I a_{Ie_x} + I_{zy}^I a_{Ie_y} + I_{zz}^I a_{Ie_z} \right) \\
& + \omega_{Oe_x} \left( I_{yx}^O W_{Oe_x} + I_{yy}^O W_{Oe_y} + I_{yz}^O W_{Oe_z} + I_{yx}^I W_{Ie_x} + I_{yy}^I W_{Ie_y} + I_{yz}^I W_{Ie_z} \right) \\
& - \omega_{Oe_y} \left( I_{xx}^O W_{Oe_x} + I_{xy}^O W_{Oe_y} + I_{xz}^O W_{Oe_z} \right) + \cos \epsilon \left( I_{xx}^I W_{Ie_x} + I_{xy}^I W_{Ie_y} + I_{xz}^I W_{Ie_z} \right) \\
& + \sin \epsilon \left( I_{zx}^I W_{Ie_x} + I_{zy}^I W_{Ie_y} + I_{zz}^I W_{Ie_z} \right) = M_{mO} + M_{frIO} + (m_I + m_O)(r_{PG_{Ox}} g_y^O - r_{PG_{Oy}} g_x^O)
\end{aligned} \tag{3.73}$$

Dış gimbal için euler eşitliği Denklem (3.74)'deki gibi elde edilmiştir. Dış gimbal yanca eksen takımının hareketi z ekseninde olacağından sistem modellenmesinde kullanılacak eşitlikler buna göre çıkarılmıştır.

$$I_{zz}^O a_{Oe_z} + D_{dinamikdengesiz_z}^O = M_{mO} + M_{frBO} + M_{frIO} + D_{statikdengesiz_z}^O \tag{3.74}$$

$$\begin{aligned}
D_{dinamikdengesiz_z}^O &= I_{zx}^O a_{Oe_x} + I_{zy}^O a_{Oe_y} - \cos \epsilon \left( I_{xx}^I \omega_{Ie_x} + I_{xy}^I \omega_{Ie_y} + I_{xz}^I \omega_{Ie_z} \right) \\
&- \sin \epsilon \left( I_{zx}^I \omega_{Ie_x} + I_{zy}^I \omega_{Ie_y} + I_{zz}^I \omega_{Ie_z} \right) - \sin \epsilon \left( I_{xx}^I a_{Ie_x} + I_{xy}^I a_{Ie_y} + I_{xz}^I a_{Ie_z} \right) \\
&+ \cos \epsilon \left( I_{zx}^I a_{Ie_x} + I_{zy}^I a_{Ie_y} + I_{zz}^I a_{Ie_z} \right) \\
&+ \omega_{Oe_x} \left( I_{yx}^O W_{Oe_x} + I_{yy}^O W_{Oe_y} + I_{yz}^O W_{Oe_z} + I_{yx}^I W_{Ie_x} + I_{yy}^I W_{Ie_y} + I_{yz}^I W_{Ie_z} \right) \\
&- \omega_{Oe_y} \left( I_{xx}^O W_{Oe_x} + I_{xy}^O W_{Oe_y} + I_{xz}^O W_{Oe_z} + \cos \epsilon \left( I_{xx}^I W_{Ie_x} + I_{xy}^I W_{Ie_y} + I_{xz}^I W_{Ie_z} \right) \right. \\
&\left. + \sin \epsilon \left( I_{zx}^I W_{Ie_x} + I_{zy}^I W_{Ie_y} + I_{zz}^I W_{Ie_z} \right) \right)
\end{aligned} \tag{3.75}$$

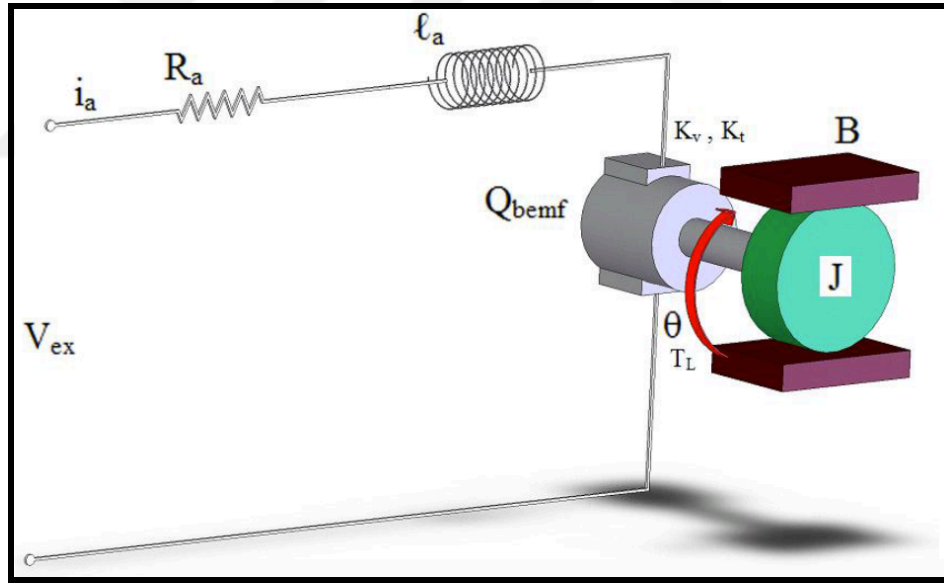
$$\begin{aligned}
D_{statikdengesiz_z}^O &= g(m_O + m_I) \left( (-\cos \eta \sin \theta + \sin \eta \sin \phi \cos \theta) r_{PG_{Oy}} \right. \\
&\left. - (\sin \eta \sin \theta + \cos \eta \sin \phi \cos \theta) r_{PG_{Ox}} \right)
\end{aligned} \tag{3.76}$$

### 3.4. Sistem Modeli

Gimbal yapıya sahip aktif koruma sisteminin matematiksel modeli oluşturulurken iç gimbal, dış gimbal ve motor olmak üzere 3 ana birimde incelenmiştir. Gimballerin dinamik denklemleri doğru akım motor modeline eklenerek sistemin modeli çıkarılmıştır. İç gimbal ve dış gimbalın arasında oluşan sürtünme etkisi aktif koruma sistemi için düşük değerlerde olduğundan ihmal edilebilir. Benzetim çalışmasını güçlendirmek amacıyla bu çalışmada gimballere etki eden sürtünme etkisi literatürde benzer bir çalışmada kullanılmış olan değerler alınmıştır.

#### 3.4.1. Doğru akım motor modeli

Bu çalışmada iç gimbal ve dış gimbal tahrik eyleyicileri için APPLIMOTION firmasının motorları rol model alınmıştır. Kullanılan motorlar doğrudan tahrikli sürekli mıknatıslı fırçasız tipte eyleyicilerdir.



Şekil 3.2. Doğru Akım Motor Modeli

Bu modelde Kirchoff yasası kullanıldığında, motor ile ilgili aşağıdaki diferansiyel denklemler elde edilir. Motorun ürettiği tork  $T_L$  (Nm), motorun armatüründen geçen akıma  $i_a$ (A) ve tork sabiti  $K_t$ 'ye (V/(rad/sec)) bağlıdır.

$$T_L = K_t i_a \quad (3.77)$$

Armatür döndükçe armatüre bağlı şaftın açısal hızıyla doğru orantılı olarak bir ters emk gerilimi oluşur. Ters emk gerilimi  $V_{bemf}$  motor şaftının açısal hızı  $\theta$  ile emk sabiti  $K_v$  ile doğru orantılıdır.

$$V_{bemf}=K_v\theta \quad (3.78)$$

Şekil (3.2)'ye göre  $R_a$  motor iç direnci,  $L_a$  motor sarım endüktansı,  $V_{ex}$  uygulanan gerilim değerleridir. Ohm kanununa göre:

$$V_{ex}-V_{bemf}=L_a \frac{di_a}{dt}+R_a i_a \quad (3.79)$$

Ters emk gerilimini eşitliğin diğer kısmına aktarılıp yerine Eşitlik (3.78) yazıldığında Eşitlik (3.80) elde edildi,

$$V_{ex}=L_a \frac{di_a}{dt}+R_a i_a+V_{bemf} \quad (3.80)$$

Eşitlik (3.80)'in Laplace dönüşümü yapıldığında aşağıdaki Denklem (3.81) elde edildi,

$$V_{ex}(s)=L_a i_a(s)+R_a i_a(s)+V_{bemf}(s) \quad (3.81)$$

$$i_a(s)=\left[\frac{1}{L_a+R_a}\right]+[V_{ex}(s)-K_v\theta(s)] \quad (3.82)$$

Şekil (3.2)'de tork eşitliği, Newton'nun 2. yasası kullanılarak elde edilmektedir.  $J$  toplam ataletsel momenti ifade etmekte,

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2}+B \frac{d\theta}{dt}=K_t i_a \quad (3.83)$$

Eşitlik (3.83)'ün Laplace dönüşümü yapıldığında aşağıdaki Eşitlik (3.84) elde edildi,

$$Js^2\theta+Bs\theta(s)=K_t I_a(s) \quad (3.84)$$

Eşitlik (3.82)'deki akım ifadesi Eşitlik (3.84)'te yerine yazıldığında,

$$Js^2\theta + Bs\theta(s) = K_t \left[ \frac{1}{L_a + R_a} \right] + [V_{ex}(s) - K_v\theta(s)] \quad (3.85)$$

Sistem girişi, giriş gerilimi  $V_{ex}(s)$ , çıkışı açısal hız  $\theta(s)$  olacak şekilde uygun düzenlenir. Doğru akım motoru transfer fonksiyonu Denklem (3.86)'daki gibi elde edildi,

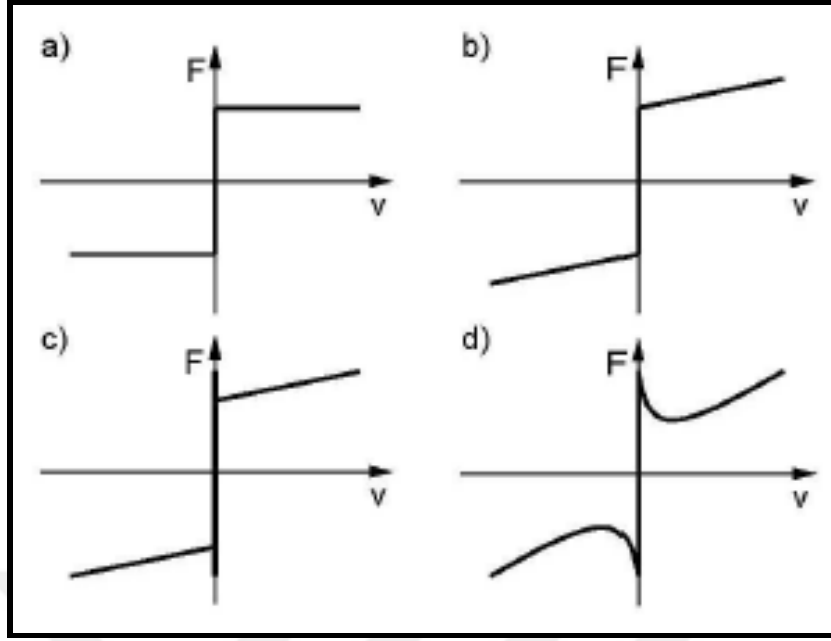
$$\frac{\theta(s)}{V_{ex}(s)} = \frac{K_v}{s[(R_a + L_a)(Js + B) + K^2]} \quad (3.86)$$

### 3.4.2. Sürtünme modeli

Sürtünme genellikle iki kayan yüzeyin hareketine gösterilen direnç olarak tanımlanır. Sürtünme kuvveti, yüzey büyüklüğü, geometrisi, sürtünen maddenin tipi, maddenin yer değiştirmesi ve yağlanmış yüzey olup olmaması gibi bir çok değişkene bağlıdır [34]. Servo sistemlerde sürtünme, doğrudan sistem dinamiği üzerine etki eder [35]. Gimbal sistemlerde sürtünme, yanca ve yükseliş hareketini sağlayan iç gimbal ve dış gimbal arasındaki harekete karşı koyan dirençtir. Sistem benzetiminin gerçek sistem ile tutarlı olabilmesi için sistemin bilinmeyen davranışları da sürtünme etkisi olarak eklenir. Benzetim çalışmalarında dinamik ve statik olmak üzere iki tip sürtünme modeli vardır. Statik sürtünme modelleri Klasik modeller, Stribeck modeli, Karnopp modeli ve Armstrong modeli olmak üzere 4 gruba ayrılır. Klasik statik sürtünme modelleri coulomb, vizkoz, statik ve bunların kombinasyonlarından meydana gelir [36]. Klasik sürtünme modelleri hız ve sürtünme momenti arasındaki statik tablolar ile ifade edilir.

#### 3.4.2.1. Statik sürtünme modelleri

Coulomb sürtünme modeli hızın sıfır olduğu durum için sürtünme kuvvetini vermez. Sadece sıfır,  $+F_c$  ve  $-F_c$  değerlerini alabilir. Coulomb sürtünme modeli basitliğinden dolayı sürtünme kombinasyonlarında sıklıkla kullanılır. Coulomb sürtünmesi ve kombinasyonları Şekil (3.3)'deki gibidir.



Şekil 3.3. Statik Sürtünme Modelleri (a) Coulomb Sürtünmesi (b) Coulomb ve Viskoz Sürtünme Kombinasyonu (c) Coulomb, Yapışma (stiction) ve Viskoz Sürtünme Kombinasyonu(d) Stribeck Etkisi Eğrisi

Coulomb sürtünme denlemi Eşitlik (3.87)'de gösterildiği gibidir,

$$F_{s_c} = F_c \text{sgn}(v) = \mu F_N \text{sgn}(v) \quad (3.87)$$

Burada Coulomb sürtünme kuvvet katsayısı  $F_c$ , normal yük  $F_N$  ile orantılıdır.  $F_{s_c}$  Coulomb sürtünme kuvveti,  $\mu$  ise Coulomb sürtünme katsayısıdır.

Vizkoz sürtünmesi birbirine temas eden yüzeyler arasındaki yağlamanın bir sonucu olarak karşımıza çıkar. Şekil (3.3-b)'de viskoz ve Coulomb sürtünmesinin birlikte oluşturduğu grafik görülmektedir. Viskoz sürtünme kuvveti Denklem (3.87)'deki gibidir. Bu sürtünme modelinin hız ile doğru orantılı bir şekilde değiştiği kabul edilmektedir.[36]

$$F_{s_v} = F_v v \quad (3.88)$$

Burada  $F_{s_v}$  viskoz sürtünme kuvveti,  $F_v$  viskoz sürtünme katsayısı,  $v$  hızdır.

Statik sürtünme bazı kaynaklarda yapışma (stiction) sürtünmesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sürtünme modeli coulomb sürtünmesinden daha büyük olduğu

bilinmektedir. Bu yüzden yapışma sürtünmesi daha önceki coulomb ve viskoz sürtünmeleri gibi hızın bir fonksiyonu olarak ifade edilemez. Statik sürtünme kuvveti, uygulanan kuvvete bağlıdır. Uygulanan kuvvet statik kuvvetin üzerine çıktığında, sistem hareket etmeye başlar. Şekil (3.3-c)'de Viskoz, coulomb ve yapışma sürtünmesinin birlikte oluşturduğu grafik görülmektedir.

Stribeck sürtünme modeli, hareketli mekanik parçaların temas yüzeylerinde yağ kullanıldığında meydana gelen sürtünme modelidir. Stribeck modeli hızın bir fonksiyonu olarak daha gelişmiş bir sürtünme modelidir [37]. Sadece sabit durumda hala geçerli olmasına rağmen, Coulomb ve viskoz sürtünme modelini yerleşik elemanlar olarak içerir. Doğrusal olmayan sürtünme kuvvetinin genel ifadesi Denklem (3.89)'daki gibidir,

$$F(v)=F_c+(F_{st}+F_c)e^{-\left|\frac{v}{v_s}\right|^{\delta_s}}+F_v(v) \quad (3.89)$$

Burada  $v_s$  Stribeck hızı ve  $\delta_s$  Stribeck şekil faktörüdür.

#### 3.4.2.2. Dinamik sürtünme modelleri

Dinamik modeller statik modellerin bütün problemlerini çözebilir. Bu yüzden çoğunlukla statik sürtünmelere göre dinamik sürtünmeler daha çok tercih edilir.[16] Dahl bunu, iki yüzey arasındaki bağlantı kuvvetlerinde meydana gelen yay benzeri elastik malzeme davranışı ile karşılaştırdı. Dahl sürtünme kuvvetinin sadece hızın değil, aynı zamanda yer değiştirmenin bir fonksiyonu olduğunu varsaymıştır. Dinamik sürtünme modellerinden olan Dahl modeli rulman sürtünmeli servo sistemlerde sıklıkla kullanılır. Dahl model klasik katı mekaniklerde stres-gerilme eğrisine bağlıdır. Fakat Dahl modeli, hıza bağlı bir sürtünme olan stribeck etkisini ve yapışma-kayma hareketini yakalayamaz. Dahl modeli zaman düzleminde Eşitlik (3.90)'daki gibi ifade edilir.

$$M_{fr}=\sigma z \quad (3.90)$$



$$\frac{dz}{dt} = v - \frac{\sigma_0 |v|}{M_c} z \quad (3.91)$$

Burada  $M_{fr}$  sürtünme torku,  $M_c$  coulomb sürtünmesi,  $v$  açısal hız ve  $\sigma_0$  rijitliktir.

Bir diğer dinamik sürtünme modeli LuGre modelidir. Bu modelde iki katı maddenin yüzeylerindeki elastik kılcallar olduğu ve bu kılcalların birbiriyle temas halinde oldukları varsayılır. İki katı yüzey birbirine çok kısa mesafeden paralel hareket ettiklerinde kılcallar elastik özelliklerinden dolayı esneyecekler ve sürtünme kuvvetine neden olacaklardır. LuGre modeli Stribeck etkisinin modellenmesinde oldukça başarılıdır. Bu sebeple yapılan bu çalışmada elde edilecek sürtünme modeli LuGre modeliyle sağlanacaktır. Elastik kılcalların bükülmesinden kaynaklanan sürtünme kuvveti Eşitlik (3.92)'deki gibidir.

$$M_{fr} = \sigma_0 z + \sigma_1 \frac{dz}{dt} \quad (3.92)$$

Burada  $\sigma_1$  sönümlenme katsayısı,  $z$  kılcalların ortalama bükülmesidir. Bu ifadeye viskoz sürtünme denklemi eklenir ve ifade Eşitlik (3.93)'deki şeklini almakta,

$$M_{fr} = \sigma_0 z + \sigma_1 \frac{dz}{dt} + F_v v \quad (3.93)$$

Bu çalışmada sistem modellenmesi yapılan gimbal, görüş sistemi veya radar anteni gibi yüksek pozisyon hassasiyeti gerektirmeyen ve yaklaşık  $\pm 2$  derecelik pozisyon toleransları ile kullanılmak üzere tasarlanmıştır. İç ve dış gimballerin arasında oluşacak sürtünme etkileri kullanılan açısal rulman çiftleri ile en aza indirgenmiştir. Bundan dolayı sistem modellenmesinde kullanılacak sürtünme verileri benzer çalışmalarda kullanılan yaklaşık değerler kabul edilmiştir. Literatürde gimbal sistemlerde tercih edilen dinamik sürtünme modeli olarak Dahl modeli tercih edilmiştir.

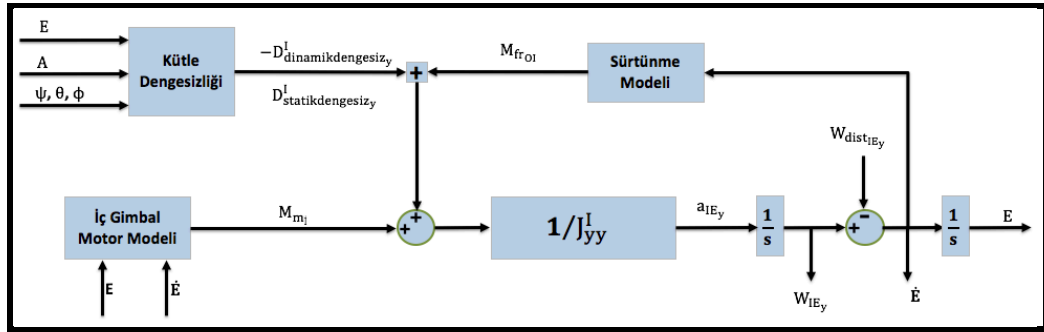
Tablo 3.1. Sürtünme Değerleri

Parametreler	Birimler	Sembol	$T_{fr_{BO}}$	$T_{fr_{IO}}$
Coulomb Sürtünme Torku	N. m	$T_c$	18	2.5
Statik Sürtünme Torku	N. m	$T_s$	22	3.5
Stribeck Hızı	rad/sn	$v_s$	0.001	0.001
Stribeck Etkisi	-	$\delta$	2	2
Rijitlik Katsayısı	N. m/rad	$\sigma_0$	82	90
Sönümlenme Katsayısı	N. m/rad	$\sigma_1$	8.7	9.48
Viskoz Katsayısı	N. m . sn/rad	$\sigma_2$	0	0

### 3.4.3. İç gimbal modeli

Bölüm 3.3'teki iç gimbal için Euler eşitliklerinin sonucu olarak Eşitlik (3.94) ifadesi ortaya çıkmaktadır. Bu ifadeyi motor modeli ile birlikte kullanarak iç gimbal sistem modeline ulaşılmıştır.

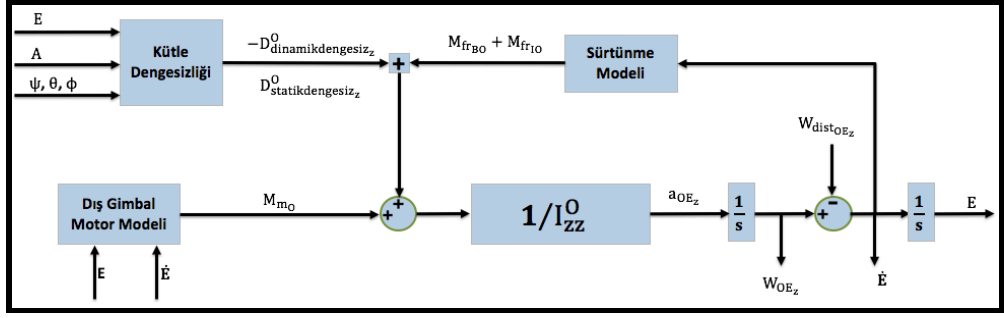
$$I_{yy}^I a_{I_{E_y}} + D_{dinamikdengesiz_y}^I = M_{m_I} + M_{fr_{OI}} + D_{statikdengesiz_y}^I \quad (3.94)$$



Şekil 3.4 İç Gimbal Blok Diyagramı

Bölüm 3.3'teki iç gimbal için Euler eşitliklerinin sonucu olarak Denklem (3.95) ifadesi ortaya çıkmaktadır. Bu ifadeyi motor modeli ile birlikte kullanarak iç gimbal sistem modeline ulaşıldı.

$$I_{zz}^O a_{O_{E_z}} + D_{dinamikdengesiz_z}^O = M_{m_O} + M_{fr_{BO}} + M_{fr_{IO}} + D_{statikdengesiz_z}^O \quad (3.95)$$



Şekil 3.5 Dış Gimbal Blok Diyagramı

#### 4. SİSTEMİN BENZETİMİ VE GERÇEK ZAMANLI DENETİMİ

Bu bölümde, matematiksel olarak modellenen ve gerçek zamanlı denetimi yapılan gimbal aktif koruma sisteminin yanca eksenini için denetim sistemi ve bu denetim sistemini oluşturan kontrolcülerin karşılaştırılması ele alınmıştır. Aktif koruma sistemlerinin lançerlerini taşımak ve yönlendirmek için tasarlanan gimbal yapının, yanca ekseninin reaksiyon süresinin azaltılması amacıyla dayalı kontrolcü tasarım çalışmaları yapılmıştır. Gimbal sistemlerinde kullanılan fırçasız doğru akım (DA) motorlar redüktörsüz bir şekilde faydalı yük'e doğrudan bağlanırlar. Bu nedenle benzetim safhasında fırçasız DA motorunun modeli kullanılarak geliştirilen kontrolcüler aynı zamanda sistemin eksen kontrolünü de başarıyla gerçekleştirirler. Fırçasız doğru akım motorlarının fırçalı doğru akım motorlarından farkı 3 fazlı olmaları ve komutasyon algoritmasına sahip olmasıdır. Bir fırçasız doğru akım motorunun komutasyon algoritmasının doğru yapıldığı varsayılırsa fırçalı doğru akım motor modeli sistem modeli olarak kullanılabilir.[38] Bu bağlamda 3. bölümde hazırlanan motor modeli üzerinden kontrolör tasarımı yapılması uygun görülmüştür. AKS'de kullanılan yanca eksenini motor parametreleri ve bu eksenin ataleti aşağıdaki gibidir.

Tablo 4.1. Yanca Eksenini Parametreleri

Parametreler	Birimler	Semboller	Dış Gimbal
Direnç	Ohm	R	0,71
Endüktans	mH	L	5,2/1000
Atalet momenti	kg. m <sup>2</sup>	J	0,569
Tork sabiti	N.m/amp	Kt	257
Ters EMF katsayısı	V/(rad/sn)	Kb	0,20995

#### 4.1. Kontrolcü tasarımı

Bu çalışmada denetçi çalışmaları kapsamında 2 farklı denetim sistemi tasarlanmıştır. Bu denetim sistemleri kaskad PI denetleyici ve kaskad adaptif bulanık mantık PI denetleyicileridir. Tasarımı yapılan bu kontrolcülerin PI parametrelerinin bulunmasında optimizasyon yöntemi uygulanmıştır. Bu parametreler kontrolcülerin karşılaştırılabilir olması için adaptif PI kontrolcünün başlangıç değerlerinede atanmıştır. Tasarlanan adaptif bulanık mantık PI kontrolcüsü (“Adaptive Fuzzy Logic PI Controller”) MATLAB-Simulink programının kütüphanesindeki “Fuzzy Logic Toolbox (FLC)” kullanılarak geliştirilmiştir. Kontrol tasarımlarından sonra iyileşmelerin ölçülmesi için “performans kriteri” hesaplamaları yapılmıştır. Performans kriterlerinin doğruluğunun sağlanması için “performans indeksleri” olarak isimlendirilen bir ölçülendirme kullanılır. Performans indeksleri, sistemin başarmaya çalıştığı belirli performans karakteristiklerini içerir. Başlıca performans indeksleri hata, referans fonksiyonları ve çıkış sinyalinden meydana gelmektedir. Sistem parametreleri, performans indeksi en küçük değere ulaşacak şekilde bir noktaya ulaştığında, bu sistem optimum denetim sistemi olarak kabul edilir. Sonuç olarak en iyi kontrolcü bu performans indeks değerleri en düşük çıkan denetleyicidir. Performans indeksleri, kontrolcünün referans sinyali ile çıkış sinyali arasındaki hata sinyalini en düşük yapmaya çalışır.[39]

Kontrolcü karşılaştırmalarında kullanılan performans indeksleri aşağıdaki gibidir:

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (4.1)$$

$$IAE = \int_0^{\infty} |e|(t) dt \quad (4.2)$$

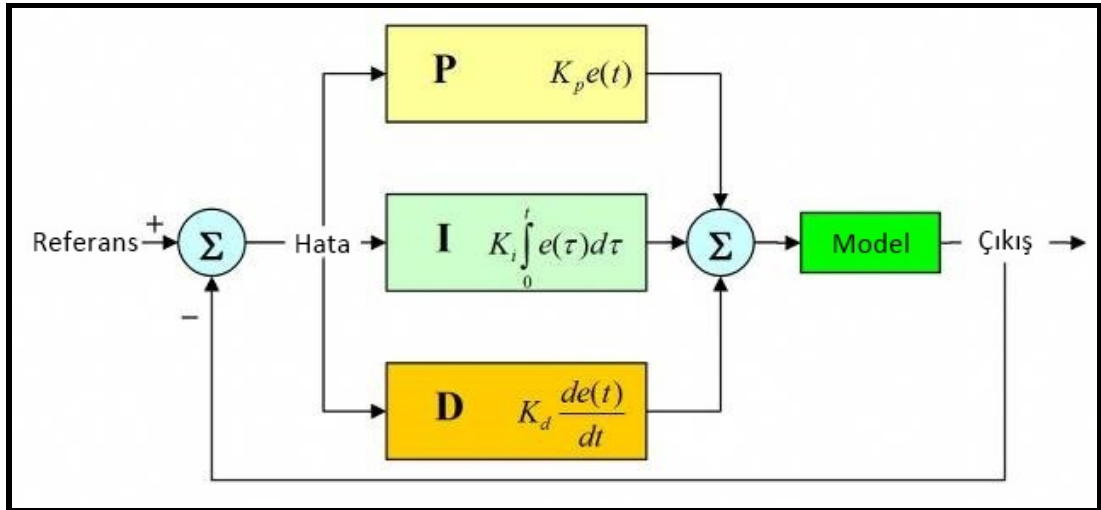
$$ITSE = \int_0^{\infty} te^2(t) dt \quad (4.3)$$

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e|(t)dt \quad (4.4)$$

Bu performans indeksleri kontrol sistemlerinin hata azaltma özelliklerini dikkate alır ve kontrolcülerini bu parametreye göre karşılaştırır. Çok döngülü kontrol algoritmalarının gereği olarak pozisyon, hız, akım için ayrı ayrı kontrol yapısı tasarlanmıştır. Çok döngülü kontrolcü tasarımları en iç döngüde bulunan kontrolcünün sistemi kararlı hale getirmesi ile başlanarak kendisinden dışarıya doğru bir sonraki kontrolcüye geçilip sistemin yine kararlı hale gelmesi sağlanarak yapılır. Çok döngülü kontrol yapısı kontrolcü çıkışının yanısıra içerideki hız ve akım kontrol döngülerinde kontrol edilebilme avantajı bu denetim sisteminin daha gürbüz hale gelmesini sağlamıştır.

#### 4.1.1. Kaskad Klasik PID Kontrolcüsü

Basitliği ve PID parametrelerinin kolayca belirlenebilmesinden dolayı motor kontrolü için en yaygın ve en fazla tercih edilen kontrolcü çeşididir. Birçok geri besleme çevrimli sistemler bu algoritmayı veya bu algoritmanın türevleriyle kontrol edilmektedir. PID (Proportional Integral Derivative) oransal, integral, türev olmak üzere üç farklı parametreye sahiptir.



Şekil 4.1. PID Denetleyici Yapısı

$$u(t)=K_p e(t)+K_i \int_0^t e(t)d(t)+K_d \frac{d_e}{d_t} \quad (4.5)$$

Denklem (4.5)'te yer alan  $u(t)$  çıkış değeri,  $e(t)$  hata fonksiyonu,  $K_p$  oransal,  $K_d$  türevsel kazanç değerleridir.  $K_p$  anlık hata değerini,  $K_i$  geçmiş hataların birikimini,  $K_d$  ise değişim oranına bağlı olarak gelecekte karşılaşılabilecek hataların öngörülmesini sağlamaktadır.  $K_p$  sistemin kararlılığına doğrudan etki ederken,  $K_i$  hatanın büyüklüğü ile doğru orantılı olarak hareket eder. Sistem hatasının değişim oranı, zaman içindeki hatanın değişiminin  $K_p$  ile çarpılmasıyla elde edilmektedir. Bu bağlamda  $K_d$  cevabın sönümlenmesini veya şekillenmesini sağlamak için kullanılır. PID parametrelerinin sisteme olan etkisi Tablo (4.2)'deki gibi gösterilmiştir.

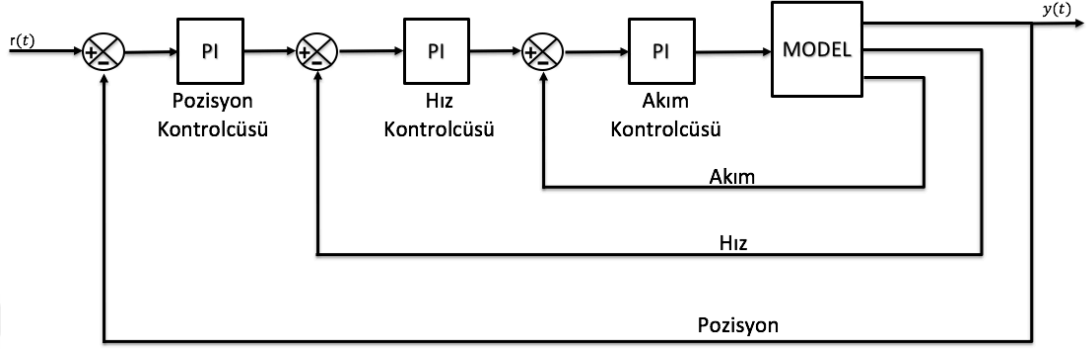
Tablo 4.2. PID Parametrelerinin Sisteme Etkisi

Kontrolcü	Yükselme Zamanı	Aşma	Oturma Zamanı	Kararlı Durum Hatası
$K_p$	Azalır	Artar	Değişmez	Azalır
$K_i$	Azalır	Artar	Artar	Azalır
$K_d$	Değişmez	Azalır	Azalır	Değişmez

Yaygın bir kullanım alanına sahip olan klasik PID kontrolcüsü özellikle motor kontrollerinde integral değerinin neden olduğu istenmeyen davranışlar ortaya çıkarmaktadır. Sistem kararlı durum hatasının düşürülemediği, sabit kaldığı durumlarda integral değerinin sürekli olarak yükseldiği görülmektedir. Bu durum herşey normale dönünceye kadar, hata işaretinin ters yönde olması gerekir. Yani integral kontrolcüsü, motor doyuma ulaştığında büyük genlikli cevaplar oluşturur. Bunun sonucunda, sistemin denetimi sağlanamaz ve kontrolcü yanlış davranış gösterir. Bu duruma integral yığılması denir ve en yaygın çözüm yöntemi “Anti-Windup” tekniğidir.[40] Gerçekleştirilen gerçek zamanlı çalışmalarda da integral yığılmasının engellenmesi için anti wind-up tekniği uygulanmıştır. Bu tekniğe ait test ve sonuçları gerçek zamanlı testler bölümünde gösterilmektedir.

Bu çalışmada kontrolcü türlerinde oransal ve integral kontrolcüler kullanılmıştır. İyi bir geçici tepkiye ve zayıf kararlı durum tepkisine sahip olan bir sistemin performansını iyileştirmek için Oransal-İntegral (PI) denetleyici kullanılması uygun

görülmüştür. Bu çalışmadaki denetim sisteminin gürbüzlüğünün artırılması için kaskad klasik PI tasarımı yapılmıştır. Kaskad klasik PI kontrolcü blok diyagramı Şekil (4.2)'deki gibidir. Bu diyagramda  $r(t)$  referans sinyalini  $y(t)$  ise çıkış sinyalini göstermektedir.



Şekil 4.2. Çok Döngülü Geleneksel PI Kontrolcü

Bu kontrolcü tasarımında pozisyon ve hız PI parametreleri f-min-search optimizasyon fonksiyonu ile elde edilmiştir. f-min-search optimizasyonu çok değişkenli, lineer olmayan bir  $f_x$  fonksiyonunun kısıtlama olmaksızın minimum olduğu noktayı araştırır. Bu nedenle bu yöntem, minimizasyon problemlerini çözmek için kullanılır [41]. Bu yönteme girdi olarak performans indeksi olan Denklem (4.4)'teki ITAE formülasyonu tanımlandı. Algoritma çeşitli PI parametrelerini işleme sokarak indeks değerini en düşük değere getirene kadar tekrar edildi, indeks değeri en düşük çıktığı yerde bulunan PI parametreleri sistemin optimum PI parametreleri olarak elde edilmiştir.

#### 4.1.2. Kaskad Adaptif Bulanık Mantık Kontrolcüsü

Bulanık mantık Aristo tarafından ileri sürülen ikili mantık sistemine karşı olarak geliştirilmiştir. Gerçek hayatta evet-hayır, 0-1, siyah-beyazın olmadığını, bunların arasında farklı seçeneklerin olduğunu düşünen Azerbaycanlı bilim adamı Zadeh tarafından ilk kez 1965 yılında ortaya atılmıştır. Bulanık mantık teorisinin temelini bulanık kümeler oluşturmaktadır. Zadeh bulanık mantıkla ilgili yapmış olduğu “Fuzzy Sets” isimli makalede, bulanık kümenin 0 ile 1 aralığında değişen üyelik derecelerine sahip nesnelere kümesi olarak tanımlamıştır. Bu bağlamda Zadeh, bir elemanın bulanık kümedeki üyelik derecesinin bir mutlak değer olmadığı aslında 0 ile 1 arasında bir ara değer olduğunu ifade etmektedir [42-43].



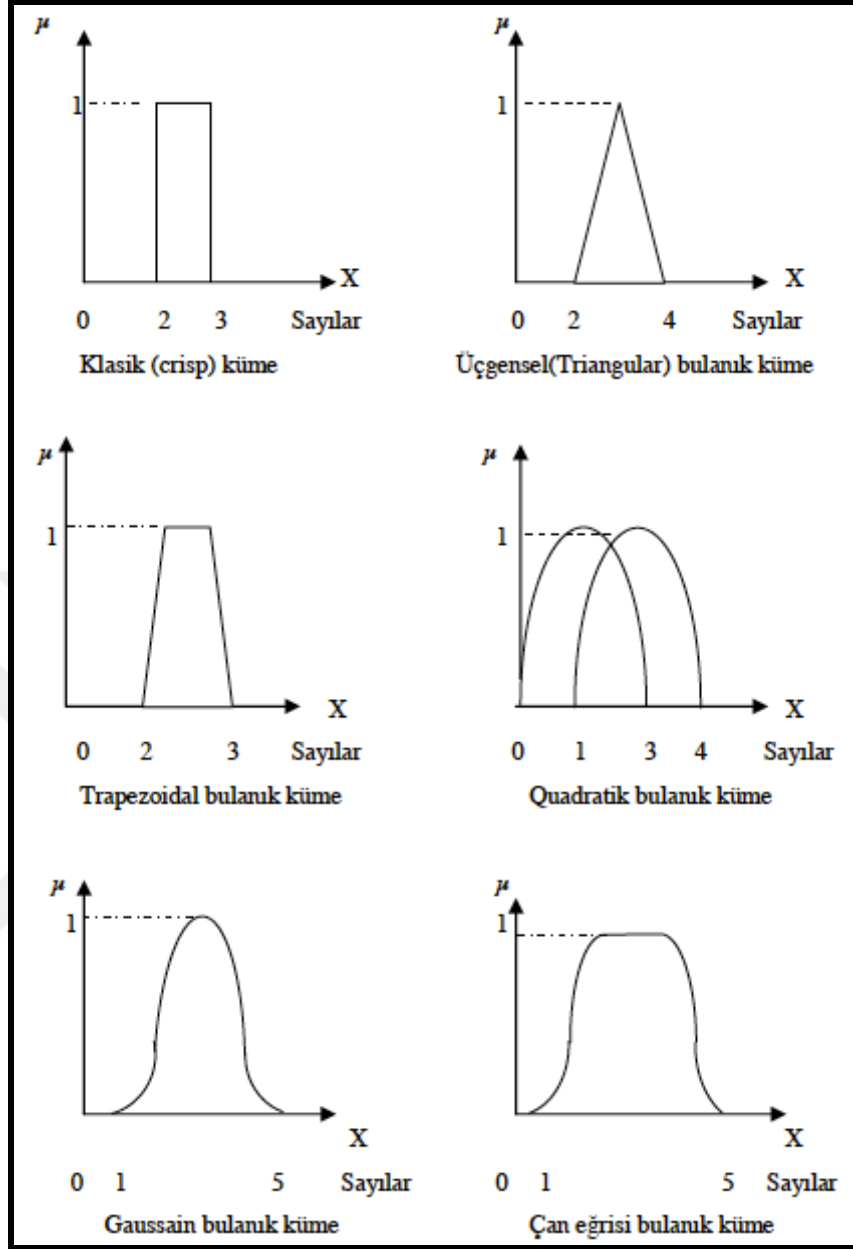
Bulanık mantığın tarihine bakıldığında ilk uygulama 1974'de buhar makinesini ve kazan bileşiminin denetiminde İngiliz bilim adamı Prof. Ebraham Mamdani tarafından yapılmıştır. Mamdani'nin kullanımından sonra Danimarka'da çimento üretim proseslerindeki uygulama ile bu sistemin getirdiği avantajlar ortaya çıkmıştır. Bulanık mantığın günümüzde de en yaygın olduğu yer olan Japonya'da metro, hisse senedi portföyü, asansör vs. pek çok alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Japonya'daki Sendai metrosu dünyanın en gelişmiş metrosu olarak kabul edilmektedir. 14 kilometrelik seyahati sırasında 16 farklı durakta duran bu metro o kadar yumuşak hareket etmektedir ki ayaktaki yolcular bu hareketten etkilenmezler ve bu metroda ayakta hiçbir yere tutunmadan kahvenizi içebilirsiniz. Bu sistemin altında bulanık mantık kontrolü yatmaktadır [44].

#### **4.1.2.1. Bulanık küme teorisi**

Bulanık kümeler klasik kümelerin aksine kesin limitleri olmayan kümelerdir. Bulanık küme teorisi sadece dilsel değerlerin temsilini sağlamaz aynı zamanda bu değerlerin mantıksal bir yolla irdelenip sonuç çıkarılmasını da sağlar. Bulanık kümelerde bir elemanın, eleman olma ve olmama durumu sırasıyla 1 ve 0 ile değil, 0 ile 1 arasındaki üyelik derecesi ile gösterilir [45].

#### **4.1.2.2. Üyelik fonksiyonları**

Üyelik fonksiyonlarının alabileceği muhtemel şekiller Şekil (4.3)'teki gibidir. Literatürdeki çalışmaların çoğunda üçgen, yamuk, çan eğrisi şeklinde üyelik fonksiyonları kullanıldığı görülmektedir. Bulanık kümelerin tanımları üyelik fonksiyonlarıyla gerçekleştirilmektedir. Bulanık mantık kuramı ile oluşan sistem, insan düşünce sistemini klasik kümelerin kullandığı 0-1 mantığına göre çok daha iyi modelleyebilir ve kişilerin ifadelerini daha doğru bir şekilde sisteme entegre edebilir.



Şekil 4.3. Üyelik Fonksiyonu Tipleri

#### 4.1.2.3. Bulanık mantık denetimi

Bulanık kontrol, bir insanın uzmanlığına (IF-THEN kuralları yapısına) ya da gözlemlerine dayanır ve kontrolör bu kurallar sentezinden yola çıkılarak tasarlanır. Klasik kontrol teorilerinde olduğu gibi sistemin tam matematiksel modeline ihtiyaç duymazlar. Denetmesi zor olan karmaşık süreçlerde bulanık kontrolü kullanmak işleri kolaylaştırır.

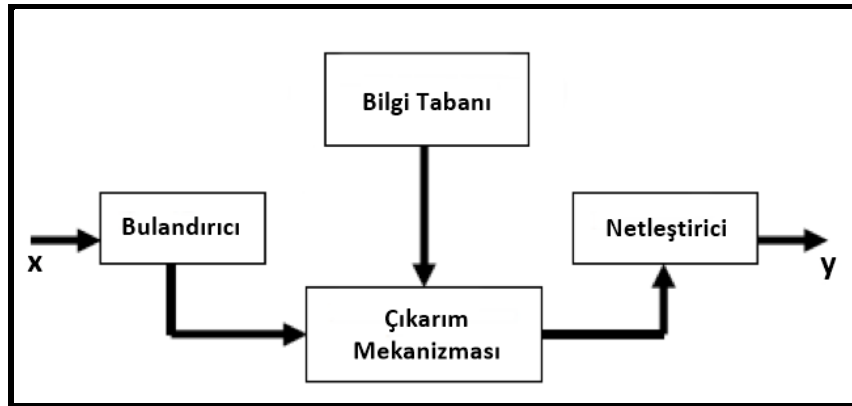
Bulanık mantık denetleyicisinin avantajları;

- Çalışma mantığı insan düşünme yapısına benzer.
- Matematiksel modele ihtiyaç duymaksızın, doğrusal olmayan sistemlerde diğer geleneksel kontrolcülere göre daha doğru sonuçlar verir.
- Uygulamaların daha hızlı bir şekilde sonuçlanmasını sağlar.

Bulanık mantık denetleyicisinin dezavantajları ise;

- Kuralları ve üyelikleri tanımlamak kolay olmayabilir, uzman deneyimine ihtiyaç duyabilir.
- Üyelik fonksiyonlarının belirlenmesinde kesin sonuç veren bir yöntem yoktur, en uygun yöntemin deneme yanılmaya dayalı çalışarak üyelik fonksiyonlarının belirlenmesidir ve bu nedenle uzun zamanlar alır.
- Kararlılık, gözetlenebilirlik ve denetlenebilirlik analizinin yapılamaması bu yönetim en temel sorunudur.

Geleneksel kontrolcüler ile tasarlanan sistemlerde ortaya çıkan zorluklara alternatif olarak bulanık mantık kontrol yapısı gelişmiş ve modern denetim algoritmalarında geniş yer bulmuştur. Bulanık mantık denetim sistemleri, matematiksel modeli tam olarak elde edilemeyen, doğrusal olmayan sistemlere uygulamada avantaj sağlamaktadır. Bir bulanık mantık kontrolcü Şekil (4.4)'te görüldüğü gibi dört temel yapıdan oluşmaktadır. Bunlar, bulandırıcı, bilgi tabanı, çıkarım mekanizması ve netleştiricidir.



Şekil 4.4. Bulanık Mantık Sistem Yapısı

#### 4.1.2.4. Bulanıklaştırma işlemi ve kuralları

Bulanıklaştırma işlemi temelde 3 aşamadan oluşmaktadır;

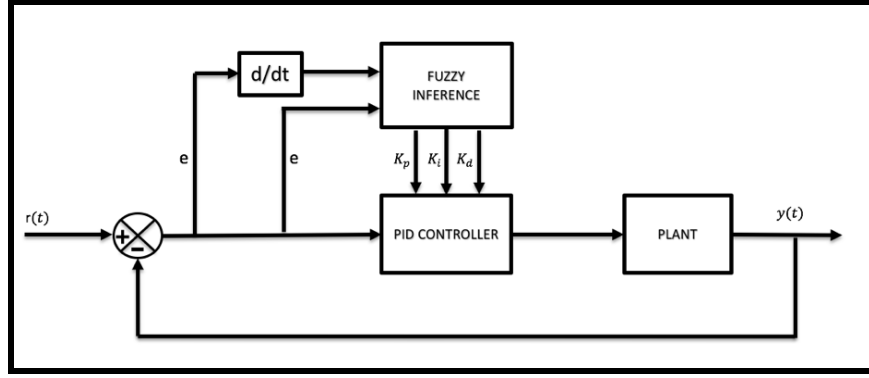
- Giriş değişkenlerinin değerlerinin ölçülmesi,
- Giriş değişkenlerinin değerler aralığı, ilgili örnek uzayına taşıyan ölçekli şekli, haritayı oluşturma,
- Bulanık kümelerin işareti olarak gözlenebilen giriş verilerini uygun dilbilimsel değerlere dönüştüren bulanıklaştırma fonksiyonunu oluşturma,

#### 4.1.2.5. Bulanık model ve bulanık çıkarım

Bulanık çıkarım, bulanık mantık kullanarak girdilerden çıktı elde etme işlemidir. Bulanık kavramlara dayanan insani karar vermeyi simüle etme ve bulanık kapalı ifade ile işlem yapan bulanık kontrol faaliyetlerinde çıkarım yapma kabiliyetine, bulanık mantıkta çıkarım kurallarına sahiptir. Bulanık çıkarım üyelik fonksiyonlarının üyelik değerlerinde IF-THEN kurallarına göre, bulanık mantık operatörlerinin kullanıldığı bir işlemdir.

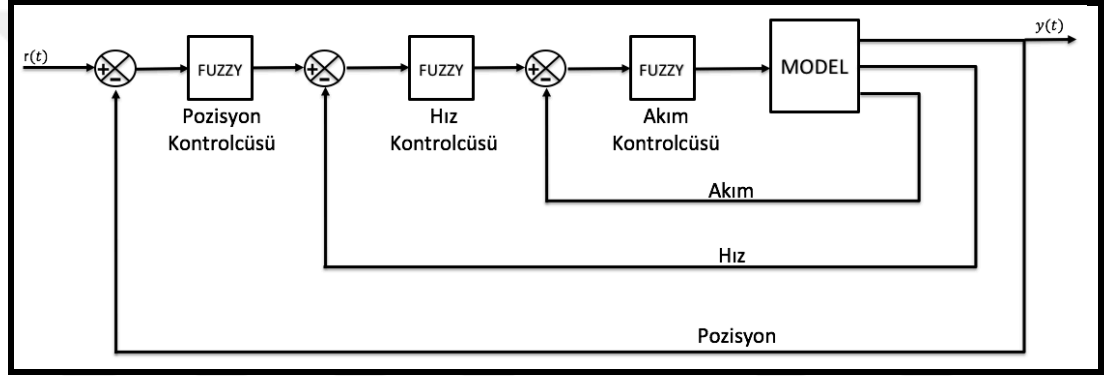
#### 4.1.2.6. Durulama işlemi

Durulama işlemi, bulanık sonuçları sayısal (kesin) değerlere dönüştürür. Bu işlem safhasında gerçekleştirilen işlem sonucu keskin bir değer çıkmaktadır ve bu işleme “durulama” işlemi denilmektedir. Adaptif ve bulanık mantık kontrol yapılarının birlikte kullanılması sistemin doğrusal olmayan özelliklerini de iyi bir biçimde tanımlar ve daha gürbüz bir denetim sağlar. Adaptif kontrolörler çoğu zaman kendinden ayarlamalı bir kontrol sistemine sahiptir. Uyarlamalı kontrol cihazı, geri bildirim döngüsü ve kontrolör parametresi güncelleme döngüsünden oluşur. Bu çalışmada kullanılan adaptif bulanık mantık kontrolcü blok diyagramı Şekil (4.5)’deki gibidir.



Şekil 4.5. Adaptif Bulanık Mantık PID Kontrolcü Blok Diyagramı

Kaskad adaptif bulanık mantık kontrolcü blok diyagramı Şekil (4.6)'daki gibidir.

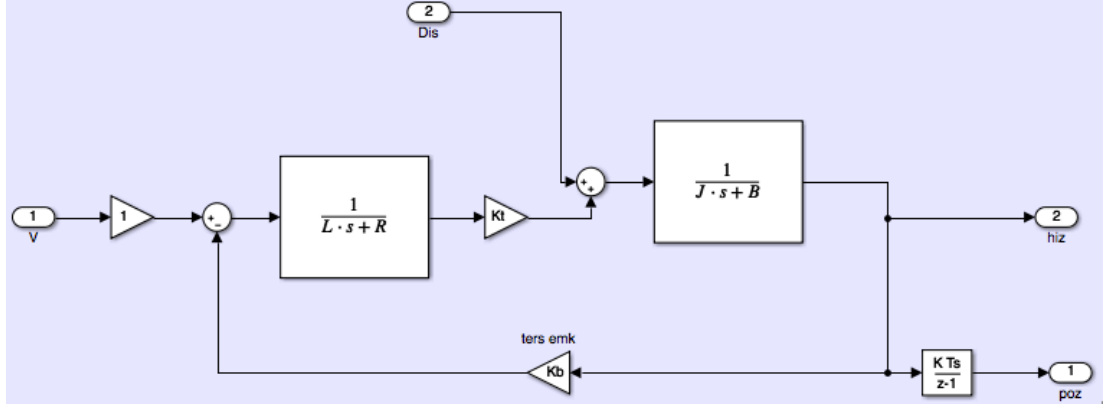


Şekil 4.6. Kaskad Adaptif Bulanık Mantık Kontrolcü Blok Diyagramı

Bu çalışmada, pozisyon ve hız kontrolcülerini için bulanık kümeler üzerinde, giriş değerlerinin üyelik durumuna göre kazançların derecesi tespit edildi ve o değer: az, çok az, fazla gibi dilsel niteleyici değerlere atandı. Geliştirilen bu denetçilerin giriş değişkenleri sistemin hatası (E) ve hatanın değişimi olan hatanın türevi (EC), denetçinin çıkış değişkenleri ise doğrudan  $K_p$  ve  $K_i$  kazançları olarak tasarlanmıştır.

## 4.2. Yanca Ekseninin Benzetim Ortamında Denetimi

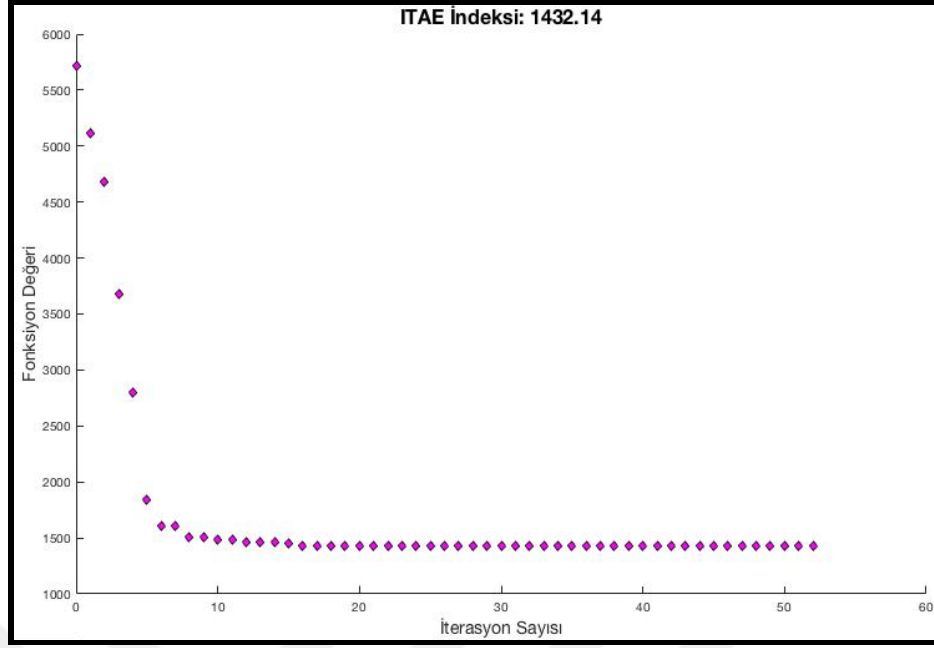
Gerçekleştirilen bu çalışmada gimbal yapının yanca ekseninin hareketini sağlayan motorun adaptif bulanık mantık PI ve geleneksel PI kontrolcüler ile denetimi gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışması kapsamında sistem modeli doğru akım motor modeli olarak kabul edilmiştir. Benzetim modelinin gerçek sisteme yakın olması için dinamik denklemlerden elde edilen dış gimbal ataleti motor atalet değerine eklenmiştir. Bunun yanında statik-dinamik dengesizlik ifadeleri sürtünme değeri ile birlikte sisteme bozucu olarak girdi yaptırılmıştır.



Şekil 4.7. Sistemin Benzetim Modeli

Sistem benzetimi çalışmasında Şekil (4.7)'deki benzetim modeli Ek-E'de verilen benzetim diyagramında kontrolcü yapısı ile birlikte gösterilmiştir. Benzetim çalışmasında kullanılan PI kontrolcünün parametre değerlerini bulmak için, referans ve geri besleme farkından oluşan değerın lokal minimum değerleri üzerinde sistemi optimize etmeye dayalı, 'f-min-search' optimizasyonu kullanılmıştır. Fonksiyonun ilk başlangıç PI parametrelerinin sistemin kararlı olduğu herhangi bir yerdeki parametreleri olmalıdır. Benzetimi kararlı yapan  $K_p$  ve  $K_i$  kazanç değerleri MATLAB-Simulink'te PI bloğunda bulunan 'tuning' yöntemi ile belirlenmiştir. Yaptığımız bu çalışmada 'f-min-search' optimizasyon fonksiyonu "ITAE" kriterinin performans kriterini Ek-G'de bulunan matlab fonksiyonu ile en aza indirmeye çalışmıştır. Ve gerekli optimizasyonlar sonucu en düşük performans kriteri ve en düşük P ve I parametrelerini elde etmemizi sağlamıştır.

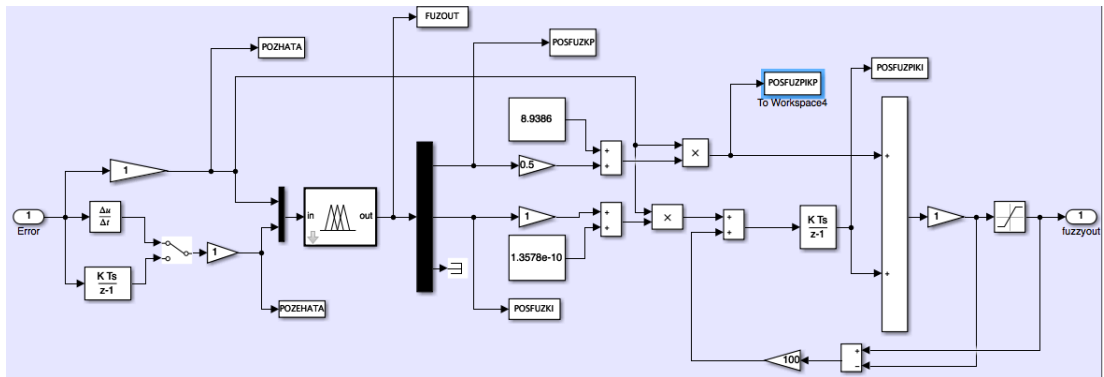
$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e|(t)dt \quad (4.6)$$



Şekil 4.8. f-min-search Optimizasyon Fonksiyonu Grafiği

Şekil (4.8)'de gözüktüğü gibi f-min-search optimizasyon fonksiyonu ITAE kriterine göre benzetim hatasını sıfıra çekecek PI parametrelerini belirlemiştir. Buna göre benzetimde kullanılacak  $K_p$  ve  $K_i$  kazançları sırasıyla 10.0207 ve  $1.3987e-10$  bulunmuştur.

Elde edilen PI parametreleri Şekil (4.9)'de simulink diyagramı olan adaptif bulanık mantık PI kontrolcünün başlangıç değerleri olarak girilmiştir.



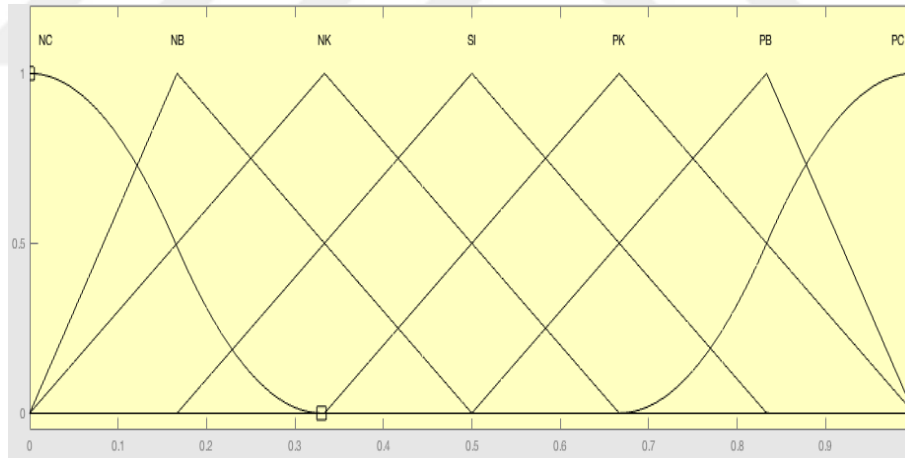
Şekil 4.9. Benzetim Adaptif Bulanık Mantık PI Kontrolcü Simulink Diyagramı

Sistem benzetiminde kullanılan adaptif bulanık mantık denetleyicinin kural tablosu ve üyelik fonksiyonları aşağıdaki gibidir.

Tablo 4.3. Kural Tablosu

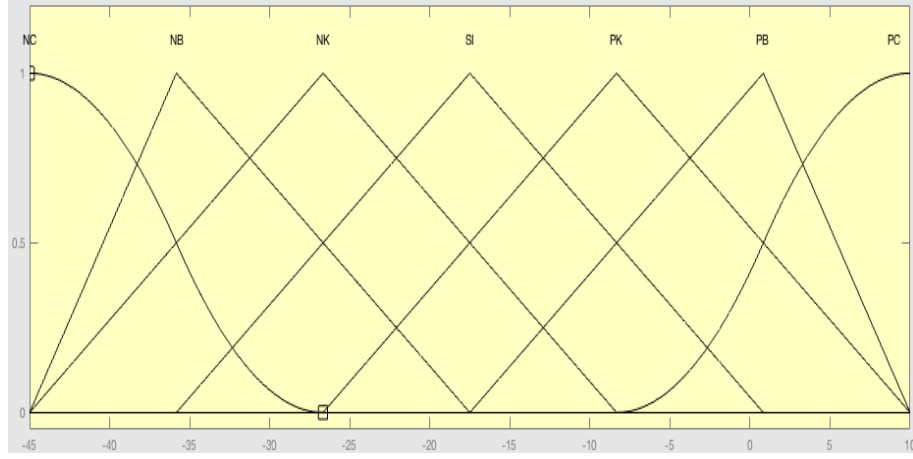
E	EC						
	NC	NB	NK	SI	PK	PB	PC
	$K_p/K_i$						
NC	NC/NC	NB/NC	NC/NB	NB/NB	NC/NK	NB/SI	PK/SI
NB	NC/NC	NC/NC	NC/NB	NB/NK	NB/NB	NK/SI	SI/SI
NK	NB/NC	NC/NB	NC/NK	NC/NK	NK/SI	NK/PK	SI/PK
SI	PK/NC	PK/NC	PK/NK	PK/SI	PK/PK	PB/PB	SI/PB
PK	SI/NB	SI/NB	SI/SI	SI/PK	SI/PK	SI/PB	SI/PC
PB	PC/NK	PB/NK	PB/PK	PB/PK	PK/PB	PK/PC	PC/PC
PC	PC/SI	PB/SI	PB/PK	PB/PB	PK/PB	PK/PC	PC/PC

Tablo (4.3)'deki kural tablosu adaptif bulanık mantık PI kontrolcünün sistem durumlarının koşullandırılması için kullanılmıştır. Kural tabloları MATLAB fuzzy arayüzü kullanılarak oluşturulmuştur. Burada “NC”, “NB”, “NK”, “SI”, “PK”, “PB”, “PC” ile gösterilen ifadeler sırasıyla “Negatif Çok”, “Negatif Büyük”, “Negatif Küçük”, “Sıfır”, “Pozitif Küçük”, “Pozitif Büyük”, “Pozitif Çok” dilsel nitelendirici anlamlarına gelmektedir.



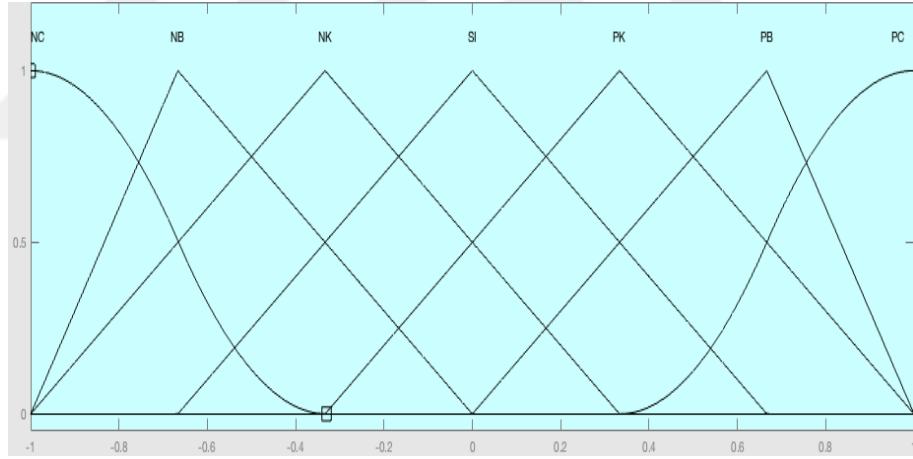
Şekil 4.10. Hata (E) Üyelik Fonksiyonu



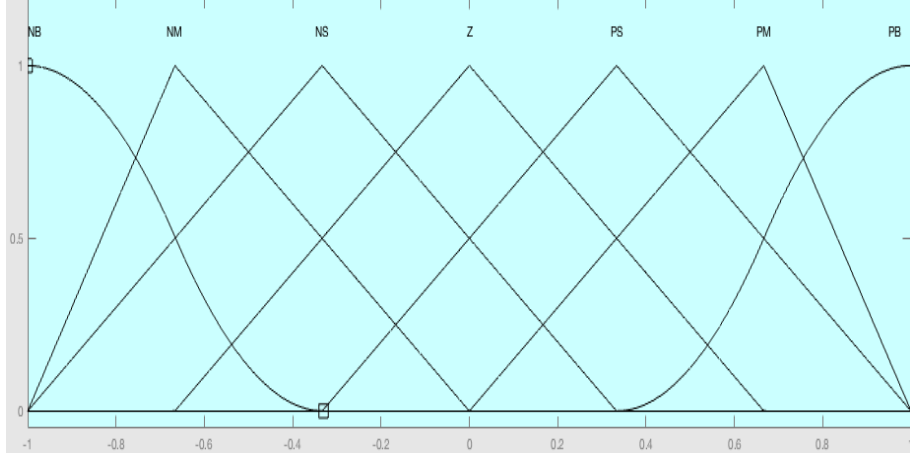


Şekil 4.11. Hatanın Değişimi (EC) Üyelik Fonksiyonu

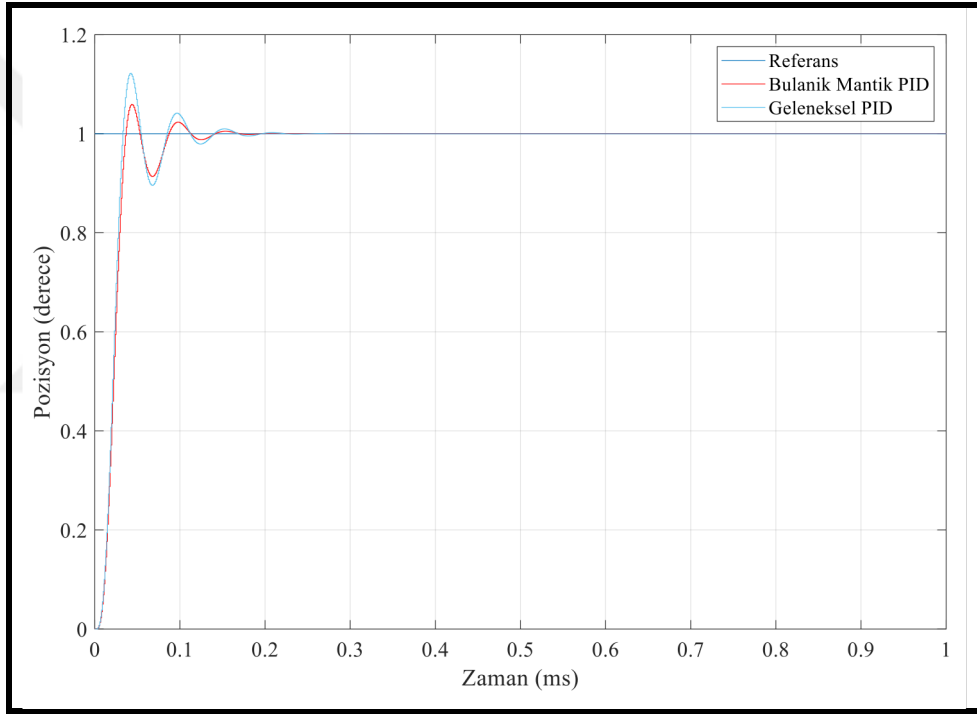
Hata ve hatanın değişimi üyelik fonksiyonu oluşturulurken sistemin hatasının değiştiği aralık dikkate alınmış, üyelik fonksiyonu buna göre modifiye edilmiştir. Hata üyelik fonksiyonu 0 ve +1 aralığındayken, hatanın değişim üyelik fonksiyonu -45 ve +10 aralığında tasarlanmıştır.



Şekil 4.12.  $K_p$  Üyelik Fonksiyonu

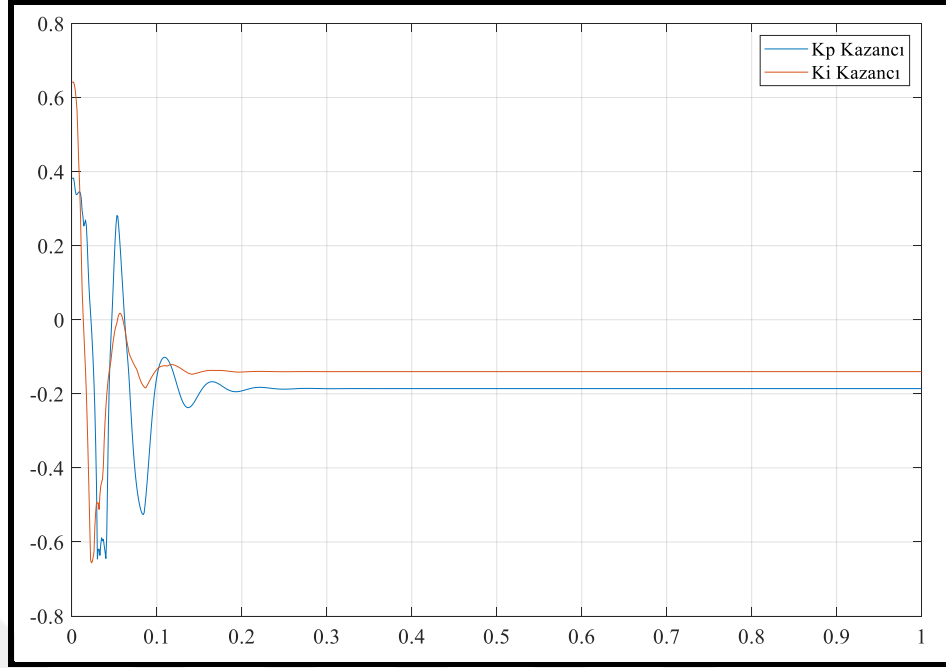


Şekil 4.13.  $K_i$  Üyelik Fonksiyonu



Şekil 4.14. Yanca Eksenli Pozisyon Kontrolü

Yanca ekseninin tahrik elemanı için geliştirilen kontrolcüler Şekil (4.14)'te karşılaştırılmıştır. Bulanık mantık kontrolcünün daha az aşım göstermiş ve sistemi daha hızlı kararlı hale getirdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.15. Bulanık Mantık Kontrolcü  $K_p$  ve  $K_i$  Değişimleri

Şekil (4.15)'te adaptif bulanık mantık PI kontrolcülerinin  $K_p$  ve  $K_i$  kazançlarındaki değişimler gösterilmiştir. Değişimler üyelik fonksiyonlarının belirlediği aralıkta olması ve sistemin cevabına göre değişim göstermesi, kontrolcüde bulunan adaptifliğin başarılı olduğunu göstermiştir.

### 4.3. Yanca Ekseninin Gerçek Zamanlı Denetimi

Aktif koruma sisteminde mühimmat taşıyıcı görevi gören gimbalin, yanca eksenini oluşturan dış gimbal motoru için hız ve pozisyon kontrolü gerçekleştirilmiştir. Yanca eksenini için kaskad klasik PI ve kaskad adaptif bulanık mantık PI kontrolcü kullanılmıştır. Her iki kontrolcüde de PI parametrelerine ihtiyaç duyulmaktadır. PI parametreleri Tablo (4.2)'deki özelliklere göre deneme yanılma yöntemi kullanılarak bulunmuştur. Çalışmada ilk olarak kaskad klasik PI kontrolcüsü tasarlanmıştır. Denetimi sağlanan doğrudan tahrikli motorun içerisinde akım kontrolcüsü bulunduğu kaskad yapısında bulunan diğer kontrol döngüleri pozisyon ve hız PI değerleri, içerdeki döngü olan hız kontrolcüsünden başlayarak elde edilmiştir.

#### 4.3.1. Adaptif bulanık mantık hız kontrolcüsü tasarımı

Çok döngülü yapının gereği olarak içerideki döngüden başlayıp kontrolcü tasarımları yapılmıştır. Şekil (4.6)'da gözüktüğü gibi en iç döngüde akım kontrolcüsü

bulunmakta, fakat akım kontrolcüsü kullanılan eyleyicinin içerisinde üretici tarafından yerleştirildiği için ilk önce hız kontrolcüsü üzerine çalışma yapılmıştır. Hız kontrolü için tasarlanan klasik PI parametreleri, sistemin denetim hassasiyetinin sağlanması için adaptif bulanık mantık PI kontrolcüsünün başlangıç değerleri olarak ayarlanmıştır. Bu PI parametreleri Tablo (4.4)'deki gibidir. Gerçek zamanlı kontrolü gerçekleştirilen sistemde kullanılan enkoderler 16 bit çözünürlüğe sahiptir. Gerçek zamanlı kontrol çalışmasında kullanılan sürücüler sisteme maksimum +/- 80 Amper verebilmektedir. Bu bilgilerden yola çıkılarak sistemin çözünürlüğü  $(80+80) / (2^{16}) = 0,0024$  olarak ortaya çıkar. Yani Tablo (4.4)'deki denetleyici kazançları yüksek olsalarda bu çözünürlükte ölçeklendirilerek sisteme etki yaparlar.

Tablo 4.4. Hız Kontrolcüsü PI Parametreleri

PI Parametreleri	K <sub>p</sub> ve K <sub>i</sub> Kazançları
K <sub>p</sub>	300
K <sub>i</sub>	8000

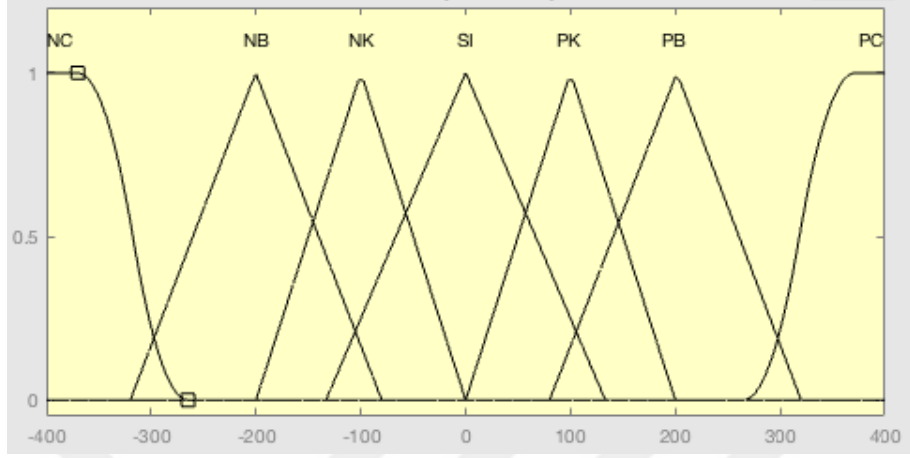
Hız kontrolcüsü için kural tablosu PI kontrolcüsünün her iki kazancını da kapsayacak şekilde Tablo (4.5)'te gösterilmiştir.

Tablo 4.5. Hız Kontrolcü Kural Tablosu

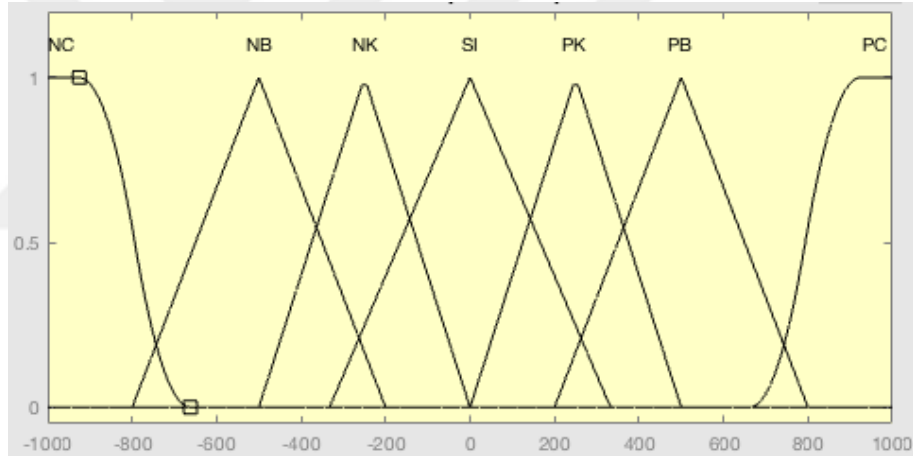
E	EC						
	NC	NB	NK	SI	PK	PB	PC
	K <sub>p</sub> /K <sub>i</sub>						
NC	NC/NC	NC/NC	NB/NC	NB/NB	NK/NB	NK/SI	SI/SI
NB	NC/NC	NB/NC	NB/NB	NC/NB	NK/NK	SI/SI	SI/SI
NK	NB/NB	NB/NB	NK/NK	NK/NK	SI/SI	PK/PK	PK/PK
SI	NB/NB	NB/NK	NK/NK	SI/SI	PK/PC	PK/PC	PB/PB
PK	NB/NK	NK/NK	SI/SI	PK/PK	PB/PK	PB/PB	PB/PB
PB	SI/SI	SI/SI	PK/PK	PB/PB	PB/PB	PC/PC	PC/PC
PC	SI/SI	PK/SI	PK/PK	PB/PB	PB/PC	PC/PC	PC/PC

Hız kontrolcüsü için üyelik fonksiyonları aşağıdaki gibi oluşturulmuştur. Bu çalışmada, NC-NB-NK-SI-PK-PB-PC ile gösterilen üyelik fonksiyonları sırasıyla,

Negatif Çok-Negatif Büyük-Negatif Küçük-Sıfır-Pozitif Küçük-Pozitif Büyük-Pozitif Çok dilsel ifadelerin anlamlarına gelmektedir.

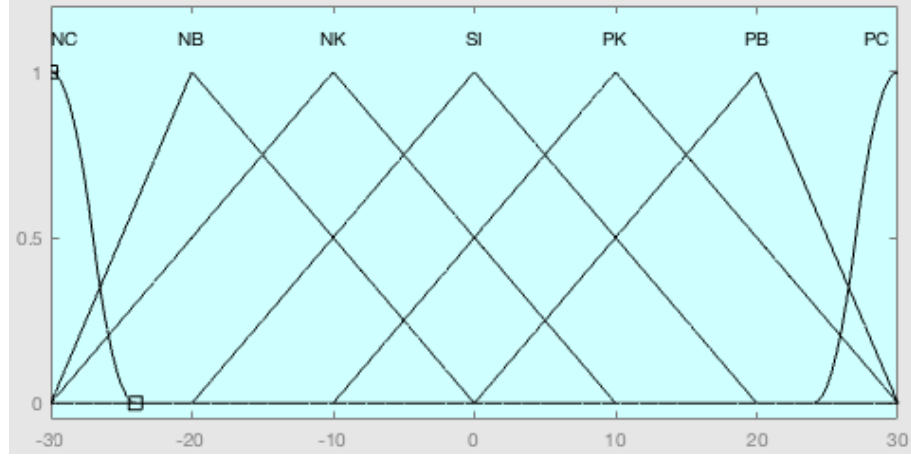


Şekil 4.16. Hız Hatasının (E) Üyelik Fonksiyonu

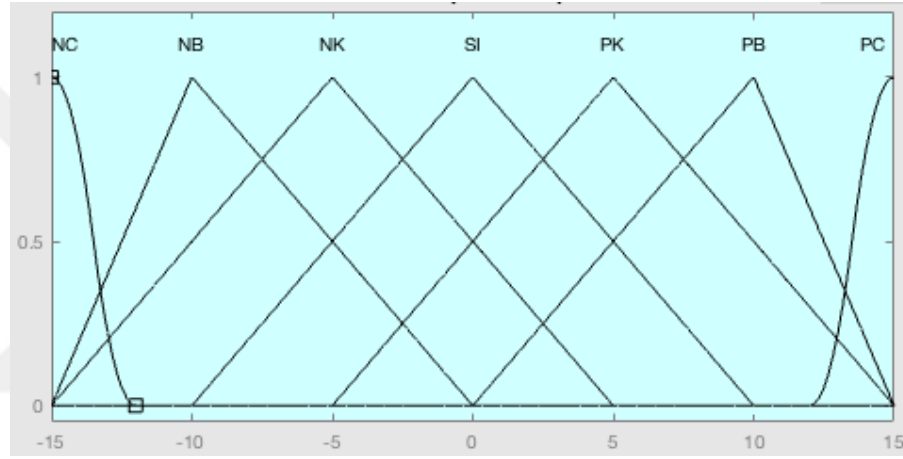


Şekil 4.17. Hız Hatasının Değişiminin (EC) Üyelik Fonksiyonu

Hız kontrolcüsünün hata ve hata değişiminin üyelik fonksiyonları Şekil (4.16) ve Şekil (4.17)'deki gibidir. Hız kontrolcüsü çalışmalarında sisteme referans olarak 400 °/sn girildiğinden dolayı, hata üyelik fonksiyonunun çalışma aralığında -400 ile +400 aralığında ayarlanmıştır. Hatanın değişimi, hız kontrolcüsü testlerinde ortaya çıkan maksimum değerler dikkate alınarak -1000 ile +1000 arasında ayarlanmıştır.

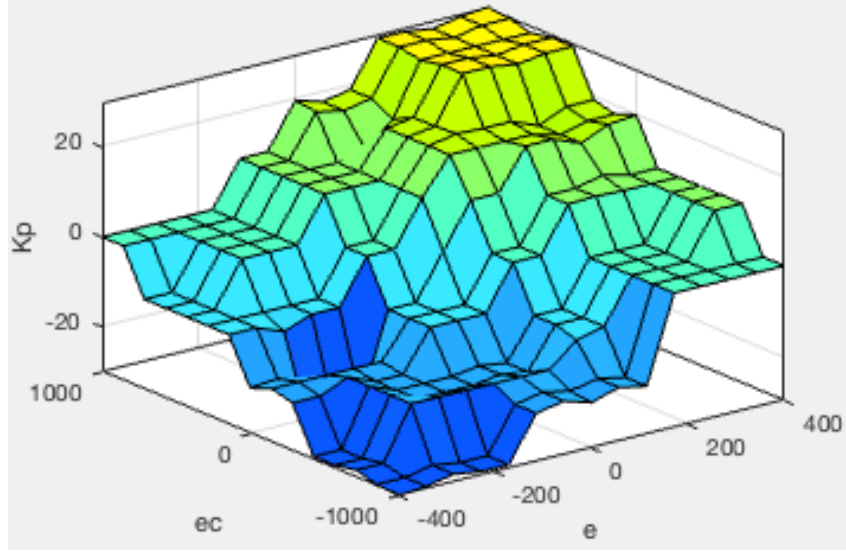


Şekil 4.18.  $K_p$  Üyelik Fonksiyonu

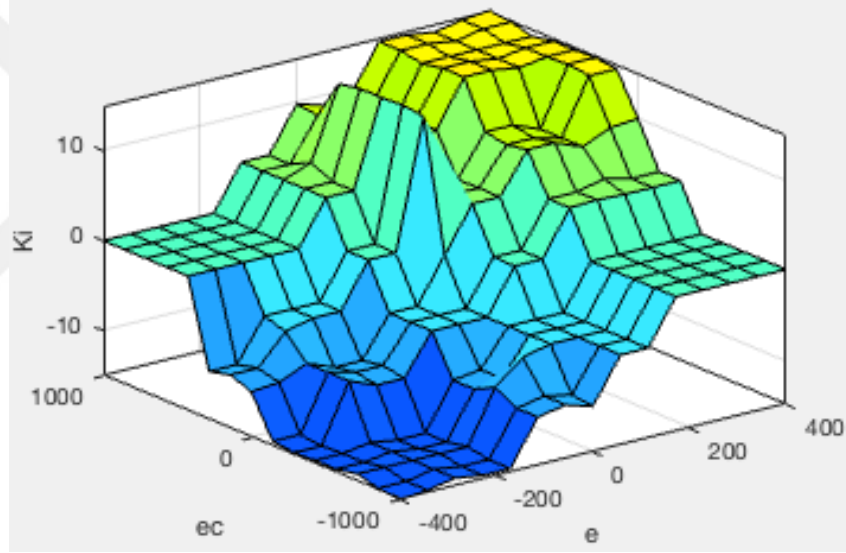


Şekil 4.19.  $K_i$  Üyelik Fonksiyonu

Hız denetimini sağlayacak olan bulanık mantık kontrolcüsünün kural tablosu ve üyelik fonksiyonları sonucu kontrolcünün sisteme tepkisi Şekil (4.20) ve Şekil (4.21)'daki yüzey modellemesi ile özetlenmiştir.



Şekil 4.20 Hata ve Hatanın Değişimine Göre  $K_p$  Yüzey Gösterimi



Şekil 4.21 Hata ve Hatanın Değişimine Göre  $K_i$  Yüzey Gösterimi

#### 4.3.2. Adaptif bulanık mantık pozisyon kontrolcüsü tasarımı

İç döngüde bulunan hız kontrolcüsü sistemi kararlı hale getirdikten sonra bir sonraki döngü olan pozisyon kontrolcüsü tasarlanmıştır. Kaskad tasarım yapılırken hız kontrolcüsünde bulunan parametreler sabit tutulup, pozisyon kontrolcüsünde bulunan parametreler Tablo (4.6)'daki gibi gösterilmiştir.

Tablo 4.6. Kaskad Kontrolcülerin PI Parametreleri

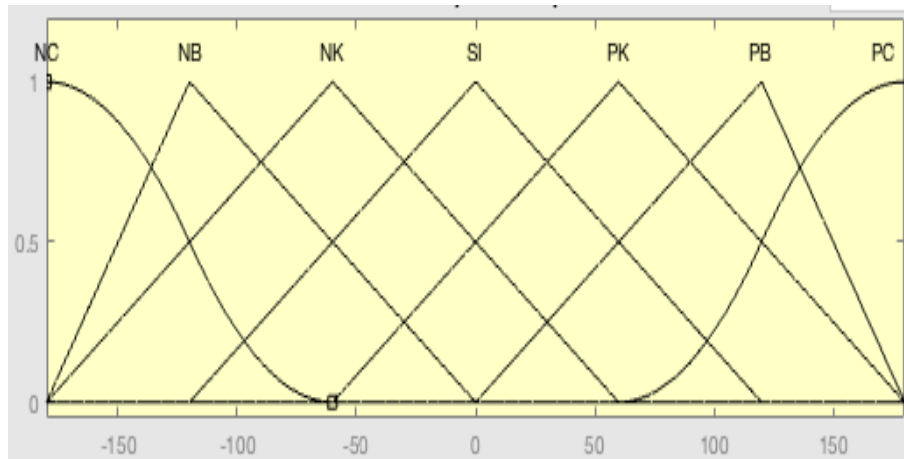
	Pozisyon PI parametreleri	Hız PI parametreleri
K <sub>p</sub>	95	300
K <sub>i</sub>	450	8000

Çok döngülü denetçi yapısının bir diğer kontrolcüsü olan bulanık mantık pozisyon kontrolcüsüne ait kural tablosu ve üyelik fonksiyonları aşağıdaki gibi gösterilmiştir.

Tablo 4.7. Pozisyon Kontrolcü Kural Tablosu

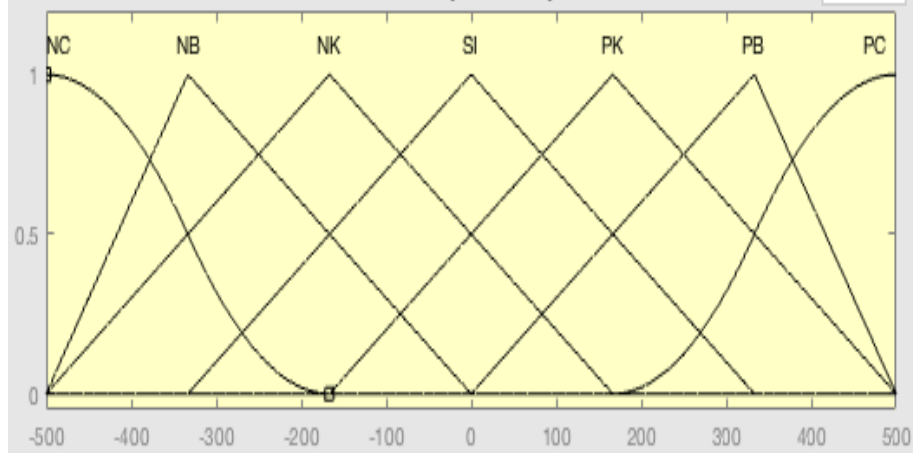
E	EC						
	NC	NB	NK	SI	PK	PB	PC
K <sub>p</sub> /K <sub>i</sub>							
NC	PC/NC	PC/NC	PB/NB	PB/NB	PK/NK	SI/SI	SI/SI
NB	PC/NC	PB/NC	PB/NB	PK/NK	PK/NK	SI/SI	NK/SI
NK	PB/NC	PB/NB	PK/NK	PK/NK	SI/SI	NK/PK	NK/PK
SI	PB/NB	PB/NB	PK/NK	SI/SI	NK/PK	NB/PB	NB/PB
PK	PK/NB	PK/NK	SI/PB	NK/PK	NK/PK	NB/PB	NB/PC
PB	PK/SI	SI/SI	NK/PK	NB/PK	NB/PB	NB/PC	NC/PC
PC	SI/SI	SI/SI	NB/PK	NB/PB	NB/PB	NC/PC	NC/PC

Pozisyon kontrolcüsü için üyelik fonksiyonları aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.



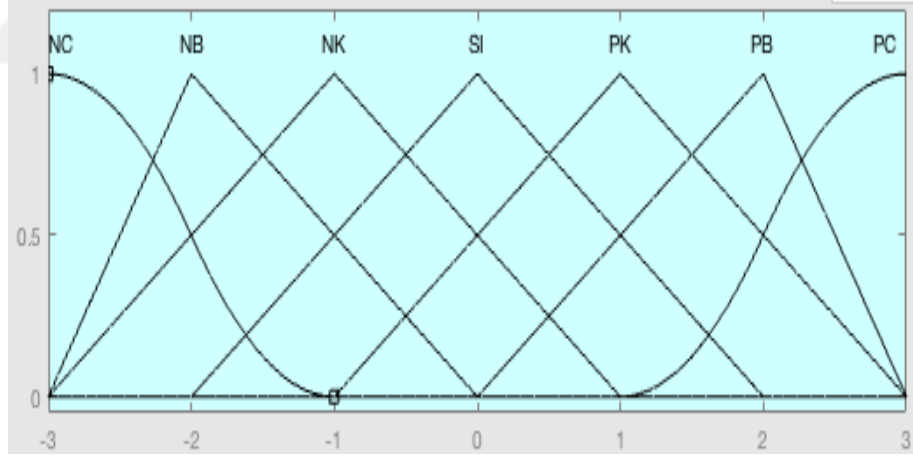
Şekil 4.22. Pozisyonun Hata (E) Üyelik Fonksiyonu



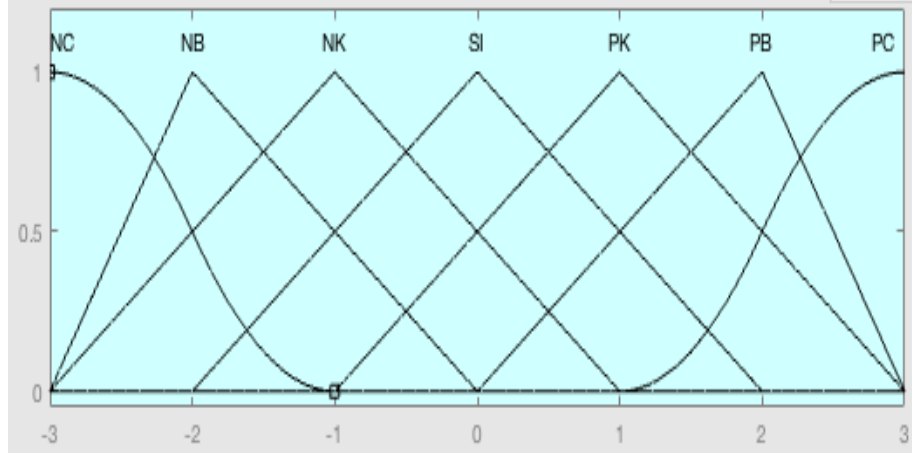


Şekil 4.23. Pozisyon Hata Değişimi (EC) Üyelik Fonksiyonu

Pozisyon kontrolcüsünün hata ve hata değişiminin üyelik fonksiyonları Şekil (4.22) ve Şekil (4.23)'teki gibidir. Hız kontrolcüsü çalışmalarında sisteme referans olarak 170 derece girildiğinden dolayı, hata üyelik fonksiyonunun çalışma aralığında -170 ile +170 aralığında ayarlanmıştır. Hatanın değişimi, hız kontrolcüsü testlerinde ortaya çıkan maksimum değerler dikkate alınarak -500 ile +500 arasında ayarlanmıştır.

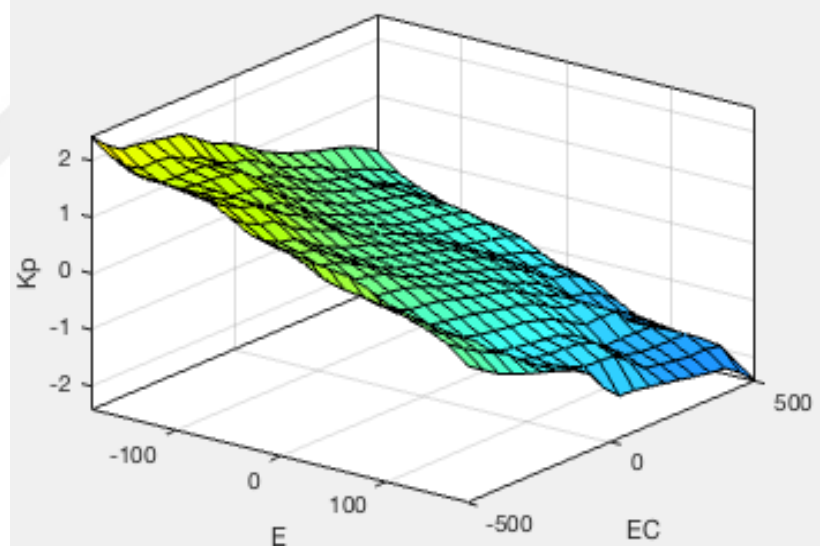


Şekil 4.24.  $K_p$  Üyelik Fonksiyonu

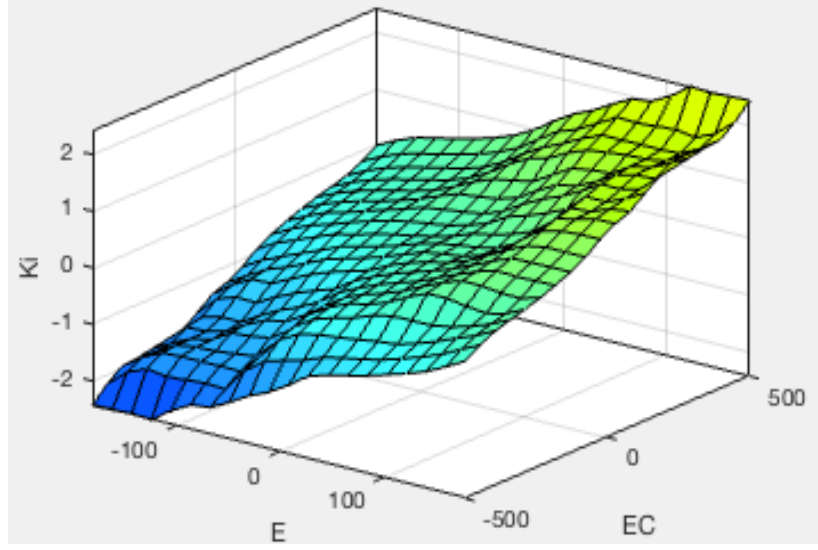


Şekil 4.25.  $K_i$  Üyelik Fonksiyonu

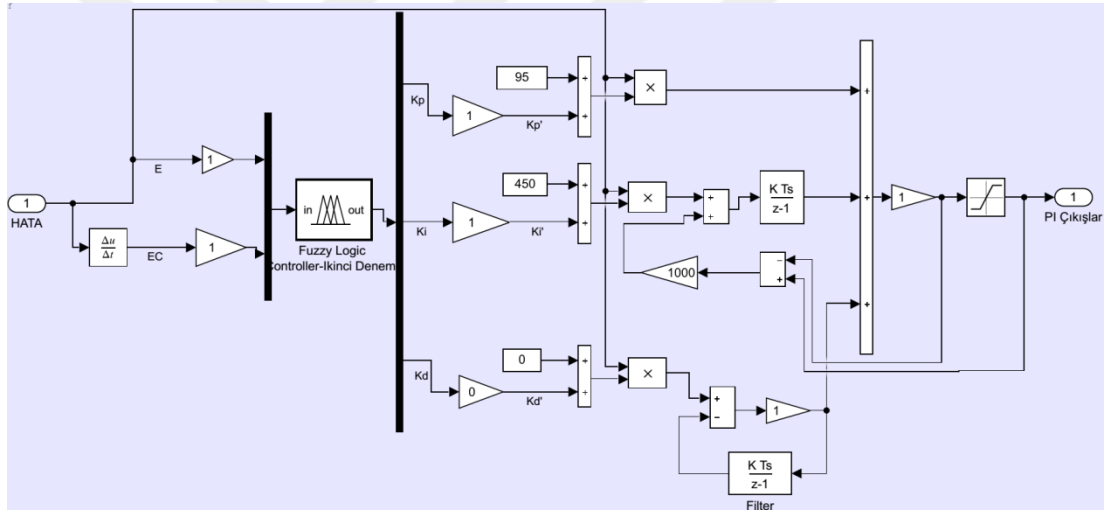
Pozisyon denetimini sağlayacak olan bulanık mantık kontrolcüsünün kural tablosu ve üyelik fonksiyonları sonucu Şekil (4.26) ve Şekil (4.27)'deki yüzey modellemesi ile özetlenmiştir.



Şekil 4.26. Hata ve Hata Değişimine Göre  $K_p$  Yüzey Gösterimi



Şekil 4.27. Hata ve Hata Değişimine Göre  $K_i$  Yüzey Gösterimi

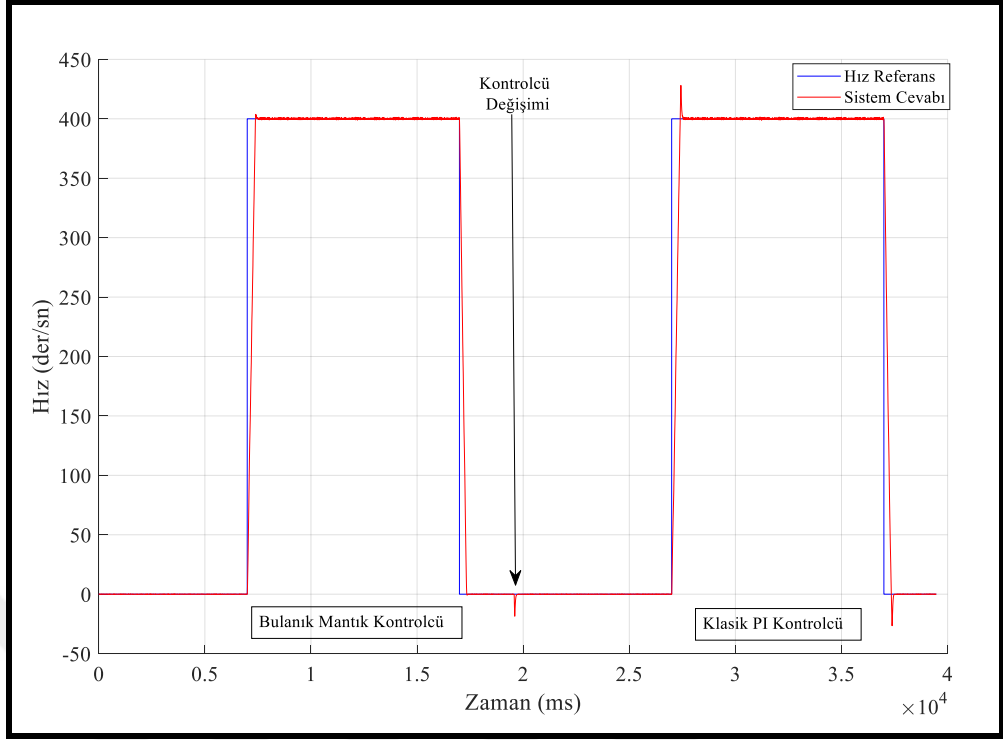


Şekil 4.28. Gerçek Zamanlı Adaptif Bulanık Mantık PID Kontrolcü Simulink Gösterimi

Adaptif bulanık mantık PID kontrolcüsüne ait simulink gösterimi Şekil (4.28)'deki gibi gösterilmiştir. Sistem hatası ve hatanın türevi MATLAB bulanık mantık bloğuna girer, karşılığında PID parametreleri ( $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ ) çıkar. Bu parametreler oransal, integral ve türev işlemlerinden geçerek PID çıkışını verir.

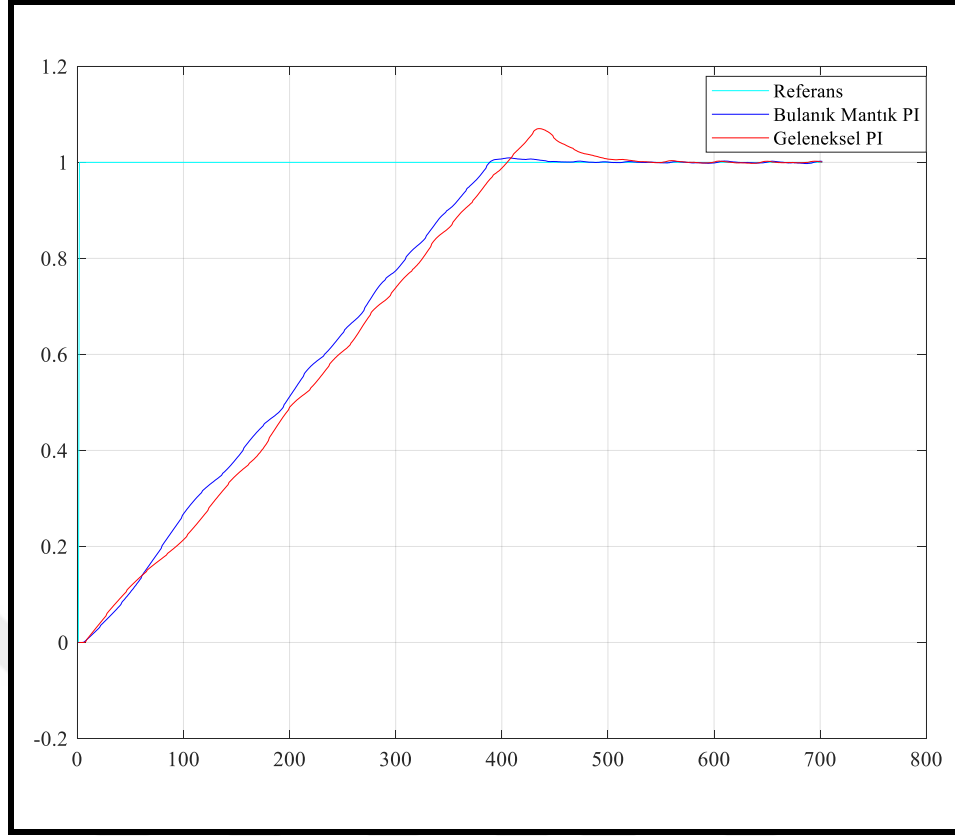
### 4.3.3. Gerçek Zamanlı Denetim

Bu bölümde sırasıyla hız ve pozisyon kontrolüne ait grafikler gösterilmiştir. Testlerde aktif koruma sistemlerinin reaksiyon süreleri ve pozisyon doğrulukları sistem gereksinimi olarak ele almıştır.



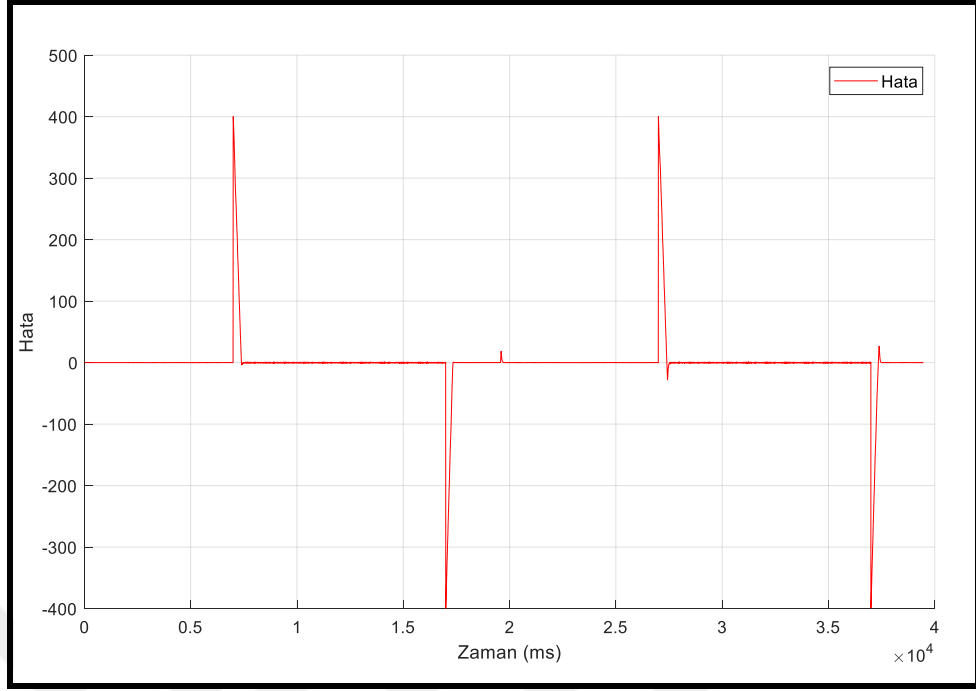
Şekil 4.29. Hız Komutu ve Sistem Cevabının Grafığı

Şekil (4.29) ile gösterilen grafikte sisteme verilen 400%/sn referans değeri ve sırasıyla kaskad adaptif bulanık mantık PI ve kaskad geleneksel PI kontrolcülerinin cevapları görülmektedir. 0 ile 18. sn arasında adaptif bulanık mantık PI kontrolcü, 18 ile 40. saniye arasında da geleneksel PI kontrolcü ile sistem denetiminin testi gerçekleştirilmiştir. Referans değeri 400%/sn değeri girildiğinde ilk kontrolcünün diğerine göre daha az aşım yaptığı görülmektedir. Referans tekrar 0 olduğunda ise ilk periyottaki denetimde aşım olmadan referans değerine ulaşılırken kaskad geleneksel PI kontrolcünün denetimi yine aşım yaptığı görülmektedir. Şekil (4.29)'un yaklaşık 18. saniyesinde grafiğin sıçrama yaptığı görülmektedir. Bu sıçramanın nedeni 18. saniyede kontrolcü test işlemi için bulanık mantıktan geleneksel PI kontrolcüye geçirilmesidir.



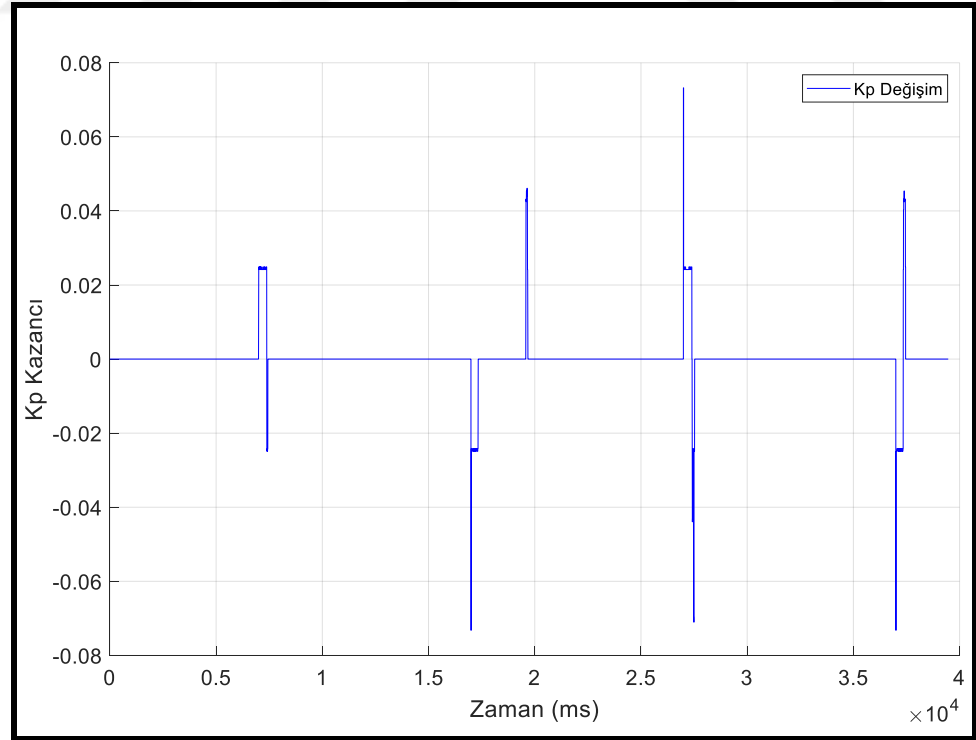
Şekil 4.30. Yükselme Zamanı Grafiği

Şekil (4.30) ile gösterilen grafikte sistemin Şekil (4.29)'da gösterildiği gibi 400 %sn olan referans girişi yerine referans sinyali ölçeklenerek referans sinyali 1%sn olarak ayarlanmış ve iki kontrolcü için referans başladığı andan, hatanın ilk 0 olduğu zamana kadar olan grafikleri üst üste çizdirilmiştir.



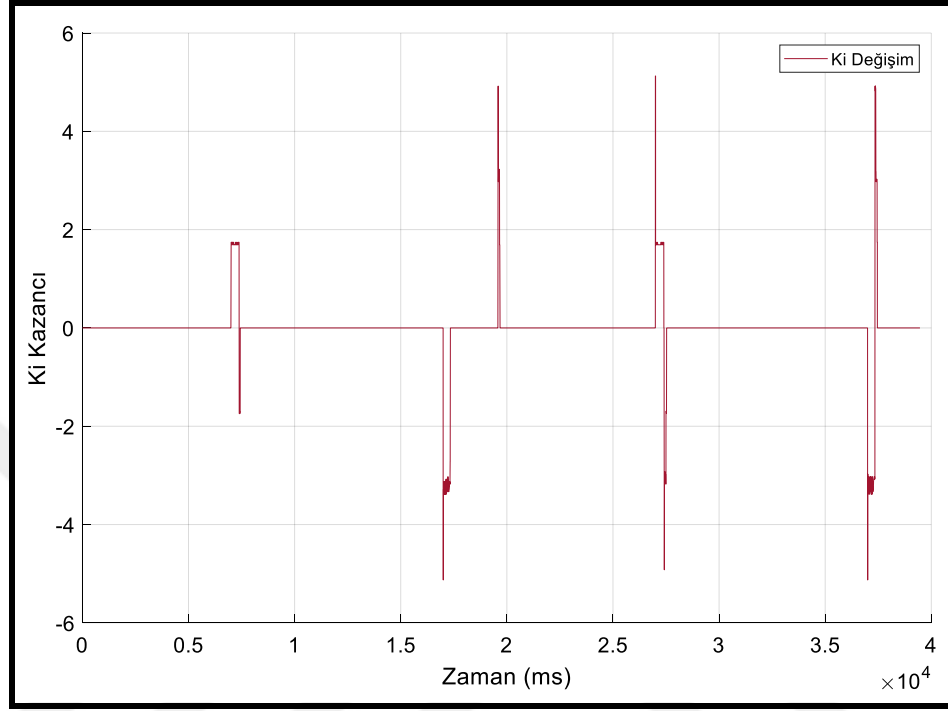
Şekil 4.31. Sistemin Hata Grafiği

Kaskad kontrolcünün iç döngüsündeki hız kontrolcüsünün, hata grafiği Şekil (4.31)'deki gibidir. Sisteme her test aşamasında 400 %sn referans hızı uygulanmıştır.



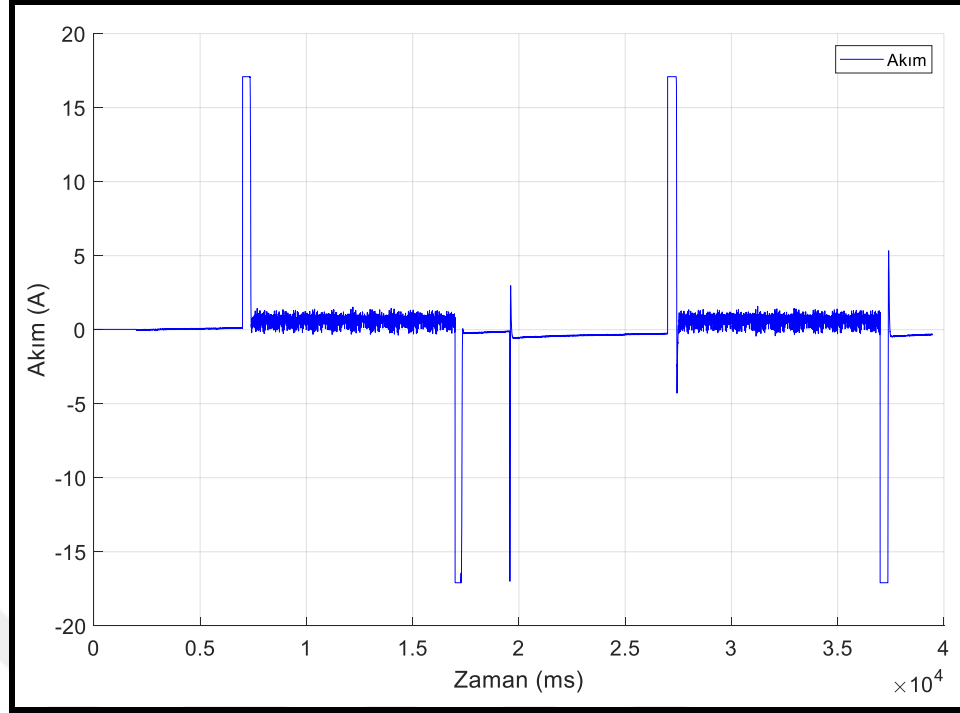
Şekil 4.32. Adaptif Bulanık Mantık PI  $K_p$  Kazancı

Hız kontrol döngüsünde adaptif bulanık mantık PI kontrolcüsünün sistemin hata ve hatasının türevini dikkate alarak uyguladığı  $K_p$  kazancındaki değişim Şekil (4.32)'deki gibidir.



Şekil 4.33. Adaptif Bulanık Mantık PI  $K_i$  Kazancı

Adaptif bulanık mantık PI kontrolcüsünün zamana göre  $K_i$  kazancındaki değişim Şekil (4.33)'deki gibidir.



Şekil 4.34. Sistemin Akım Zaman Grafiği

Sistemin bu çalışma senaryosunda çektiği akım grafiği Şekil (4.34)'deki gibidir. Çok döngülü yapının hız kontrolcüsünde kullanılan her iki denetim algoritması sayısal olarak karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.8. Hız Kontrolcüsü Akım ve Hata Sayısal Karşılaştırması

		HIZ KONTROLCÜSÜ		
		RMS	MSE	MAE
Akım	Bulanık Mantık PI	3,5428	12,5313	1,3431
	Geleneksel PI	3,7592	14,1318	1,4388
Hata	Bulanık Mantık PI	47,5450	2,2605E+03	8,8470
	Geleneksel PI	49,3366	2,4341E+03	9,5133

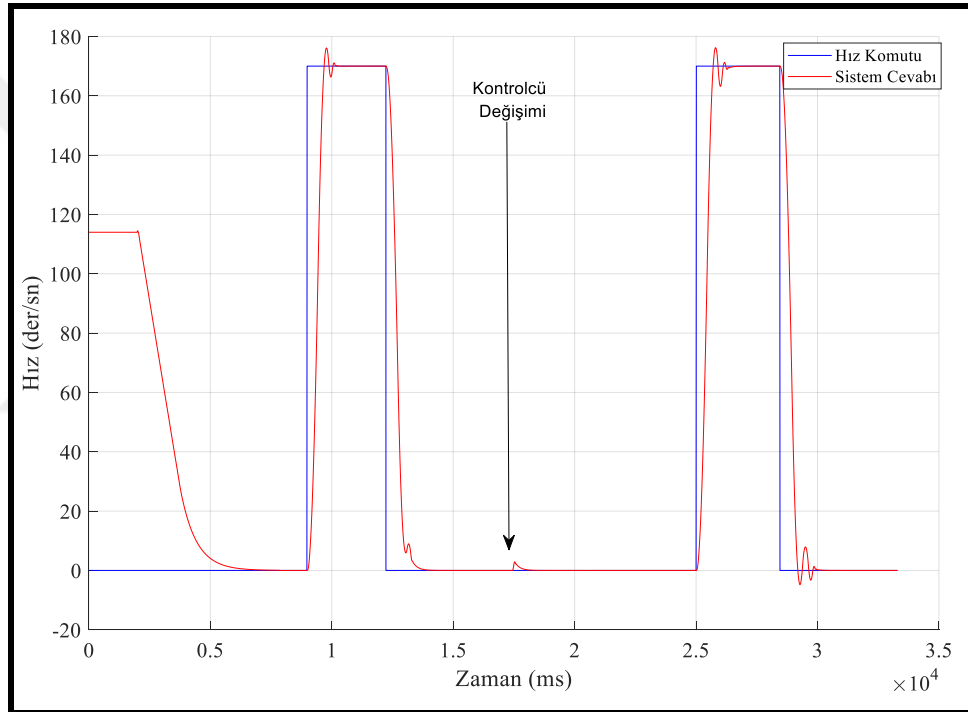
Her iki hız kontrolcüsünün akım ve hata değerleri için RMS (Root Mean Square), MSE (Mean Squared Error) ve MAE (Mean Absolute Error) değerleri Tablo (4.8)'deki gibidir. Adaptif bulanık mantık PI ve geleneksel PI kontrolcülerinin yükseliş zamanı, aşım miktarları ve oturma zamanlarına ait karşılaştırma değerleri Tablo (4.9)'daki gibidir.



Tablo 4.9. Hız Kontrolcüsü Karşılaştırma Tablosu

Hız Kontrolü	Yükseliş Zamanı (ms)	Aşım	Oturma Zamanı (ms)	IAE
Bulanık Mantık PI	388	% 0,75	474	1,0163E+07
Geleneksel PI	405	% 7,025	605	1,1818E+07

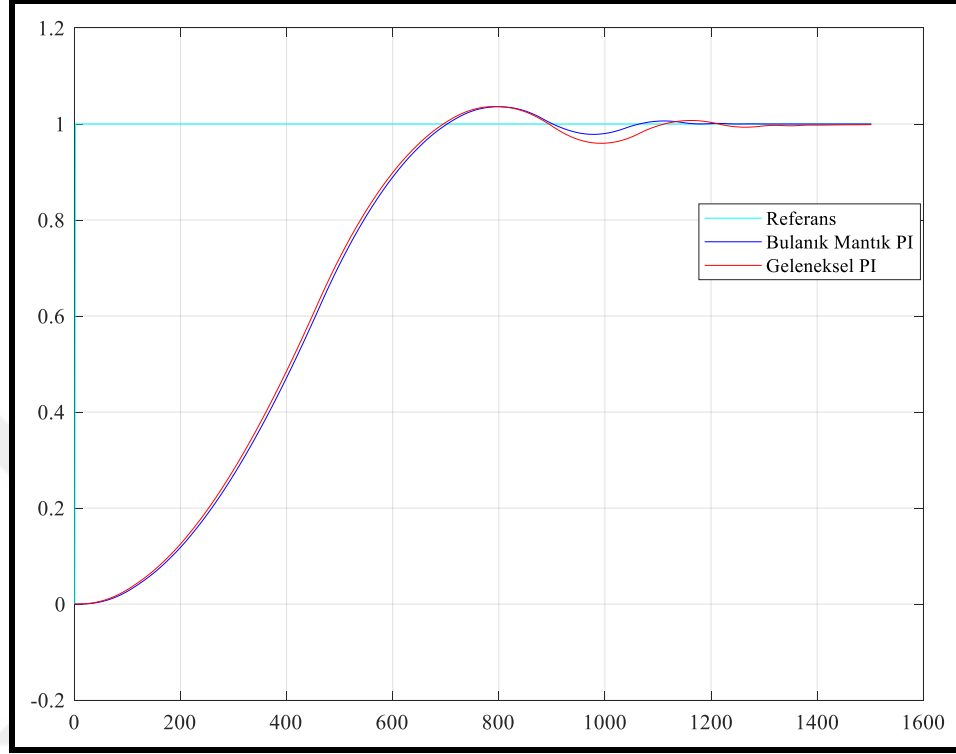
Çok döngülü yapının diğer kontrolcüsü olan pozisyon kontrolcüsünün gerçek zamanlı testlerde ortaya çıkan grafikleri aşağıdaki gibidir. Pozisyon denetimi döngüsünde iç döngüde bulunan hız kontrolcüsünün sonuçları da paylaşılmıştır.



Şekil 4.35. Pozisyon Referans ve Sistem Cevabının Grafığı

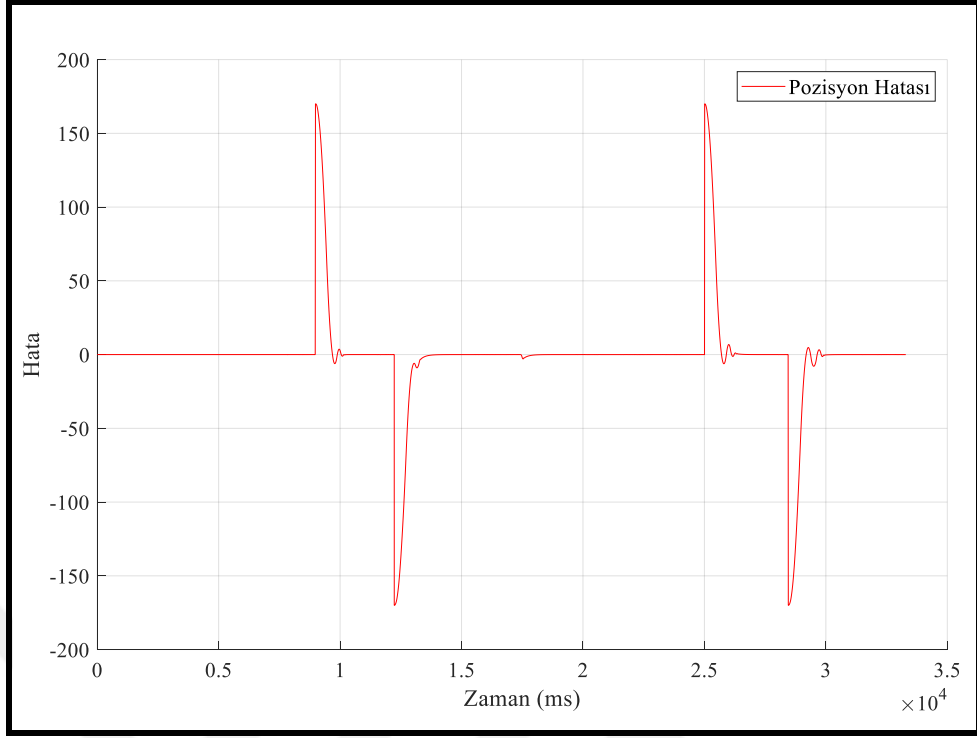
Şekil (4.35) ile gösterilen grafikte sisteme verilen 170 derecelik pozisyon referans değeri ve sırasıyla adaptif bulanık mantık PI ve geleneksel PI kontrolcülerinin cevapları görülmektedir. 0 ile 18. saniye arasında adaptif bulanık mantık PI kontrolcü, 18 ile 40. saniye arasında da geleneksel PI kontrolcü ile sistem denetiminin testi gerçekleştirilmiştir. Adaptif bulanık mantık PI kontrolcüsünün denetlediği sistem geleneksel PI kontrolcüsünükine göre daha az aşım yaptığı görülmüştür. Sistem 170 derece referans girişinden 0 dereceye çekildiğinde ilk kontrolcü hiç aşım yapmadan hatayı sıfırlarken, ikinci kontrolcü aşım yaptığı görülmüştür. Şekil (4.35)'in yaklaşık

18. saniyesinde grafiğin sıçrama yaptığı görülmektedir. Bu sıçramanın nedeni 18. saniyede kontrolcü test işlemi için bulanık mantıktan geleneksel PI kontrolcüye geçirilmesidir.



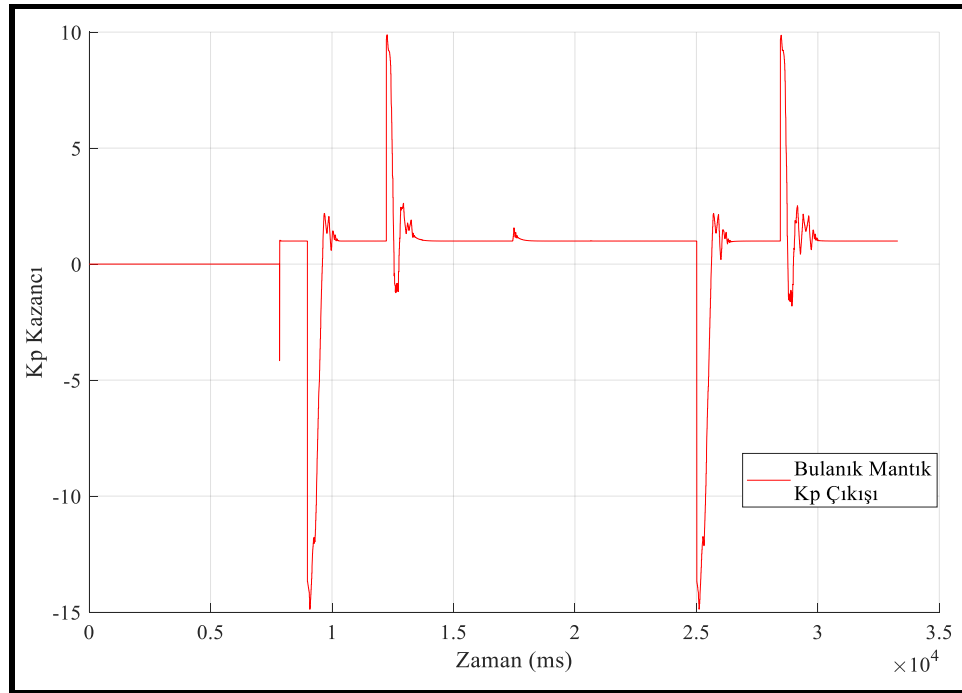
Şekil 4.36. Pozisyon Kontrolcüsü Yükselme Grafiği

Şekil (4.36) ile gösterilen grafikte sistemin Şekil (4.35)'de gösterildiği gibi 170 derece olan referans girişi yerine referans sinyali ölçeklenerek 1 derece referans sinyali girişi sağlanmış ve görsel olarak karşılaştırılması daha kolay olması için referans 1 derece olduğu andan hatanın ilk 0 olduğu zamana kadar olan grafikleri üst üste çizdirilmiştir. Bulanık mantık kontrolcüsünün denetiminde daha az aşım ve oturma zamanı daha kısa olduğu görülmektedir. Yükseliş zamanlarına bakıldığında birbirlerine çok yakın performans gösterdikleri görülmüştür.



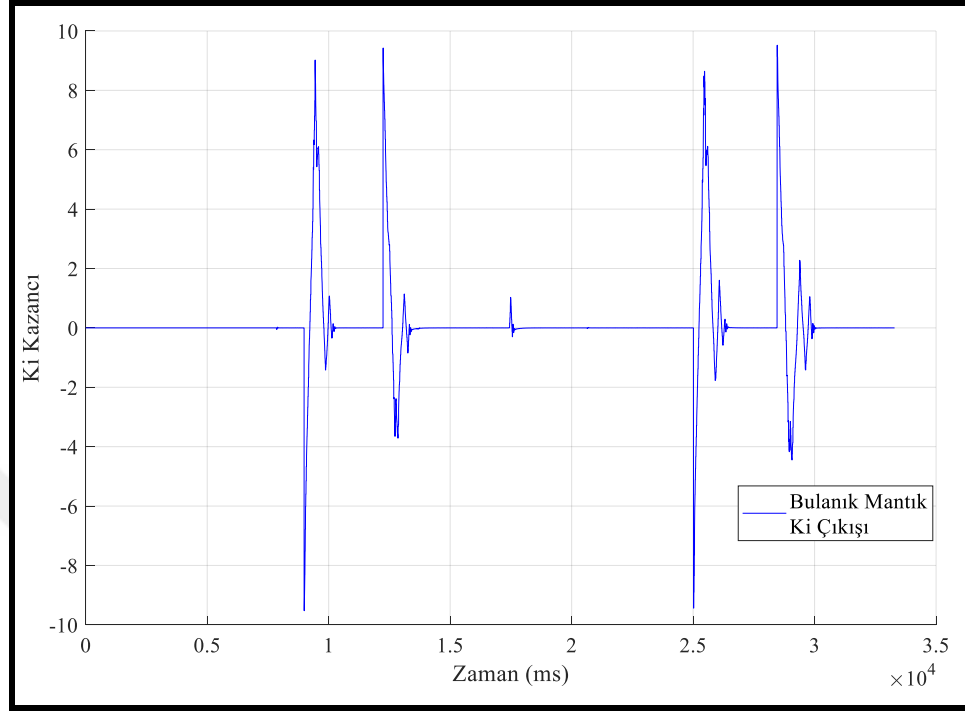
Şekil 4.37. Kaskad Pozisyon Hatası

Gerçek zamanlı denetimi yapılan bu sistemin sırasıyla adaptif bulanık mantık PI, geleneksel PI kontrolcüler ile yapılmış olan testin pozisyon hatası grafiği Şekil (4.37)'daki gibidir.



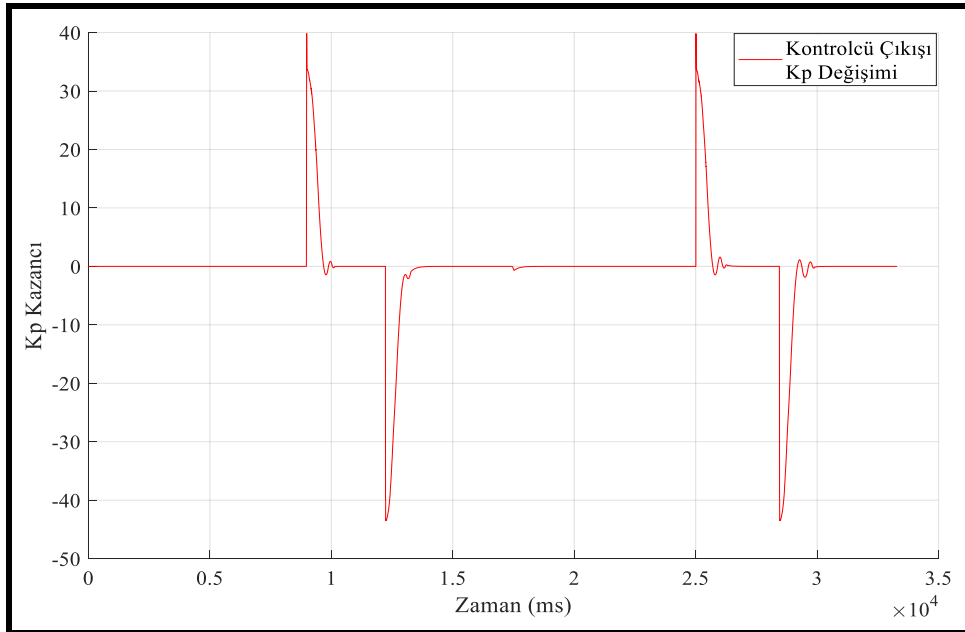
Şekil 4.38. Kaskad Pozisyon Kontrolcü Bulanık Mantık  $K_p$  Çıkışı

Pozisyon denetimi için adaptif bulanık mantık kontrolcüsünün PI bloğuna göndermeden önce zamana göre  $K_p$  kazancındaki değişim Şekil (4.38)'deki gibidir.



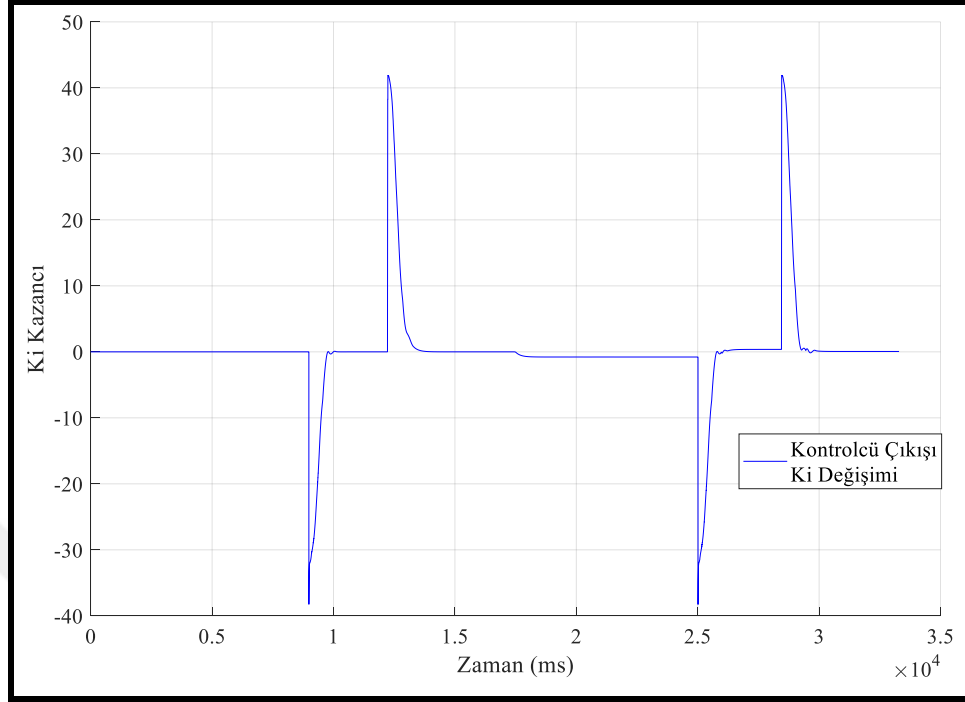
Şekil 4.39. Kaskad Pozisyon Kontrolcü Bulanık Mantık  $K_i$  Çıkışı

Pozisyon denetimi için adaptif bulanık mantık kontrolcüsünün  $K_i$  çıkışını PI bloğuna göndermeden önceki değişim Şekil (4.39)'daki gibidir.



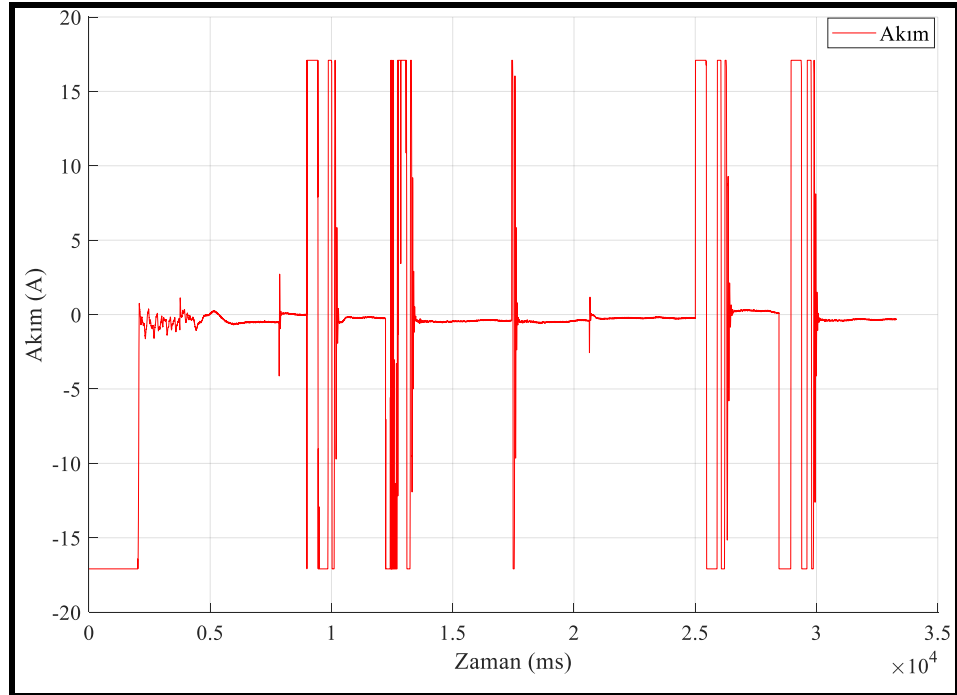
Şekil 4.40. Kaskad Pozisyon Kontrolcü  $K_p$  Çıkışı

Adaptif bulanık mantık PI pozisyon kontrolcüsünün  $K_p$  çıkışı Şekil (4.40)'daki gibidir



Şekil 4.41. Kaskad Pozisyon Kontrolcü  $K_i$  Çıkışı

Adaptif bulanık mantık PI pozisyon kontrolcüsünün  $K_i$  çıkışı Şekil (4.41)'deki gibidir.



Şekil 4.42. Sistemin Akım Grafiği

Çok döngülü yapının dışarıdaki döngüsü olan pozisyon kontrolü sağlanırken sistemin çektiği akımın grafiği Şekil (4.42)'deki gibidir. Çok döngülü yapının pozisyon kontrolcüsünde kullanılan her iki denetim algoritması sayısal olarak karşılaştırılmıştır.

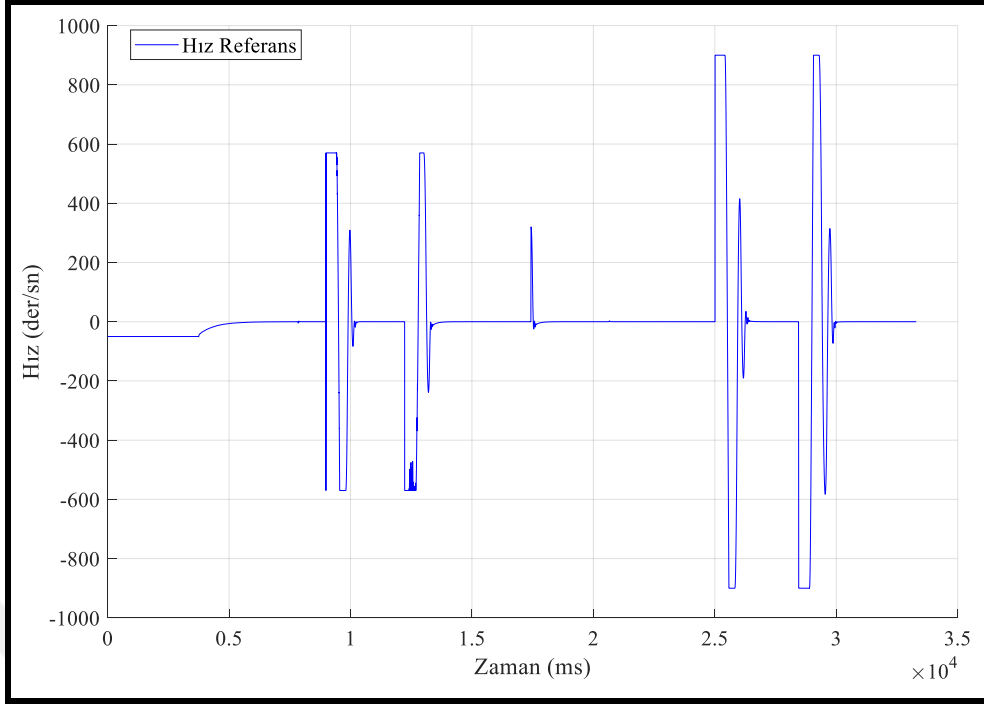
Tablo 4.10. Pozisyon Kontrolcüsü Akım ve Hata Sayısal Karşılaştırması

		POZİSYON KONTROLCÜSÜ		
		RMS	MSE	MAE
AKIM	Bulanık Mantık PI	3,9055E+03	1,5253E+07	2,3119E+03
	Geleneksel PI	4,3463E+03	1,8890E+07	2,8268E+03
HATA	Bulanık Mantık PI	51,3632	2,6382E+03	20,5276
	Geleneksel PI	51,8354	2,6869E+03	20,9402

Her iki pozisyon kontrolcüsünün akım ve hata değerleri için RMS (Root Mean Square), MSE (Mean Squared Error) ve MAE (Mean Absolute Error) değerleri Tablo (4.10)'daki gibidir. Adaptif bulanık mantık PI ve geleneksel PI kontrolcülerinin yükseliş zamanı, aşım miktarları ve oturma zamanlarına ait karşılaştırma değerleri Tablo (4.11)'deki gibidir.

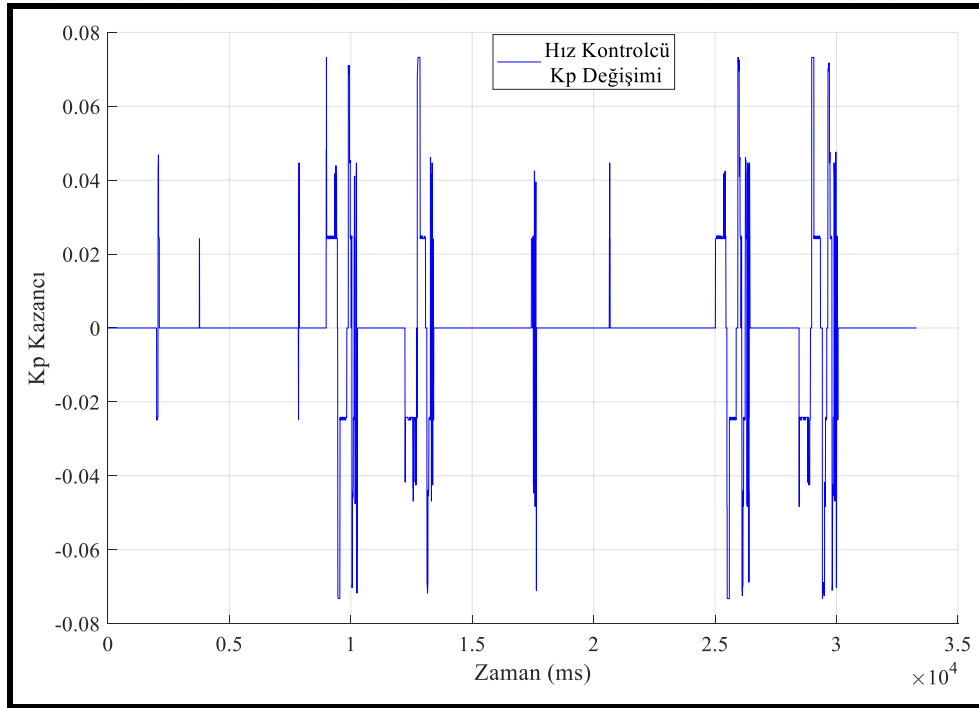
Tablo 4.11. Pozisyon Kontrolcüsü Karşılaştırma Tablosu

Hız Kontrolü	Yükseliş Zamanı (ms)	Aşım	Oturma Zamanı (ms)	IAE
Bulanık Mantık PI	696	% 3,59	1045	1,6929E+07
Geleneksel PI	703	% 3,58	1283	1,7274E+07



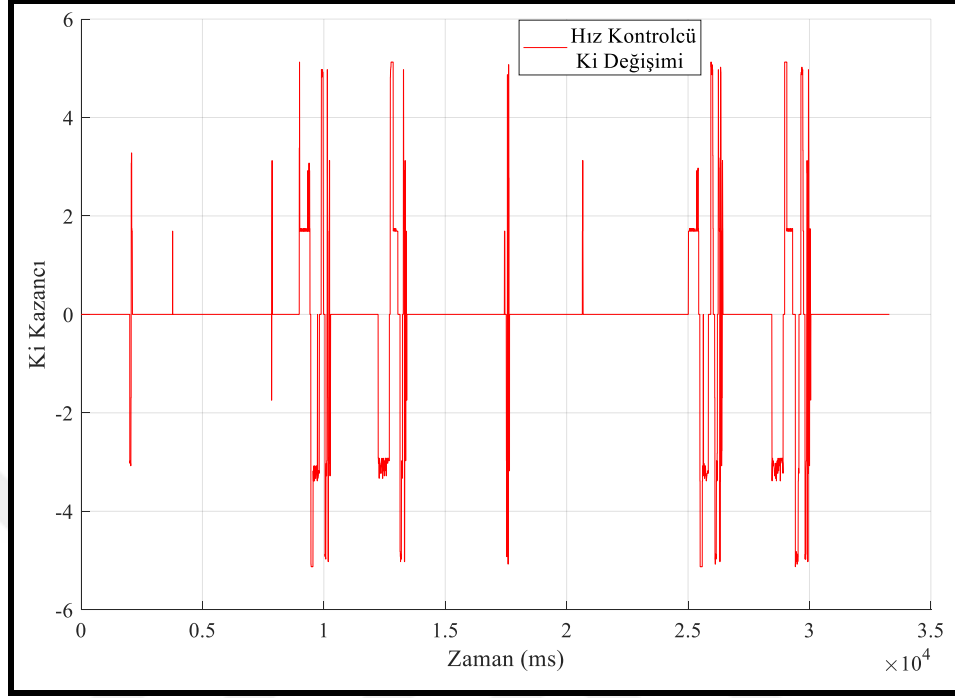
Şekil 4.43. Kaskad Hız Referans Grafiği

Kaskad kontrol algoritmasının pozisyon kontrolcüsünden hız kontrolcüsüne gönderilen hız referansının grafiği Şekil (4.43)'deki gibidir.



Şekil 4.44. Kaskad Hız Kontrolcü  $K_p$  Çıkışı

Kaskad kontrol algoritmasının hız kontrolcüsündeki  $K_p$  değişimi Şekil (4.44)'deki gibidir.



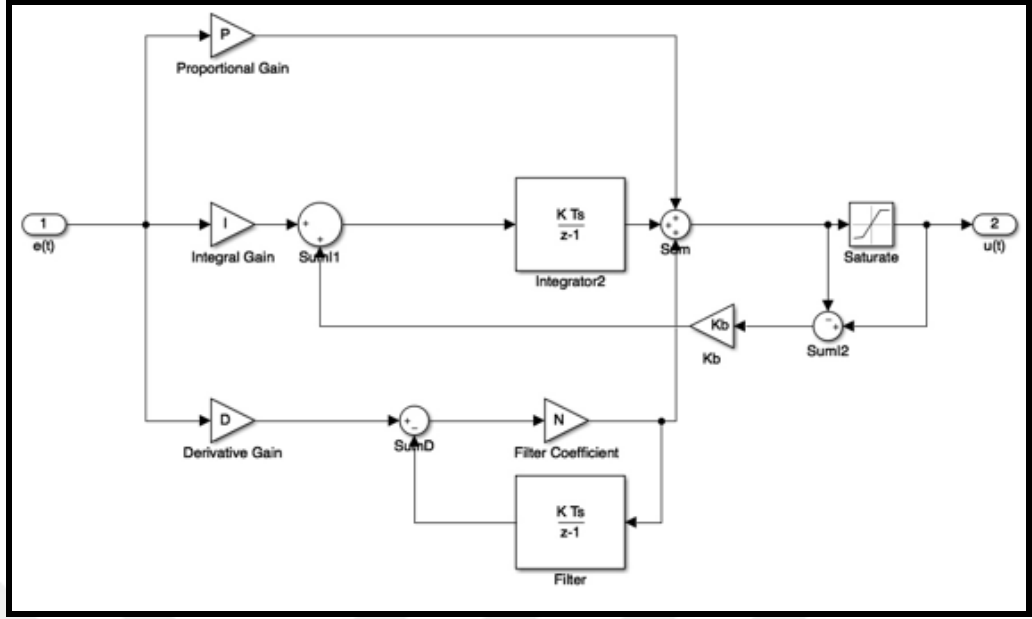
Şekil 4.45. Kaskad Hız Kontrolcü  $K_i$  Çıkışı

Kaskad kontrol algoritmasının hız kontrolcüsündeki  $K_i$  değişimi Şekil (4.45)'deki gibidir.

#### 4.3.4. Kaskad pozisyon kontrolü için Anti-Windup testi

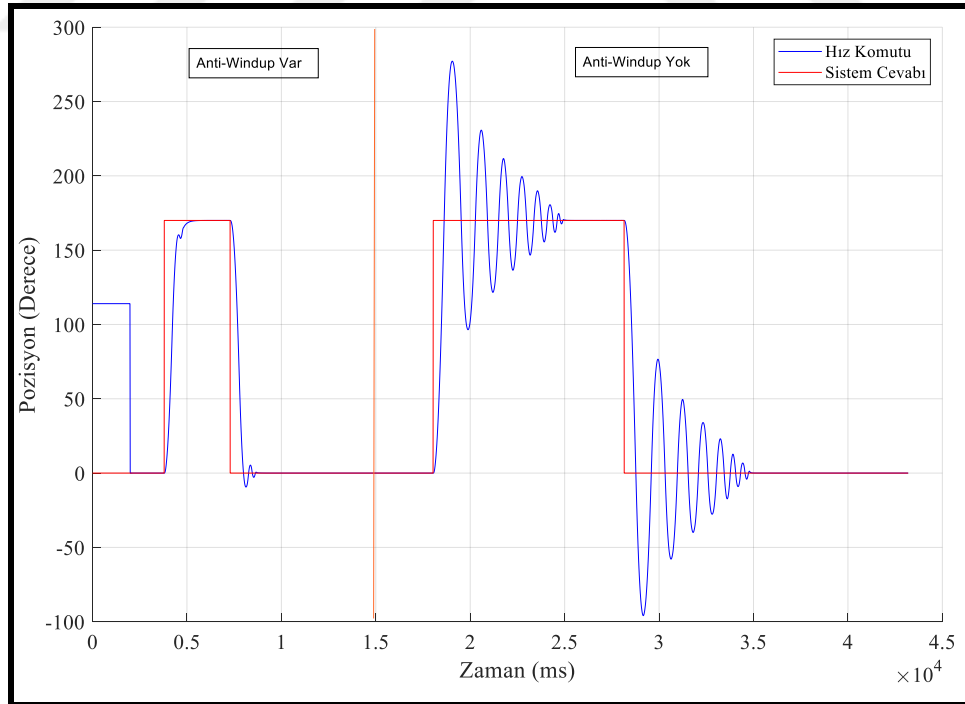
Bu çalışma kapsamında yapılan denetim sistemi testlerinde integral yığılmasını önlemek için Anti-Windup tekniğinin kullanıldığı belirtilmişti. Şekil (4.46)'da görüldüğü gibi, saturasyona giren değer integratör çıkışı ile geri beslemeye girer ve hata sinayline azaltıcı yönde etki eder. Burada oluşacak yığılmayı engelleyen kazanç değeri  $K_i$  her hata durumunda integratör giriş değerini düşük tutacak şekilde güncellemektedir.





Şekil 4.46. Anti-Windup Simulink Blok Diyagramı

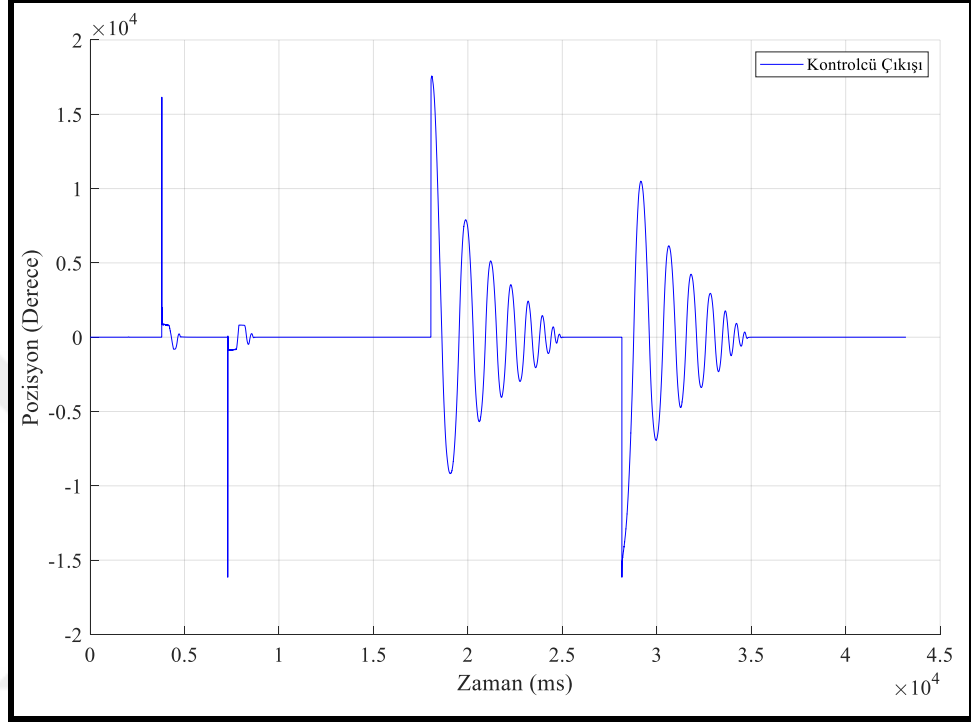
Tekniğin bu çalışmadaki önemini ifade etmek için bu bölümde kaskad adaptif bulanık mantık kontrolcüsünün bu teknikle birlikte ve Anti-Windup tekniği olmadan testler gerçekleştirilmiş ve sonuçları paylaşılmıştır.



Şekil 4.47. Adaptif Bulanık Mantık Pozisyon Referansı ve Sistem Cevabı

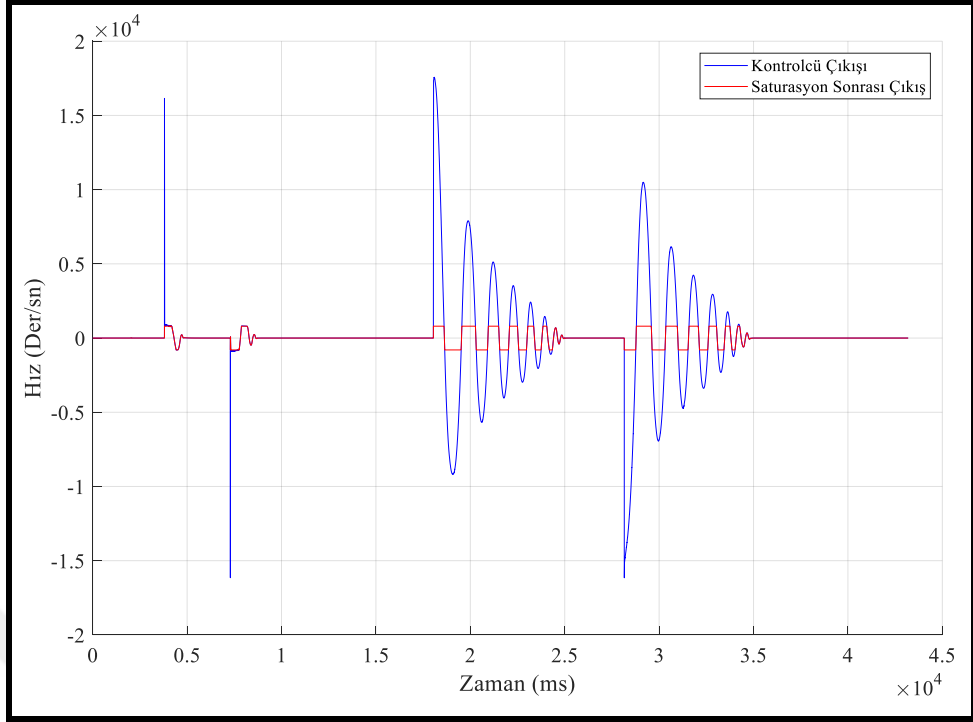
Şekil (4.47)'da görüldüğü gibi sistem, adaptif bulanık mantık PI kontrolcüler ile denetlenmektedir. Kaskad yapıdan oluşan denetleyicilerin pozisyon ve hız

kontrolcülerinin her ikisinde de Anti-Windup tekniği kullanılmıştır. Tekniğin gösterilmesi için pozisyon kontrolcüsündeki Anti-Windup test çalışmasının 15. saniyesine kadar kullanılmış ve sistem Şekil (4.47)'daki gibi aşım olmadan kararlı hale gelmiştir.



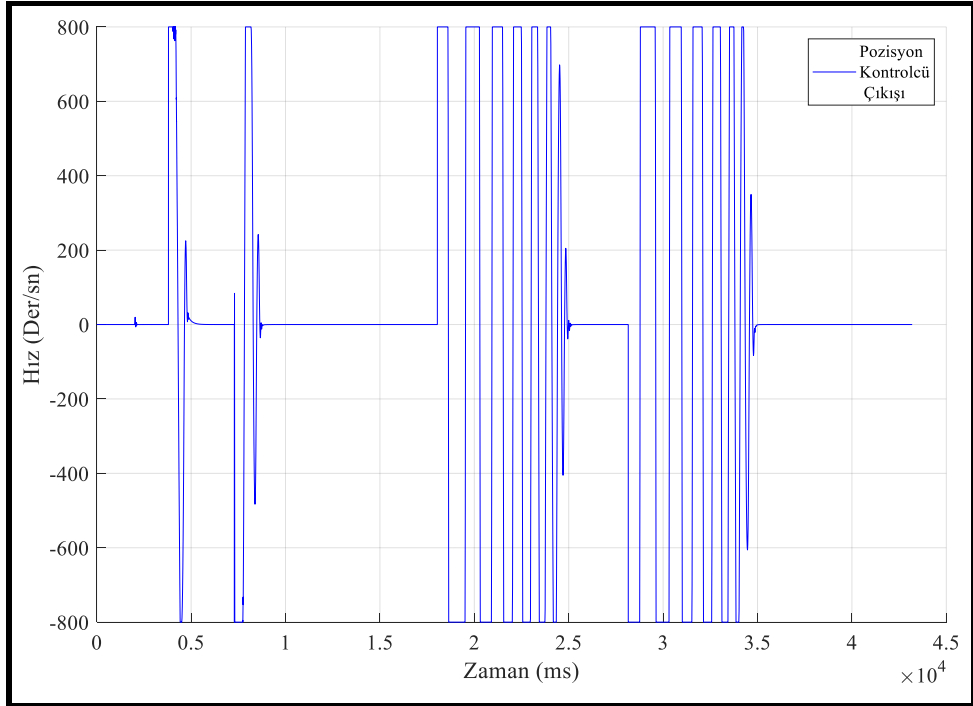
Şekil 4.48. Anti-Windup Testi Pozisyon Kontrolcü Çıkışı

Şekil (4.48)'de pozisyon kontrolcüsünün çıkışı görülmektedir. Sisteme ilk pozisyon referansı verildiğinde Anti-Windup tekniği uygulanırken 15. saniyeden sonra sisteme ikinci pozisyon referansı verildiğinde Anti-Windup tekniği uygulanmamış ve sistem osilasyona girerek uzun bir süre sonra kararlı hale gelmiştir.



Şekil 4.49. Anti-Windup Testi Saturasyon Öncesi ve Sonrası

Şekil (4.49)'de sistemin kararlı çalışabilmesi için yerleştirilen saturasyon bloğundan önce ve sonra alınan veriler bulunmaktadır.



Şekil 4.50. Pozisyon Kontrolcü Saturasyon Sonrası Çıkış

Pozisyon kontrolcüsünden hız referansı olarak çıkış Şekil (4.50)'deki gibidir.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Literatürdeki benzer gimbal uygulamalarında, genellikle kontrol algoritmasının tek kontrol döngüsünden oluştuğu görülmüştür. Açık algılayıcılardan alınan geri dönüş bilgisinin, eksen motorlarının kontrolüne yönelik uygulanması sırasında, kullanılan elektronik elemanların gürültüsü ve kinematik hareketinden kaynaklı hatalar dolayısıyla toplam hata değerleri birikmekte ve motorların kontrolü kapsamında gerekli olan referans değeri farklılık göstermektedir. Bundan dolayı bu çalışmada çok döngülü bir denetim sistemi kullanılmasına karar verilmiştir. Kontrol döngülerinin içerisinde yanca eyleyici denetimine yönelik kontrolcüler tasarlanmıştır. Bu bağlamda yanca eksen eyleyicisine yönelik pozisyon kontrolünün yanında hız kontrolüde yapılarak daha hassas ve daha gürbüz bir kontrol sistemi oluşturulmuştur. Sistemin denetimini sağlamak amacıyla kaskad adaptif bulanık mantık PI ve kaskad geleneksel PI kontrolcüler tasarlanmıştır. İç ve dış gimbal arasındaki sürtünme, statik ve dinamik dengesizlikte oluşan ataletlerden dolayı yanca ekseninin farklı açılarında kontrol motorlarına farklı yükler düşmektedir. Bu nedenle kaskad adaptif bulanık mantık PI denetim algoritması adaptifliği sayesinde PI katsayıları kontrolün her farklı açıdaki durumuna özel ayarlanabilmekte ve daha etkin bir denetim sistemi olmaktadır.

2 farklı kontrolcü ile kontrol edilen sistemin performans ve gürbüzlük özellikleri deneysel bir çalışma ile teyit edilmiş ve sonuçları sıralı bir şekilde sunulmuştur. Bu sunulan sonuçlardan anlaşılacağı üzere kaskad adaptif bulanık mantık PI kontrolcüsü, kaskad geleneksel PI kontrolcüsüne göre daha iyi sonuçlar vermiş ve tatmin edici bir sistem performansını sağlamıştır.

Sistem için yapılması öngörülen gelecek çalışmalar ise gimbal yükseliş ekseninin denetiminin aynı kontrolcüler ile yapılması, iç ve dış gimbal arasında oluşacak sürtünmenin deneysel yollarla elde edilmesi ve aktif koruma sistemi görevi görecektir. gimbal yapının 6-serbestlik ekseninde (Stewart Platform) kontrolcü çalışmalarının yapılmasıdır. Aktif koruma sistemlerinin isterlerini karşılayacak 2 serbestlik dereceli sistemler için ilk kez önerilen bu denetim sistemi kapsamında yapılan çalışmaların,

savunma sanayii çalışmalarında, hava savunma ve aktif koruma sistemlerinin geliştirilmesine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.



## KAYNAKLAR

- [1] Meyer T. J., Active Protection Systems: Impregnable Armor or Simply Enhanced Survivability, *Armor Magazine*, pp. 7–11, 1998.
- [2] Dere M., Günümüzün Meskun Mahal Muharebelerinde Tankın Teknolojik Yeterliliklerinin İncelenmesi, T.C. Kara Harp Okulu, Savunma Bilimleri Enstitüsü, Teknoloji Yönetimi Anabilim Dalı, Ankara, 2008, 231630.
- [3] Sarpen G., Stryker Slat Armor Protects Troops, *Advanced Materials and Processes Research Institute*, no:10, 31–32, 2005.
- [4] Servaes A., Belgian Army Unveils Upgrade of Piranha 3C 8x8 Armored Personnel Carrier with Slat Armour, Army Recognition, [http://armyrecognition.com/weapons\\_defenceindustry\\_military\\_technology+ok/html](http://armyrecognition.com/weapons_defenceindustry_military_technology+ok/html). (Ziyaret Tarihi: 15 Ocak 2015).
- [5] Wey P., Analysis Of Active Protection Systems : When Athena Meets Arena, *17th International Symposium on Ballistics*, Switzerland, 7-11 May 2001.
- [6] Ertekin Ö., Döğüşen C., Kılıçaslan E., Kara Platformları İçin Aktif Koruma Sistemleri, *Savunma Bilim Dergisi*, 2011, **10**(1), 92–106.
- [7] Özkan B., Elektromekanik Eyletimli Bir Fırlatma Sisteminin Dinamik Modellemesi ve Denetimi, *Uluslararası Makine Teorisi Sempozyumu*, Erzurum, 12-13 Eylül 2013
- [8] Feickert A., Army and Marine Corps Active Protection System ( APS ) Efforts, *Congressional Research Service*, R44598, 70-85, 2016.
- [9] Vivek R. and Roopchand J., Active Protection System for AFV application Current Trends and Future Requirement, *International Journal of Computer Technology and Applications*, 2012, **3**(4), 1450-1454.
- [10] Özkan B., “Elektromekanik Eyletimli Bir Fırlatma Sisteminin Dinamik Modellemesi Ve Denetimi,” *16. Uluslararası Makina Teorisi Sempozyumu*, Ankara, 12-13 Eylül 2013.
- [11] Dziopa Z., Krzysztofik I. and Koruba Z., An analysis of the dynamics of a launcher-missile system on a moveable base, *Bulletin of The Polish Academy Of Sciences*, DOI:10.2478/v10175-010-0068-5.
- [12] Obiora V., Achumba I. E., Adaptive Control of Aerial Vehicle Gimbal using Fuzzy-PID Compensator, *2017 IEEE 3rd International Conference on Electro-Technology for National Development*, 10.1109/NIGERCON.2017.8281914

- [13] Rajesh R. J., Ananda C. M., PSO Tuned PID Controller for Controlling Camera Position in UAV Using 2-Axis Gimbal, *2015 International Conference on Power and Advanced Control Engineering*, DOI: 10.1109/ICPACE.2015.727493
- [14] Abdo M., Vali A. R., Toloei A. R., Arvan M.R., Modeling Control And Simulation Of Two Axes Gimbal Seeker Using Fuzzy PID Controller, *22nd Iranian Conference on Electrical Engineering*, DOI:10.1109/IranianCEE.2014.6999742
- [15] Öztürk T., Angular Acceleration Assisted Stabilization Of A 2-Dof Gimbal Platform, Thesis of Master, Middle East Technical University, Electrical and Electronics Engineering Department, Ankara, 2010, 269394.
- [16] Poyrazoğlu E., Detailed Modeling And Control Of A 2-Dof Gimbal System, Middle East Technical University, Electrical and Electronics Engineering Department, Ankara, 2017, 463566.
- [17] KMW Company, KMW Company 76 Mm Wegmann-Protection System, KMW Company web sitesi, <https://www.kmweg.com/home/armament-systems-html>, (Ziyaret tarihi: 25 Şubat 2019)
- [18] Rapanotti J.L., Vehicle DAS Considerations for The Iron Gorget Threats, *Defence Technical Information Center*, 2007, **76**(300), DTIC ADA637805.
- [19] Rheinmetall AG, Reinmetall Defence-Active Defence System ADS, [https://www.rheinmetall\\_defence.com/en/rheinmetall\\_defence/public\\_relations/themen\\_im\\_fokus/active\\_defence\\_system\\_ads/index.php](https://www.rheinmetall_defence.com/en/rheinmetall_defence/public_relations/themen_im_fokus/active_defence_system_ads/index.php), (Ziyaret tarihi: 15 Mart 2019).
- [20] General Dynamics, General Dynamics - Bright Arrow Active Protection System, <https://www.gd-ots.com/protection-systems/active-protectionsystems>, (Ziyaret tarihi: 20 Mart 2019)
- [21] Aselsan, Aselsan Lazer İkaz Alıcı Sistemi, Aselsan Web Sitesi, <https://www.aselsan.com.tr/tr/cozumlerimiz/elektrooptiksistemler/havaplatformuelektrooptiksistemleri/lias-lazer-ikaz-alici-sistemi>, (Ziyaret tarihi: 22 Mart 2019)
- [22] Thales Group, Thales Laser Warning Detector, Thales Group Web Site, <https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/defence/land-survivability-laser-warning-detector-lwd>, (Ziyaret tarihi: 15 Mayıs 2019)
- [23] ASELSAN, Laser Warning Receiver System, Aselsan Web sitesi <http://www.aselsan.com.tr/en-us/capabilities/electro-optic-systems/air-platforms/lias-laser-warning-receiver-system>, (Ziyaret tarihi: 24 Mart 2019)
- [24] Kwag Y. K., An Airborne Radar System with Adaptive MTD Doppler Compensation Scheme using DSP Based Real-Time Spectral Estimation, *2008 IEEE Radar Conference*, DOI: 10.1109/RADAR.2008.472078

- [25] Reddy A.K., Taffet G.E., Li Y.H., Lim S.W., Pham T.T., Pocius J.S., Entman M.L., Michael L.H., Hartley C.J., Pulsed Doppler Signal Processing for Use in Mice: Applications, *Transactions On Biomedical Engineering*, DOI:10.1109/TBME/2005.855709.
- [26] Rada Electronic Industries LTD., Active Protection Solutions for Combat Vehicles-RADA, <https://www.rada.com/>, (Ziyaret tarihi: 10 Ocak 2019)
- [27] Denel Dynamics, Proud Innovators Of Competitive Missile, Uavs And Integrated Air Defence Solutions, Denel Dynamics web sayfası, [www.deneldynamics.com](http://www.deneldynamics.com), (Ziyaret tarihi:12 Ocak 2019)
- [28] Yaren T., Doğrusal Tahrikli Çift Çubuklu Ters Sarkaç Sisteminin Tasarımı Ve Denge Kontrolü, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2018, 494767
- [29] Moflon, Moflon Slipring, Moflon web Sayfası, <https://www.moflon.com/>, (Ziyaret tarihi: 20 Ocak 2019)
- [30] Şeref T., Dynamic Modelling and Control of A Gimballed Airborne, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2018, 527284
- [31] Kennedy P. J., Kennedy R. L., Direct Versus İndirect Line Of Sight (LOS) Stabilization, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, DOI: 10.1109/TCST.2002.806443
- [32] Waldmann J., Line-Of-Sight Rate Estimation And Linearizing Control Of An İmaging Seeker İn A Tactical Missile Guided By Proportional Navigation, *IEEE Transactions Control Systems Technology*, DOI: 10.1109/TCST.2002.1014675
- [33] Perez C., Rubio F. R., Implementation Of An Inertial Controller For A 2-DOF Platform, *6th International Federation Of Automatic Control* ,DOI:10.1016/S1474-6670(17)32800-8
- [34] Olsson H., Astrom K. J., Canudas C., A Study of Friction Models and Friction Compensation, *European Journal of Control*, DOI: 10.1016/S0947-3580(98)70113-x
- [35] Selezneva A., Modeling and Synthesis of Tracking Control for The Belt Drive System, Master Thesis, Lappeenranta University of Technology, Institute of Science and Technology, Department of Electrical Engineering, Finland, 2007.
- [36] Baykara B., Control of Systems Under The Effect of Friction, Middle East Technical University, Master Thesis, Institute of Science and Technology, Department of Mechanical Engineering, Ankara, 2009, 255842.
- [37] Polat A., X-Y Eksenli Kayış-Kasnak Servo Sistemin Modellenmesi ve Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2009, 252326.

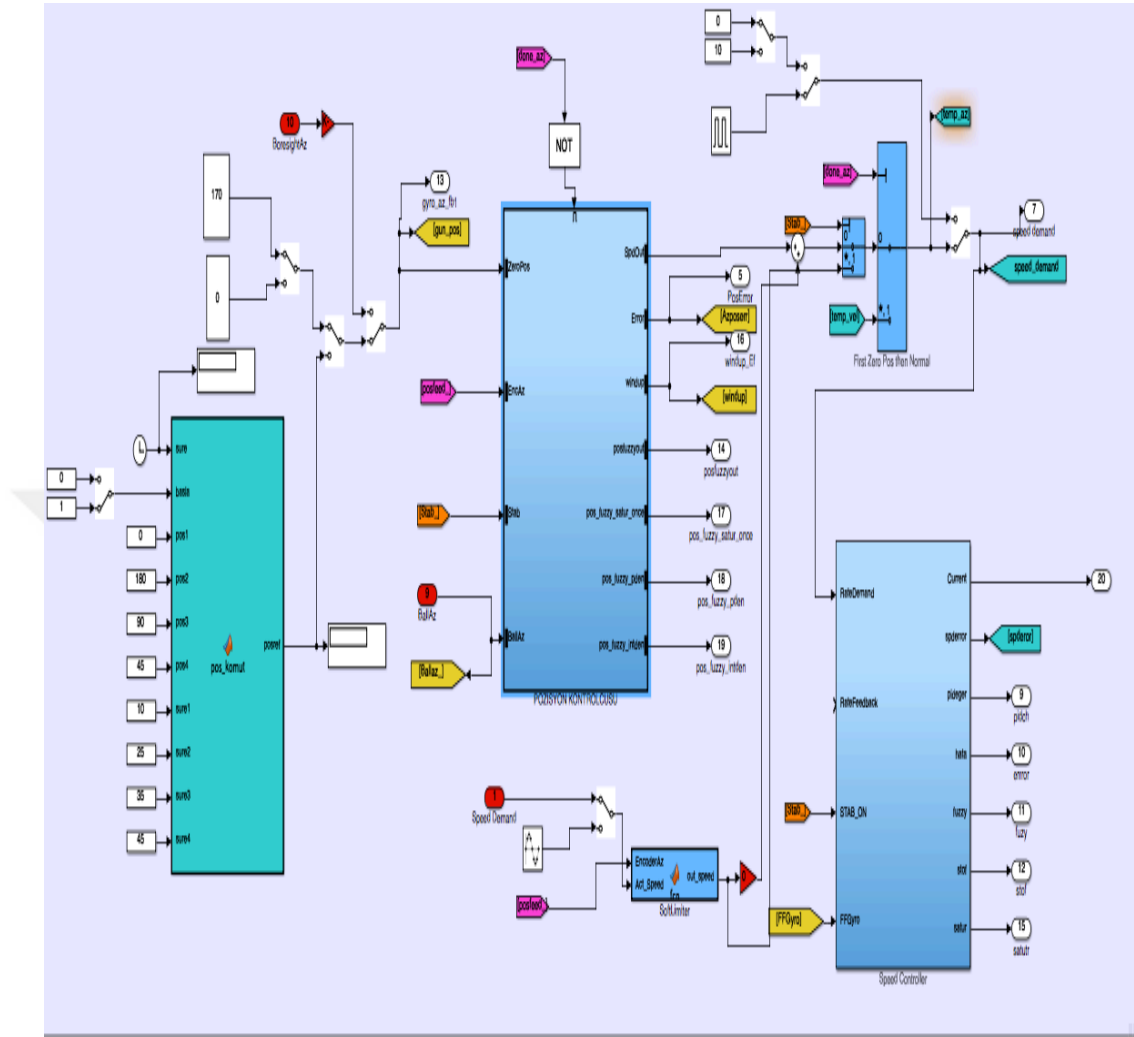


- [38] Karapınar U., Esen Z., Şahin M., Kanburoğlu F., Cascaded Controller Algorithm Design for A Brushless DC Motor with Matlab/Simulink and MCU Implementation, *Signal Processing and Communications Applications Conference*, Girne, Türkiye, 24-26 Nisan 2013.
- [39] Boz A. F., Sari Y., Sıfırsız 3 Kutuplu Sistemler İçin Optimal PI-PD Denetleyici Tasarım Yöntemi, *Politeknik Dergisi*, 2008, 11(4), 307–312.
- [40] Markaroğlu H., İntegral Yığılması Problemine Karşı Yeni Bir Yaklaşım, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006, 221961.
- [41] Arifoğlu U., *MATLAB Simulink ve Mühendislik Uygulamaları*, 3. Baskı, ALFA Basım Yayın, İstanbul, 2016.
- [42] Zadeh L., Fuzzy Sets, *Information and Control*, DOI:10.1016/S0019-9958(65)90241-X.
- [43] Ertunç M., *Introduction to Fuzzy Logic*, Kocaeli Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği, Kocaeli, 0-30, 2017.
- [44] Görgülü Ö., Şahinler S., Bek Y., Bulanık Mantık Uygulamalarının MATLAB Aracılığıyla Çözümlemesi, *5.Ulusal Biyoistatistik Kongresi*, Zonguldak, Türkiye, 5-9 Eylül 2006.
- [45] Çobanoğlu B., Bulanık Mantık ve Bulanık Küme Teorisi Ders Notu, Gazi Osmanpaşa Üniversitesi, Niksar MYO, Tokat, 2000.



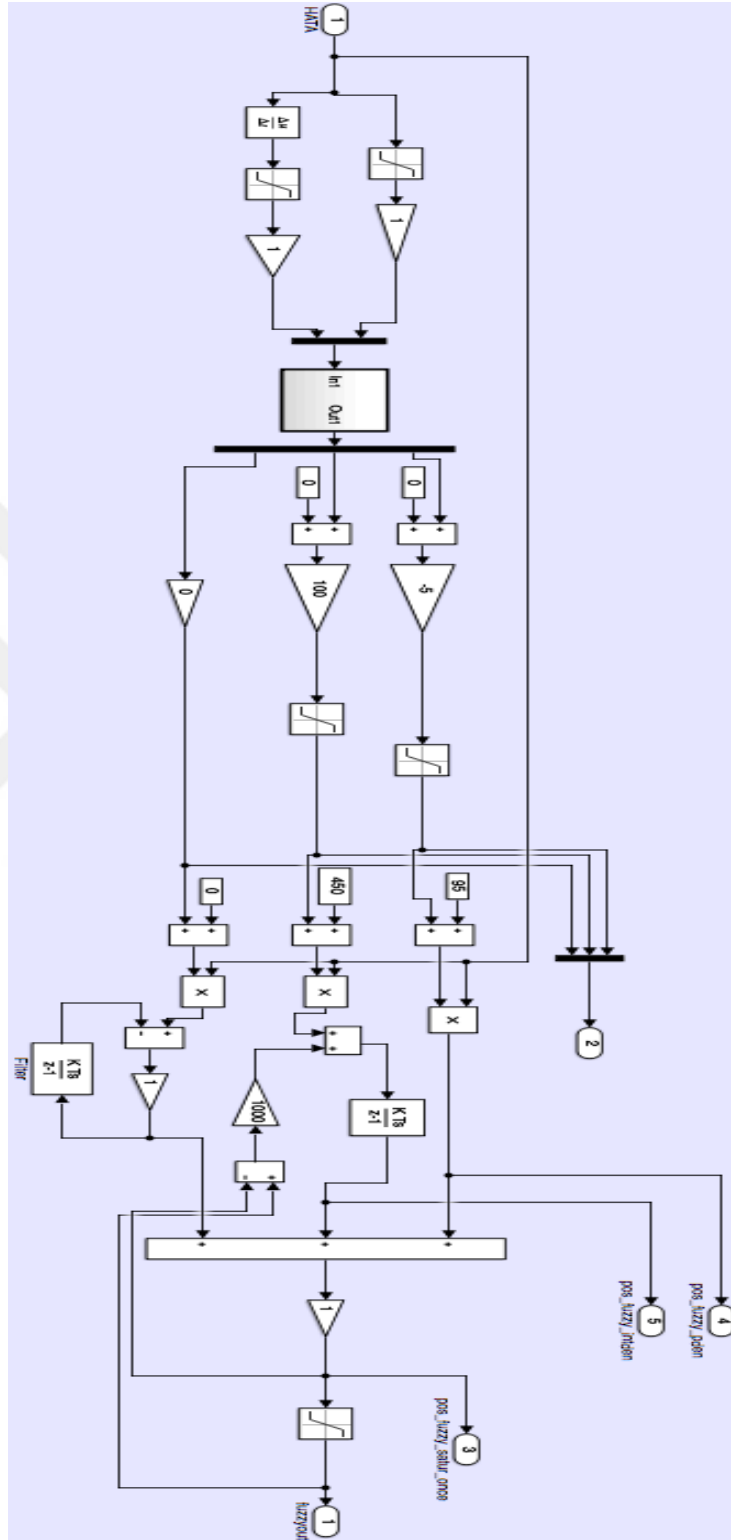
**EKLER**

Ek-A



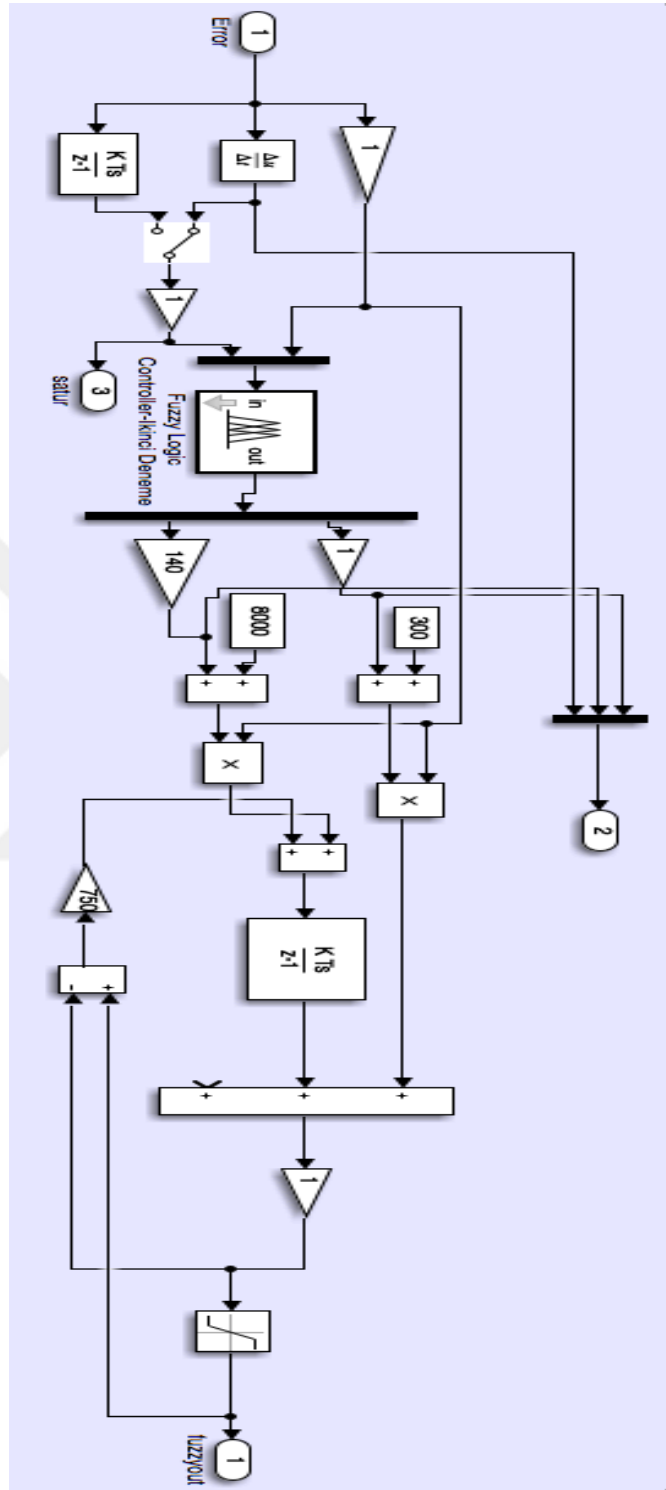
Şekil A.1. Kaskad Kontrolcü Simulink Blok Diyagramı

EK-B



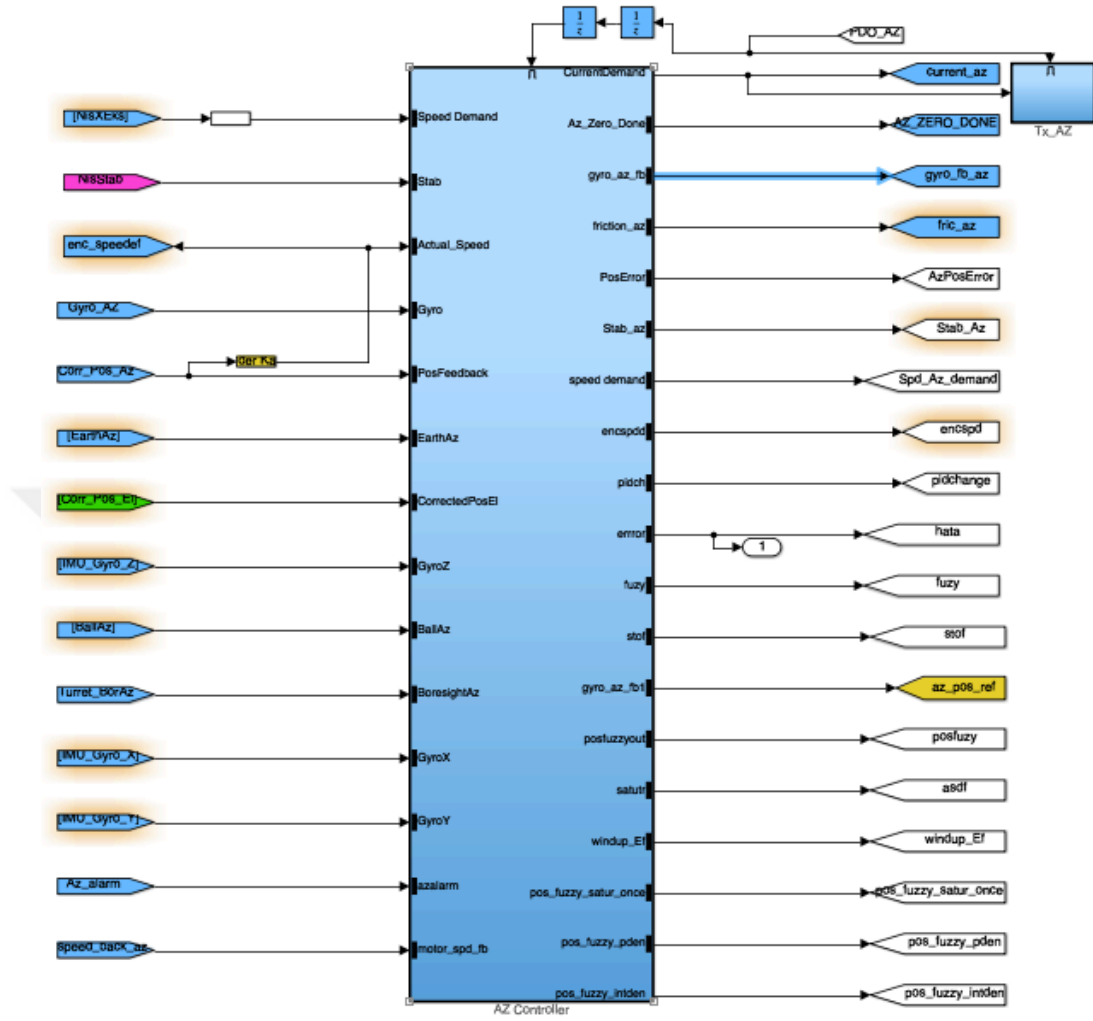
Şekil B.1. Pozisyon Kontrolcü Simulink Blok Diyagramı

Ek-C



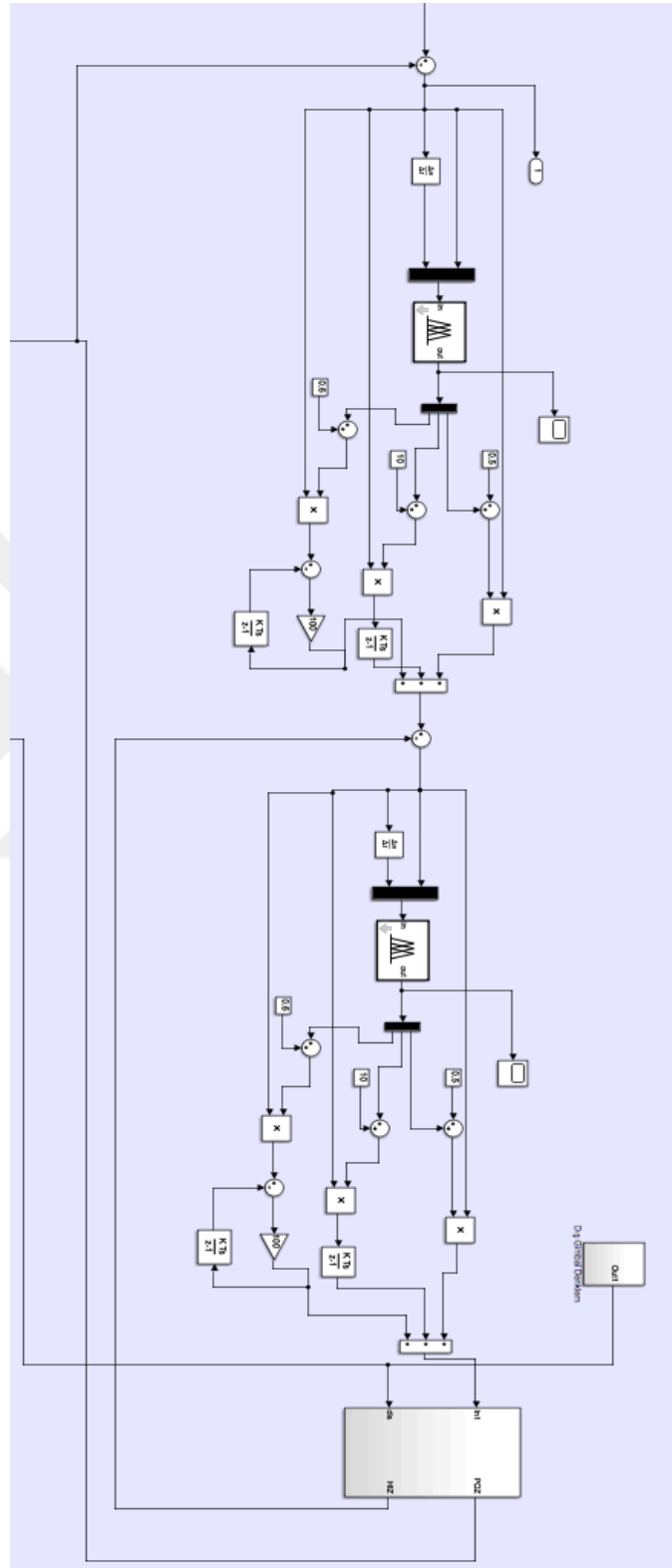
Şekil C.1. Hız Kontrolcü Simulink Blok Diyagramı

## Ek-D



Şekil D.1. Gerçek Zamanlı Sistemin Yanca Kontrolü Simulink Bloğu

Ek-E



Şekil E.1. Kaskad Bulanık Mantık Denetleyici Simulink Blok Diyagramı

## Ek-F

```
spd_cmd=d1ngs.data(1:end,13);
for i=2:length(spd_cmd)
    if (spd_cmd(i) ~= 0) && (spd_cmd(i-1) == 0)
        if i<20000
            point1=i+0;
        else
            point2=i+0;
        end
    end
end
len=700;
compareq=zeros(len+2,4);
test1_spd_cmd=d1ngs.data(point1-1:point1+len,13)/400;
test1_spd_fb=d1ngs.data(point1-1:point1+len,14)/400;
error1=test1_spd_cmd-test1_spd_fb;
test2_spd_cmd=d1ngs.data(point2-1:point2+len,13)/400;
test2_spd_fb=d1ngs.data(point2-1:point2+len,14)/400;
error2=test2_spd_cmd-test2_spd_fb;
figure;
plot(test1_spd_cmd,'c','DisplayName','test1_spd_cmd');hold on;
plot(test1_spd_fb,'b','DisplayName','test1_spd_fb');
plot(test2_spd_cmd,'c','DisplayName','test2_spd_cmd');
plot(test2_spd_fb,'r','DisplayName','test2_spd_fb');
gridon;plottools;
t=1:1:(len+2);
J1=sum(t'.*abs(error1))
J2=sum(t'.*abs(error2))
(J1-J2)*100/J2
```

Şekil F.1. Kontrolcü Sinyallerinin İAE Kriterine Göre Karşılaştırma Fonksiyonu



## Ek -G

```
function J=ofht2(K)
global Kp Ki
%Kp1 Ki1 Kd Kd1 Kp2 Ki2 Kd2
Kp=K(1);
Ki=K(2);
% Kd=K(3);
% Kp1=K(3);
% Ki1=K(4);
% Kd1=K(6);
% Kp2=K(7);
% Ki2=K(8);
% Kd2=K(9);
ifmin(K)<0
    J=1e12;
else
    [t,x,y]=sim('kaskadPI_deneme',5);
    J=sum(t.*y(:,1).^2)
    % J=1;
    % + wm*y(:,2).^2) === ISE
    % J=sum(abs(y(:,1)))% === IAE
    % J=sum(t.*abs(y(:,1))); % =====ITAE hata verirse son
    parantezden once nokta ekle
End

clearall
global Kp Ki
%Kp1 Ki1 Kd Kd1 Kp2 Ki2 Kd2
K0=[5 1];
options = optimset('PlotFcns',@optimplotfval);
[K,best]=fminsearch('ofht2',K0,options);
Kp=K(1);
Ki=K(2);
% Kd=K(3);
% Kp1=K(3);
% Ki1=K(4);
% Kd1=K(6);
% Kp2=K(7);
% Ki2=K(8);
% Kd2=K(9);
```

Şekil G.1. f-min-search Optimizasyon Fonksiyonu

## KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

- [1] **Fazhoğlu E.**, Erdil A., İki Eksen Aktif Koruma Sisteminin Kontrolü, *Uluslararası Ege Disiplinlerarası İnovatif Bilimsel Araştırmalar Sempozyumu*, İzmir, 26-27 Mart 2019.



## ÖZGEÇMİŞ

Kasım 1992 Sakarya doğumludur. İlk okul ve orta okul eğitimini Sakarya'da tamamlamıştır. 2006 yılında Fatih Anadolu Teknik Lisesi elektrik-elektronik bölümünde eğitime başlamış ve 2010 yılında mezun olmuştur. 2012 yılında girmiş olduğu üniversite sınavında Karabük Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği bölümünü kazanmıştır. 2013 yılında tekrar girdiği üniversite sınavı sonucunda Sakarya Üniversitesi Mekatronik Mühendisliğini kazanmış ve buradan 2016 yılında Mekatronik Mühendisi olarak mezun olmuştur. 2016 şubat ayında stajyer olarak başladığı OTOKAR firmasının Elektromekanik Sistemler Müdürlüğünde 2016 Kasım ayında tasarım mühendisi olarak iş başı yapmıştır. 2016-2017 eğitim öğretim döneminde Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans eğitimine başlamıştır.