

**AKILLI MÜHİMMATLARDA ARAYICI BAŞLIK  
PARAMETRELERİNİN GÜDÜM BAŞARIMINA  
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

**AN INVESTIGATION OF SEEKER PARAMETERS'  
EFFECTS ON GUIDANCE PERFORMANCE OF SMART  
MUNITIONS**

**OĞUZHAN KILIÇ**

**DR. ÖĞR. ÜYESİ YAKUP ÖZKAZANÇ**

**Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

## ÖZET

### AKILLI MÜHİMMATLARDA ARAYICI BAŞLIK PARAMETRELERİNİN GÜDÜM BAŞARIMINA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Oğuzhan KILIÇ

Yüksek Lisans, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Yakup ÖZKAZANÇ

Ocak 2022, [97] sayfa

Bu tez kapsamında sonlanma güdümünü kararlı kılınmış (stabilize) görüntüleyici ile gerçekleştiren akıllı mühimmatlar üzerine çalışılmıştır. Arayıcı başlık, güdüm yöntemi ve otopilot benzetim ortamında modellenerek, arayıcı başlık parametrelerinin hedef kaçırma mesafesine etkileri incelenmiştir. Güdüm yöntemi olarak oransal seyir güdümü algoritması kullanılmıştır. Arayıcı başlık parametrelerinin angajman başarımına etkilerinin ayrı olarak incelenmesi adına angajman modeli katımlı sistem analiziyle etüt edilmiştir. Katımlı sistem analizi sonuçları benzetim sonuçları olarak verilmiş ve yorumlanmıştır. Çalışmanın çıktısı olarak, arayıcı başlık başarım kıstaslarının ve sensör hatalarının sapma mesafesindeki etkileri belirlenmiş, mühimmat kabiliyetlerinin arayıcı başlık hata bütçesinde belirleyici olduğu sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Güdümlü Sistemler, Arayıcı Başlık, Görüntüleyici Kararlılaştırma, Katımlı Sistem Analizi, Oransal Seyir Güdümü, Akıllı Mühimmat

## **ABSTRACT**

### **AN INVESTIGATION OF SEEKER PARAMETERS' EFFECTS ON GUIDANCE PERFORMANCE OF SMART MUNITIONS**

**Oğuzhan KILIÇ**

**Master of Science, Department of Electrical and Electronics Engineering**

**Supervisor: Asst. Prof. Dr. Yakup ÖZKAZANÇ**

**January 2022, [97] pages**

In this thesis, smart munitions which are guided to target by stabilized imaging detectors are investigated. Stabilized seeker, guidance and autopilot models are constructed in a simulation environment and effects of the seeker parameters and dynamics are investigated in various scenarios. Proportional navigation method is used as guidance logic. In order to investigate the effects of seeker dynamics and performance parameters on miss distance separately, adjoint analysis method is used. As a result, it is seen that seeker dynamics and sensor performances have different effects on the error cost when the munition type or engagement character is different.

**Keywords:** Guided Munition, Guidance, Seeker, Detector, Seeker Stabilization, Adjoint Model Analysis, Proportional Guidance Method

## TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans ders dönemim boyunca verdiği dersler ve paylaştığı tecrübeleriyle mesleki bilgi dağarcığımı ve ufkumu genişleten, tez dönemimde çalışmalarımı yakından takip edip karşılaştığım problemlerde beni yönlendiren ve motive eden danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Yakup ÖZKAZANÇ'a,

Çalışmalarımın her döneminde yanımda olan ve beni destekleyen sevgili ailem ve eşim Gülşah KILIÇ'a,

Çalışmalarım esnasında bilgi birikiminden faydalandığım ROKETSAN'a,

Tez hazırlık dönemimde bilgi alışverişinde bulunduğum ve çalışmalarımı yakından takip eden tüm arkadaşlarıma,

Teşekkürler.

Oğuzhan KILIÇ,

Ocak 2022, Ankara

# İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
İÇİNDEKİLER .....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
SÖZLÜKÇE .....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. AKILLI MÜHİMMAT TEKNOLOJİSİ .....	3
2.1. Akıllı Mühimmatlar.....	3
2.2. Akıllı Mühimmat Güdüm Mimarileri .....	5
2.2.1. Komuta Güdümü .....	6
2.2.2. Evleme Güdümü .....	7
2.3. Oransal Seyir Güdümü (Proportional Navigation Guidance).....	11
3. ARAYICI BAŞLIK TEKNOLOJİSİ.....	12
3.1. Arayıcı Başlık Teknolojisi Temelleri.....	12
3.2. Algılayıcı Tiplerine Göre Arayıcı Başlıklar .....	13
3.2.1. Kızılötesi (Infrared) Arayıcı Başlıklar .....	14
3.2.2. Radar Arayıcı Başlıklar .....	17
3.2.3. Lazer Arayıcı Başlıklar.....	21
3.2.3. Diğer Algılayıcı Arayıcı Başlıklar .....	23
3.3. Elektromekanik Yapılarına Göre Arayıcı Başlıklar.....	24
3.3.1. Dinamik Dönüölçerli Stabilize Arayıcı Başlıklar (Dynamic Gyro Seekers) .....	26

3.3.2. Stabilize Platform Tabanlı Arayıcı Başlıklar (Stabilized Platform-Based Seekers).....	29
3.3.3. Sabitlenmiş Algılayıcılı Stabilize Optik Arayıcı Başlıklar (Detector Strapdown Stabilized Optic Seeker).....	31
3.3.4. Yarı Sabitlenmiş Platform Tabanlı Arayıcı Başlıklar (Semi-Strapdown Platform Seeker) .....	32
3.3.5. Sabitlenmiş Arayıcı Başlıklar (Strapdown Seeker).....	32
4. KATIMLI SİSTEM ANALİZİ .....	34
4.1. Belirlemci (Deterministic) Sistemler İçin Katımlı Sistem Analizi .....	35
4.2. Rastgele (Stochastic) Bozucuların Katımlı Model ile Analizi.....	40
4.3. Katımlı Sistem Modelinin Blok Gösterimlerden Elde Edilmesi .....	45
5. KATIMLI BENZETİM MODELLERİ .....	50
5.1. Oransal Seyir Güdümü Katımlı Modeli ( Adjoint PN Guidance Model) ...	51
5.2. İvme Otopilotu Katımlı Modeli.....	54
5.3. Arayıcı Başlık Katımlı Modeli .....	56
5.3.1. Arayıcı Başlık Kararlılaştırma ve Takip Döngülerinin Modellenmesi	56
5.3.2. Dönüölçer Hatalarının Benzetim Ortamına Aktarılması.....	58
5.3.3. Takip Gürültüsünün Benzetim Ortamına Aktarılması .....	59
5.3.4. Görüntüleyici Çıktı Sıklığının Benzetim Ortamına Aktarılması .....	60
5.3.5. Nişangah Hattı Kontrol Hatasının Benzetim Ortamına Aktarılması ..	60
5.3.6. Motorlar Üzerindeki Bozucu Momentin Benzetim Ortamına Aktarılması .....	62
5.3.7. Arayıcı Başlık Modelinin Katımlı Yapıya Çevrilmesi .....	62
6. BENZETİM ÇALIŞMALARI .....	66
6.1. Arayıcı Başlık Döngü Başarımının Angajman Başarımına Etkileri.....	66
6.1.1. Arayıcı Başlık Kararlılaştırma Döngüsünün Angajman Başarımına Etkisi .....	66
6.1.2. Arayıcı Başlık Takip Döngüsünün Angajman Başarımına Etkisi .....	71
6.2. Dönüölçer Bant Genişliğinin Angajmana Etkileri.....	75
6.3. Dönüölçer Sabit Hatasının Sapma Mesafesine Etkisi .....	78

6.4. Dönüölçer Rastgele Hatasının Sapma Mesafesine Etkisi.....	80
6.5. Takip Döngüsü Rastgele Gürültüsünün Sapma Mesafesine Etkisi.....	82
6.6. Nişangah Hattı Açısal Hatasının Sapma Mesafesine Etkisi.....	84
6.7. Görüntüleyici Çıktı Sıklığının Sapma Mesafesine Etkisi .....	86
6.8. Sürücüler Üzerindeki Sabit Momentin Sapma Mesafesine Etkisi .....	88
6.9. Sürücüler Üzerindeki Rastgele Momentlerin Sapma Mesafesine Etkisi .....	90
7. SONUÇLAR.....	92
8. KAYNAKLAR .....	94
ÖZGEÇMİŞ .....	97

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Akıllı Mühimmat Alt Sistemleri.....	5
Şekil 2.2. Akıllı Mühimmat Güdüm Döngüsü Blok Gösterimi .....	6
Şekil 2.3. Evleme Güdüm Tipleri .....	8
Şekil 2.4. Arayıcı Başlık Alt Sisteminin Mühimmat Döngüsündeki Yeri .....	9
Şekil 2.5. Noktasal Kütleli Mühimmat ve Hedefin İki Eksende Gösterimi .....	10
Şekil 3.1. Elektromanyetik İzge İçerisinde Kızılötesi Bölge.....	14
Şekil 3.2. Hisar Füzesi Kızılötesi Arayıcı Başlık.....	16
Şekil 3.3. Görüntü Tabanlı Kızılötesi Arayıcı Başlıklı Roketsan Laçın Güdüm Kiti.....	17
Şekil 3.4. Orta Menzil Aim-120 AMRAAM Hava-Hava Füzesi .....	19
Şekil 3.5. Orta Menzil Aim-7 SPARROW Hava-Hava Füzesi .....	20
Şekil 3.6. Lazer Arayıcı Başlık Üzerindeki 4 Bölmeli Optik Algılayıcı Yapısı.....	21
Şekil 3.7. MAM-L ve MAM-C Takılı Bayraktar TB2.....	23
Şekil 3.8. CİRİT ve LUMTAS Mühimmatları.....	23
Şekil 3.8. İki Eksenli Gimbal Mekanizması .....	25
Şekil 3.9. Dinamik Dönüölçer Stabilize Arayıcı Başlık Yapısı.....	27
Şekil 3.10. Dinamik Dönüölçer Stabilize Arayıcı Başlık Temel Blok Gösterimi .....	28
Şekil 3.11. Dinamik Dönüölçer Stabilize Arayıcı Başlık Bulunduran Amerikan Hellfire Mühimmatı.....	29
Şekil 3.12. Stabilize Platform Tabanlı Arayıcı Başlıkların Elektromekanik Yapısı.....	30
Şekil 3.12’de görüleceği üzere stabilize platform tabanlı arayıcı başlıkların iki eksende hareket kabiliyeti bulunmaktadır. Şekil üzerinde algılayıcının yunuslama ve sapma eksenindeki açsal konumlar sırasıyla $\varepsilon$ ve $\eta$ ile ifade edilmiştir. ....	30
Şekil 3.13. Platform Stabilize Arayıcı Başlıkların Temel Blok Gösterimi .....	31
Şekil 3.14. Faz Dizilimli Anten Taşıyan Sabitlenmiş Arayıcı Başlık Mimarisi.....	33
Şekil 4.1. Orijinal ve Katımlı Sistem Blok Gösterimleri.....	36
Şekil 4.2. Doğrusal Zamanla Değişen Sistem ve Katımlı Hali.....	37
Şekil 4.3. Doğrusal Zamanla Değişen Sistem ve Belirlenimci Girişler .....	39
Şekil 4.4. Karakterize Edilmiş Belirlenimci Girişler ve Doğrusal Zamanla Değişen Sistem .....	39



Şekil 4.5. Katımlı Sistem Girişleri ve Çıkışları .....	40
Şekil 4.6. Rastgele Bozucuların Beslendiği Doğrusal Zamana Bağlı Sistem.....	44
Şekil 4.7. Rastgele Bozucu Girişler Altında Katımlı Sistem .....	45
Şekil 4.8. Örnek LTV Sistem Blok Gösterimi .....	46
Şekil 5.1. Kurulan Benzetim Ortamının Alt Bileşenlerini İçeren Blok Gösterim .....	51
Şekil 5.2. İki Eksen Doğrusallaştırma Senaryosu Gösterimi .....	51
Şekil 5.3. Doğrusal Oransal Seyir Güdümü Blok Gösterimi .....	53
Şekil 5.4. Oransal Seyir Güdümünün Katımlı Blok Gösterimi.....	54
Şekil 5.5. Otopilot Kontrol Yapısı Blok Gösterimi.....	54
Şekil 5.6. Oransal Seyir Güdümü ve İvme Otopilotu Katımlı Blok Gösterimi .....	55
Şekil 5.7. Arayıcı Başlık Döngü Benzetimi.....	57
Şekil 5.8. Dönüölçer Hatalarının Benzetim Ortamına Aktarılması .....	59
Şekil 5.9. Takip Gürültüsünün Benzetim Ortamına Aktarılması.....	59
Şekil 5.10. Görüntüleyici Yenilenme Sıklığının Benzetim Ortamına Aktarılması.....	60
Şekil 5.11. Kubbe Kaynaklı Nişangah Hattı Hatasının Görselleştirilmesi.....	61
Şekil 5.12. Nişangah Hattı Hatasının Benzetim Ortamına Aktarılması .....	61
Şekil 5.13. Motorlar Üzerindeki Bozucu Momentin Benzetim Ortamına Aktarılması..	62
Şekil 5.14. Arayıcı Başlık Katımlı Modeli .....	63
Şekil 5.15. Benzetim Ortamında Angajman Katımlı Modeli .....	64
Şekil 5.16. Angajman Hatalarının Senaryo Başlangıcı Üzerinde Gösterimi .....	65
Şekil 6.1. Kararlılaştırma Bant Genişliğinin Birim Mühimmat-Hedef Konum Kaçıklığında Angajmana Etkileri ( $y_{r0} = 1$ metre).....	67
Şekil 6.2. Kararlılaştırma Bant Genişliğinin Birim Mühimmat-Hedef Hız Kaçıklığında Angajmana Etkileri ( $y_{r0} = 1$ metre/sn) .....	68
Şekil 6.3. Kararlılaştırma Bant Genişliğinin Birim Hedef İvmelenmesinde Angajmana Etkileri ( $y_{r0} = y_{t0} = 1$ metre/sn <sup>2</sup> ) .....	69
Şekil 6.4. Takip Bant Genişliğinin Birim Mühimmat-Hedef Konum Kaçıklığında Angajmana Etkileri ( $y_{r0} = 1$ metre).....	72
Şekil 6.5. Takip Bant Genişliğinin Birim Mühimmat-Hedef Hız Kaçıklığında Angajmana Etkileri ( $y_{r0} = 1$ metre/sn).....	73

Şekil 6.6. Takip Bant Genişliğinin Birim Hedef İvmelenmesinde Angajmana Etkileri ( $y_{r0} = y_{t0} = 1 \text{ metre/sn}^2$ ).....	74
Şekil 6.7. Dönüölçer Bant Genişliğinin Sapma Mesafesine Etkisi.....	77
Şekil 6.8. Dönüölçer Sabit Hatasının Sapma Mesafesine Etkisi .....	79
Şekil 6.9. Dönüölçer Rastgele Hatasının Sapma Mesafesine Etkisi .....	81
Şekil 6.10. Takip Gürültülerinin Sapma Mesafesine Etkisi .....	83
Şekil 6.11. Nişangah Sabit Hatasının Sapma Mesafesine Etkisi .....	85
Şekil 6.12. Görüntüleyici Çıktı Sıklığının Birim Mühimmat-Hedef Konum Kaçıklığında Sapma Mesafesine Etkisi ( $y_{r0} = 1 \text{ metre}$ ) .....	87
Şekil 6.13. Sürücüler Üzerindeki Sabit Bozucu Momentin Sapma Mesafesine Etkisi ...	89
Şekil 6.14. Sürücüler Üzerindeki Rastgele Bozucu Momentin Sapma Mesafesine Etkisi .....	91

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 5.1. GÜDÜM SONLANMA ZAMANINDA ARAYICI BAŞLIK SAPMA BÜTÇELERİNİN TANIMLANMASI .....	63
Çizelge 5.2. GÜDÜM SONLANMA ZAMANINDA ANGAJMAN SAPMA BÜTÇELERİNİN TANIMLANMASI .....	64
Çizelge 6.1. KARARLIlaştırma DÖNGÜ BAŞARIMI BENZETİM PARAMETRELERİ .....	66
Çizelge 6.2. TAKİP DÖNGÜ BAŞARIMI BENZETİM PARAMETRELERİ.....	71
Çizelge 6.3. DÖNÜÖLÇER BANT GENİŞLİĞİ BENZETİM PARAMETRELERİ.....	76
Çizelge 6.4. TAKİP DÖNGÜ BAŞARIMI BENZETİM PARAMETRELERİ.....	78
Çizelge 6.5. DÖNÜÖLÇER RASTGELE HATASI BENZETİM PARAMETRELERİ.....	80
Çizelge 6.6. TAKİP BOZUCULARININ BAŞARIMA ETKİLERİ BENZETİM PARAMETRELERİ .....	82
Çizelge 6.7. SABİT NİŞANGAH AÇISAL HATASININ BAŞARIMA ETKİLERİ BENZETİM PARAMETRELERİ .....	84
Çizelge 6.8. GÖRÜNTÜLEYİCİ ÇIKTI SIKLIĞININ BAŞARIMA ETKİLERİ BENZETİM PARAMETRELERİ	86
Çizelge 6.9. SÜRÜCÜ ÜZERİNDEKİ SABİT MOMENTİN BENZETİM PARAMETRELERİ .....	88
Çizelge 6.10. RASTGELE BOZUCU UÇUŞ MOMENTİNİN BAŞARIMA ETKİLERİ BENZETİM PARAMETRELERİ .....	90

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$a_c$	İvme Komutu ( $m/sn^2$ )
$a$	Mühimmat İvmelenmesi ( $m/sn^2$ )
$\lambda, q$	Görüş Açısı (Line of Sight) (derece)
$\dot{\lambda}, \dot{q}$	Görüş Açısı Değişimi (Line of Sight Rate) (derece/sn)
$\dot{\lambda}_d, \dot{q}_d$	Arayıcı Başlık Ölçülen Görüş Açısı Değişimi (derece/sn)
$\varepsilon, \varepsilon_p$	Görüş Açısı Ölçüm Hatası (derece)
$x_b$	Mühimmat Ekseni
$\vartheta$	Mühimmat Ekseninin Referans Eksenle Yaptığı Açık (derece)
$\theta$	Mühimmat Hız Vektörünün Referans Eksenle Yaptığı Açık (derece)
$N$	Oransal Seyir Güdümü Seyir Katsayısı
$V_c$	Mühimmat-Hedef Yaklaşma Hızı ( $m/sn$ )
$q_t$	Hedefin Referans Eksen ile Yaptığı Açık (derece)
$q_s$	Arayıcı Başlığın Referans Eksen ile Yaptığı Açık (derece)
$\dot{q}_c$	Arayıcı Başlık Açısız Hız Komutu (derece/sn)
$\dot{q}_s$	Arayıcı Başlık Açısız Hız Cevabı (derece/sn)
$\Delta q$	Arayıcı Başlık Referanslı Hedef Kaçıklığı (derece)
$t$	Zaman (sn)
$t_f$	Sonlanma Zamanı (sn)
$X_m$	Mühimmat X Ekseni Konumu (m)
$Y_m$	Mühimmat Y Ekseni Konumu (m)
$X_t$	Hedef X Ekseni Konumu (m)

$Y_t$	Hedef Y Eksenli Konumu (m)
$V_M$	Mühimmat Hızı (m/sn)
$V_T$	Hedef Hızı (m/sn)
$R$	Mühimmat-Hedef Mesafesi (m)
$\delta$	Dürtü Sinyali
$G$	Transfer Fonksiyonu
$K_1$	Arayıcı Başlık Takip Döngüsü Devre Kazancı
$K_2$	Arayıcı Başlık Kararlılaştırma Döngüsü Devre Kazancı
$J_y$	Arayıcı Başlık Eksenel Ataleti
$\Phi$	Spektral Güç Yoğunluğu
$W_{oto}$	İvme Otopilotu Bant Genişliği (Hz)
$W_T$	Arayıcı Başlık Takip Döngüsü Bant Genişliği (Hz)
$W_S$	Arayıcı Başlık Kararlılaştırma Döngüsü Bant Genişliği (Hz)
$W_G$	Görüntüleyici Çıktı Sıklığı (Hz)
$M$	Moment (kg m <sup>2</sup> /sn <sup>2</sup> )
$i$	Akım (Amper)

## **Kısaltmalar**

IIR	Imaging Infrared
INS	Inertial Navigation System
IR	Infrared
ISP	Inertially Stabilized Platform
LOS	Line of Sight
LTV	Linear Time Varying
MAM	Mini Akıllı Mühimmat
OMTAS	Orta Menzil Tanksavar Sistemi
PDF	Probability Density Function
PNG	Proportional Navigation Guidance
PSD	Power Spectral Density
RF	Radio Frequency
TV	Television
UMTAS	Uzun Menzil Tanksavar Sistemi

## SÖZLÜKÇE

Aerodinamik Kaldırma	Aerodynamic Lift
Aktif Evleme Güdümü	Active Homing Guidance
Algılayıcı	Detector
Arayıcı Başlık	Seeker
Ataletsel Navigasyon Sistemi	Inertial Navigation System
Bakış Alanı	Field of Regard
Beklenen Değer	Expected Value
Belirgin Kuvvet	Specific Force
Bitime Kalan Süre	Time-to-go
Dinamik Dönüölçerli Arayıcı Başlık	Dynamic Gyro Seeker
Doğrusal Zamanla Değişen	Linear Time Variant
Durum Uzay Modeli	State Space Model
Duyarlılık	Sensitivity
Dürtü Sinyali	Impulse Signal
Elektromanyetik İzge	Electromagnetic Spectrum
Evlleme Güdümü	Homing Guidance
Görüş Alanı	Field of View
Güdümlü Mühimmat	Guided Munition
Güdümlü Füze	Guided Missile
Güdümsüz Mühimmat	Unguided Munition
Harp Başlığı	Warhead
İtke Sistemi	Propulsion System
İvme Komutu	Commanded Acceleration

Jiroskop, Dönüölçer	Gyroscope
Jiroskop Etkisi	Gyroscopic Effect
Kanat	Wing
Kanard	Canard
Kararlılaştırma	Stabilizasyon
Katımlı Sistem Analizi	Adjoint Analysis
Komuta Güdümü	Command Guidance
Kızılötesi	Infrared
Oransal Seyir Güdümü	Proportional Navigation Guidance
Özilinti İşlevi	Autocorrelation Function
Pasif Evleme Güdümü	Passive Homing Guidance
Rastgele Bozucu Etki	Random Noise
Sabit Manyetik Sarım	Precession Coil
Sabitlenmiş Arayıcı Başlık	Strapdown Seeker
Sapma Ekseni	Yaw Axis
Sapma Mesafesi	Miss Distance
Sonlanma Zamanı	Final Time
Spektral Güç Yoğunluğu	Power Spectral Density
Stabilize Platform	Inertially Stabilized Platform
Stabilize Platform Tabanlı Arayıcı	Stabilized Platform-Based Seeker
Tapa	Fuse
Yarı Aktif Evleme Güdümü	Semi-Active Homing Guidance
Yarı Sabitlenmiş Arayıcı Başlık	Semi-Strapdown Platform Seeker
Yunuslama Ekseni	Pitch Axis





# 1. GİRİŞ

Akıllı mühimmat sistemleri geliştirmenin temel başarıml kriteri mühimmat uçuşunun sonunda kıymetlendirilen hedefin vurulması veya beklenen angajman yaklaşımının sağlanmasıdır. Bu amaca ulaşmak için hedefin ve mühimmatın hareket ve konum bilgilerinin düzenli olarak alınması, tahmin edilmesi ve bu bilgiler ışığında mühimmat hareketinin ne şekilde devam ettirileceğine karar verilmesi gerekmektedir. Gerçekleştirilecek mühimmat hareketinin belirlenmesi için geliştirilen stratejiye güdüm (guidance) yöntemi denmektedir. Güdüm yönteminin çıktıları, mühimmatın aerodinamik kaldırma kuvveti ile kontrol edilmesi ile mühimmat üzerinde gerçekleşir. Bu kontrol mekanizması ile mühimmat verilen kararlar doğrultusunda hareketini gerçekleştirebilir. Bu kontrolden mahrum olan mühimmatlara güdümsüz mühimmatlar denmektedir.

Güdümsüz mühimmatlar 13. yüzyıldan itibaren çeşitli formlarda karşımıza çıkmaktadır. 13. Yüzyılda Çin’de Moğol kuşatmasını püskürtmek için basit roketler kullanılmıştır. 15. Yüzyılda Kore’de sinkijon isimli ok atarlar kullanılmıştır. Yıllar içinde sinkijon sistemi geliştirilerek hedef konumun yakınına çoklu olarak atılabilen ve atıldığı bölgede patlamalar yaratan bir sisteme dönüşmüştür [1]. Gerekli güdüm ve kontrol yapılarından mahrum olmasından dolayı güdümsüz mühimmatların tarihsel gelişmesi yavaş olmuştur, ancak güdümsüz mühimmatlar hedef isabetinden çok belirli bir bölgenin tahribatında etkin olarak kullanılmaktadır.

Güdümlü mühimmat fikri ilk olarak 20. Yüzyılda 1. Dünya Savaşı sırasında ortaya çıkmıştır. Ancak 1. Dünya Savaşı esnasında güdümlü mühimmatların herhangi bir kullanımı olmadan savaş sona ermiştir. 2. Dünya Savaşı sırasında güdümsüz mühimmatların hareketli ve uzaktaki hedefleri vurmadaki zaafı ve sahada kullanılırken istenilen başarımlı sağlayamaması üzerine güdümlü mühimmatların tasarımına hız verilmiştir. Güdümlü mühimmatların ilk örnekleri 2. Dünya Savaşı’nda kullanılan Alman V-1 ve V-2 füzeleridir. V-1 ve V-2 füzeleri yer-yer füzeleri olup geliştirilen güdüm yöntemi sayesinde füze 100 mil mesafeden hedef noktaya gönderilebilmektedir [1]. Bunun yanında çeşitli güdümlü mühimmatlar da aynı dönemde geliştirilmiştir. Wasserfall Almanya’da geliştirilmiş, uzaktan radyo sinyalleri ile kontrol edilen süpersonik hızda

hareket eden yer-hava bir diğere adıyla uçaksavar füzesidir. Yaklaşık 5 ton ağırlığında olan füze, 7.62 m boyunda olup 19812 metre irtifaya ve saatte 2172 kilometre hıza çıkabilmektedir [1]. Menzili 48 km olan füzenin harp başlığı uzaktan aktif edilebileceği gibi üzerinde kızılötesi yakınlık sensörü de bulundurmaktadır. Bu sensör sayesinde harp başlığını patlatmak için avantajlı konum seçilebilmektedir. İlgili yapı füzenin kendi üzerinde hedefini bulmasını sağlayan arayıcı başlık yapısının ilk örneklerindedir.

2. Dünya Savaşından beri süre gelen güdümlü mühimmat ve arayıcı başlık geliştirme çalışmaları tüm dünyada devam etmektedir. UMTAS, OMTAS, MAM-C, MAM-L gibi mühimmatlar ülkemiz tarafından geliştirilmiş envanterimizde bulunan güdümlü mühimmatlardır. Bu mühimmatlar çeşitli güdüm yöntemlerini kullanarak üzerinde bulundurduğu arayıcı başlık yapıları ile hedefini takip edebilmektedir.

Bu tezde, üzerinde bulundurduğu görüntüleyici arayıcı başlık ile evleme güdümü yapan akıllı mühimmatlar incelenmiştir. İkinci bölüm, akıllı mühimmat teknolojisi, güdüm yöntemleri ve arayıcı başlığın görevleri üzerine kurulmuştur. Üçüncü bölümde, arayıcı başlık teknolojisi, elektromekanik yapıları ve algılayıcılara göre çeşitlendirilmesi hakkında bilgiler verilmiştir. Dördüncü bölümde, doğrusal zamanla değişen sistemlerin incelenmesinde kullanışlı bir yöntem olan katımlı sistem analizi (adjoint analysis) sunulmuştur. Beşinci bölümde, arayıcı başlıklardaki hata parametreleri belirlenerek benzetim ortamına aktarılmış, arayıcı başlık, oransal seyir güdümü (proportional navigation guidance) ve ivme otopilotunun bulunduğu angajman katımlı benzetim ortamı kurulmuştur. Katımlı sistem analizinin güdümlü mühimmatlarda uygulanması Peterson [23], Howe [24] ve Zarchan [25] tarafından yapılmıştır, ancak bu çalışmalarda arayıcı başlık katımlı yapısına yer verilmemiştir. Bu tezde özgün olarak, arayıcı başlık katımlı modeli kurularak benzetim ortamına eklenmiştir. Altıncı bölümde, benzetim sonuçları incelenmiş ve arayıcı başlık başarımlarının ve sensör hatalarının angajman üzerindeki etkileri yorumlanmıştır. Yedinci bölümde, toplanan tüm benzetim sonuçlarının değerlendirildiği ve tartışıldığı bir sonuç kısmı sunulmuştur.

## 2. AKILLI MÜHİMMAT TEKNOLOJİSİ

### 2.1. Akıllı Mühimmatlar

Akıllı mühimmatlar çeşitli güdüm kabiliyetleri olan, itki sistemine sahip olabilen, asıl amaçları istenilen bölge veya hedefte hasar yaratmak olan hava araçları olarak tanımlanabilir. Hedef alınan ve fırlatılan platformlara göre hava-hava, yer-hava ya da yer-yer mühimmatları olarak sınıflandırılabilir [1]. Mühimmatlar elektromekanik olarak itki-fırlatma sistemi, harp başlığı, arayıcı başlık, güdüm sistemi, ataletsel navigasyon sistemi ve kontrol yüzeyleri alt sistemlerinin birleşmesinden oluşur. Belirtilen tüm alt sistemlerin mühimmat seyrüseferi esnasında farklı rolleri vardır.

Güdüm sistemi, mühimmatın ve hedefin hareket ve konum bilgilerini alarak ya da tahmin ederek, bu bilgiler ışığında mühimmat hareketinin ne şekilde sürdüreceğini hesaplayan alt sistemdir. Bir mühimmatın akıllı mühimmat olarak nitelendirilebilmesini sağlayan temel özelliği güdüm kabiliyetinin olup olmamasıdır. Akıllı mühimmatlarda güdüm sisteminin temel amacı hedefe başarılı bir angajmanı sağlayacak yöntemi belirlemektir. Güdüm sistemi bu yöntemi mühimmatın aerodinamik kabiliyetleri, mühimmatın üzerindeki sensörler ve hedef çeşitliliğine göre şekillendirir.

Otopilot sistemi, güdüm kararlarının aerodinamik olarak gerçekleşmesini sağlayan hesapları yaparak kontrol yüzeylerine komut olarak besleyen temel birimdir. Otopilot tasarımı mühimmattan mühimmata farklılık gösterir. Bunun temel nedeni her mühimmatın farklı mekanik özellikleri olması ve bu mekanik kompleksin hareketini sağlayan kontrol yüzeylerinin farklı mimarilerde kurulmasıdır.

Kontrol yüzeyleri, otopilot tarafından anlamlandırılan güdüm çıktılarının füze üzerinde aerodinamik olarak gerçekleştiren alt sistemdir. Mühimmatların üzerlerinde bulundurduğu aerodinamik kaldırma kuvvetini yönlendiren kanat (wing) ya da kanard (canard) gibi sistemlerin hepsi kontrol yüzeyidir. Kontrol yüzeyleri tasarımında temel kriter mühimmatın ihtiyaç duyduğu manevra kabiliyetidir.

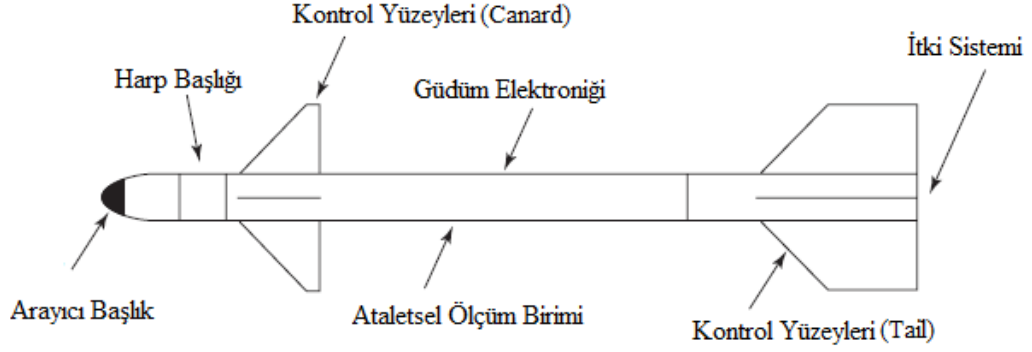
Navigasyon, hareket halindeki bir platformun, referans olarak belirlenen bir eksene göre uzaydaki konumu ve hızının bulunması tekniğidir [2]. Mühimmat üzerinde bulunan Ataletsel Navigasyon Birimi (INS), ataletsel sensörler bütünü ile belirgin kuvvet (specific force) ölçümü yaparak mühimmatın navigasyon işlemlerini gerçekleştiren birimdir. Ataletsel sensörler olarak ivmeölçer (accelerometer) ve dönüölçer (gyroscope) örnek verilebilir. Bu sensörlerden gelen veriler ile, güdüm sisteminin ihtiyaç duyduğu uzaydaki mühimmat durumu bilgisi elde edilir. Ayrıca ataletsel navigasyon biriminin çıktıları otopilot biriminde de kullanılarak, kontrol çıktılarının yüksek doğrulukla hesaplanması sağlanır.

Arayıcı başlık hedefin uzaydaki durumu hakkında güdüm birimine bilgi sağlayan alt sistemdir. Çok çeşitli arayıcı başlık mimarileri mevcuttur ancak hepsinin temel görevi hedef hakkında bilgiyi güdüm sistemine sağlamaktır. Arayıcı başlıklar üzerine detaylı çalışmalar üçüncü bölümde sunulmuştur.

Mühimmatın ilgili hedefe doğru yol alırken hedefi temel yakalama durumu aradaki mesafeyi kapatabilmesidir. Bu mesafenin kapatılmasında yönelim anlamında kontrol yüzeyleri rol alırken, gerekli olan temel yaklaşma hızı itki ve fırlatma sistemleri tarafından sağlanmaktadır.

Hedefin vurulduğu ya da angajman başarımının yeterli olduğu durumlarda, hedefe gerekli hasarın verilmesini sağlayan alt sistem harp başlığıdır. İçinde bulunan tapa (fuse) mekanizması yardımıyla harp başlığının patlatılması sağlanır. Harp başlığı tasarımı, verilmek istenen hasara ve hedef tipine göre farklılık göstermektedir. Verilmek istenilen hasara göre, kimyasal, patlayıcı, biyolojik harp başlığı gibi tipleri mevcutken, hedef tipine göre parçacık tesirli, zırh delici gibi özelleşmiş tipleri de mevcuttur [3].

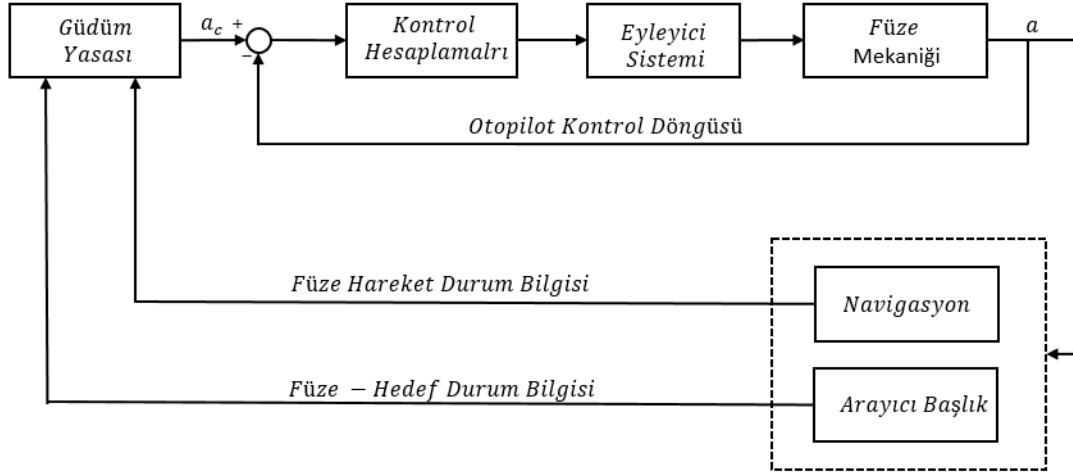
Yukarıda belirtilen alt sistemlerden oluşan bir akıllı mühimmat bütünü Şekil 2.1 ile görselleştirilmiştir.



Şekil 2.1. Akıllı Mühimmat Alt Sistemleri

## 2.2. Akıllı Mühimmat Güzüm Mimarileri

Daha önce de belirtildiği gibi akıllı mühimmatların temel başarıml kriteri mühimmat uçuşunun sonunda kıymetlendirilen hedefin vurulması veya beklenen angajman başarımlının sağlanmasıdır. Bu amaca ulaşmak için hedefin ve mühimmatın hareket ve konum bilgilerinin düzenli olarak alınması, tahmin edilmesi ve bu bilgiler ışığında füze hareketinin ne şekilde devam ettirileceğine karar verilmesi gerekmektedir. Mühimmat hareketinin belirlenmesi için geliştirilen stratejiye güzüm yöntemi denmektedir. Mühimmatın hedefe doğru yönelmesini sağlayan güzüm yöntemi, hedefin mühimmata göre durumuna bakarak, mühimmatın hızlanma vektörünün bulunması gerektiği yöne karar verir. Güzüm biriminin işlevini yerine getirebilmesi için gerekli olan mühimmat bilgileri navigasyon sistemi (INS) ile güzüm birimine beslenir. Hedefin füzeye göre olan durumunun belirlenmesinde ise arayıcı başlık olarak adlandırılan hedef bulucu alt sistem görev almaktadır [1]. Güzüm yönteminin sonucunda belirlenen çıktı ivme komutu (commanded acceleration) çıktısıdır. Güzüm yöntemi tarafından belirlenen ivme komutu ( $a_c$ ), otopilot sistemi yardımıyla kontrol yüzeylerine aktarılarak ilgili hızlanmanın mühimmat üzerinde gerçekleşmesi sağlanır. Şekil 2.2 ile güzüm döngüsü görselleştirilmiştir.



Şekil 2.2. Akıllı Mühimmat Güdüm Döngüsü Blok Gösterimi

Güdüm yöntemi akıllı mühimmatın hedef karakteristiği, görev alacağı ortam şartları, manevra yeteneği ve üzerinde veya başka bir platformda bulunduracağı yardımcı sensörlere göre belirlenir. Güdüm yöntemleri güdüm kararlarının alındığı platformlara göre komuta güdümü (command guidance) ve evleme güdümü (homing guidance) olmak üzere iki sınıfta incelenebilir.

### 2.2.1. Komuta Güdümü

Güdüm komutunun mühimmat harici başka bir konumda hesaplandığı ve mühimmata iletiildiği güdüm yöntemine komuta güdüm denmektedir. Mühimmata doğrudan güdüm komutu gönderildiği için mühimmat üzerinde hedeften bilgi almayı gerektirecek herhangi bir sensöre veya arayıcı başlığa gerek yoktur. Hedef hakkındaki bilgi güdüm komutunun gönderildiği istasyon tarafından toplanır ve güdüm hesaplamaları bu istasyon üzerinde gerçekleştirilir. Güdüm komutları, komuta hattı üzerinden mühimmata gönderilmektedir.

İlgili güdüm yöntemi mühimmat üzerinde arayıcı başlık gerektirmediği için birim maliyeti açısından avantaj sağlamaktadır. Ancak bu güdüm yöntemini kullanan mühimmatların, istasyonun hedef hakkında bilgi derleyemeyeceği uzak menzillerde kullanılamaması saha operasyonlarında dezavantaj sağlamaktadır. Komuta hattının elektronik harp ortamında bozuculara maruz kalabilmesi de komuta güdümünün bir diğer

dezavantajlı yanıdır. Hava savunma gibi bilinen bölgelerde yapılan operasyonlarda komuta güdümü kullanışlı bir stratejidir.

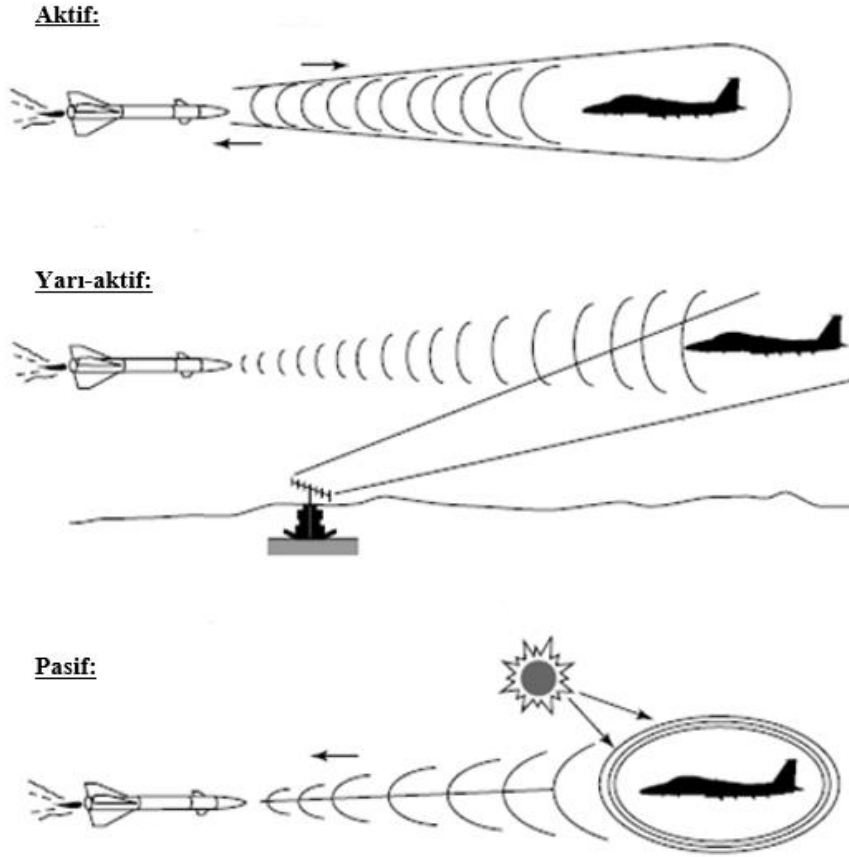
### **2.2.2. Evleme Güdümü**

Evlleme güdümü yapan sistemler, hedefi tespit edip, hedefe yönelimini kendi üzerinde koşturduğu güdüm algoritmasıyla yapan sistemlerdir. Bir diğler deyişle, evleme güdümü hedefin belirli bir özelliğine bakarak hedefi belirliyeabilen ve takip edebilen özelleşmiş bir güdüm türüdür.

Evlleme güdümü kullanılan sistemler hedef takibini yapabilmek için üzerlerinde arayıcı başlık (seeker) bulundurur. Hedefi belirleyebilmek adına hedeften gelen ısı, ses, ışık ya da radar yansıması arayıcı başlık tarafından tespit edilir. Mühimmat uçuşunun önceden belirlenmiş bir projeksiyonda gerçekleştirildiği mimarilerde, avantajlı bir çarpma noktası bulmak adına güdüm sonlanma evresinde evleme güdümü kullanılabilir. Evleme güdümü mühimmat üzerinde arayıcı başlık bulundurmasından dolayı maliyet olarak dezavantajlı bir konumda olsa da otomatik hedef tayininin yapılabilmesi, at-unut operasyonlarda kullanılabilmesi, güdüm algoritmalarının koştacağı bir istasyon ihtiyacı olmaması ve başka bir platformdan bozucuya maruz kalabilecek bir veri hattı bulundurmaması yönünden taktik anlamda güçlü bir mimaridir.

Evlleme güdümlü sistemler hedef algılama mimarilerine göre üç sınıfta incelenebilir. Bunlar aktif, pasif ve yarı aktif olarak adlandırılır. Şekil 2.3 ile evleme güdümü tipleri görselleştirilmiştir [1].





Şekil 2.3. Evleme Güdüm Tipleri

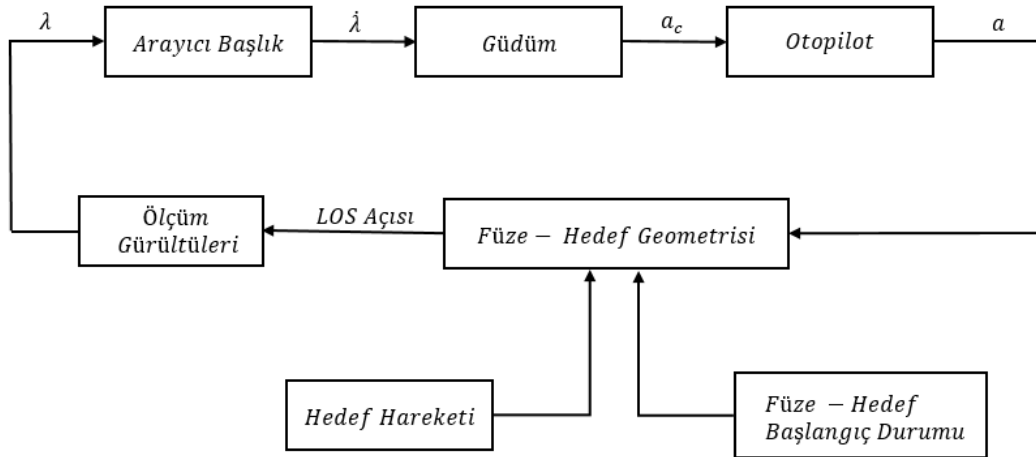
Aktif evleme güdümü yapan mühimmatlarda, hedefin aydınlatıldığı ve takip edildiği kaynak füzenin üzerindedir. Radar sistemler üzerinden örnek verilirse, radarın hem verici hem de alıcı anteni arayıcı başlık üzerinde bulunur. Aktif evleme güdümlü mühimmatlar, at-unut operasyonlarında kullanılabilecek yapıda olmasından dolayı avantajlı bir mimaridir. Ancak hem alıcı hem de verici yapının arayıcı başlık üzerinde bulunması, mühimmat birim maliyetini arttırmaktadır.

Yarı-aktif evleme güdümlü mühimmatlarda, hedef ayrık bir istasyon ya da kaynak tarafından işaretlenir. Mühimmat, üzerinde bulundurduğu arayıcı başlık ile hedeften yansıyan sinyalleri toplar. Aydınlatıcı istasyon bazlı radarlar bu sistemlere örnek verilebilir. Ayrık bir kaynak tarafından yapılan işaretlemelerde, kaynağın bulunduğu ortamdaki geniş çalışma alanları sayesinde, güçlü işaretleyiciler kurmak mümkündür. Bu sayede hedef tayininde mesafe artışı sağlanabilir. Genel kavram olarak yarı-aktif

sistemler her ne kadar komuta güdümüne benzer özellikler taşısa da, hedeften gelen sinyallerin arayıcı başlık tarafından toplanması ve güdüm yönteminin mühimmatın üzerinde yapılması itibariyle komuta güdümünden ayrılırlar.

Pasif evleme güdümlü mühimmatlar, kendi üzerinde ya da ayırık olarak başka bir işaretleyici kaynağa ihtiyaç duymayan yapıdadırlar. Bu mühimmatlarda, hedefin yayacağı doğal ışıklar ve yayılmalar arayıcı başlık tarafından toplanır. Isı, ışık ve ses dalgaları bu doğal yayılmalara örnek verilebilir. Kızılötesi arayıcı başlıklı mühimmatlar hedefin doğal ışınmasına göre hedef takibini sağladığı için pasif evleme güdümlü mühimmatlara örnek olarak verilebilir.

Bütün evleme güdümlü mühimmatların ortak özellikleri yapılarında arayıcı başlık bulundurmalarıdır. Arayıcı başlığın temel görevi içerisinde bulundurduğu alıcı-verici sensörler bütünü ile hedef tayinini sağlamak ve mühimmat güdüm döngüsüne bu bilgiyi aktarmaktır. Arayıcı başlık alt sisteminin mühimmat döngüsündeki yerinin blok gösterimi Şekil 2.4 ile verilmiştir.

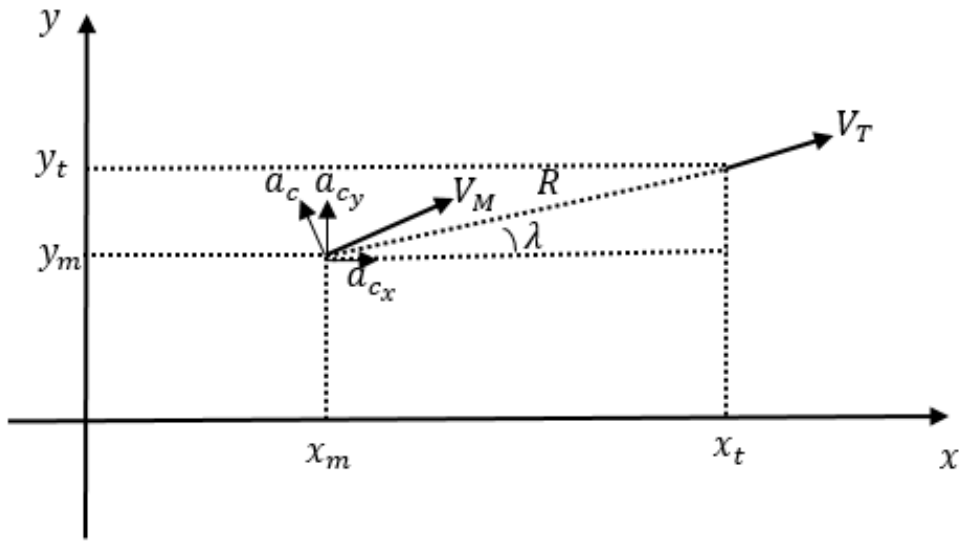


Şekil 2.4. Arayıcı Başlık Alt Sisteminin Mühimmat Döngüsündeki Yeri

Şekil 2.4'te  $\lambda$  görüş açısını (line of sight),  $\dot{\lambda}$  görüş açısı değişimini (line of sight rate),  $a_c$  ivme komutunu ve  $a$  ivme komutuna verilen cevabı ifade etmektedir.

Şekil 2.4'te görüleceği üzere güdüm yönteminin uygulanmasında rol alan hedef bilgileri arayıcı başlık tarafından sağlanmaktadır. Akıllı bir mühimmat için bu girdiler; hedef konumu, hedef hızı, füze-hedef mesafesi ve yönü bilgileridir. Bu bilgilerin tümü güdüm birimine sağlanabileceği gibi arayıcı başlık mimarisine bağlı olarak içlerinden sadece bazıları da sağlanabilir.

Mühimmat-hedef mimarisi göz önünde bulundurularak gerekli arayıcı mimarisi seçildikten sonra, arayıcı başlıktan sağlanan hedef bilgisi uygun bir güdüm stratejisiyle değerlendirilir. Günümüzde evleme güdüm yöntemini kullanan bütün mühimmatlar güdüm yöntemi olarak Oransal Seyir (Proportional Navigation) yöntemi veya bu yöntemin geliştirilmiş hallerini kullanmaktadır. Oransal seyir yönteminin yaygın olarak kullanılmasının birkaç nedeni vardır. Öncelikle oransal seyir yöntemi, duran, sabit hızda hareket eden ve manevra kabiliyeti düşük hedeflere karşılıklı etkili bir yöntemdir. Yüksek manevra kapasitesine sahip hedeflere karşı da belirli algoritma geliştirmeleri ile başarılı angajmanlar sağlanabilir. Bunun yanında uygulanma evresinde çok gelişmiş donanımlara ihtiyaç duymayan, karmaşıklık seviyesi görece düşük bir algoritmadır. Oransal seyir algoritmasının ihtiyaç duyduğu temel bilgi görüş açısı değişimi bilgisidir. Görüş açısı mühimmatın referans aldığı eksen ile hedef arasındaki açı olarak tanımlanabilir. Görüş açısı değişimi ise bu açının birim zamandaki değişimi bilgisidir. Noktasal kütleli mühimmat ve hedefin iki eksende gösterimi Şekil 2.5 ile verilmiştir.



Şekil 2.5. Noktasal Kütleli Mühimmat ve Hedefin İki Eksende Gösterimi

Şekil 2.5'te  $(x_m, y_m)$  mühimmat konum takımını,  $(x_T, y_T)$  hedef konum takımını,  $V_m$  mühimmat hız vektörünü,  $V_T$  hedef hız vektörünü,  $R$  mühimmat ile hedef arasındaki mesafeyi,  $a_c$  ivme komutunu ve  $\lambda$  görüş açısını ifade etmektedir.

### 2.3. Oransal Seyir Güdümü (Proportional Navigation Guidance)

Oransal Seyir Güdümü en çok bilinen ve evleme güdümü ile yönlenen mühimmatlarda en yaygın olarak kullanılan güdüm yöntemidir. Oransal seyir güdümünün temelinde birbirine yaklaşan iki nesnenin sonunda birbirine çarpacağı üzerine kurulmuş bir yaklaşım vardır. Bu yaklaşım ile ilgili güdüm yönteminde görüş açısı değişimi sıfırlanmaya çalışılır. Daha önce de bahsedildiği gibi görüş açısı değişimi bilgisi arayıcı başlık tarafından sağlanmaktadır. Alınan bu bilgi ile kontrol yüzeylerinde görüş açısı değişimini sıfır tutmaya yarayacak mühimmat ivmesi gerçekleştirilir [1]. Oransal seyir güdümünün yarattığı ivme komutu Eşitlik (1) ile verilmiştir.

$$a_c = NV_c \frac{d\lambda}{dt} \quad (1)$$

Eşitlik (1)'de  $a_c$  füzeeye uygulanan normal (füze hız vektörüne dik) ivmeyi,  $N$  seyir katsayısını ve  $V_c$  yaklaşma hızını ifade eder. Oransal seyir güdümü yapılan sistemlerde, ivme komutu hesaplaması yapılırken mühimmatın hedefe yaklaşma hızı kullanılır. Yaklaşma hızı arayıcı başlık tarafından ölçülebilir. Bu ölçüm radar arayıcı başlıklarda mümkünken, kızılötesi veya optik arayıcı başlıklarda bu hız ölçülemez. Bunun yerine yaklaşma hızının sabit mühimmat hızı olarak kabul edilmesi yaygındır.

### 3. ARAYICI BAŞLIK TEKNOLOJİSİ

#### 3.1. Arayıcı Başlık Teknolojisi Temelleri

Akıllı mühimmat teknolojisinde bahsedildiği üzere; evleme güdümü gerçekleştiren sistemler hedefe doğru güdülme için hedef hakkındaki bilgiyi kendi üzerinde algılamaya ihtiyaç duyar. Arayıcı başlık (seeker), bu ihtiyacı karşılayan hedefin konumu ve hareketi hakkında bilgiyi güdüm birimine aktaran elektromekanik bütündür. Arayıcı başlığın temel işlevleri şu şekilde listelenebilir:

- Üzerinde bulundurduğu sensörler bütünü ile hedefi takip etmek.
- Hedefin hareketi ve durumu hakkındaki bilgileri güdüm birimine iletmek.
- Angajman süresince görüş açısı değişimi bilgisini ölçmek.
- Görüş açısı değişimini doğru bir şekilde ölçmek için arayıcı başlığı mühimmat hareketlerine karşı kararlı hale getirmek.
- Hedefe yaklaşma hızını ölçmek. (Bu ölçüm radar tabanlı arayıcı başlıklarda kolay olsa da kızılötesi sistemlerde ölçülmesi zordur [27].)

Arayıcı başlıklar ile iki tip sınıflandırma yapmak mümkündür. Bunlardan ilki arayıcı başlığın takip ettiği sinyal, ışına veya işaret çeşitine göre yapılan sınıflandırmadır. Kızılötesi, radar ve lazer arayıcı başlıklar takip ettikleri sinyal tipine göre sınıflanmış arayıcı başlıklara örnek olarak verilebilir.

Bir diğer sınıflandırma ise elektromekanik yapılarına göre yapılan sınıflandırmadır. Çoğu arayıcı başlık mühimmat hareketleri ve uçuş momentlerinden izole olmak için kendisini kararlı kılmaya (stabilize olmaya) ihtiyaç duyar. İlgili kararlılaştırma (stabilizasyon) arayıcı başlık üzerinde çeşitli mekanizmalarla yapılabileceği gibi genellikle iki veya üç adet gimbal halkasından oluşan bir mekanizma kullanılır. Gimbal mekanizması hedefi tespit eden algılayıcının arayıcı başlık içinde iki veya üç ekseninde hareket etmesini sağlayan mekanizmaya verilen isimdir. Bu mekanizma sayesinde gimbal halkaları üzerinde bulunan dönüölçerler uçuş momentlerinden arındırılarak, temiz bir görüş açısı değişimi bilgisi güdüm birimine sunulur. Kararlı olmayan, hedef algılayıcıların sabitlenmiş bulunduğu arayıcı başlık yapıları da mevcuttur. Sabitlenmiş algılayıcılarla

alınan bilgiler güdüm üzerinde matematiksel olarak uçuş dinamiklerinden arındırılarak güdüm döngüsünde kullanılır.

### **3.2. Algılayıcı Tiplerine Göre Arayıcı Başlıklar**

Arayıcı başlık, hedefin doğal ışması veya yaydığı sinyalleri takip edebildiği gibi hedefin müttefik bir kaynak tarafından aydınlatılması gibi belirleyici izleri de takip edebilir. Her iki durumda da hedeften kaynaklanan işaretlerin takip edilmesi arayıcı başlık üzerinde bulunan algılayıcılar sayesinde gerçekleşmektedir. Çeşitli izlerin anlamlandırılması için çeşitli algılayıcı mimarileri mevcuttur. Bu mimarilerin seçiminde angajman başarımlarını arttırmak için hedef-mühimmat istekleri göz önünde bulundurulmalıdır.

Örneğin deniz sahasında gerçekleştirilecek taktik operasyonlarda yüksek öneme sahip amiral gemisinin diğer hedeflerden ayrılmasını sağlamak için görüntü tabanlı bir algılayıcı mimarisi seçilebilir. Bu sayede arayıcı başlık üzerinde kıymetlendirme yapılabilir ya da kıymetlendirmenin kullanıcıya devredilmesi sağlanabilir. Bu tip bir kıymetlendirmenin etkili bir şekilde yapılması radar veya lazer sistemlerde mümkün değildir.

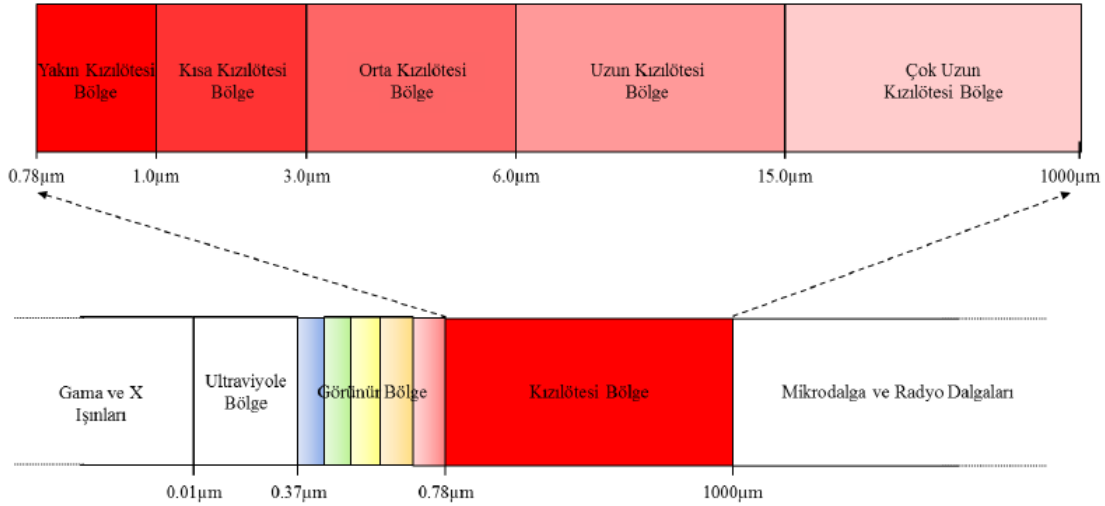
Hava savunma sistemleri gibi bilinen bir sahada yapılan operasyonlarda, radar istasyonları tarafından yarı aktif bir işaretleme yapılması hem mühimmatın birim maliyetini düşürecek hem de hedefin güçlü bir şekilde işaretlenmesini sağlayacaktır. Bu mimaride bir sistem oluşturmak için algılayıcı olarak RF tercih edilebilir.

Lazer işaretleme sistemleri hareket kabiliyeti düşük hedeflere karşı kullanıcı tarafından işaretleme yapılmasına izin vererek kıymetlendirilen hedefe başarılı aneje olunmasını sağlayabilir. Lazer sistemlerin görece daha basit optik algılayıcılara ihtiyaç duyması maliyeti düşürmektedir.

Yukarıda örneklendirilen algılayıcı mimarilerinin yanında farklı algılayıcı mimarileri de mevcuttur. İlerleyen bölümde algılayıcı mimarileri, teknik arka planları ve kullanım konseptleri aktarılacaktır.

### 3.2.1. Kızılötesi (Infrared) Arayıcı Başlıklar

Kızılötesi bölge, elektromanyetik izge içerisinde bulunan 0.78 ile 1000  $\mu\text{m}$  dalgaboyu aralığındaki elektromanyetik enerjiyi ifade etmektedir. Atmosferik etkiler ve dalgaboyu özelliklerinden dolayı kızılötesi bölge alt bölgelere ayrılmıştır [5]. Elektromanyetik izge ve kızılötesi bölgenin bu izgedeki yeri ve alt bölgeleri Şekil 3.1 ile verilmiştir [5].



Şekil 3.1. Elektromanyetik İzge İçerisinde Kızılötesi Bölge

Kızılötesi bölgenin arayıcı başlık kavramındaki önemi ise doğada sıcaklığı mutlak  $0^{\circ}\text{K}$ 'nin üzerinde olan bütün cisimlerin termal ışıma yapmasıdır. Termal ışıma olarak isimlendirdiğimiz elektromanyetik enerji yayını, nesnenin sıcaklığıyla orantılıdır. Kızılötesi arayıcı başlıklar hedeften gelen termal ışımayı anlamlandırarak hedefin yer ve hareketi hakkında bilgiyi tayin ederler. Hedefin termal ışıması takip edildiği için bu mimarideki arayıcı başlıklara termal arayıcı başlık da denmektedir.

Daha önce de bahsedildiği gibi kızılötesi bölge alt bölgelerden oluşmaktadır. Kızılötesi arayıcı başlıklar genelde bu alt bölgelerden biri ya da birkaçı üzerinden gelen ışımaları anlamlandırır. Bu anlamlandırmayı yapmak için arayıcı başlığın üzerinde ilgili bölgeyi geçirecek optik sistem ve termal ışımayı sezimleyecek elektronik algılayıcıların olması gerekmektedir. Çeşitli optik ve algılayıcı mimarileri mevcuttur ve bunların her birinin keskinlik, çözünürlük ya da görüş alanı (field of view) açısından farklı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır.

Çeşitli kızılötesi alt bölge mimarilerine uygun optik ve algılayıcı seçenekleri var olsa da kızılötesi arayıcı başlıkların temel çalışma prensibi ve taktik operasyonlarda sağladığı avantajları aynıdır. Bu avantajlar sıcaklık farkının hedef tayininde seçici unsur olarak kullanılmasıdır.

Hedefin kızılötesi ışınması takip edildiği için kızılötesi arayıcı başlık bulunduran mühimmatlar pasif evleme güdümü yapan sistemlerdir. Bir diğer deyişle arayıcı başlık ya da başka bir kaynak hedefe sinyal göndermez ya da işaretlemez. Hedef tamamen doğal ışınmasıyla tespit edilir. Hedef işaretlenmesi ve aydınlatıcı bir sinyal bulunmamasından dolayı hedefin kendi üzerinde tehdit olduğunu anlaması zordur.

Ülkemizde kızılötesi arayıcı başlık geliştirilme çalışmaları Roketsan, Aselsan ve Tubitak Sage tarafından yürütülmektedir. Ülkemiz envanterinde bulunan Hisar Kızılötesi Arayıcı Başlık ve UMTAS-OMTAS kızılötesi arayıcı başlıkları bu sınıf arayıcı başlıklara örnektir. Hisar Kızılötesi Arayıcı Başlık Şekil 3.2 ile verilmiştir [6].





Şekil 3.2. Hisar Füzesi Kızılötesi Arayıcı Başlık

Kızılötesi sistemlerin görüntü tabanlı olarak kullanımı da yaygındır. Bu sayede kızılötesi sistemler ile alınan görüntü kullanıcıya iletilerek, kullanıcının hedef kıymetlendirmesini yaparak mühimmatı istediği hedefe doğru yönlendirmesi sağlanabilir. Görüntü tabanlı kızılötesi sistemler, belirli bir bölgede birden çok hedef olduğu durumda ya da büyük hedeflerin maksimum tahribatı sağlayacak bölgesinin seçilmesinde avantajlar sunar. Sıcaklık kaynağının yüksek olduğu yerlerin vurulmasının kıymetli olduğu durumlarda örneğin tank motoru, ya da sıcaklık farkından kıymetli hedef bölgesinin saptanabildiği örneğin gemi güvertesinin belirlenmesi durumlarında, görüntü tabanlı kızılötesi sistemler avantajlı durumdadır. Vurulacak bölge seçilmesinde kullanıcı ya da otomatik hedef seçimine kapsamlı bilgi sağlamasından dolayı, etkili bir arayıcı başlık algılayıcı mimarisidir.

Görüntü tabanlı kızılötesi arayıcı başlıklar üzerinde bulunduğu mühimmatın hareketlerinden ve uçuş titreşiminden izole olmalıdır. İzole olmadığı durumlarda hedef tayininde belirsizlikler, gürültüler ve sallanmalar oluşacaktır. Bu yüzden görüntü tabanlı kızılötesi sistemlerde görüntüleyici kararlılaştırma önemli bir yer tutar. Görüntüleyici kararlılaştırma ve servo mekanizmaları arayıcı başlık elektromekanik yapıları bölümünde incelenecektir. Üzerinde görüntü tabanlı kızılötesi arayıcı başlık bulunduran Roketsan Laçın Güdüm Kiti Şekil 3.3 ile verilmiştir [7].



Şekil 3.3. Görüntü Tabanlı Kızılötesi Arayıcı Başlıklı Roketsan Laçın Güdüm Kiti

Kızılötesi arayıcı başlıklı mühimmatların pasif olarak çalışması bir diğer deyişle hedef üzerine herhangi bir sinyal gndermemesinden dolayı bu mühimmatlara karşı özel elektronik harp karşı koyma yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemler, kızıl ötesi boya, aktif ve pasif egzoz bastırıcı sistemler, pasif kızıl ötesi karıştırıcılar ve flare atma sistemleridir [8]. Bunun yanında kızılötesi sistemlerin başarımını yağmur, bulutlu hava ya da duman gibi doğa olayları da düşürmektedir. Her ne kadar karşı koyma teknikleri ve kızılötesi bölgeden kaynaklı doğal etmenler olsa da hedef tayin algoritmaları geliştirilerek ilgili karşı koyma ve doğa etkilerinin başarımına etkileri ortadan kaldırılabılır. Kızılötesi görüntüleyici sistemlerin, görünür bölge grntleyicilerine göre bir diğer avantajı da kızılötesi sistemlerin hem gece hem gündüz görev yapabilmesidir.

### 3.2.2. Radar Arayıcı Başlıklar

Hareket kabiliyeti olan uçak, gemi, tank gibi taktik taşıtların hedef alındığı mühimmatlarda arayıcı başlık algılayıcı seçimi optik, radar veya kızılötesi olarak yapılabilir. Kızılötesi ve optik arayıcı başlıklar düşük dalga boylarında çalıştıklarından dolayı açaşsal hedef tayini bakımından radara göre doğruluk seviyeleri daha yüksektir. Ancak radar arayıcı başlıklar, yağmur, kum, nem ve sis gibi ortamlarda daha gürbüz bir şekilde çalışabildiklerinden dolayı kısa menzil füzeler hariç tercih edilen sistemler

olmuşlardır [9]. Bunun yanında radar sistemlerde hedef ile mühimmat arasındaki mesafenin ölçülebilmesi diğer mimarilere göre daha kolaydır.

Komuta güdümü yapan sistemlerin hemen hemen hepsinde radar takibi yapılmaktadır. Radar platformlar sahada hedef tayinini yaparak doğrudan güdüm komutlarını mühimmata aktarabilir. Bunun yanında sadece hedef bilgisinin mühimmata gönderildiği ve mühimmatın güdüm döngüsünü içerisinde gerçekleştirdiği yapılar da yaygın olarak görülmektedir.

Radar algılayıcıların evleme güdümünde kullanımı da yaygın olup, komuta güdümündeki kullanımına göre avantajlı yönleri vardır. Evleme güdümü yapan sistemler, hedefe yaklaştığı sürece hedeften daha yüksek doğrulukta bilgi toplarken, komuta güdümünde hedef istasyonlardan uzaklaştıkça hedeften gelen bilginin doğruluğu düşer. Bu da uzun süren angajmanlarda hedef tayininde başarımları farklılıkları yaratır. Evleme güdümü yapan sistemlerde radar algılayıcılar aktif, yarı aktif ve pasif evleme güdümü yöntemlerinde kullanılabilir.

Aktif evleme güdümü yapan radar arayıcılar, üzerlerinde hem yayın yapan bir verici hem de hedeften dönen sinyali toplayan bir almaç anten bütünü bulundurur. Bu yapıdaki radar arayıcı başlıklar at-unut operasyonları destekleyen arayıcı başlıklardır. Üzerlerinde buldukları hem verici hem de alıcı anten bütününe gücünü mühimmatdan sağladıklarından dolayı istenilen seviyede güçlü bir radar sinyali yayamazlar. Bu yüzden aktif evleme yapan radar sistemlerin başarımları genelde kısa mesafede yüksektir. Uzun menzilli mühimmat mimarilerinde aktif evleme güdümü hedefle mühimmat arasındaki mesafe kapatıldıktan sonra terminal safhada gerçekleştirilir.

Aktif radar evleme güdümü yapan mühimmatlara NATO tarafından geliştirilen orta menzil AIM-120 AMRAAM hava-hava füzesi örnek verilebilir. Ülkemizde GÖKDOĞAN ve HİSAR-RF geliştirme aşamasında olan orta menzil aktif radar evleme güdümü yapan mühimmatlardır. AIM-120 AMRAAM füzesinin görseli Şekil 3.4 ile verilmiştir [10].



Şekil 3.4. Orta Menzil Aim-120 AMRAAM Hava-Hava Füzesi

Yarı aktif evleme güdümü yapan sistemler yer istasyonlarındaki güçlü antenler sayesinde hedefi güçlü bir şekilde işaretleyebilir. Arayıcı başlık bu sayede verici bir anten bulundurmamak zorunda kalmaz. Yer istasyonları tarafından güçlü bir şekilde işaretlenen hedef arayıcı başlık üzerinde bulunan toplayıcı anten ile toplanır. Bu sayede hedefin tayini yapılabilir. Yarı-aktif radar evleme güdümü arayıcı başlık maliyetini düşüren bir mimari olsa da yer istasyonlarına ihtiyaç duyması ve bilinmeyen sahalardaki taktik zaafiyeti ve at-unut şekilde kullanılamaması yönünden dezavantajları mevcuttur. Amerika yapımı orta menzilli AIM-7 SPARROW hava hava füzesi yarı aktif radar evleme güdümü yapan mühimmatlara örnek verilebilir. AIM-7 SPARROW füzesinin görseli Şekil 3.5 ile verilmiştir [11].



Şekil 3.5. Orta Menzil Aim-7 SPARROW Hava-Hava Füzesi

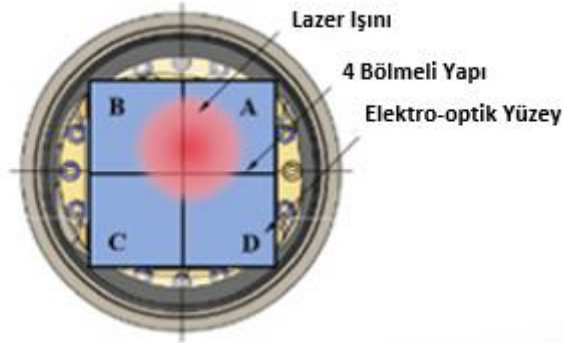
Pasif evleme güdümü yapan radar sistemler çok yaygın olarak görülen sistemler değildir. Ancak operasyon esnasında hedef üzerindeki yayının kesildiği ve hedefin yaydığı bozucu sinyallerin dinlendiği kullanımlar da pasif evleme güdümü yapılmaktadır(home on jam). Aktif güdüm yapabilen AIM-120 AMRAAM hava-hava füzesi bu kabiliyette olan mühimmatlara örnek olarak verilebilir.

Radar arayıcı başlıklar görüntü tabanlı çalışmasalar da, alıcı anteni çeşitli bölgeleri taramak için hareket ettirmek isteyebilirler. Bunun için daha çok kızılötesi sistemlerde görülen gimbal mekanizması uygulamaları mevcuttur. Radar sistemlerine karşı sinyal bozma, yanıltma ya da köreltme gibi çeşitli elektronik harp karşı koyma teknikleri bulunmaktadır. Özellikle yarı aktif sistemlerde, düşman yer istasyonlarına karşı sinyal bozucular yerleştirebilir. Bu bağlamda bakıldığı zaman, gürültülü saha operasyonlarında farklı tipte algılayıcıların da arayıcı başlık üzerinde bulundurulmasıyla elde edilen hibrit arayıcılar tercih edilebilir.

### 3.2.3. Lazer Arayıcı Başlıklar

Lazer arayıcı başlıklar bir diğere adıyla optik arayıcı başlıklar belirli dalga boylarındaki lazer ışınlarının hedeften yansımasını algılayarak çalışırlar. Genellikle yarı-aktif evleme güdümü kullanan lazer arayıcı başlıklar, üzerlerinde bir lazer kaynağı taşımazlar ve yardımcı bir yer istasyonu ya da platform tarafından lazer ile işaretlenmiş hedeflerden gelen verileri sezimleyerek çalışırlar.

Arayıcı başlığın hedefin üzerindeki işareti anlamlandırabilmesi ve başka işaretlerle karıştırmaması adına çeşitli darbe kodlamaları hem arayıcı başlıkta hem de işaretleyicide yapılır [3]. Arayıcı başlık hedeften yansıyan lazer sinyallerini üzerinde bulundurduğu bölünmüş yapıdaki elektro-optik algılayıcı ile elde eder. Bu algılayıcı üzerindeki enerjinin oransal dağılımından faydalanarak hedefle mühimmat arasındaki kaçıklığın iki ekseninde sıfırlanması hedeflenir. Bu sıfırlama sonucunda mühimmat yönlendirilerek lazer kaynağı ile işaretlenmiş yere başarılı bir angajman yapılmaya çalışılır. Dört bölmeli elektro-optik algılayıcının yapısı Şekil 3.6 ile verilmiştir [12].



Şekil 3.6. Lazer Arayıcı Başlık Üzerindeki 4 Bölmeli Optik Algılayıcı Yapısı

Şekil 3.6’da gösterildiği üzere lazer arayıcı başlıkların içinde bölmelendirilmiş optik algılayıcı bulunmaktadır. Dört bölmeli optik algılayıcılar yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek takip hassasiyeti istenilen sistemlerde bölme sayısı artırılarak çözünürlük yükseltilebilir.

Lazer arayıcı başlıklarda algılayıcı genelde füzeye sabitlenmiş şekildedir. Bir diğer deyişle, herhangi bir servo mekanizma algılayıcıyı hareket ettirmek için kullanılmaz. Bunun nedeni lazer arayıcı başlık kullanan mühimmatların sert hareketler yapmaması ve kısa uçuşu boyunca mühimmatın göreceği uçuş bozucularının düşük olmasıdır. Bu yaklaşımda, mühimmatın çok agresif hareketlerde bulunmayacağı, hedefin görüş açısından çıkmayacağı ve hedefin düzenli olarak lazer ile işaretleneceği varsayılmaktadır.

Lazer arayıcı başlıklarda gimbal mekanizması ile algılayıcının 2 ekseninde hareket ettirildiği mimariler de mevcuttur. Bunun nedeni arayıcı başlığın bakış alanını (field of regard) arttırmaktır. Arayıcı başlık terminolojisinde görüş alanı ve bakış alanı karıştırılmamalıdır. Görüş alanı arayıcı başlığın sabit durumda görebildiği alan iken bakış alanı arayıcı başlık içindeki hareketli mekanizmalarla algılayıcının hareket ettirilerek taranabilecek toplam alan olarak düşünülebilir.

Lazer arayıcı başlıklar algılayıcı-optik mimarisinin görece basit olması ve genellikle servo mekanizmalara ihtiyaç duymamaları yönünden diğer arayıcı başlıklara göre daha maliyet etkin bir yapıdadır. Bu nedenden dolayı çok yüksek hassasiyet beklenmeyen ya da lazer ile işaretlemenin mümkün olduğu durumlarda, lazer takipli mühimmatlar tercih edilmektedir. Ülkemizde Cirit, MAM-L, MAM-C ve L-UMTAS gibi mühimmatlar Roketsan tarafından ülkemiz envanterine katılmış dört bölmeli algılayıcı lazer arayıcı mühimmatlardır. MAM-L ve MAM-C takılı Bayraktar TB2 hava aracı Şekil 3.7 [13], Cirit ve LUMTAS mühimmatları Şekil 3.8 ile verilmiştir [14].



Şekil 3.7. MAM-L ve MAM-C Takılı Bayraktar TB2



Şekil 3.8. CİRİT ve LUMTAS Mühimmatları

### 3.2.3. Diğer Algılayıcı Arayıcı Başlıklar

Önceki bölümlerde bahsedilen kızılötesi, radar ve lazer arayıcı başlıklar dışında farklı algılayıcıları kullanan arayıcı başlıklar da mevcuttur. TV bir diğer deyişle görünür bölge arayıcı başlıklar konsept olarak görüntü tabanlı kızılötesi arayıcı başlıklara benzemektedir. Üzerlerinde bulunan algılayıcı-optik bütünü maliyet etkin bir yapıda



olması ve kullanıcıyı hedef kıymetlendirmede etkin duruma getirmesi önemli özelliklerindedir. Ancak gün ışığı olmadığı zamanlarda çalışamaması kızılötesi arayıcı başlıklara göre önemli bir dezavantajdır.

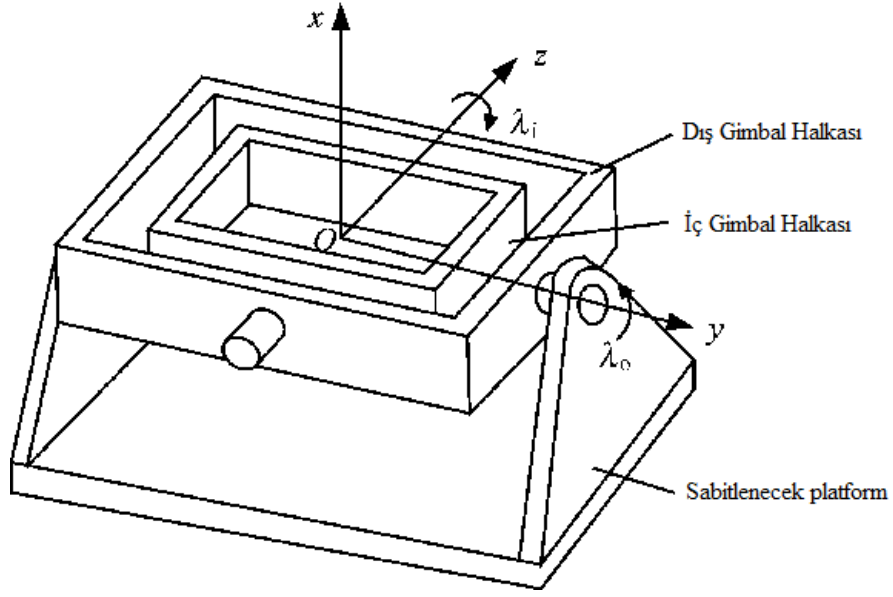
Kızılötesi bölgeyi kullanan arayıcı başlık algılayıcı mimarileri gibi elektromanyetik izgenin mikrodalga kısmını kullanan arayıcı başlık mimarileri de mevcuttur. Bu mimarilerin avantajları genellikle elektronik harp karşı koyma teknikleri ile karşılaşıldığı zaman ortaya çıkmaktadır. Bu avantajlardan beraber faydalanılabilmesi adına hibrit arayıcı başlıklar geliştirilmiştir. Örneğin radar ve görüntü tabanlı kızılötesi algılayıcı bulunduran arayıcı başlıklar mühimmat uçuşunun belirli bölgelerinde algılayıcılarını değiştirerek ya da harmanlayarak hedef hakkında doğruluğu daha yüksek bilgiyi edinebilirler. Hibrit arayıcı başlıkları dezavantajlı kılan etmenler ise tasarımsal zorluklar ve birim maliyetlerinin yüksek olmasıdır.

### **3.3. Elektromekanik Yapılarına Göre Arayıcı Başlıklar**

Arayıcı başlıklarda bulunan algılayıcı mimari ne seçilirse seçilsin arayıcı başlığın temel görevi hedefi daima görüş açısı içinde tutmak ve görüş açısı değişimini doğru bir şekilde hesaplamaktır. Algılayıcı yöneliminin hedefe doğru tutulmasının sağlanması manevra kabiliyeti yüksek hedef kümelerinde zorlayıcı bir durumdur. Hedefin her zaman görüş açısı içinde kalacağını ve uçuş dinamiklerinin algılayıcı verisinin başarımını düşürmeyeceğinin öngörüldüğü mühimmatlarda algılayıcı mühimmata sabitlenerek basit bir arayıcı başlık elektromekanik yapısı kurulabilir.

Genellikle görüntü tabanlı çalışan kızılötesi ve görünür bölge arayıcıları bu yapının dışındadır. Yüksek odak sağlanmak istenen arayıcı başlıklarda optik bütünün tasarımından kaynaklı olarak görüş açısı darlığı mevcuttur. Bu gibi durumlarda sabitlenmiş algılayıcılar ile kurulan mimarilerde, mühimmat-hedef uçuş dinamikleri altında hedefin görüş alanında tutulması zordur. Hedefin görüş alanının dışına çıkmasının önüne geçilebilmesi adına arayıcı başlığın bakış alanının yüksek tutulması gerekmektedir. Arayıcı başlıklarda bakış alanının oluşturulabilmesi için algılayıcı ve optik bütünün arayıcı eksen takımında hareket ettirilmesi ve algılayıcının uçuş dinamiklerinden izole

hale getirilip mühimmatın hareketinden bağımsız görüş açısı bilgisi üretmesi gerekmektedir. Arayıcı başlık içinde algılayıcı-optik bütünü için stabilize platform kurulması bu gereksinimleri karşılamaktadır. Arayıcı başlıklarda stabilize platform genellikle iki veya üç eksende hareket kabiliyeti sağlayan gimbal halkaları, sürücü sistemleri ve gerekli sensörler bütünü olarak düşünülebilir. İki eksenli gimbal mekanizması Şekil 3.8 ile verilmiştir.



Şekil 3.8. İki Eksenli Gimbal Mekanizması

Arayıcı başlık algılayıcıları, stabilize platforma oturtulduğu zaman, algılayıcının ölçtüğü görüş açısı mühimmatın ya da taşıyıcı platformun hareketlerine göre şekillenir. Görüş açısının bakış alanı içerisinde dolaştırılabilmesinin görüntü tabanlı algılayıcılar için iki ayrı önemi vardır. İlk olarak görüş alanının hareket ettirilebilmesi sayesinde hedefin düzenli olarak görüş alanı içerisinde tutulması sağlanmış olacaktır. İkinci olarak görüntüleyicinin hedefe veya hedef bulunabilecek bölgeye bakarken sabit olması ve uçuş dinamiklerinden etkilenmemesi sağlanacaktır.

Arayıcı başlığın kararlılaştırılması hedef tayinin yapıldığı görüntüdeki titremenin ve bulanıklaşmanın da önüne geçer [15]. Kullanıcının angajman sonunda hedef kıymetlendirmeye dahil olduğu safhalarda kullanıcıya net bir görüntü verilmesi de kararlılaştırmanın sağladığı avantajlardan biridir.

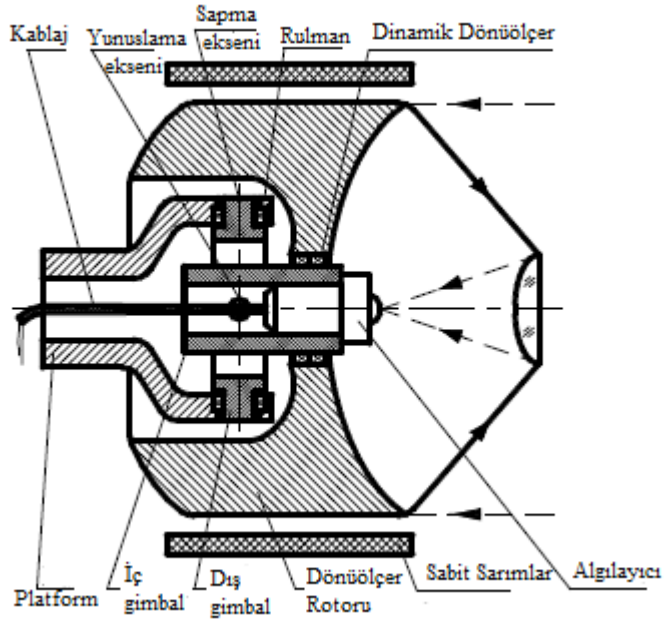
Arayıcı başlık gimbal mekanizmalı bir yapıda ise, hedef arayıcı başlık tarafından takip edildiği sürece görüş açısı değişimi gimbal mekanizmasının açısal hız değişimlerinden elde edilebilir. Algılayıcının hedef takipinde ihtiyaç duyduğu açısal hızın güdüm döngüsünde kullanılabilmesi için, daha önce de belirtildiği gibi mühimmat hareketlerinin arayıcı başlık üzerinden izole edilmesi gerekmektedir. Bu izolasyonun yapılması için gimbal halkaları ve gerekli sensörlerden oluşan stabilize platformlar mevcuttur. Günümüzde kullanılan arayıcı başlıkların elektromekanik olarak farklı mimarileri mevcuttur.

Arayıcı başlık elektromekanik yapıları şu şekilde sınıflandırılabilir,

- Dinamik Dönüölçerli Stabilize Arayıcı Başlıklar (Dynamic Gyro Seekers)
- Stabilize Platform Tabanlı Arayıcı Başlıklar (Stabilized Platform-Based Seeker)
- Sabitlenmiş Algılayıcılı Stabilize Optik Arayıcı Başlıklar (Detector Strapdown Stabilized Optic Seeker)
- Yarı-Sabitlenmiş Arayıcı Başlıklar (Semi-Strapdown Platform Seeker)
- Sabitlenmiş Algılayıcılı Stabilize Optik Arayıcı Başlıklar (Detector Strapdown Stabilized Optic Seeker)

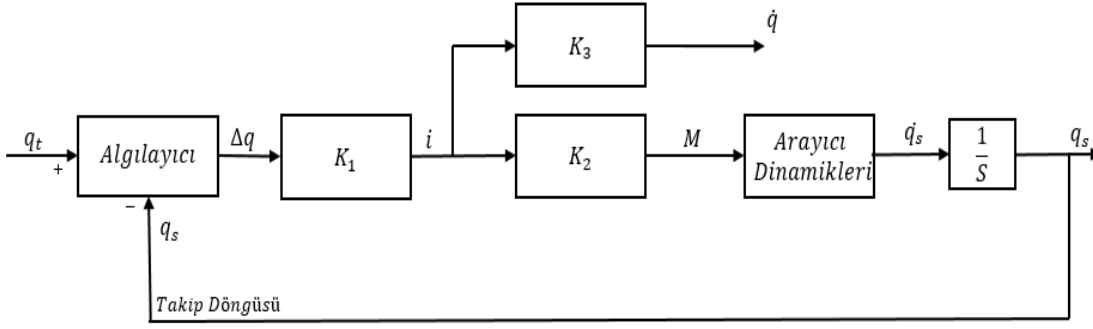
### **3.3.1. Dinamik Dönüölçerli Stabilize Arayıcı Başlıklar (Dynamic Gyro Seekers)**

Bu konfigürasyondaki arayıcı başlıkların füzeye göre iki ekseninde hareket kabiliyeti bulunmaktadır. Bu hareket kabiliyeti üzerinde bulundurduğu iki gimbal halkası ve gimbal mekanizmasının etrafında konumlanmış manyetik sarımlar tarafından sağlanmaktadır. Gimbal halkaları iç içe bir yapıda bulunmasından kaynaklı iç ve dış gimbal halkaları olarak isimlendirilmiştir. Algılayıcı iç gimbalde sabitlenmiştir. Bu mimaride kararlılaştırma yüksek açısal momentumla algılayıcı etrafında dönen dinamik dönüölçer ile yapılmaktadır. Jiroskopik etki adını verdiğimiz etki sayesinde algılayıcı füze hareketlerine karşı kararlı hale gelmiş olur. Dinamik dönüölçer stabilize arayıcı başlık yapısı Şekil 3.9 ile verilmiştir [4].



Şekil 3.9. Dinamik Dönüölçer Stabilize Arayıcı Başlık Yapısı

İlgi alanı içerisindeki algılayıcı hareketinin, manyetik sarımlarla yapılmasının bazı dezavantajları vardır. Bunun nedeni algılayıcı üzerinde oluşturulabilecek hareket momentinin sabit manyetik sarımlar (precession coil) ve hareket eden algılayıcının arasındaki açıyla değişiyor olmasıdır. Bu davranışın önüne geçmek için, sabitlenmiş sarımların ayrı bir gimbal mekanizması ile algılayıcı üzerinde maksimum momenti oluşturabilecek şekilde hareket ettirilmesi veya sabitlenmiş sarımlar yerine hareketi gerçekleştirecek olan motorlar yerleştirilmesi bu mimaride görülebilecek geliştirmelerdir [4]. Bu elektromekanik yapı genellikle optik olarak Cassegrin sistemiyle kullanılmaktadır. Bu yüzden ilgili mekanik yapıya cassegrin optomekanik yapısı da denmektedir. Dinamik dönüölçer stabilize arayıcı başlık işlevsel blok gösterimi Şekil 3.10 ile verilmiştir.

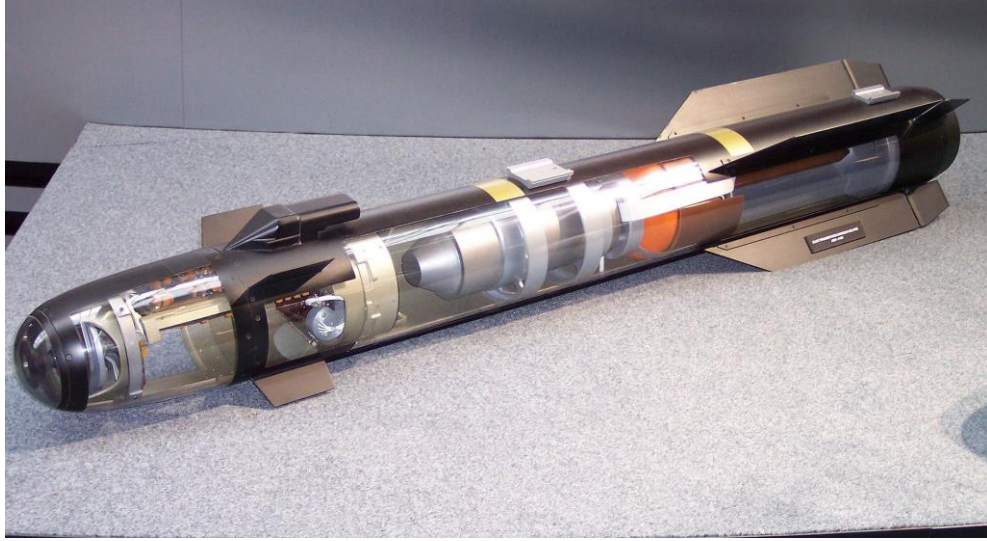


Şekil 3.10. Dinamik Dönüölçer Stabilize Arayıcı Başlık Temel Blok Gösterimi

Dinamik dönüölçerli arayıcı başlıklarda açısıl takip hatası  $\Delta q$  arayıcı başlık üzerinde bulunan algılayıcı tarafından sağlanır. Şekil 3.10 ile verilen  $\Delta q$  bilgisi hedefin bulunduğu açısıl konum  $q_t$  ile arayıcı başlığın baktığı açısıl konum  $q_s$  arasındaki farktır.

Sağlanan takip hatasının blok gösterimde  $K_1, K_2$  ve  $K_3$  olarak ifade edilen çeşitli katsayı ve kontrolcülerden geçirilmesi sonucu sabit manyetik sarımlardan geçirilecek akım  $i$ , oluşturulacak moment  $M$  ve güdüm birimine gönderilecek olan görüş alanı değişimi bilgisi  $\dot{q}$  elde edilir. Görüş alanı değişimi bilgisi olarak güdüm birimine iletilen bilgi aynı zamanda arayıcı başlık eksenlerindeki açısıl hızdır.

Sunduğu avantajlarından dolayı dinamik dönüölçerli yapıya sahip arayıcı başlıkların kızılötesi arayıcı başlıklar ve yarı-aktif lazer arayıcı başlıklar da kullanım örnekleri mevcuttur. Bunlara Amerikan AIM-9B Sidewinder ve AGM-114 Hellfire mühimmatları örnek verilebilir. Sidewinder füzesi kızılötesi güdümlü hava-hava mühimmatı iken Hellfire füzesi yarı-aktif lazer güdümlü bir tanksavar mühimmatıdır. AGM-114 Hellfire mühimmatı Şekil 3.11 ile görselleştirilmiştir [16].

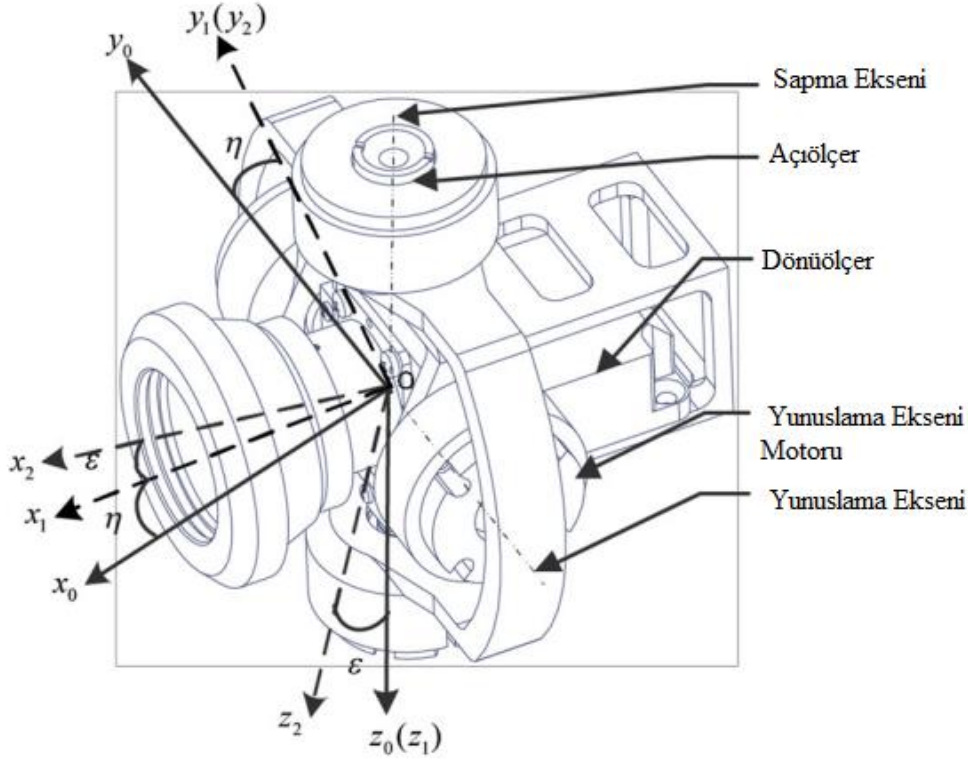


Şekil 3.11. Dinamik Dönüölçer Stabilize Arayıcı Başlık Bulunduran Amerikan Hellfire Mühimmatı

### 3.3.2. Stabilize Platform Tabanlı Arayıcı Başlıklar (Stabilized Platform-Based Seekers)

Stabilize platform tabanlı arayıcı başlıklar iki veya üç ekseninde hareket kabiliyeti olan gimbal mekanizmasıyla kurulmuş bir yapıda olup üzerinde bulundurduğu motorlar ile aksenal hareketlerin gerçekleşmesini sağlayan yapıdadır. Algılayıcı iç gimbal halkasında sabitlenmiş olup açıölçer ve dönüölçerler yardımıyla istenilen açısal konuma, istenilen açısal hızda sürülebilme kabiliyetindedir.

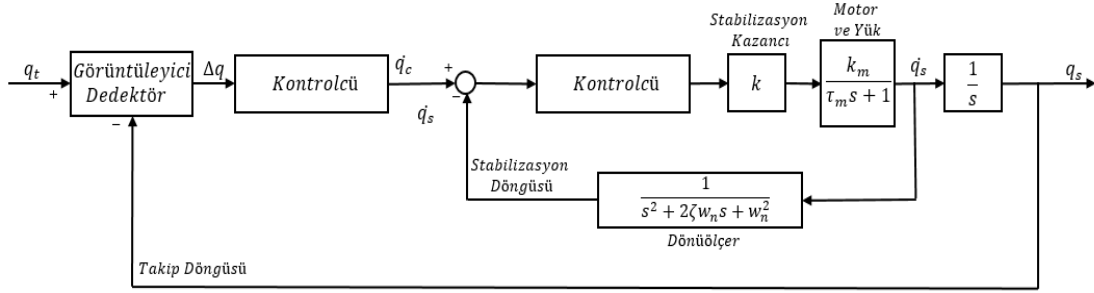
Platform stabilize arayıcı başlıklarda güdüm birimine gönderilecek görüş açısı değişimi bilgisi arayıcı başlık üzerinde bulunan dönüölçer (gyroscope) tarafından sağlanmaktadır. Görüş alanı değişimi bilgisi olarak güdüm birimine iletilen bilgi aynı zamanda arayıcı başlık eksenlerindeki açısal hız veya komuta edilen açısal hız komutudur. Stabilize platform tabanlı arayıcı başlıkların elektromekanik yapısı Şekil 3.12 ile verilmiştir [17].



Şekil 3.12. Stabilize Platform Tabanlı Arayıcı Başlıkların Elektromekanik Yapısı

Şekil 3.12’de görüleceği üzere stabilize platform tabanlı arayıcı başlıkların iki eksende hareket kabiliyeti bulunmaktadır. Şekil üzerinde algılayıcının yunuslama ve sapma eksenindeki açısal konumlar sırasıyla  $\varepsilon$  ve  $\eta$  ile ifade edilmiştir.

Stabilize platform tabanlı arayıcı başlıklar temel iki işlevi yerine getiren iki adet işlevsel döngüden oluşmaktadır. Bunlardan iç döngüde olanı kararlılaştırma döngüsüdür. Kararlılaştırma döngüsünün görevi arayıcı başlığın uçuş dinamiklerinden izole olmasını sağlamak ve dış döngü olan takip döngüsünün komutlarını gerçekleştirmektir. Takip döngüsü ise hedefin takip edilmesinde rol alan döngüdür. Stabilize platform tabanlı arayıcılar, dinamik dönüölçerli arayıcılarla kıyaslandığı zaman takip döngüsündeki hareketlere cevap verebilme kabiliyeti açısından daha kabiliyetlidir. Platform tabanlı arayıcıların bir diğer avantajı da algılayıcı hareketinin sabit sarımlar yerine gimbal eksenlerinde konumlandırılmış motorlar tarafından sağlanmasıdır. Bu sayede bakış alanı içerisindeki hareketlerde herhangi bir moment kaybı yaşanmaz. Platform stabilize arayıcı başlıkların tek bir eksen için işlevsel blok gösterimi Şekil 3.13 ile verilmiştir.



Şekil 3.13. Platform Stabilize Arayıcı Başlıkların Temel Blok Gösterimi

Şekil 3.13'te,  $\dot{q}_s$  arayıcı başlık açisal hız cevabı,  $q_t$  hedefin referans eksenle yaptığı açısı,  $q_s$  arayıcı başlık gimbal-dedektör açısı,  $\Delta q$  arayıcı referanslı hedef kaçıklığı ve  $\dot{q}_c$  arayıcı başlık açisal hız komutunu göstermektedir.

İlgili yapının sunduğu yüksek hassasiyetli kararlılaştırma ve takip hatasına hızlı cevap verebilme kabiliyetinden dolayı; görüntü tabanlı arayıcı başlıklarda sıklıkla tercih edilen elektromekanik arayıcı başlık yapısıdır. Ülkemizde geliştirilen UMTAS – OMTAS görüntü tabanlı kızılötesi arayıcı başlıklar bu mimarideki arayıcı başlıklardır.

### 3.3.3. Sabitlenmiş Algılayıcı Stabilize Optik Arayıcı Başlıklar (Detector Strapdown Stabilized Optic Seeker)

Kararlılaştırılmış arayıcı başlıklarda genellikle algılayıcılar kararlılaştırma mekanizmalarının üzerinde konumlandırılmaktadır. Algılayıcının füzeye sabitlendiği, kararlılaştırmanın optik takımın hareketleri sayesinde yapıldığı mimari bu sınıf altındadır. Optik takımın döndürülmesi ile sağlanan jiroskop etkisi ile füzenin hareketlerine karşı kararlılaştırma sağlanır. Bu tip arayıcı başlık mimarilerinde kararlılaştırma döngüsü açisal kararlılaştırmadır [4].



### **3.3.4. Yarı Sabitlenmiş Platform Tabanlı Arayıcı Başlıklar (Semi-Strapdown Platform Seeker)**

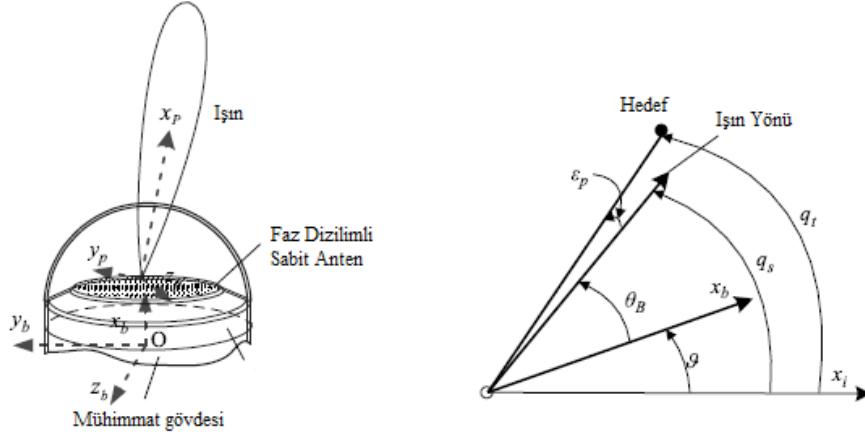
Platform tabanlı arayıcı başlıklarda genellikle iki adet gimbal eksenli yapı kullanılmaktadır. Bu eksenlerde kararlılaştırma döngüsünü kapatmak için açıölçer ve dönüölçerler bulunmaktadır. Gimbal üzerindeki yükü azaltmak ve maliyeti düşürmek için gimbal eksenlerinde bulunan dönüölçerler çıkarılabilir. Bu tip arayıcılarda, füzenin içinde bulunan ataletsel navigasyon biriminden mühimmat açısız hız bilgileri alınır ve açıölçerlerin türevinden gimbalin açısız hızları elde edilir. Bu yapı sayesinde arayıcı boyutları küçültülüp maliyet azaltımına gidilebilir. Bu yapıya yarı sabitlenmiş (Semi-Strapdown) denmesinin nedeni ise sadece açısız hız ölçen dönüölçerlerin füze gövdesine sabitlenmiş olmasıdır. Algılayıcı bütünü hala stabilize platform üzerindedir.

### **3.3.5. Sabitlenmiş Arayıcı Başlıklar (Strapdown Seeker)**

Arayıcı başlığı sabitlemenin temel avantajları tasarım zorluklarından kurtulmak, daha küçük alan kaplayan arayıcı başlıklar yapabilmek ve maliyeti azaltmaktır. Algılayıcı bütünü mükemmata sabitlenerek yeterli başarımın sağlanabileceği durumlarda tercih edilen bir arayıcı başlık mimarisidir.

Arayıcı başlığı mühimmat gövdesine sabitlemenin çeşitli dezavantajları vardır. Sabitlenmiş arayıcı başlıklar kararlılaştırılmış arayıcı başlıklar gibi güdüm birimine doğrudan görüş açısı değişimi bilgisini iletmez. Bunun nedeni mühimmat ile hareket etmesinden kaynaklı füzenin hareket verilerinin de bulunduğu toplu bir ölçüm yapmasıdır. Mühimmatın açısız hızı  $\dot{\theta}$  arayıcı başlık tarafından sağlanan  $q_s$  değerinden çıkartılmalıdır.

Sabitlenmiş arayıcı başlıklar manevra kabiliyeti düşük hedeflere öngörülebilir atışlar yapılan lazer tabanlı arayıcı başlıklarda tercih edilebilmektedir. Bu mimaride arayıcı başlık kullanan mühimmatların hedef setinde sabit durması beklenen deniz veya kara hedefleri bulunmaktadır. Radar sistemlerde faz dizilimli sabit antenli mimarilerde de geniş görüş açısı bulunduğundan dolayı sabitlenmiş arayıcı başlıklar tercih edilebilmektedir. Faz dizilimli anten taşıyan sabitlenmiş arayıcı başlık mimarisi Şekil 3.14 ile verilmiştir.



Şekil 3.14. Faz Dizimli Anten Taşıyan Sabitlenmiş Arayıcı Başlık Mimarisi

Şekil 3.14'te,  $\vartheta$  mühimmatın referans eksen ile yaptığı açıyı,  $x_B$  mühimmat eksenini,  $\theta_B$  ışın yayılımı ile mühimmat eksenini arasındaki açıyı,  $q_t$  hedefin referans eksenle yaptığı açıyı,  $q_s$  yayılım eksenini referans eksenini arasındaki açıyı göstermektedir. Görüş açısı ölçüm hatası  $\varepsilon_p$  olarak ifade edilmiştir.

Faz dizimli sabitlenmiş arayıcı başlıkların kullanıldığı mimarilerde güdüm birimi arayıcı başlığın referans eksene göre ölçmüş olduğu açısal hız ( $\dot{q}_s$ ) bilgisinden mühimmatın referans eksene göre açısal hız bilgisini ( $\dot{\vartheta}$ ) çıkararak hedefin mühimmata göre açısal hız değişimini bir diğer deyişle görüş açısı değişimini hesaplamalıdır.

Kızılötesi ya da görünür bölge algılayıcı bulunduran mimarilerde gimbal mekanizması sayesinde elde edilen geniş tarama alanından feragat edilmiş olunacaktır. Bu yüzden algılayıcı mühimmata sabitlemek bu tip sitemlerde çok tercih edilen bir mimari değildir.

## 4. KATIMLI SİSTEM ANALİZİ

Güdümlü mühimmatlarda temel başarıml kriteri angajman sonundaki sapma mesafesinin (miss distance) minimumda tutulmasıdır. Mühimmat başarıml analizlerinde, temel hedef sistem parametrelerinin sapma mesafesindeki hata bütçelerinin belirlenmesidir. Bunun yanında sapma mesafesi haricinde bazı başarıml kriterleri de analiz edilmek istenebilir.

Güdümlü mühimmat doğası gereği doğrusal olmayan bir yapıda olduğu için, güdümlü başarımlı doğrusal olmayan benzetim çalışmaları ile belirli senaryolar özelinde incelenebilir [20]. Yapılan doğrusal olmayan benzetimler ile sapma mesafesi gibi başarımlar incelenebilse de benzetimler senaryo bazlı sonuçlar vermektedir. Bu yüzden benzetim sonuçlarını etkileyen faktörlerin karakterizasyonu için analitik yaklaşımdan çok istatistiksel bir yaklaşım gerekmektedir. Bu yaklaşımda genellikle Monte Carlo veya kovaryans analizi gibi benzetim teknikleri tercih edilmektedir. Bu gibi teknikler tekrarlanmış benzetim sonuçlarına ihtiyaç duyan matematiksel hesaplama yöntemleri olarak düşünülebilir. Bu yöntemlerin en önemli dezavantajı doğru bir hesaplamının yapılabilmesi için benzetimin fazlaca tekrar edilmesine ihtiyaç duyulmasıdır [18].

Güdümlü mühimmat başarıml analizlerinde bir diğer yaklaşım ise belirli çözüm kümeleri için güdümlü mühimmatın doğrusallaştırılarak incelenmesidir. Bu sayede doğrusal bir sistem üzerinde çalışmanın getirdiği analiz araçlarından faydalanılabilir. Bu analiz metodlarından biri de katımlı sistem analizidir (adjoint analysis).

Katımlı sistem analizinin doğrusal zamanla değişen sistemlerde kullanımı ilk olarak 1870 yılında Vito Volterrana'nın çalışmalarında görülmekle birlikte, Lanning ve Battin'in 1950'deki çalışmalarıyla beraber popülerlik kazanmıştır [19].

Katımlı sistem analizi doğrusal zamanla değişen (linear time variant) sistemleri analiz etmek için kullanılan bir yöntemdir. Katımlı sistem analizi ile sistemlerdeki girişlerin ve bozucuların hata bütçeleri ve duyarlılıkları tespit edilebilir [21]. Sistem çıkışlarının belirli

zamanlardaki sonuçlarının farklı benzetim girişleri ile tek bir benzetim koşturmasıyla yapılabilmesi, katımlı sistem analizini etkili bir analiz yöntemi yapmaktadır.

Katımlı sistem analizi rastgele (stochastic) beyaz gürültü (white noise) sinyallere karşı LTV sistemlerin ortalama karesel cevabını analiz etmeye de fayda sağlar. Bu sayede Monte Carlo simulasyonları veya kovaryans simulasyonları gibi aşırı hesaplama yükü getiren yöntemlere bir alternatif sunmaktadır [22].

Doğrusal olmayan güdüm sistemleri zaman bağımlı olarak doğrusallaştırılabilir. Yukarıda belirtilen avantajlarından dolayı katımlı sistem analizi güdüm sistemlerinin incelenmesinde ve sapma mesafesini etkileyen hem belirlenimci hem de rastgele girişlerin karakterize edilebilmesinde kullanılmaktadır.

Literatürde Peterson [23] ve Howe [24] tarafından katımlı sistem analizinin güdümlü mühimmatlara uygulandığı görülmektedir. Zarchan [25] tarafından da katımlı sistem analizi güdümlü mühimmatları analiz etmekte etkili bir yöntem olarak önerilmektedir. Bu tez çalışmasında oransal seyir güdüm yöntemi doğrusallaştırılarak katımlı sistem modeli benzetim ortamında elde edilecektir. Bunun yanında ilgili benzetim modeline platform tabanlı arayıcı başlık katımlı yapısı eklenerek, katımlı analiz sonuçları ile arayıcı başlık başarımının sapma mesafesi ve diğer mühimmat başarım kriterlerine etkileri incelenecek ve yorumlanacaktır.

#### **4.1. Belirlenimci (Deterministic) Sistemler İçin Katımlı Sistem Analizi**

Doğrusal zamanla değişen bir sistem olduğunu varsayalım.

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= A(t)x(t) + B(t)u(t) \\ y(t) &= C(t)x(t)\end{aligned}\tag{2}$$

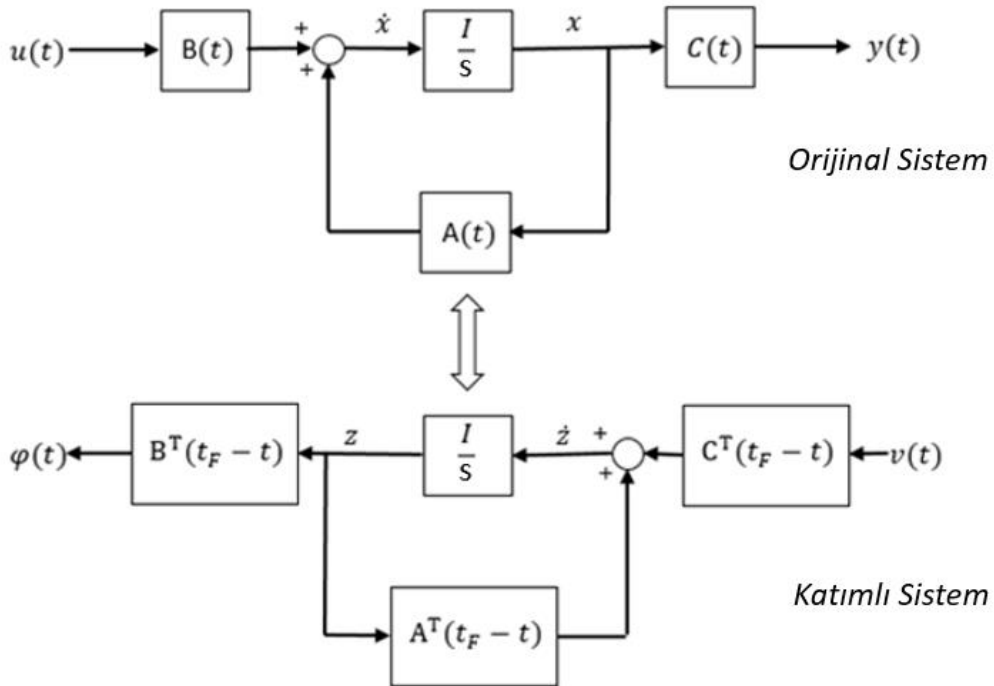
Durum uzay modeli Eşitlik (2) ile verilen sistemde  $u(t)$  giriş vektörünü,  $x(t)$  durum vektörünü,  $A(t), B(t)$  sistem matrislerini ve  $y(t)$  çıkış vektörünü ifade etmektedir. Sistemin  $t_0 \leq t \leq t_F$  arasında incelendiği varsayılacaktır.

Sistemdeki zaman değişkeni bitime kalan süre (time-to-go) ( $t_F - t$ ) ile değiştirilip ilgili giriş çıkış yapıları ve sistem matrisleri dönüştürüldüğü zaman katımlı sistem elde edilmiş olacaktır [27]. Katımlı sistem modeli Eşitlik (3) ile verilmiştir.

$$\frac{dz}{dt} = A^T(t_F - t)z(t) + C^T(t_F - t)v(t)$$

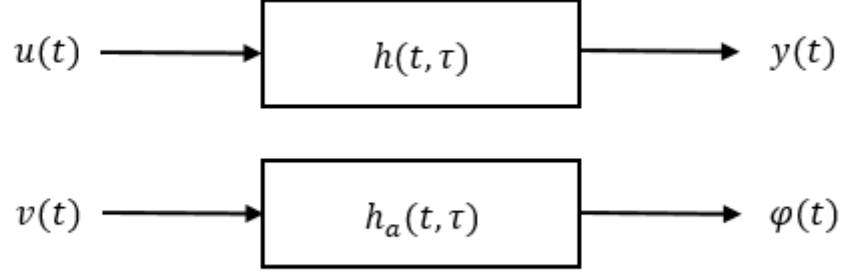
$$\varphi(t) = B^T(t_F - t)z(t)$$
(3)

Katımlı model,  $0 \leq t \leq t_F - t_0$  arasında tanımlanmaktadır. Orijinal sistemin ve elde edilen katımlı sistemin blok gösterimleri Şekil 4.1 ile verilmiştir.



Şekil 4.1. Orijinal ve Katımlı Sistem Blok Gösterimleri

Girişi  $u(t)$  ve dürtü cevabı  $h(t, \tau)$  olan doğrusal zamanla değişen bir sistem olduğunu varsayalım. İlgili sistem ve bu sistemin katımlı hali Şekil 4.2 ile verilmiştir. Katımlı sistemin girişi  $v(t)$  ve dürtü cevabı  $h_a(t, \tau)$  olarak verilmiştir.



Şekil 4.2. Doğrusal Zamanla Değişen Sistem ve Katımlı Hali

Orijinal sistemin çıkışı girişe bağlı olarak Eşitlik (4) şeklindedir.

$$y(t) = \int_{-\infty}^t u(\tau)h(t, \tau)d\tau \quad (4)$$

Sistemin aşlangıç anını  $t_0$  olarak alırsak Eşitlik (5) elde edilecektir .

$$y(t) = \int_{t_0}^t u(\tau)h(t, \tau)d\tau \quad (5)$$

Sisteme verilen  $u(t)$  girişinin  $t_0$  anında  $a$  genliğinde basamak giriş olduğu varsayılırsa Eşitlik (5), Eşitlik (6)'ya dönüşür.

$$y(t) = a \int_{t_0}^t h(t, \tau)d\tau \quad (6)$$

İlgili denklemler sabit giriş beslenen sistemlerin dürtü cevaplarının toplanarak elde edilebileceğini göstermektedir. Ancak uygulama konusunda ilgili yöntem kullanışlı değildir. Çünkü toplama işlemi  $\tau$  dürtü uygulama zamanına bağlıdır. Katımlı metodun

sabit girişli sistemlerde etkilerini incelemek için yukarıdaki belirtilen denklem evrişim tümlevi ile değiştirilmelidir.

$$y(t) = a \int_{t_0}^t h_a(t_F - \tau, t_F - t) d\tau \quad (7)$$

Eşitlik (7) ile birlikte katımlı model tanımı Eşitlik (8)'deki gibi yapılabilir.

$$\begin{aligned} h(t, \tau) &= h_a(t_F - \tau, t_F - t) \\ h_a(t, \tau) &= h(t_F - \tau, t_F - t) \end{aligned} \quad (8)$$

Değişkenler Eşitlik (9,10) ile verilen şekilde değiştirilerek Eşitlik (11) elde edilir.

$$r = t_f - \tau \quad (9)$$

$$dr = -d\tau \quad (10)$$

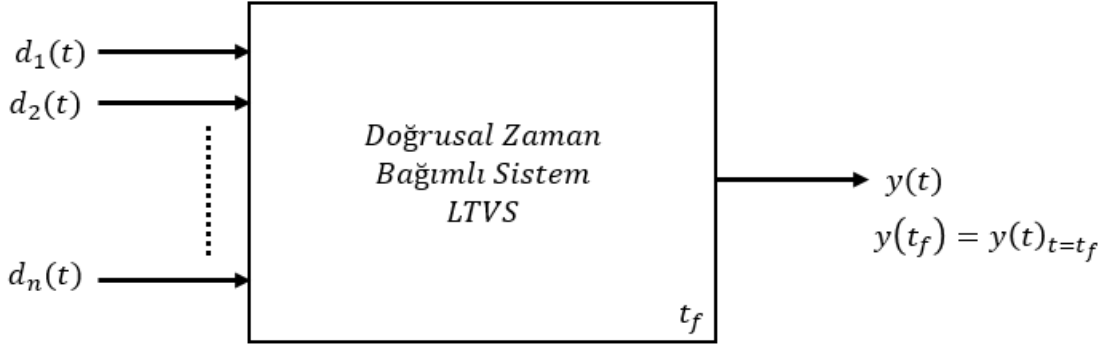
$$y(t) = a \int_{t_F-t}^{t_F-t_0} h_a(r, t_F - t) dr \quad (11)$$

Eşitlik (11)'de gözlenmek istenen zaman  $t = t_F$  ise Eşitlik (12) elde edilir.

$$y(t_F) = a \int_0^{t_F-t_0} h_a(r, 0) dr = a \int_{t_0}^{t_F} h(t_F, \tau) d\tau \quad (12)$$

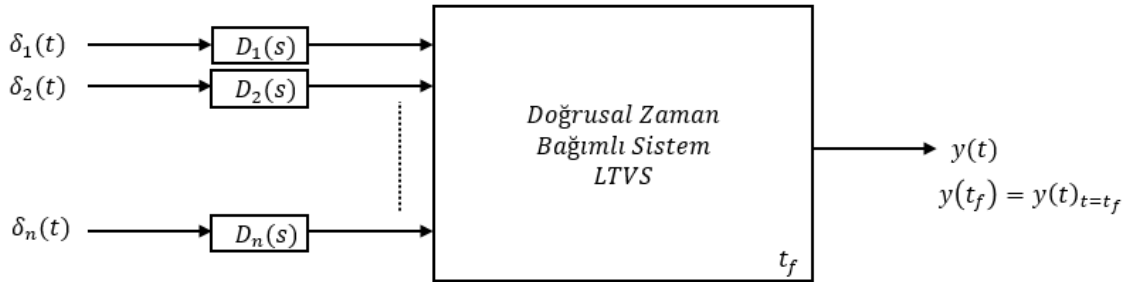
Eşitlik (12) orijinal sistemin basamak girişe  $t = t_F$  anında cevabının katımlı sisteme verilecek  $t = 0$  anındaki dürtü sinyali ile bulunabileceğini göstermektedir. Bu özellik birden çok giriş ile çalışan sistemlerde her bir girişin çıkıştaki bütçesini görmek adına önemlidir. Katımlı sistem doğrusal bir sistemden türetildiği için her bir girişin etkisi doğrudan toplanarak çıkıştaki toplam etki gözlemlenebilir. Bu sayede tek bir benzetim koşturmasıyla birden çok belirlenimci etkinin değişimi ayrı ayrı incelenebilir.

$d_i(t)$ , doğrusal zamanla değişen sisteme giren belirlenimci girişler olarak kabul edilirse, Şekil 4.3'teki görselleştirmeyi yapmak mümkündür.



Şekil 4.3. Doğrusal Zamanla Değişen Sistem ve Belirlenimci Girişler

Şekil 4.3'te gösterilmiş olan belirlenimci girişlerin  $\mathcal{L}(d_i(t)) = D_i(s)$  şeklinde karakterize edilmesi sonucu sistem Şekil 4.4'te verilen yapıya dönüşecektir.



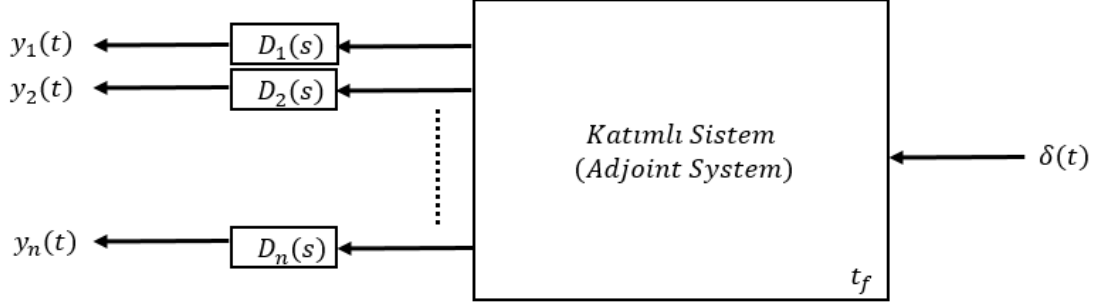
Şekil 4.4. Karakterize Edilmiş Belirlenimci Girişler ve Doğrusal Zamanla Değişen Sistem

Doğrusal zamanla değişen sistemler, katımlı sistem hallerine dönüştürülerek doğrusal sistemdeki çıkışların dürtü verilecek girişlere dönüşmesi sağlanır. Orijinal sistemin  $t = t_F$  anındaki cevabını öğrenmek için, katımlı sistem girişlerine  $t = 0$  anında dürtü sinyali vermek yeterli olacaktır.

Katımlı sistemlerin bu özelliği sayesinde orijinal sistemin girişleri bir diğer deyişle katımlı sistemin çıkışları incelenerek, orijinal sistemin girişlerine karşı sistem



duyarlılıkları ve hata bütçeleri ayrık olarak  $t = t_f$  anında incelenebilecektir. Katımlı Sistem Şekil 4.5 ile verilmiştir.



Şekil 4.5. Katımlı Sistem Girişleri ve Çıktıları

Katımlı modelde gözlemlenmek istenen çıkıştan dürtü sinyali uygulanarak  $y(t_f)$  değeri elde edilebilir.

$$y(t_f) = y_1(t_f) + y_2(t_f) + \dots + y_n(t_f) \quad (13)$$

#### 4.2. Rastgele (Stochastic) Bozucuların Katımlı Model ile Analizi

Rastgele bozucuların güdüm sistemi üzerindeki etkileri önemlidir. Örneğin radar evleme güdümü yapan sistemlerde ölçülen görüş açısı değişimi gürültülü bir yapıdadır. Kıymetli verinin bozuculardan arındırılarak yorumlanması önemlidir. Bozucuların sistem üzerinden arındırılması ancak belli bir seviyede gerçekleştirilebilir. Engellenemeyecek bozucuların sistem başarımı üzerindeki etkisini incelemek ve yorumlamak başarılı bir mühimmat kurgusu yapabilmek için önemlidir [25]. Bunun yanında mühimmat üzerinde kullanılan algılayıcıların ölçümlerinde de bazı rastgele ölçüm hataları mevcuttur. Bunlara ataletsel ölçüm biriminin ölçümleri ve arayıcı başlık üzerinde bulunan dönüölçerler, ivmeölçer ve diğer algılayıcı ölçümleri örnek verilebilir. Katımlı sistem analizinin bu noktada sunduğu kullanışlılık ise, beyaz gürültü tipi bozucuların sistem başarımına olan etkilerinin ortalama karesel hata olarak ifade edilebilmesidir.

Rastgele hataları yorumlamak için temel kavramlardan başlayarak ilerlemekte fayda vardır. Elimizde  $x$  rastgele değişkeni (random variable) olduğunu varsayalım, ve  $p(x)$  bu değişkenin olasılık yoğunluk işlevi (probability density function)( pdf) olsun.

$$p(x) \geq 0 \quad (14)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} p(x)dx = 1 \quad (15)$$

$x$  değişkeninin değerinin  $a$  ile  $b$  arasında olduğu belirten olasılık yoğunluk işlevi Eşitlik (16) ile verilmiştir.

$$Prob(a \leq X \leq b) = \int_a^b p(x)dx \quad (16)$$

Eşitlik 17 ile dağılım fonksiyonu (Distribution function) verilmiştir.

$$P(x) = \int_{-\infty}^x p(u)du \quad (17)$$

$X$ 'in ortalaması ya da beklenen değeri,

$$m = E(x) = \int_{-\infty}^{\infty} xp(x)dx \quad (18)$$

$X$ 'in ortalama karesi (mean squared) ise Eşitlik (19) ile ifade edilebilir.

$$E(x^2) = \int_{-\infty}^{\infty} x^2p(x)dx \quad (19)$$

$X$ 'in ortalama karesinin kökü (root mean squared) Eşitlik (20) ile ifade edilmiştir.

$$X_{rms} = \sqrt{E(x^2)} \quad (20)$$

X'in standart sapma (deviation,  $\sigma$ ) ve değişintisi (variance,  $\sigma^2$ ) Eşitlik (21) ile ifade edilebilir.

$$\sigma^2 = E\{[X - E(X)]^2\} = E(X^2) - E^2(X) \quad (21)$$

Temel kavramlarla birlikte, artık bozucuların doğası ve linear sistemlerin bozuculara karşı verdikleri cevaplar yorumlanabilir.

Özilinti işlevi (autocorrelation function) Eşitlik (22) ile verilmiştir.

$$\phi_{xx}(t_1, t_2) = E[X(t_1)X(t_2)] \quad (22)$$

Spektral güç yoğunluğu (power spectral density) özilinti fonksiyonunun Fourier dönüşümü ile elde edilebilir.

$$\Phi_{xx}(w) = \int_{-\infty}^{\infty} \phi_{xx}(\tau) e^{-jw\tau} d\tau \quad (23)$$

Beyaz gürültü için PSD değeri sabittir.

$$\Phi_{xx}(w) = \Phi \quad (24)$$

Elimizde Şekil 4.2 ile verilen doğrusal zamanla değişen bir sistem olduğunu düşünelim. Daha önce de belirtildiği gibi sistem cevabı Eşitlik (25)'de ifade edildiği gibidir.

$$y(t) = \int_{-\infty}^t u(\tau)h(t, \tau) d\tau \quad (25)$$

Yukarıda verilen denklemde iki tarafın karesini alarak Eşitlik (26) elde edilebilir.

$$y^2(t) = \int_{-\infty}^t u(\tau_1)h(t, \tau_1)d\tau_1 \int_{-\infty}^t u(\tau_2)h(t, \tau_2)d\tau_2 \quad (26)$$

Eşitlik (26)'da her iki tarafın beklenen değerini (expectation) alırsak Eşitlik (27) elde edilir.

$$E[y^2(t)] = \int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^t h(t, \tau_1)h(t, \tau_2)E[u(\tau_1)u(\tau_2)]d\tau_1d\tau_2 \quad (27)$$

Eğer giriş  $u(t)$  beyaz bir gürültü ise, özilinti fonksiyonundan dolayı Eşitlik (27) sadeleştirilip Eşitlik (28) elde edilir.

$$E[u(\tau_1)u(\tau_2)] = \Phi\delta(\tau_1 - \tau_2) \quad (28)$$

Eşitlik (28) göz önüne alırsa spektral güç yoğunluğu  $\Phi$  olan beyaz gürültülere karşı sistemin verdiği ortalama kare cevabı Eşitlik (29) ile verilmiştir.

$$E[y^2(t)] = \Phi \int_{-\infty}^t h^2(t, \tau)d\tau \quad (29)$$

Elimizde birden çok bozucunun giriş olarak bulunduğu doğrusal zamanla değişen bir sistem olduğunu ve giren bozucuların  $u_1, u_2, \dots, u_n$  olduğunu düşünelim. İlgili görsel Şekil 4.6. ile verilmiştir.



Şekil 4.6. Rastgele Bozucuların Beslendiği Doğrusal Zamana Bağlı Sistem

Orijinal ve katımlı sistem arasındaki bağıntıyı göz önünde bulundurursak Eşitlik (29), Eşitlik (30)'a dönüşmektedir.

$$E[y^2(t)] = \Phi \int_{-\infty}^t h_a[(t_F - \tau, t_F - t)]^2 d\tau \quad (30)$$

Eşitlik (31,32)'de verilen dönüşümler yapılırsa Eşitlik (33) elde edilir.

$$r = t_f - \tau \quad (31)$$

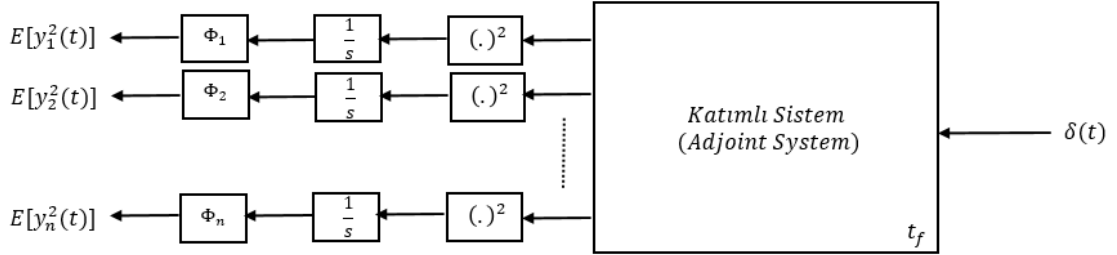
$$dr = -d\tau \quad (32)$$

$$E[y^2(t)] = \Phi \int_{t_F-t}^{t_F} [h_a(r, t_F - t)]^2 dr \quad (33)$$

İlgili denklemde sonlanma zamanı  $t = t_F$  olarak alındığı zaman Eşitlik (34) ile verilen sonuç elde edilmektedir.

$$E[y^2(t)] = \Phi \int_0^{t_F} [h_a(r, 0)]^2 dr \quad (34)$$

Eşitlik (34)'ün elde edilmesiyle birlikte Şekil 4.6 ile orijinal hali verilen sistem katımlı hale getirilerek Şekil 4.7'de verilen şekilde yorumlanabilir.



Şekil 4.7. Rastgele Bozucu Girişler Altında Katımlı Sistem

Şekil 4.7'de verilen  $(.)^2$  ifadesi kare almayı ifade ederken  $\Phi$  değerleri beyaz gürültü formundaki her bir bozucunun spektral güç yoğunluğunu ifade etmektedir. Katımlı sistem ile rastgele bozucuların ayrı olarak sistem başarımına etkileri incelenebileceği gibi tüm sistemin başarımı da incelenebilir. Sistemin bütün bozuculara karşı verdiği toplam ortalama kare cevabı Eşitlik (35) ile verilmiştir.

$$E[y^2(t)] = E[y_1^2(t)] + E[y_2^2(t)] + \dots + E[y_n^2(t)] \quad (35)$$

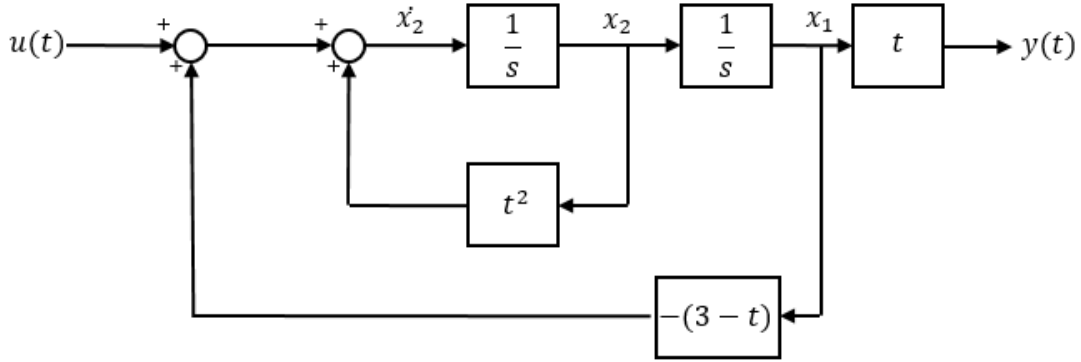
Böylece, güdüm sistemlerinde beyaz gürültü şeklindeki sıfır ortalamalı bozucu etkilerin sapma mesafesinin değişimine olan etkileri, katımlı sistem benzetimi ile elde edilebilmektedir.

### 4.3. Katımlı Sistem Modelinin Blok Gösterimlerden Elde Edilmesi

Katımlı sistem matematiksel model üzerinden elde edilebileceği gibi blok gösterimlerin modifikasyonları ile de elde edilebilir. Elimizde bulunan herhangi bir LTV sistemin blok gösteriminden katımlı sistem blok gösterimi aşağıda belirtilen prosedür ile elde edilebilir.

- 1) Blok gösterim içinde bulunan zaman değişkenleri bitime kalan süre olarak güncellenmelidir. ( $t \Rightarrow t_F - t$ )
- 2) Blok gösterim içerisinde bulunan tüm sinyal akışları ters çevrilmelidir.
- 3) Sinyallerin ayrıldığı noktalar toplam olarak ifade edilmeli, toplanan sinyaller ise tek bir sinyal olarak yorumlanmalıdır.
- 4) Tüm sistem girişleri çıkış, tüm çıkışlar ise girişlere dönüştürülmelidir.

Elimizde doğrusal zamanla değişen bir sistemin blok gösterimi olduğunu düşünelim. İlgili blok gösterim Şekil 4.8. ile verilmiştir.



Şekil 4.8. Örnek LTV Sistem Blok Gösterimi

Blok gösterim üzerinden sistem uzay-durum modeli Eşitlik (36) - (43) ile elde edilebilir [27].

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (36)$$

$$\dot{x}_2 = t^2 x_2 - (3 - t)x_1 + u \quad (37)$$

$$y = tx_1 \quad (38)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ t-3 & t^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \quad (39)$$

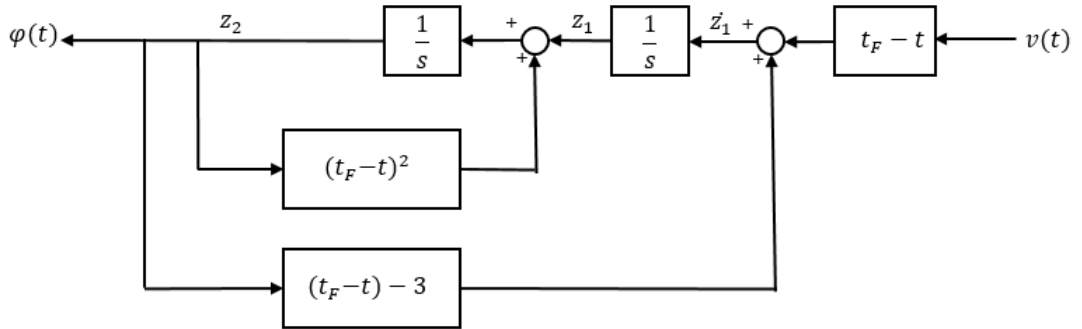
$$y = [t \ 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (40)$$

$$A(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ t-3 & t^2 \end{bmatrix} \quad (41)$$

$$B(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (42)$$

$$C(t) = [t \ 0] \quad (43)$$

Orijinal sistem blok gösterimini yukarıda verilen kurallar çerçevesinde katımlı yapıya dönüştürürsek Şekil 4.9'da verilen katımlı blok gösterimi elde edilir.



Şekil 4.9. Örnek Sistemin Katımlı Blok Gösterimi

Katımlı blok gösterim üzerinden sistem uzay-durum modeli Eşitlik (44) - (51) ile elde edilebilir.

$$\dot{z}_1 = (t_F - t - 3)z_2 + (t_F - t)v \quad (44)$$



$$\dot{z}_2 = (t_F - t)^2 z_2 + z_1 \quad (45)$$

$$\varphi = z_2 \quad (46)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & t_F - t - 3 \\ 1 & (t_F - t)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_F - t \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (47)$$

$$\varphi = [0 \quad 1] \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} \quad (48)$$

$$A_k(t) = \begin{bmatrix} 0 & t_F - t - 3 \\ 1 & (t_F - t)^2 \end{bmatrix} \quad (49)$$

$$B_k(t) = \begin{bmatrix} t_F - t \\ 0 \end{bmatrix} \quad (50)$$

$$C_k(t) = [0 \quad 1] \quad (51)$$

Örnek sistem ve blok gösterim üzerinden katımlı hale çevrilmiş sistemin durum-uzay matrisleri incelendiği zaman Eşitlik (52) - (54)'de verilen bağıntıların sağlandığı görülmektedir.

$$A_k(t) = A^T(t_F - t) \quad (52)$$

$$B_k(t) = C^T(t_F - t) \quad (53)$$

$$C_k(t) = B^T(t_F - t) \quad (54)$$

Eşitlik (49) - (51), LTV sistemlerin blok gösterimler üzerinden doğrudan katımlı hale dönüştürülebileceğini göstermektedir.

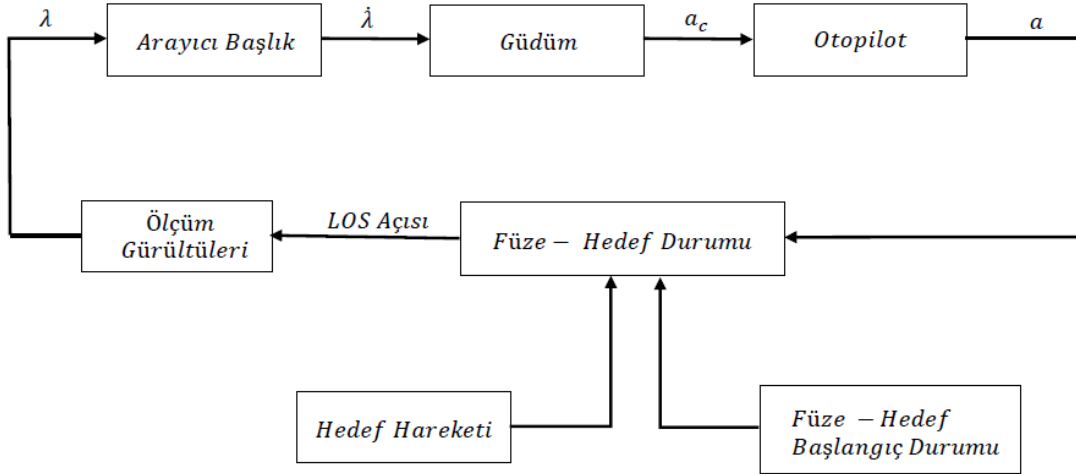
## 5. KATIMLI BENZETİM MODELLERİ

Evleme güdümü yapan mühimmatların ortak özelliği güdüm tekniği olarak oransal seyir güdümü yönteminin kullanılması ve üzerlerinde hedef izleyen arayıcı başlık yapılarını bulundurmalarıdır. Çeşitli arayıcı başlık mimarilerinden bahsedilse de hepsinin ortak görevi oransal seyir güdümüne ihtiyacı olan görüş açısı değişimi (line-of-sight rate) bilgisini sağlamaktır.

Güdümlü mühimmatlar ve oransal seyir güdümü üzerine katımlı sistem analizi çalışmaları Peterson [23], Howe [24] ve Zarchan [25] tarafından farklı bakış açıları ile yapılmıştır. Ancak bu çalışmalarda kapsamlı bir arayıcı başlık yapısı kullanılmamış, arayıcı başlık hata parametrelerinin güdüm ve angajman üzerindeki etkileri incelenmemiştir. Arayıcı başlık ve üzerinde bulundurduğu algılayıcıların güdüm döngüsünde doğrudan yeri vardır. Bu bakış açısıyla arayıcı başlık başarımının sapma mesafesine ve diğer mühimmat başarımlarına etkileri olacağı söylenebilir.

Arayıcı başlık parametrelerinin mühimmat başarımındaki önemi sorgulanırken, mühimmat karakteristiği de göz önüne alınmalıdır. Akıllı mühimmatlar kullanım konseptleri ve angajman istekleri doğrultusunda maliyet etkin olarak tasarlanırlar. Örneğin hareketsiz veya manevrasız bir hedefe karşı manevra yeteneği yüksek bir mühimmata ihtiyaç yokken, hava savunma için tasarlanan mühimmatlarda bu durum tam tersidir. Aynı durum arayıcı başlıklar için de geçerlidir. Arayıcı başlıklar tasarlanırken üzerinde bulunacağı mühimmatın isteklerine göre şekillendirilirler. Bu yüzden arayıcı başlık başarımının mühimmat başarımlarını üzerindeki etkisi farklılık gösterir.

Bu bakış açısıyla, görüntü tabanlı algılayıcı bulunduran arayıcı başlıkların başarımını benzetim yoluyla karakterize etmek için, platform tabanlı stabilize arayıcı başlık, oransal seyir güdümü ve ivme otopilotunun bulunduğu yekpare bir benzetim ortamına ihtiyaç vardır. Benzetim çalışmasında kurulan ortamın blok gösterimi Şekil 5.1 ile verilmiştir.

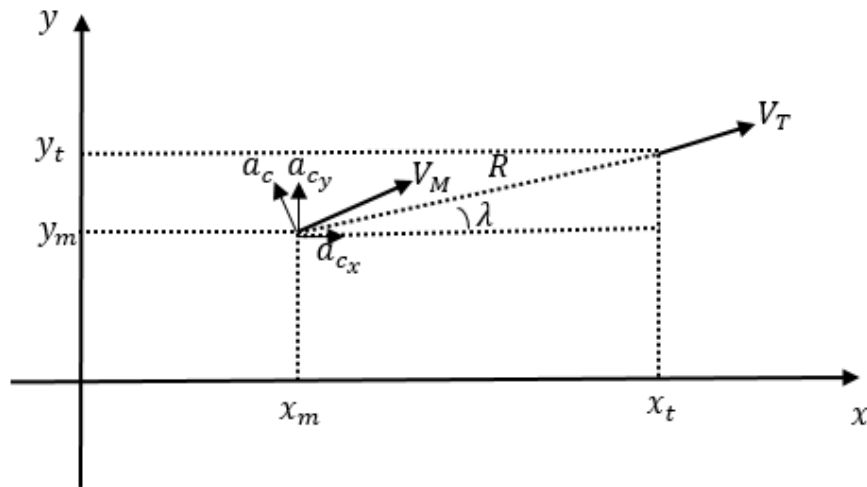


Şekil 5.1. Kurulan Benzetim Ortamının Alt Bileşenlerini İçeren Blok Gösterim

Benzetim ortamı doğrusal olarak modellenip, katımlı hale çevrilmiştir. Katımlı hale geçilirken, katımlı sistem analizinin sadece doğrusal sitemlere uygulanabildiği göz önüne alınarak, doğrusal olmayan güdüm yönteminin doğrusallaştırılması yapılmıştır.

### 5.1. Oransal Seyir Güdümü Katımlı Modeli ( Adjoint PN Guidance Model)

Oransal Seyir Güdümü gibi taktik güdüm yöntemlerini bazı senaryolar üzerinde doğrusallaştırmak analiz etmek için etkili bir yöntemdir. İki eksende doğrusallaştırma senaryosu Şekil 5.2 ile verilmiştir.



Şekil 5.2. İki Eksen Doğrusallaştırma Senaryosu Gösterimi

Mühimmatın hedefi arkasından kovaladığı ya da hedefle mühimmatın birbirine doğru hareket ettiği bir senaryo düşünelim. Belirtilen senaryolarda hedefle mühimmat arasındaki görüş açısı küçük bir açı olacaktır.

Bu bilgi altında Eşitlik (55) – (64) ile verilen işlemlerle doğrusallaştırma yapılarak Eşitlik (65) elde edilebilir. Verilen eşitliklerde geçen  $V_c$  terimi yaklaşma hızını ifade etmektedir.

$$x_t - x_m \approx R \quad (55)$$

$$a_{c_y} = a_c \cos(\lambda) \approx a_c \quad (56)$$

$$a_{c_x} = -a_c \sin(\lambda) \approx -a_c \lambda \quad (57)$$

$$y_r = y_t - y_m \rightarrow \ddot{y}_r = \ddot{y}_t - \ddot{y}_m \quad (58)$$

$$\ddot{y}_m = a_{c_y} = a_c \quad (59)$$

$$\lambda = \tan^{-1} \left( \frac{y_r}{x_r} \right) \approx \frac{y_r}{R} \quad (60)$$

$$\dot{R} = -V_c \quad (61)$$

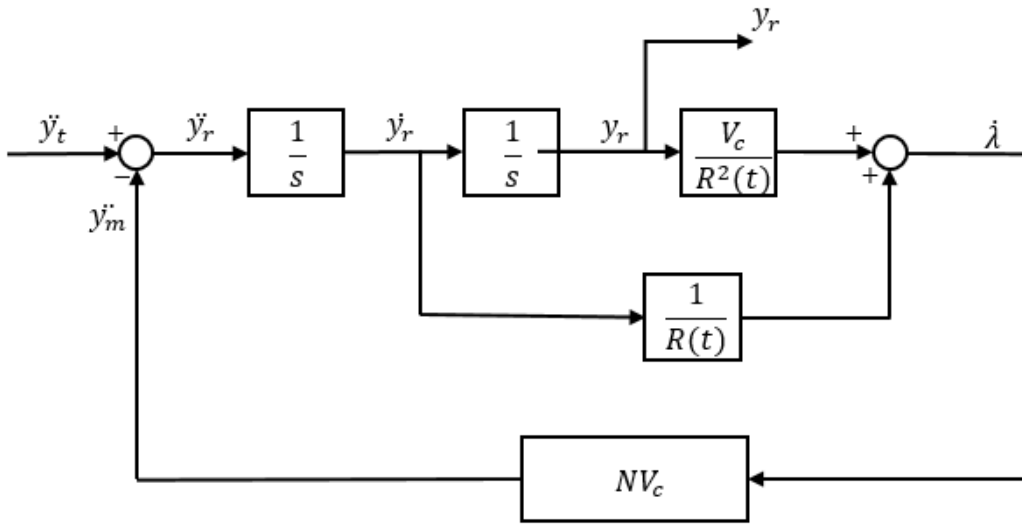
$$\dot{\lambda} = \frac{\dot{y}_r}{R} - \frac{R\dot{y}_r}{R^2} = \frac{\dot{y}_r}{R} + \frac{V_c y_r}{R^2} \quad (62)$$

$$a_c = NV_c \dot{\lambda} \quad (63)$$

$$\ddot{y}_r = \ddot{y}_t - \ddot{y}_m = \ddot{y}_t - a_c = \ddot{y}_t - NV_c \dot{\lambda} \quad (64)$$

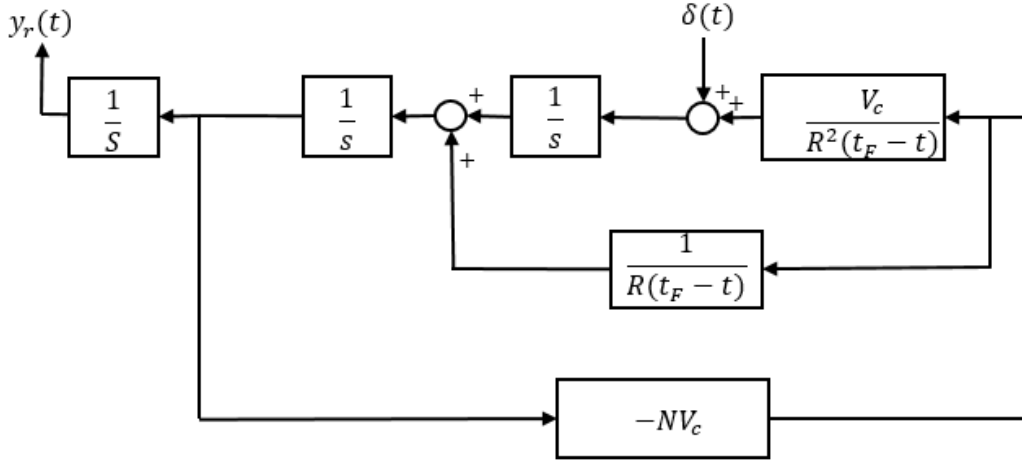
$$\ddot{y}_r + \frac{NV_c}{R} \dot{y}_r + \frac{NV_c^2}{R^2} y_r = \ddot{y}_t \quad (65)$$

Elde edilen doğrusal oransal seyir güdümünün blok gösterimi Şekil 5.3. ile verilmiştir.



Şekil 5.3. Doğrusal Oransal Seyir Güdümü Blok Gösterimi

Şekil 5.3'te  $R(t) = V_c(t_F - t)$  olarak alınmaktadır. Katımlı sistem analizi bölümünde bahsedilen blok gösterimler üzerinden katımlı model elde etme yöntemini Şekil 5.3. üzerinde hedef ivmelenmesini ( $\ddot{y}_t$ ) giriş, sapma mesafesini ( $y_r$ ) çıkış olarak uygularsak Oransal Seyir Güdümünün katımlı halini elde edebiliriz. Oransal seyir güdümünün katımlı blok gösterimi Şekil 5.4 ile verilmiştir.

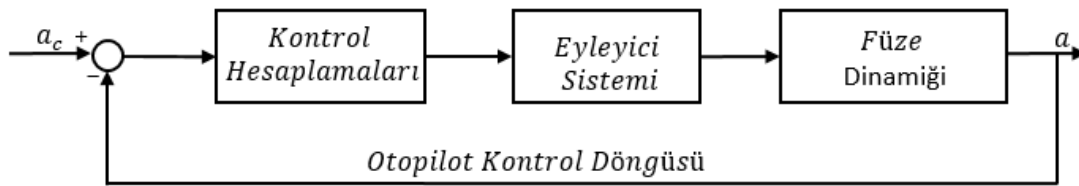


Şekil 5.4. Oransal Seyir Güdümünün Katımlı Blok Gösterimi

Katımlı modelde görüleceği üzere daha önce orijinal blokta sapma mesafesini ( $y_r$ ) ifade eden çıkıştan dürtü sinyali uygulanmıştır. Bu dürtü ile istenilen herhangi bir girişin sapma mesafesine etkisi güdüm sonlanma zamanına göre karakterize edilebilir. Şekil 5.4.'te bu karakterizasyon sabit hedef ivme girişinin sapma mesafesine olan etkisi üzerine yapılmıştır. Dikkat edilirse,  $R(t) = V_c(t_F - t)$  olduğundan, katımlı modelde  $V_c$  ve  $t_F$  parametreleri yok olmaktadır.

## 5.2. İvme Otopilotu Katımlı Modeli

Otopilot güdüm çıktılarının füze üzerinde gerçekleşmesi ve füzenin istenilen yörüngede seyrine devam edebilmesi için gerekli kontrol sinyallerini oluşturan bütün olarak düşünülebilir. Otopilot yapısı ve başarımı mühimmat kontrol yüzeyleri ve mühimmat ataletine bağlı olarak mühimmattan mühimmata farklılık göstermektedir. Otopilot kontrol döngüsünün blok gösterimi Şekil 5.5 ile verilmiştir.

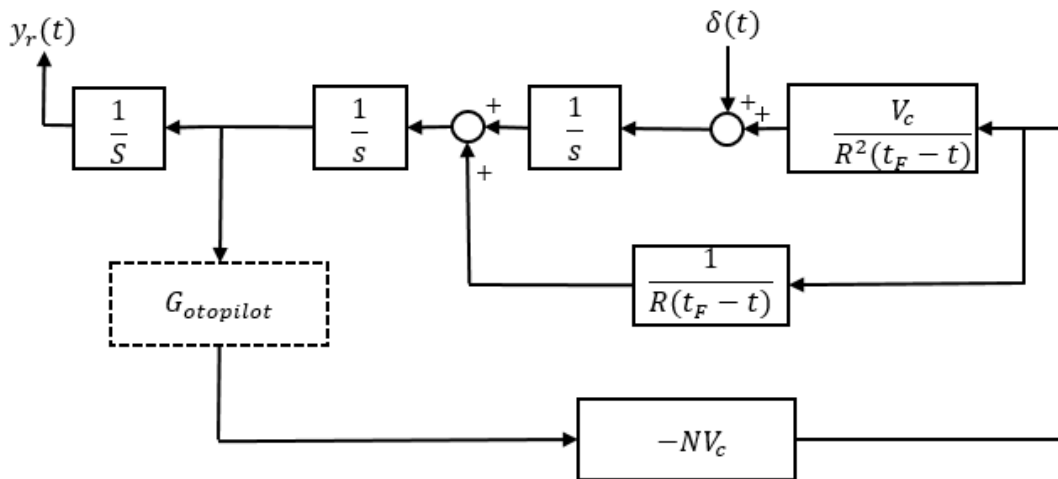


Şekil 5.5. Otopilot Kontrol Yapısı Blok Gösterimi

Kurulan benzetim ortamında ivme otopilotu, güdüm çıktısı olan ivme komutunun mühimmat tarafından hangi kabiliyette gerçekleştirilebildiği olarak modellenmiştir. Bu modelleme bant genişliği ve sönümlenme katsayıları ile karakterize edilmiştir. İlgili modelde sönümlenme katsayısı ( $\zeta$ ) 0.707 olarak alınmıştır. İvme otopilotunun bant genişliğinin yüksek olması mühimmat manevra kabiliyetinin yüksek olduğu anlamına gelmektedir. Manevra kabiliyeti yüksek olan mühimmatlarda ivme otopilotu bant genişliği 3-4 Hz iken, manevra kabiliyeti düşük seyir mühimmatlarında ise bu değer 0.5 Hz'e kadar inmektedir. Benzetim ortamında ivme otopilotu ikinci dereceden bir model ile gerçekleştirilmiş ilgili model Eşitlik (66) ile verilmiştir. Benzetim ortamında ikinci derece modelin bant genişliği ( $W_{oto}$ ) değiştirilerek, çeşitli manevra kabiliyetine sahip mühimmatlar için ayrı yorumlamalar yapılmıştır. İvme otopilotu modeli Eşitlik (66) ile verilmiştir.

$$G_{oto} = \frac{w_n^2}{s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2} \quad (66)$$

Yapılan yaklaşım doğrusal bir yaklaşım olduğu için katımlı güdüm modeline doğrudan eklenebilecek yapıdadır. İvme otopilotunun eklendiği katımlı oransal seyir güdümünün blok gösterimi Şekil 5.6 ile verilmiştir.



Şekil 5.6. Oransal Seyir Güdümü ve İvme Otopilotu Katımlı Blok Gösterimi



### **5.3. Arayıcı Başlık Katımlı Modeli**

Görüntü tabanlı algılayıcı bulunduran arayıcı başlıklar görüntü üzerinde istenmeyen titreme ve bozulmalardan kurtulmak için yüksek seviyede kararlılaştırmaya ihtiyaç duyar. İhtiyaç duyulan kararlılaştırma, gimballi stabilize platform ile sağlanabilir. Bu mimaride algılayıcı iki adet gimbal halkası ve gimbal eksenlerinde bulunan motorlar sayesinde iki eksen de hareket ettirilebilir. Bu hareket esnasında doğru konumlamayı yaparken, algılayıcı ve dönüölçer ölçümleri kullanılır. Arayıcı başlıklar işlevsel olarak iç içe geçmiş iki adet kontrol döngüsünden oluşmaktadır. Bu döngülerin başarımlarının karakterize edilmesi arayıcı başlık başarımının güdüm üzerindeki etkilerini incelemekte önemli yer tutar.

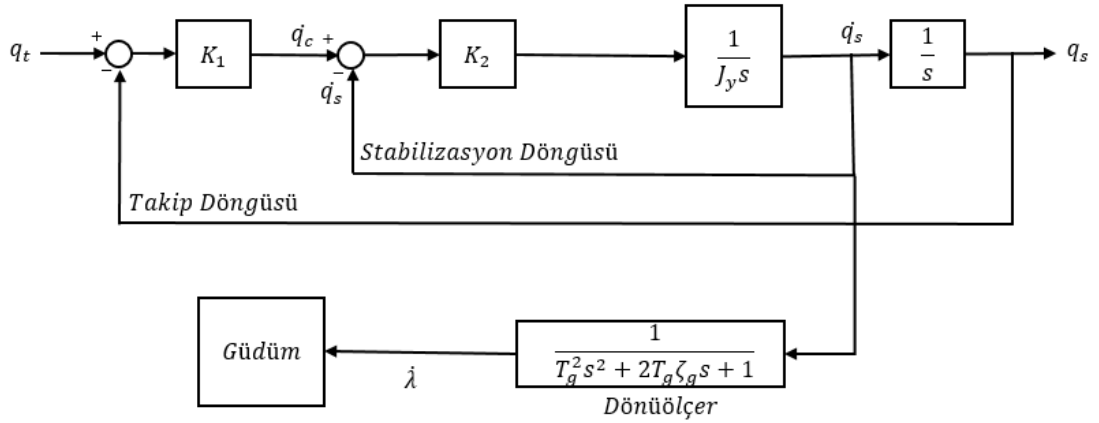
Arayıcı başlık üzerinde bulundurulan algılayıcıların doğaları gereği rastgele ve sabit ölçüm hataları bulunmaktadır. Bu hatalar ve arayıcı başlığın uçuş esnasında mağruz kalacağı diğer bozucular arayıcı başlık başarımını doğrudan etkileyeceklerinden sapma mesafasında ve belirlenen diğer mühimmat başarımlarındaki hata bütçeleri karakterize edilmelidir.

Arayıcı başlık modelleme çalışması platform stabilize arayıcı başlık mimarisi üzerinden tek eksen de sürdürülüp algılayıcı ve uçuş hata parametreleri benzetim ortamında modellenecektir. Modellemenin sonunda kurulan orijinal yapı katımlı modele çevirilerek Şekil 5.6. da verilen katımlı güdüm ve otopilot modeline eklenecektir.

#### **5.3.1. Arayıcı Başlık Kararlılaştırma ve Takip Döngülerinin Modellenmesi**

Görüntüleyicinin mühimmat hareketlerinden arındırılarak aynı konuma bakmasını sağlayan döngü kararlılaştırma döngüsüdür. Kararlılaştırma döngüsü, arayıcı başlık üzerinde bulunan dönüölçer (jiroskop) tarafından sağlanan iki eksen deki yere göre açısız hız bilgisini kullanarak görüntüleyicinin yere göre aynı konuma baktığını garanti altına alır. Kararlılaştırma döngüsü mühimmat hareketlerinden kaynaklı ölçüm hatalarını gideren bir sistem olduğu için olabildiğince yüksek bant genişliğinde olması beklenir. Genellikle bu değer arayıcı başlıklarda 20 ila 100 Hz arasında değişkenlik göstermektedir.

Dıştaki döngü ise görüntüleyici tarafından sağlanan bilgiler ile hedefin düzenli olarak takip edilmesini sağlayan takip döngüsüdür. Takip döngüsü ise algılayıcıdan gelen hedef kaçıklığı bilgisine göre görüntüleyicinin baktığı konumun değiştirilmesini sağlar. Takip döngüsü içinde bulundurduğu görüntüleyici ölçümlerinden faydalanmaktadır. Görüntüleyiciler doğaları gereği yüksek sıklıkla çıktı veren yapıda değildirler. Bu sıklık düşüklüğü takip döngüsünün yüksek bant genişliğinde olmasını engeller. Görüntüleyici içeren arayıcı başlıklar için takip döngüsü bant genişliği genellikle 2 ila 15 Hz arasındadır. Platform stabilize arayıcı başlık blok gösterimi Şekil 3.13 ile sunulmuştu. Kararlılaştırma ve pozisyon takip döngüleri bant genişlikleri ayarlanabilecek yapıda açık devre kazancı olarak benzetim ortamına aktarılmıştır. Bu sayede döngü başarımlarının oransal seyir güdümü üzerindeki etkileri karşılaştırılabilecektir. Arayıcı başlık döngü benzetimi Şekil 5.7 ile verilmiştir.



Şekil 5.7. Arayıcı Başlık Döngü Benzetimi

Şekil 5.7’de  $\lambda$  güdüm birimine iletilen görüş açısı değişimi bilgisini,  $q_t$  görüntüleyicinin ölçtüğü görüş açısı bilgisini,  $q_s$  gimbalin referans alınan eksene göre baktığı açı değerini,  $q_s$  gimbalin referans eksene göre açısal hızını,  $K_1$  takip döngüsü açık devre kazancını,  $K_2$  kararlılaştırma döngüsünün açık devre kazancını,  $q_c$  kararlılaştırma döngüsü komutunu ifade etmektedir.

$K_1$  devre kazancı, takip döngüsünün bant genişliğini ( $W_T$ ) ayarlama da kullanılmaktadır.  $K_1$  ile  $W_T$  arasında Eşitlik (67) ile verilen bağıntı bulunmaktadır.

$$K_1 = 2\pi i W_T \quad (67)$$

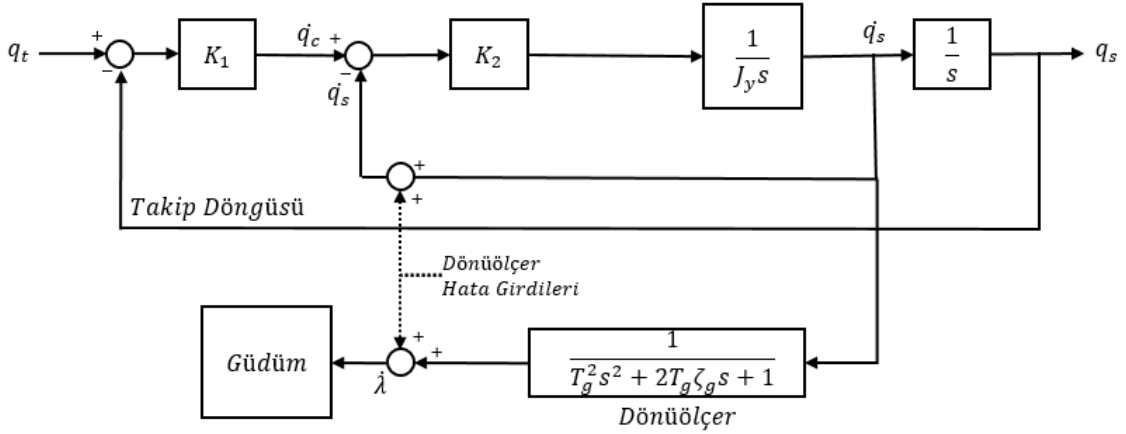
$K_2$  devre kazancı, kararlılaştırma döngüsünün bant genişliğini ( $W_S$ ) ayarlama da kullanılmaktadır.  $K_2$  ile  $W_S$  arasında Eşitlik (68) ile verilen bağıntı bulunmaktadır.

$$K_2 = 2\pi i W_S J_y \quad (68)$$

Şekil 5.7’de blok gösterimi verilen benzetim ortamında dönüölçer transfer fonksiyonunun kararlılaştırma döngüsünde kullanılmadığına dikkat edilmelidir. Bunun nedeni kararlılaştırma bant genişliği kavramının ölçümleri aldığı dönüölçer modelini de kapsıyor olmasındandır. Bir diğ er dikkat edilmesi gereken konu ise Şekil 5.7’de verilen blok gösterimde arayıcı başlık hata parametrelerine yer verilmediğidir.

### 5.3.2. Dönüölçer Hatalarının Benzetim Ortamına Aktarılması

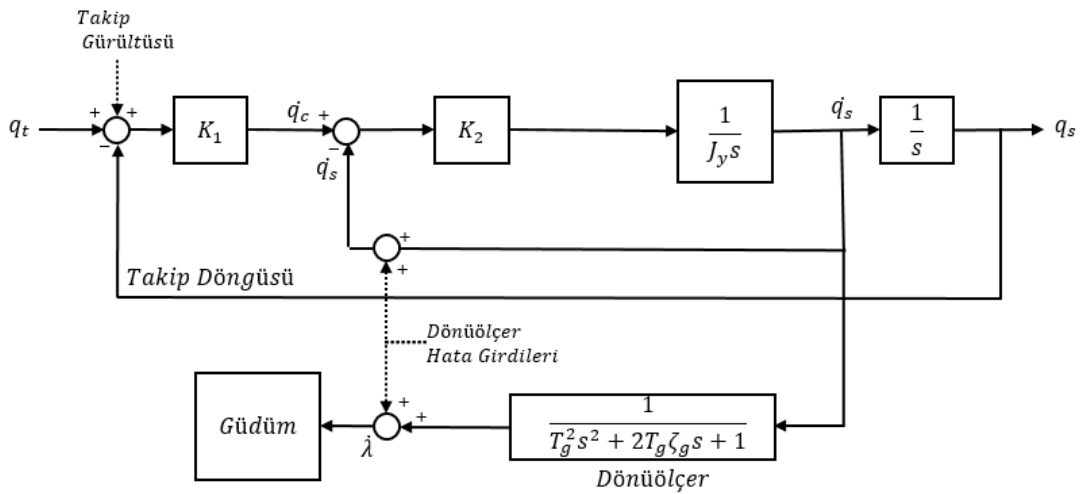
Dönüölçerler üzerinde buldukları platformların açıs al hız değışimlerini ölçmek üzere tasarlanmış ataletsel sensörlerdir. Bu sensörler çeşitli elektromekanik yapılarda bulunabilirler. MEMS (mikro elektro mekanik) dönüölçerler ve optik dönüölçerler farklı yapıdaki dönüölçer tipleridir. Her ne kadar farklı yapılarda olsalarda, arayıcı başlık üzerindeki dönüölçerin temel görevi, mühimmat üzerinde serbestliğı bulunan arayıcı başlığın ataletsel uzaya göre açıs al hızını ölçerek arayıcı başlığı kararlı kılmak ve güdüm birimine ihtiyacı olan görüş açısı değışimi bilgisini sağlamaktır. Dönüölçerlerin başarımını belirleyen kriterler bant genişlikleri ( $W_f$ ) ve düşük ölçüm hataları barındırmalarıdır. Dönüölçerlerin ölçüm hatalarını çeşitli şekillerde sınıflandırmak mümkündür. Bu sınıflandırmada arayıcı başlık üzerinde etkisi en çok görülen hata kaynakları dönüölçer sabit hatası ve dönüölçer rastgele gürültüsüdür. Bu hatalar çeşitli süzgeçlerden geçirilse de tamamen önlenmesi mümkün olmayan hata kaynaklarıdır. Dönüölçer hataları kendini hem kararlılaştırma döngüsünde gösterirken hem de güdüme iletilen görüş açısı değışimi bilgisinde gösterir. Dönüölçer hatalarının benzetim ortamına aktarımı Şekil 5.8 ile verilmiştir.



Şekil 5.8. Dönüölçer Hatalarının Benzetim Ortamına Aktarılması

### 5.3.3. Takip Gürültüsünün Benzetim Ortamına Aktarılması

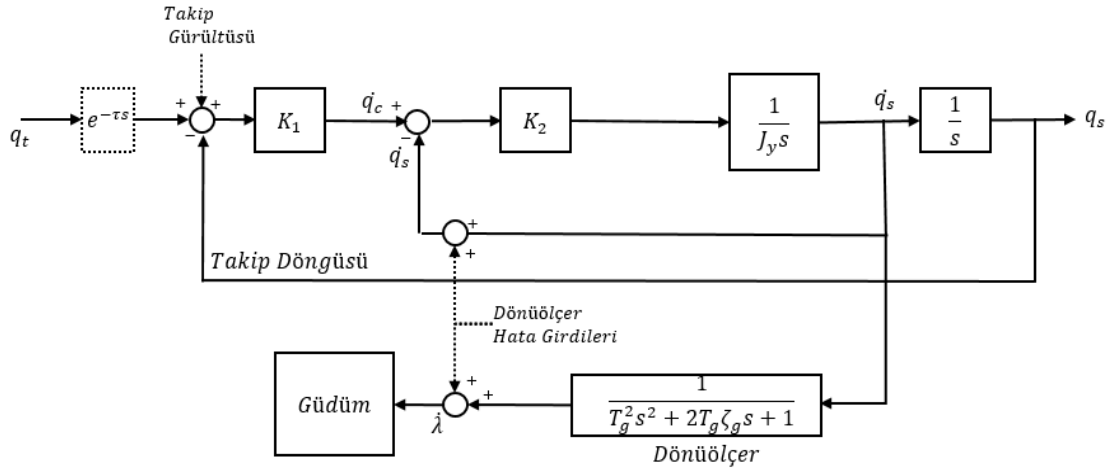
Görüntüleyici algılayıcılar ölçümlerinde ölçüm gürültüsü barındırırlar. Bu bozucular algılayıcının elektro-optik yapısından kaynaklıdır ve alınan görüntü üzerinde doğrudan etkilidir. İlgili bozucunun yanında görüntü işleyen algoritmanın hedefi yüksek doğrulukta belirleyememesi de takip döngüsünde bozucu etki yaratmaktadır. Bu hatalar rastgele hatalardır ve takip döngüsünü doğrudan etkilediğinden arayıcı başlık hata bütçelerinde yerleri olacaktır. Bu rastgele hataların benzetim ortamına aktarımı Şekil 5.9 ile gösterilmiştir.



Şekil 5.9. Takip Gürültüsünün Benzetim Ortamına Aktarılması

### 5.3.4. Görüntüleyici Çıktı Sıklığının Benzetim Ortamına Aktarılması

Görüntüleyiciler doğaları gereği yüksek sıklıkla çıktı veren yapıda değildirler. Bu yüzden hedef takibinde sürekli olarak değil belirli aralıklarla hedef konumu güncellenir. Hedef manevra kabiliyetinin yüksek olduğu durumlarda, hedefin düzenli olarak takip edilebilmesi için görüntüleyici çıktı sıklığının ( $W_g$ ) yüksek olması beklenir. Görüntüleyici çıktı sıklığı benzetim ortamına aktarılmış, ilgili yapı Şekil 5.10 ile sunulmuştur.



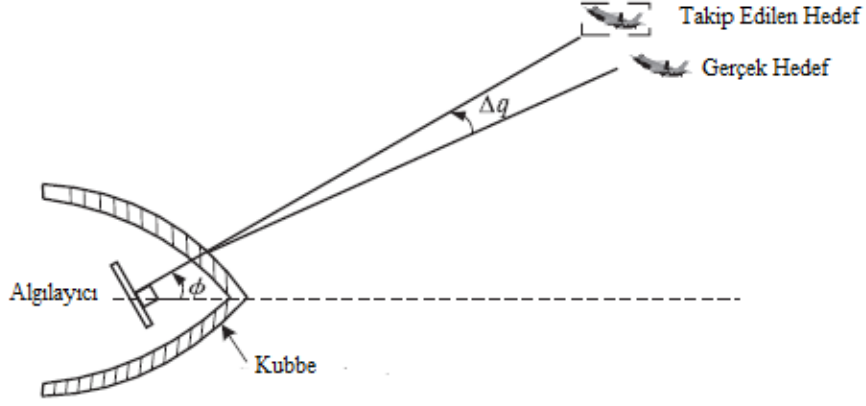
Şekil 5.10. Görüntüleyici Yenilenme Sıklığının Benzetim Ortamına Aktarılması

### 5.3.5. Nişangah Hattı Kontrol Hatasının Benzetim Ortamına Aktarılması

Arayıcı başlıkları ortam şartlarından koruyan yapıya kubbe (dome) denmektedir. Kubbe nem, toz, kum gibi arayıcı başlık başarımını düşürebilecek etkilerin ortadan kaldırılması için kullanılan koruyucu dış yapıdır.

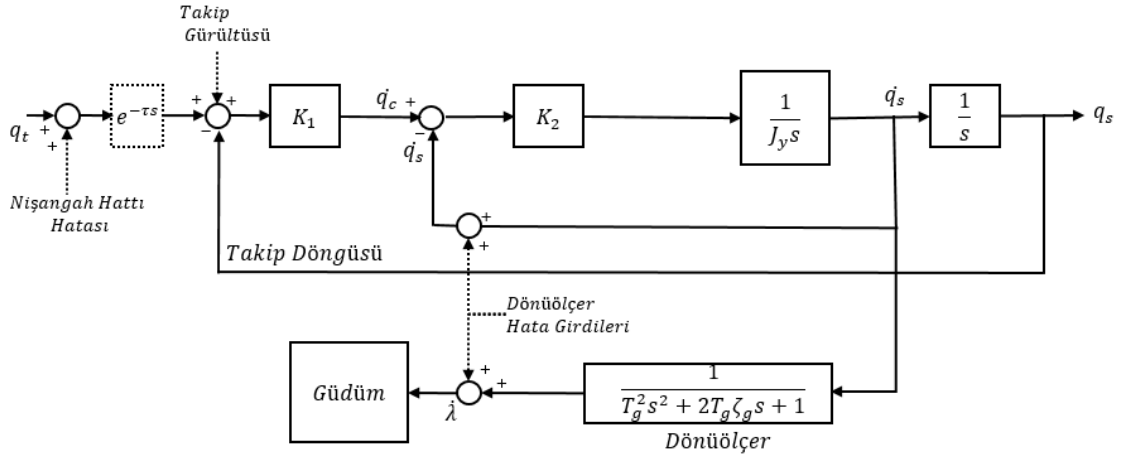
Bu yapı hedeften gelen sinyallerin toplanması noktasında bazı dezavantajlar getirmektedir. Kubbenin yapıldığı dielektrik malzeme toplanan sinyallerin kırılmasına ve geri yansımaya neden olmaktadır. Kubbede kırılan hedef izleri, arayıcı başlığın hedefi mühimmat gövdesine göre sabit bir hatayla takip etmesine neden olur. Bunun yanında entegrasyon sürecinde arayıcı başlık mekaniği ile mühimmat arasında açısal kaçıklık kalabilir. Bu açısal kaçıklık nişangah hattı hatasıyla aynı karakterde bir hatadır. Bu nedenden dolayı genellikle mühimmat entegrasyonundan sonra nişangah hattı kalibrasyonu yapılmaktadır. Bu kalibrasyon kaçıklığının belli bir kısmını düzeltse de, kalibrasyon

sistemlerince tespit edilemeyen kısmi hata devam etmektedir. İlgili davranış Şekil 5.11 ile görselleştirilmiştir.



Şekil 5.11. Kubbe Kaynaklı Nişangah Hattı Hatasının Görselleştirilmesi

Şekil 5.11’de  $\Delta q$  sabit takip hatasını ifade etmektedir. Nişangah hattı sabit hatasının benzetim ortamına aktarımı Şekil 5.12 ile verilmiştir.



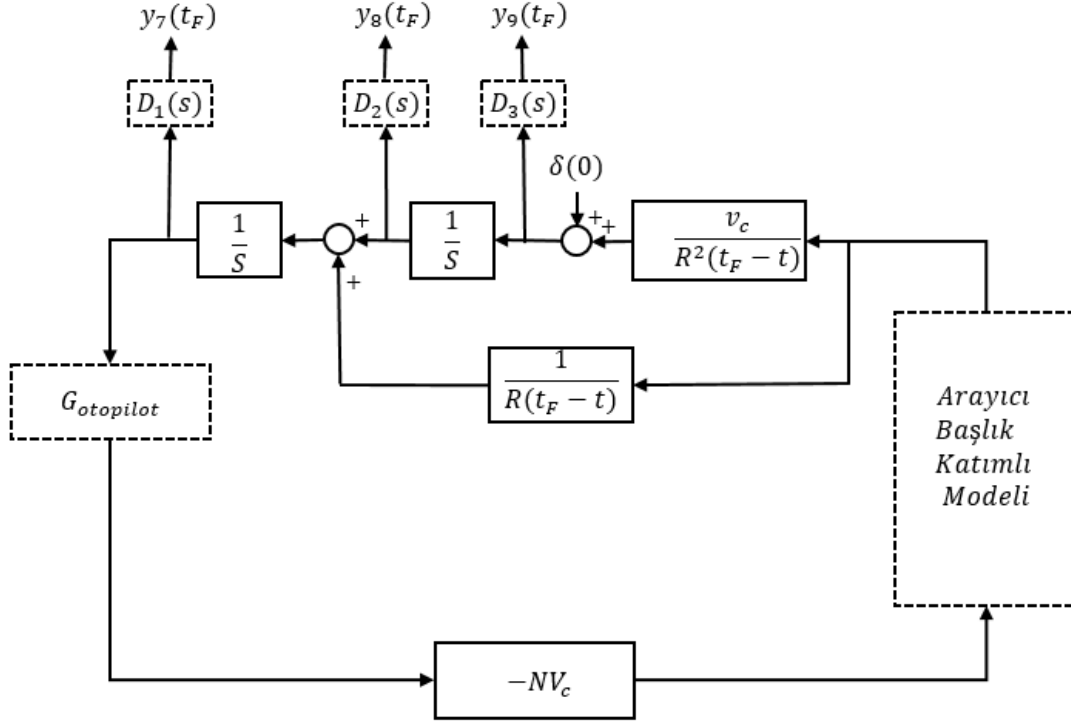
Şekil 5.12. Nişangah Hattı Hatasının Benzetim Ortamına Aktarılması







Şekil 5.14 ile verilen arayıcı başlık katımlı modeli Şekil 5.6 ile verilen katımlı oransal seyir ve otopilot modeliyle birleştirilirse, arayıcı başlık parametrelerinin ayrıık olarak güdüm başarımında izlenebileceği katımlı angajman modeli elde edilir. Katımlı angajman modeli Şekil 5.15 ile verilmiştir.



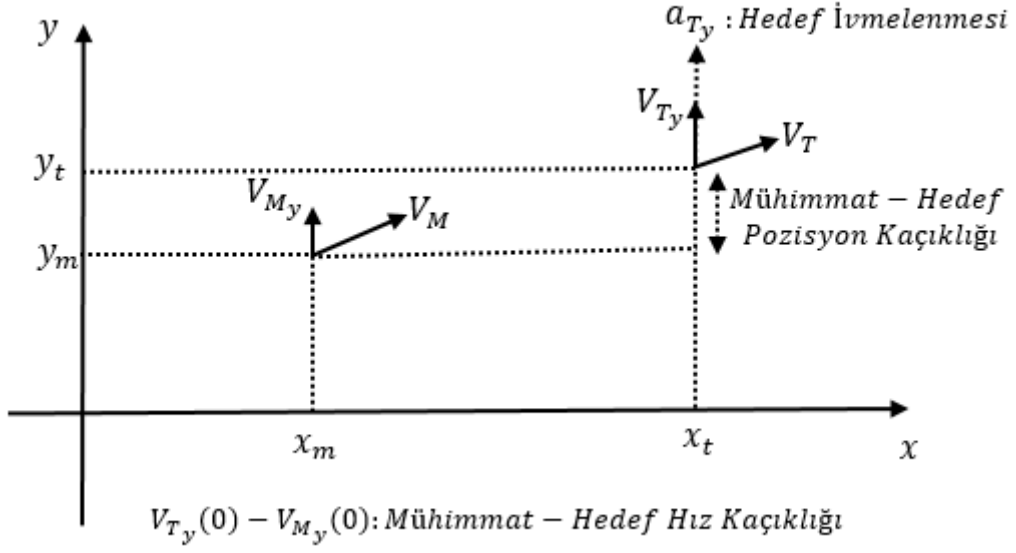
Şekil 5.15. Benzetim Ortamında Angajman Katımlı Modeli

Şekil 5.15'te belirtilen hata bütçeleri Çizelge 5.2 ile tanımlanmıştır.

Çizelge 5.2. Güdüm Sonlanma Zamanında Angajman Sapma Bütçelerinin Tanımlanması

Tanım	Simge
Hedef İvmelenmesinin Hata Bütçesi	$y_7(t_F)$
Mühimmat-Hedef Başlangıç Hız Kaçıklığının Hata Bütçesi	$y_8(t_F)$
Mühimmat-Hedef Başlangıç Konum Kaçıklığının Hata Bütçesi	$y_9(t_F)$

Çizelge 5.2 ile tanımlanan angajman hataları, Şekil 5.16 ile verilen senaryo başlangıcı üzerinden görselleştirilmiştir.



Şekil 5.16. Angajman Hatalarının Senaryo Başlangıcı Üzerinde Gösterimi

## 6. BENZETİM ÇALIŞMALARI

### 6.1. Arayıcı Başlık Döngü Başarımının Angajman Başarımına Etkileri

#### 6.1.1. Arayıcı Başlık Kararlılaştırma Döngüsünün Angajman Başarımına Etkisi

Şekil 5.15 ile verilen katımlı angajman modelinde arayıcı başlık hata parametreleri kaldırılarak, işlevsel arayıcı başlık döngülerinin angajmana olan etkileri ayrı olarak incelenebilir. Bu inceleme kararlılaştırma döngüsü için yapılırken, kararlılaştırma döngüsünün başarımı bant genişliği olarak ifade edilmiştir.

Benzetim ortamında ivme otopilotunun bant genişliği 1 Hz olarak seçilmiştir. Bu değer angajmanın orta manevra kabiliyetine sahip bir mühimmat üzerine kurulduğunu göstermektedir. Bu tip mühimmatlara hedef kümesinin manevra kabiliyeti yüksek olmayan tanksavar ve gemisavar mühimmatları örnek verilebilir.

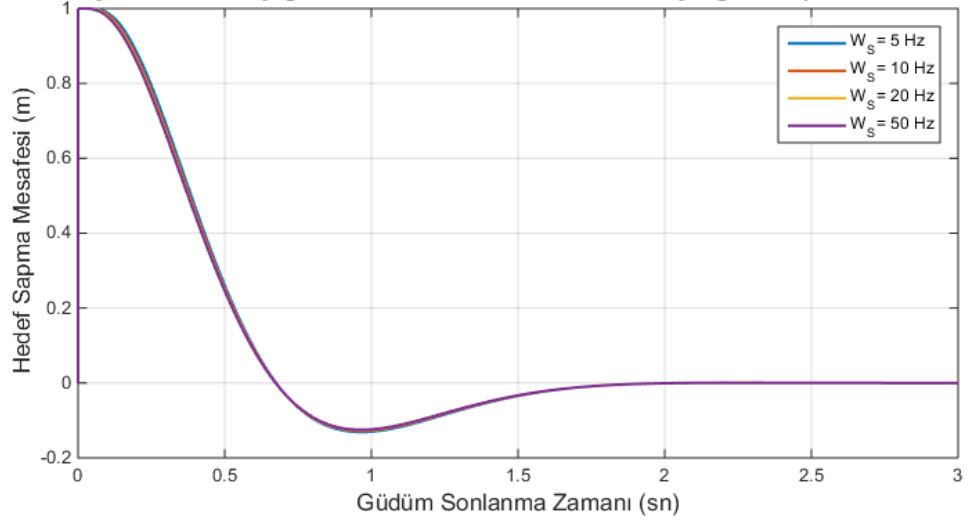
Takip döngüsü bant genişliği, ivme otopilotuna uyumlu olarak 10 Hz seçilmiştir. Diğer benzetim parametrelerinden görüntüleyici çıktı sıklığı 50 Hz, dönüölçer bant genişliği 100 Hz seçilmiştir. Bu algılayıcı-mühimmat kabiliyetleri altında 5, 10, 20 ve 50 Hz kararlılaştırma bant genişliklerinin ( $W_S$ ), birim mühimmat-hedef konum hatası, birim mühimmat-hedef hız hatası ve birim hedef ivmelenmesi altında sapma mesafesine etkileri incelenmiştir. Benzetimler hata bütçelerinin otopilot tarafından tamamen kompanse edildiği zamana koşturulmuştur. İlgili benzetim parametreleri Çizelge 6.1.'de, benzetim sonuçları ise sırasıyla Şekil 6.1, Şekil 6.2 ve Şekil 6.3'te verilmiştir.

Çizelge 6.1. Kararlılaştırma Döngü Başarımı Benzetim Parametreleri

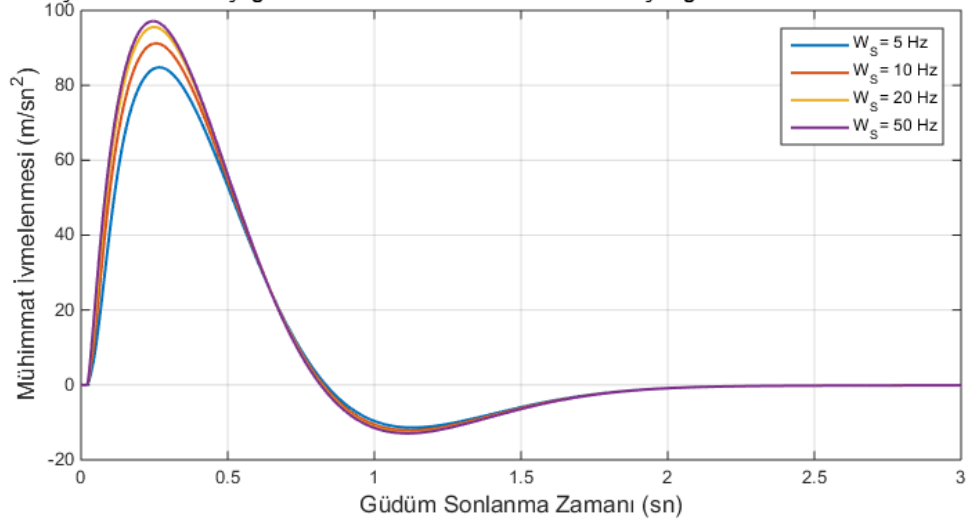
Benzetim Parametresi	Değer
Güdümlü Seyir Katsayısı (N)	3
İvme Otopilotu Bant Genişliği ( $W_{oto}$ )	1 Hz
Takip Döngüsü Bant Genişliği ( $W_T$ )	10 Hz
Kararlılaştırma Döngüsü Bant Genişliği ( $W_S$ )	5 Hz – 10Hz – 20 Hz – 50 Hz

Görüntüleyici Yenilenme Sıklığı ( $W_G$ )	50 Hz
Dönüölçer Bant Genişliği ( $W_J$ )	100 Hz
Birim Mühimmat-Hedef Konum Kaçıklığı	1 metre
Birim Mühimmat-Hedef Hız Kaçıklığı	1 metre/sn
Birim Hedef İvmelenmesi	1 metre/sn <sup>2</sup>

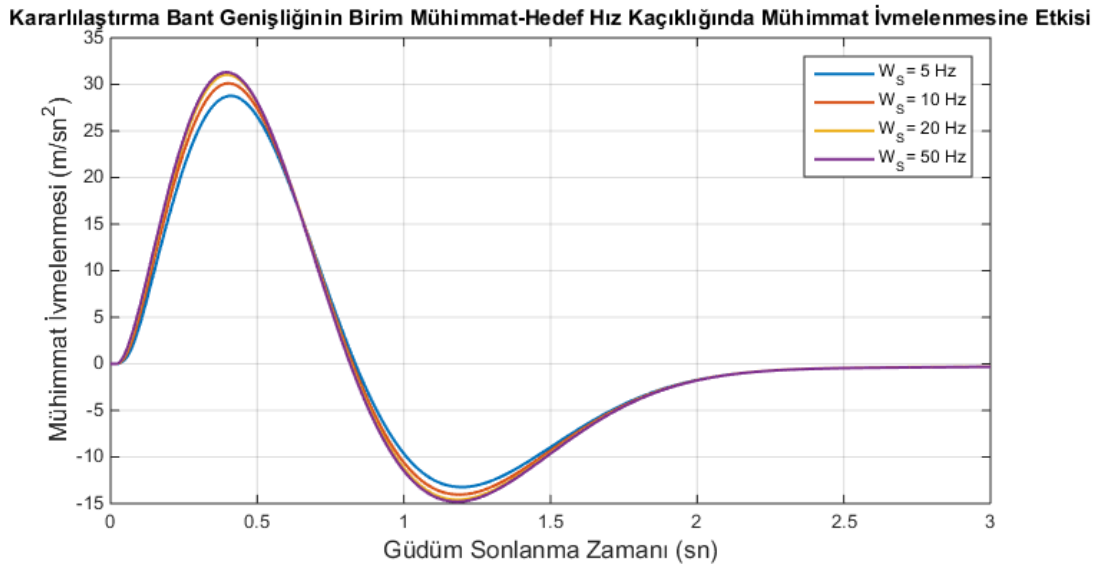
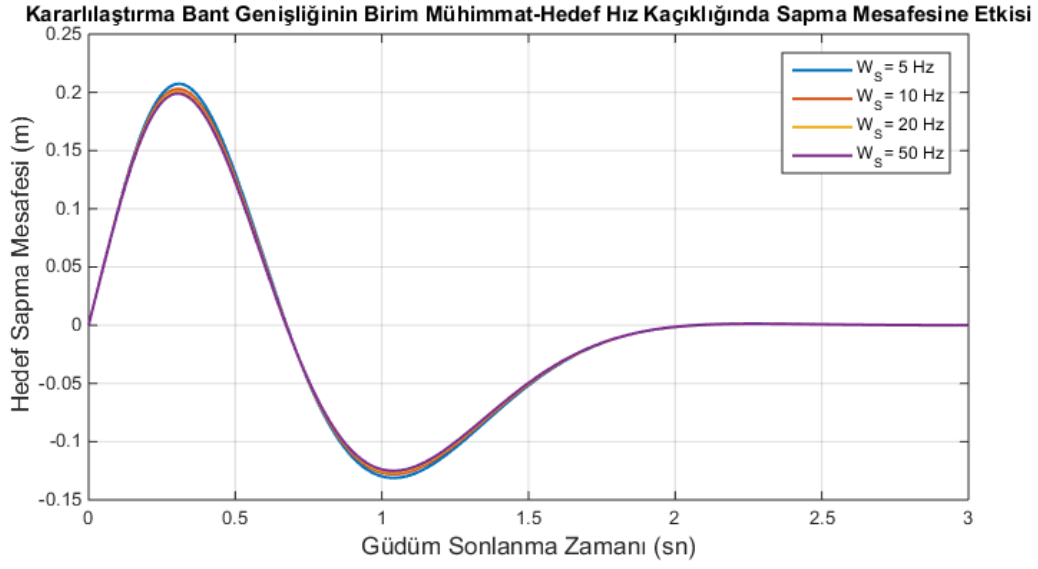
Kararlılaştırma Bant Genişliğinin Birim Mühimmat-Hedef Konum Kaçıklığında Sapma Mesafesine Etkisi



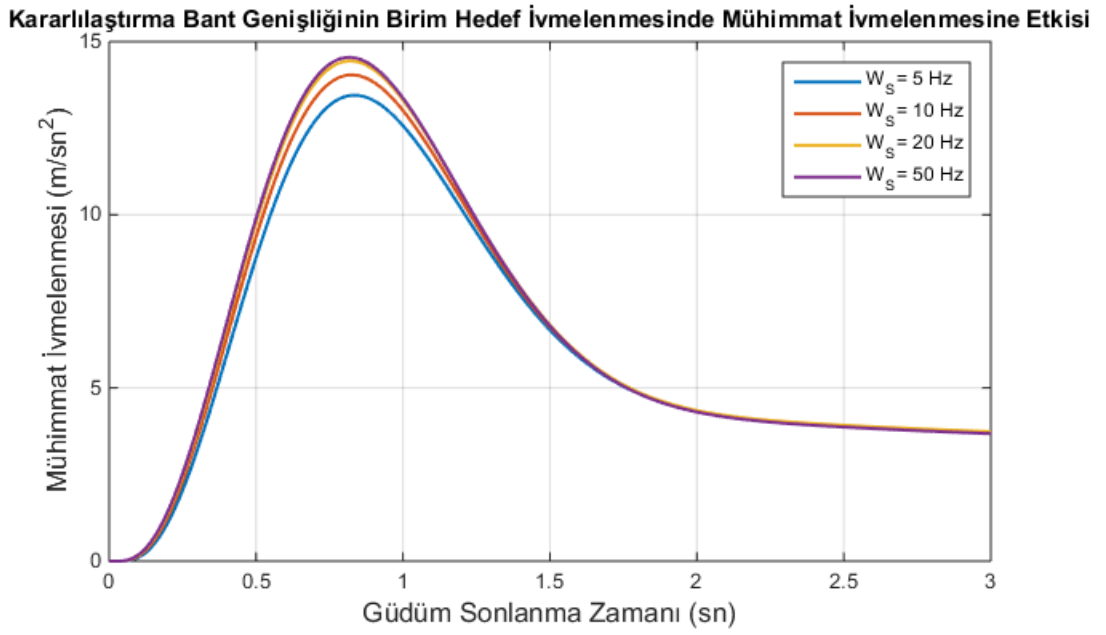
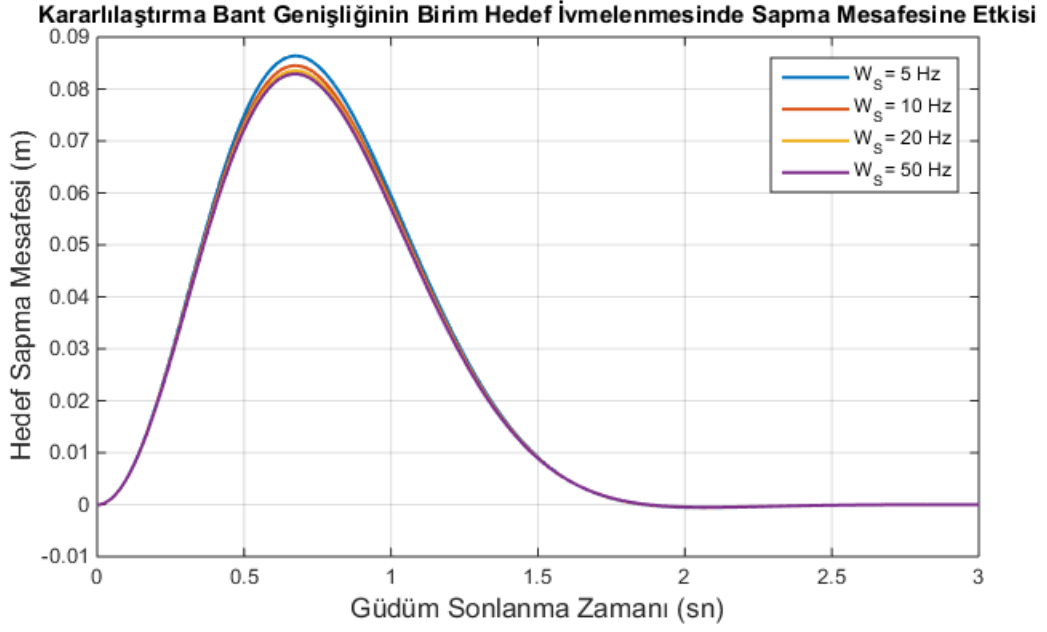
Kararlılaştırma Bant Genişliğinin Birim Mühimmat-Hedef Konum Kaçıklığında Mühimmat İvmelenmesine Etkisi



Şekil 6.1. Kararlılaştırma Bant Genişliğinin Birim Mühimmat-Hedef Konum Kaçıklığında Angajmana Etkileri ( $y_r(0) = 1 \text{ metre}$ )



Şekil 6.2. Kararlılaştırma Bant Genişliğinin Birim Mühimmat-Hedef Hız Kaçıklığında Angajmana Etkileri ( $\dot{y}_r(0) = 1$  metre/sn)



Şekil 6.3. Kararlılaştırma Bant Genişliğinin Birim Hedef İvmelenmesinde Angajmana Etkileri ( $\dot{y}_r(0) = \dot{y}_t(0) = 1$  metre/sn<sup>2</sup>)

Benzetim sonuçları incelendiği zaman, kararlılaştırma bant genişliğinin sapma mesafesinde ve mühimmat ivmelenmesinde etkileri olduğu görülmektedir. Bu etkiler özellikle güdüm sonlanmasının ilk 3 saniyede yapıldığı durumlarda daha net görülmektedir. Bunun nedeni mühimmata yeterli süre verildiği zaman kendini toparlaması olarak yorumlanabilir.

Kararlılaştırma bant genişliğini yükseltmenin sapma mesafesinde azalmaya yol açtığı görülmektedir. Bunun nedeni kararlılık seviyesi yüksek olan arayıcı başlıkların, takip döngüsünden gelen komutları daha yüksek doğrulukta gerçekleştirebilmesidir. Ancak ileriki bölümlerde görüleceği gibi, sapma mesafesini etkileyen temel kaynak kararlılaştırma başarımı değildir. Kararlılaştırma döngüsünün dış döngü olan takip döngüsünden gelen komutları yerine getirmek için belli bir başarımda olması yeterlidir.

Şekil 6.1, Şekil 6.2 ve Şekil 6.3'te verilen sonuçlardan da görülebileceği gibi kararlılaştırma bant genişliğini 20 Hz'den 50 Hz'e çıkarmak sapma mesafesi üzerinde dikkate değer bir değişim yaratmamıştır. Kararlılaştırma bant genişliğinin takip döngüsü bant genişliğinin 5 katı olacak şekilde tasarlanması kararlılaştırma döngüsünün sapma mesafesindeki bütçesini minimuma indirmek için yeterlidir.

Mühimmatın sonlanma zamanındaki ivmesi incelendiği zaman, kararlılaştırma bant genişliği arttıkça sapma mesafesine verilen mühimmat ivme cevabının arttığı görülmektedir. Şekil 6.3'te hedef ivmelenmesinin mühimmat ivmesindeki etkilerinin incelendiği benzetimde, mühimmat ivmelenmesinin sonlanma zamanı arttırıldıkça 3 m/sn<sup>2</sup> yakınsadığı görülmektedir. Bu değer Eşitlik (69)'un  $t = t_F$ ,  $N=3$  ve hedef ivmelenmesinin 1 m/sn<sup>2</sup> alındığı çözümden analitik olarak da elde edilebilir.

$$a_c = \frac{N}{N-2} \left[ 1 - \left( \frac{t_F - t}{t_F} \right)^{N-2} \right] a_T \quad (69)$$

Eşitlik (69)'da  $a_T$  hedef ivmelenmesini ifade etmektedir.

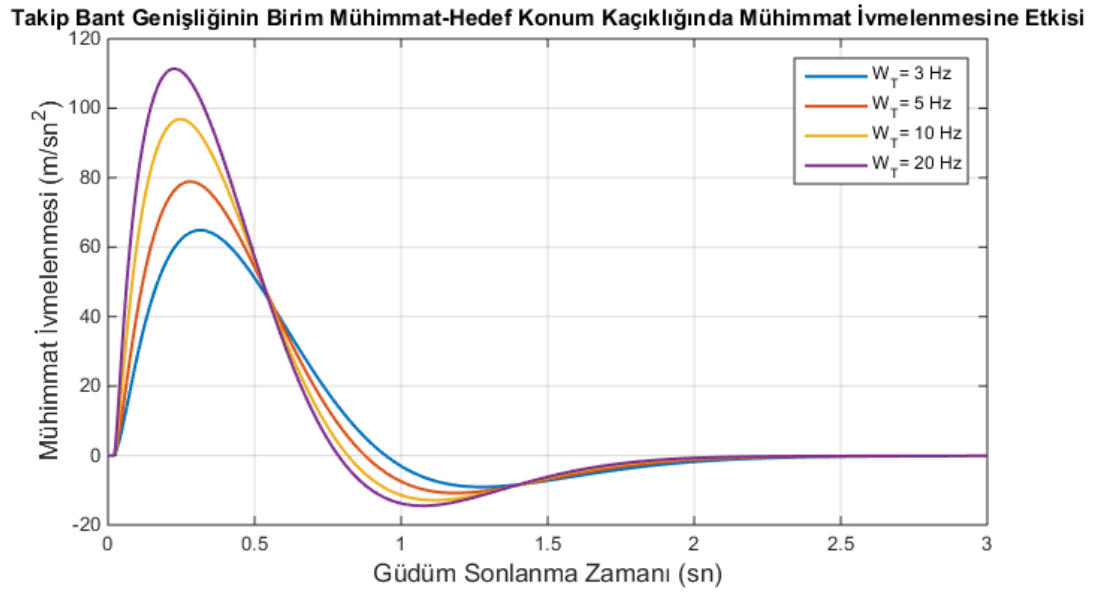
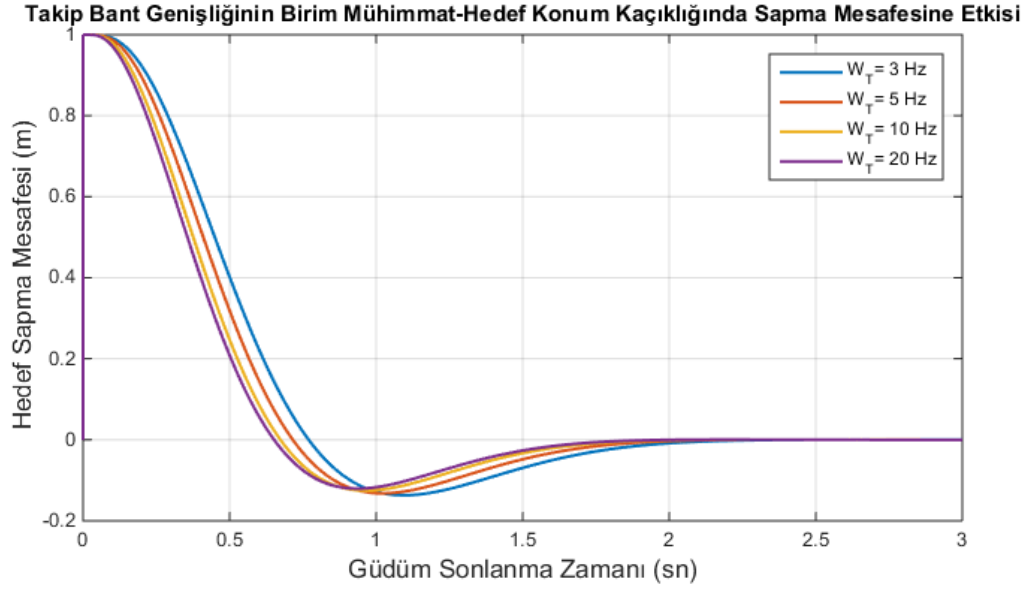
### 6.1.2. Arayıcı Başlık Takip Döngüsünün Angajman Başarımına Etkisi

Kararlılaştırma başarımının angajman üzerindeki etkileri 6.1.1’de incelenmiştir. Aynı benzetim ortamında kararlılaştırma bant genişliği ( $W_S$ ) 30 Hz’e sabitlenerek, takip döngüsü bant genişliği değiştirilmiştir. Benzetim ortamında 3, 5, 10 ve 20 Hz takip bant genişliklerinin ( $W_T$ ), birim mühimmat-hedef konum hatası, birim mühimmat-hedef hız hatası ve birim hedef ivmelenmesi altında sapma mesafesine etkileri incelenmiştir.İlgili benzetim parametreleri Çizelge 6.2.’de, sonuçları ise sırasıyla Şekil 6.4, Şekil 6.5 ve Şekil 6.6.’da verilmiştir.

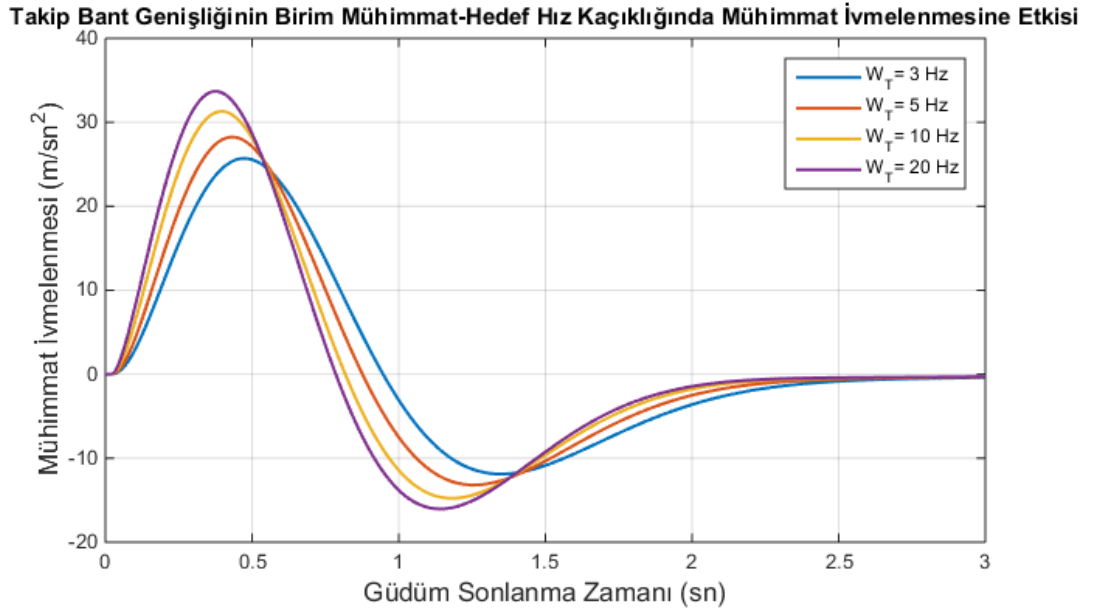
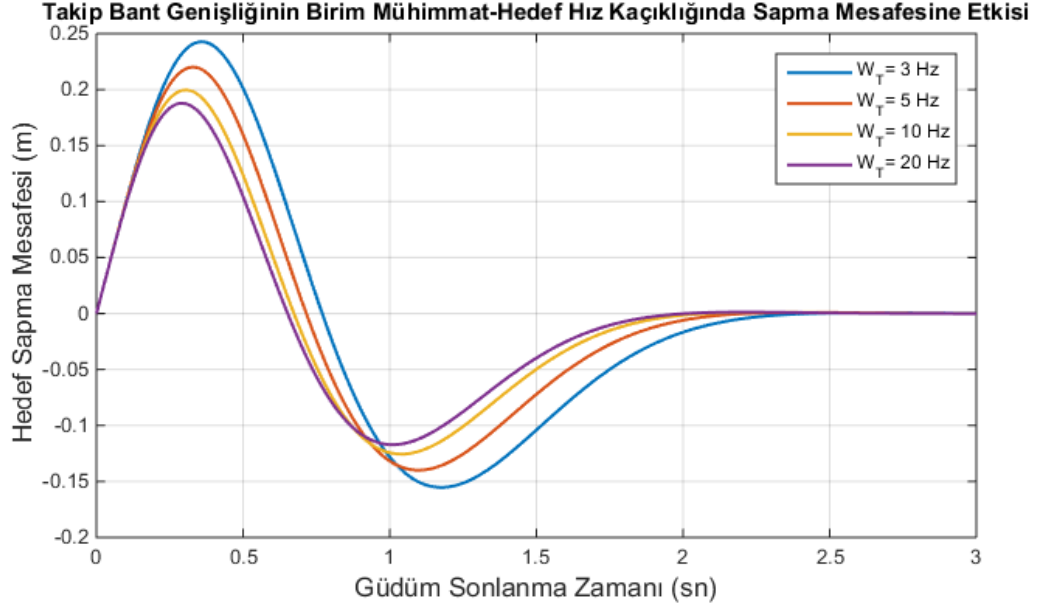
Çizelge 6.2. Takip Döngü Başarımı Benzetim Parametreleri

<b>Benzetim Parametresi</b>	<b>Değer</b>
Güdüm Seyir Katsayısı (N)	3
İvme Otopilotu Bant Genişliği ( $W_{oto}$ )	1 Hz
Takip Döngüsü Bant Genişliği ( $W_T$ )	3 Hz – 5Hz – 10 Hz – 20 Hz
Kararlılaştırma Döngüsü Bant Genişliği ( $W_S$ )	30 Hz
Görüntüleyici Yenilenme Sıklığı ( $W_G$ )	50 Hz
Dönüölçer Bant Genişliği ( $W_J$ )	100 Hz
Birim Mühimmat-Hedef Konum Kaçıklığı	1 metre
Birim Mühimmat-Hedef Hız Kaçıklığı	1 metre/sn
Birim Hedef İvmelenmesi	1 metre/sn <sup>2</sup>

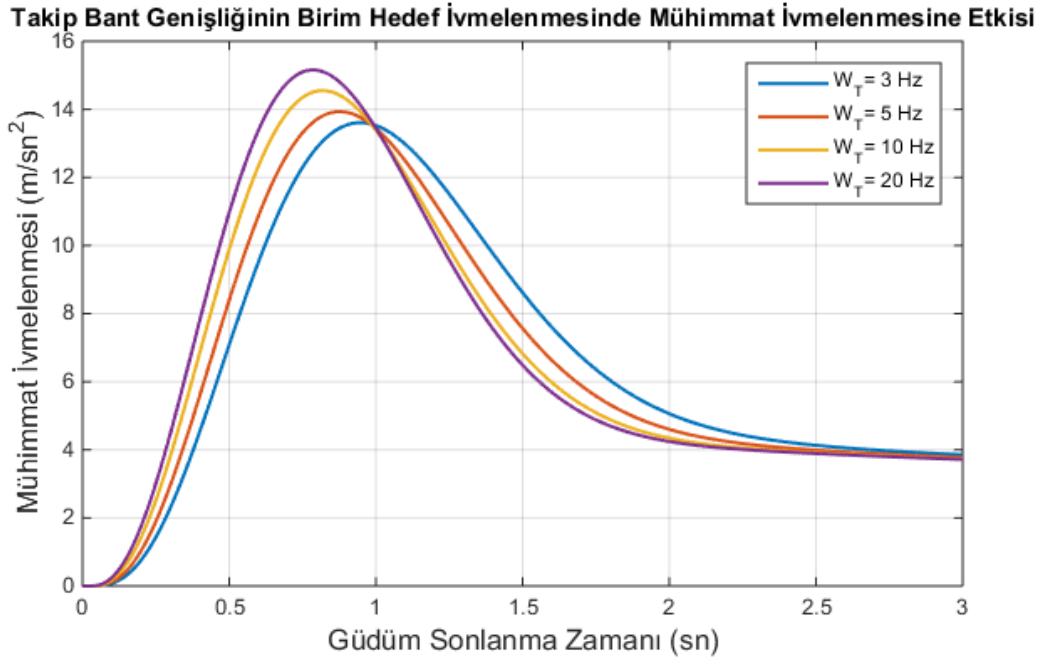
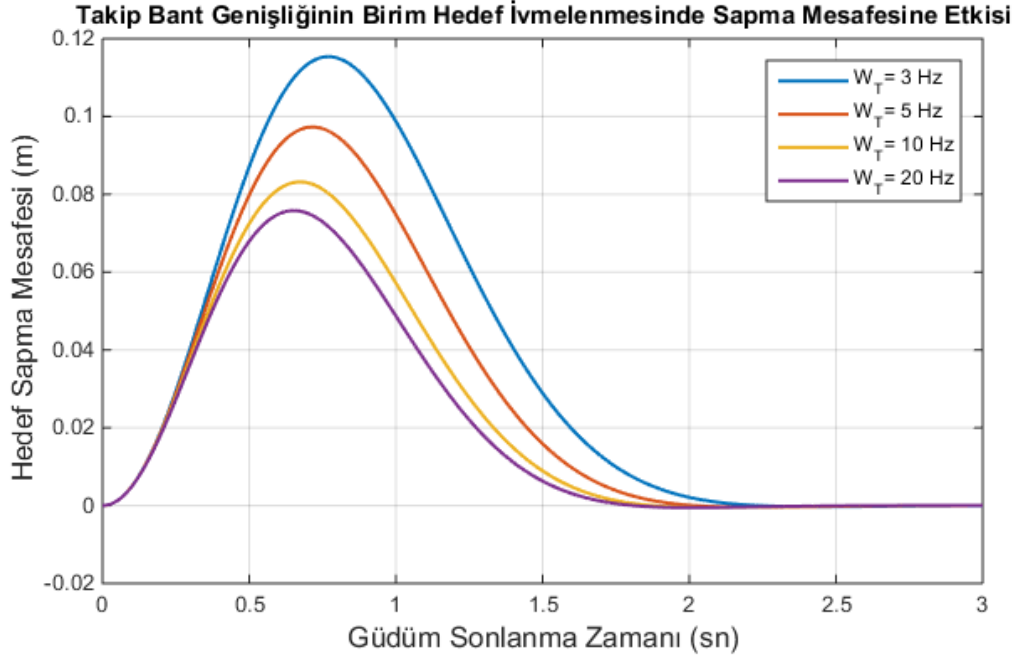




Şekil 6.4. Takip Bant Genişliğinin Birim Mühimmat-Hedef Konum Kaçıklığında Angajmana Etkileri ( $y_r(0) = 1$  metre)



Şekil 6.5. Takip Bant Genişliğinin Birim Mühimmat-Hedef Hız Kaçıklığında Angajmana Etkileri ( $\dot{y}_r(0) = 1$  metre/sn)



Şekil 6.6. Takip Bant Genişliğinin Birim Hedef İvmelenmesinde Angajmana Etkileri  
 $(\ddot{y}_r(0) = \ddot{y}_t(0) = 1 \text{ metre/sn}^2)$

Arayıcı başlık takip bant genişliği, hedefin açısal olarak ne kadar iyi takip edilebildiği olarak yorumlanabilir. Benzetim sonuçları incelendiği zaman, takip bant genişliğinin, sonlanma zamanı 2 saniyeden kısa olan angajmanlarda sapma mesafesinde önemli bir etkisinin olduğu görülmektedir.

İdeal bir mühimatta, arayıcı başlığın bant genişliğinin yüksek olması, görüş açısı değişimi bilgisini tamamen doğru olarak ölçülmesi beklenir; ancak arayıcı başlıklarda ideal bir ölçüm yapılabilmesi söz konusu değildir.

Günümüzde ivme otopilotu bant genişlikleri mühimmat karakteristiğine göre 0.5 ile 5 Hz arasında farklılık göstermektedir. Otopilot-güdüm bütününe yeterli kabiliyette bilgi sağlanabilmesi için takip bant genişliğinin ivme otopilotu bant genişliğinden yüksek olması amaçlanır. Benzetim ortamında takip bant genişliği üssel olarak arttırılmasına rağmen, sapma mesafesi aynı oranda azalmamıştır. Takip bant genişliğinin yeterli başarımda olmasını sağlamak mühimmat başarıımı için yeterlidir.

Mühimmatın sonlanma zamanındaki ivmesi incelendiği zaman, takip bant genişliği arttıkça sapma mesafesine verilen mühimmat ivme cevabının arttığı görülmektedir.

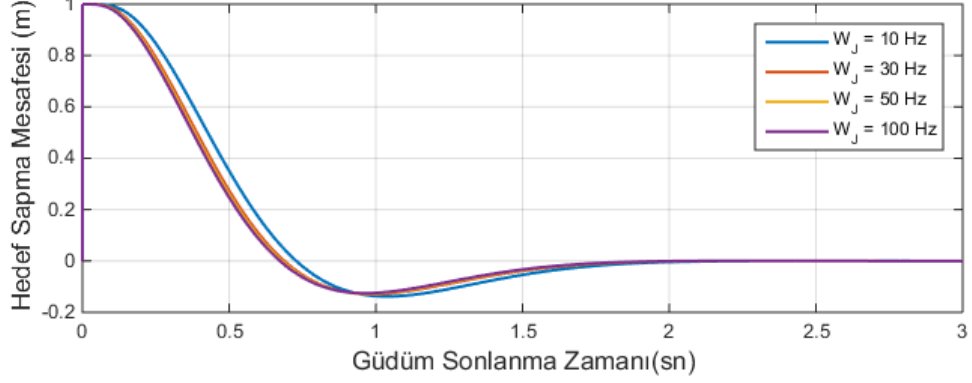
## **6.2. Dönüölçer Bant Genişliğinin Angajmana Etkileri**

Şekil 5.15 ile verilen katımlı arayıcı başlık modelinden hata parametreleri çıkartılarak, dönüölçer bant genişliğinin sapma mesafesine etkileri incelenmiştir. Bu benzetim sırasıyla birim mühimmat-hedef konum kaçıklığı, birim mühimmat-hedef hız kaçıklığı ve birim hedef ivmelenmesi senaryolarında yapılmıştır. İlgili senaryolarda dönüölçer bant genişliği değiştirilerek dönüölçer bant genişliğinin sapma mesafesi üzerindeki etkisi incelenmiştir. İlgili benzetim parametreleri Çizelge 6.3., sonuçları ise Şekil 6.7 ile verilmiştir.

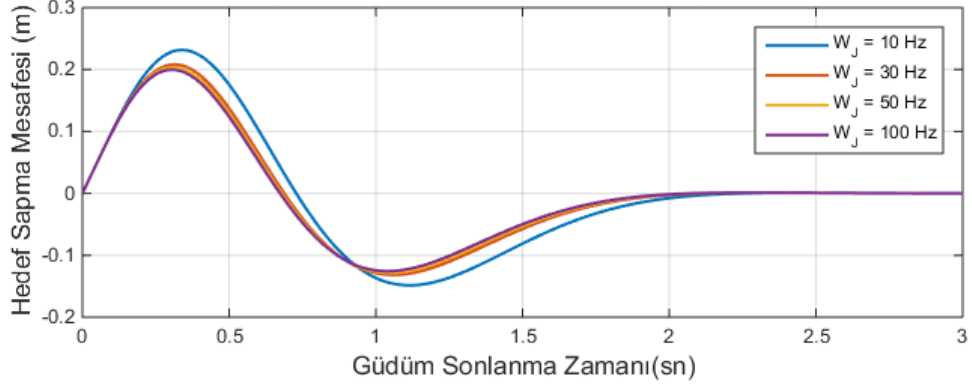
Çizelge 6.3. Dönüölçer Bant Genişliği Benzetim Parametreleri

<b>Benzetim Parametresi</b>	<b>Değer</b>
Güdümlü Seyir Katsayısı (N)	3
İvme Otopilotu Bant Genişliği ( $W_{oto}$ )	1 Hz
Takip Döngüsü Bant Genişliği ( $W_T$ )	10 Hz
Kararlılaştırma Döngüsü Bant Genişliği ( $W_S$ )	30 Hz
Görüntüleyici Yenilenme Sıklığı ( $W_G$ )	50 Hz
Dönüölçer Bant Genişliği ( $W_J$ )	10 Hz – 30Hz – 50 Hz – 100 Hz
Birim Mühimmat-Hedef Konum Kaçıklığı	1 metre
Birim Mühimmat-Hedef Hız Kaçıklığı	1 metre/sn
Birim Hedef İvmelenmesi	1 metre/sn <sup>2</sup>

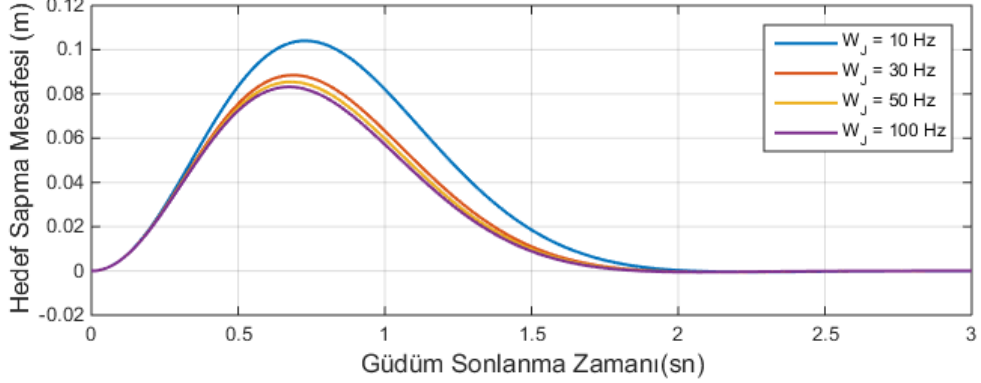
**Dönüölçer Bant Genişliğinin Birim Mühimmat-Hedef Konum Kaçıklığında Sapma Mesafesine Etkisi**



**Dönüölçer Bant Genişliğinin Birim Mühimmat-Hedef Hız Kaçıklığında Sapma Mesafesine Etkisi**



**Dönüölçer Bant Genişliğinin Birim Hedef İvmelenmesinde Sapma Mesafesine Etkisi**



Şekil 6.7. Dönüölçer Bant Genişliğinin Sapma Mesafesine Etkisi

Dönüölçer bant genişliği temelde güdüm birimine sağlanan görüş açısı değişimi bilgisinin hangi başarımda olduğunu ifade etmektedir. Benzetim sonuçlarında, dönüölçer bant genişliğinin artırılmasının sapma mesafesini azalttığı görülmüştür. Dönüölçer bant genişliğinin 10 Hz'den 30 Hz'e yükseltilmesi hata bütçelerinde yaklaşık yüzde 20'lik bir

düşüş sağlamıştır. Bu değer, mühimmat başarımında değerli bir artımdır. Aynı ifadeyi 50 Hz'den 100 Hz'e yükseltileen dönüölçer bant genişliğı durumu için söylemek mümkün değildir.

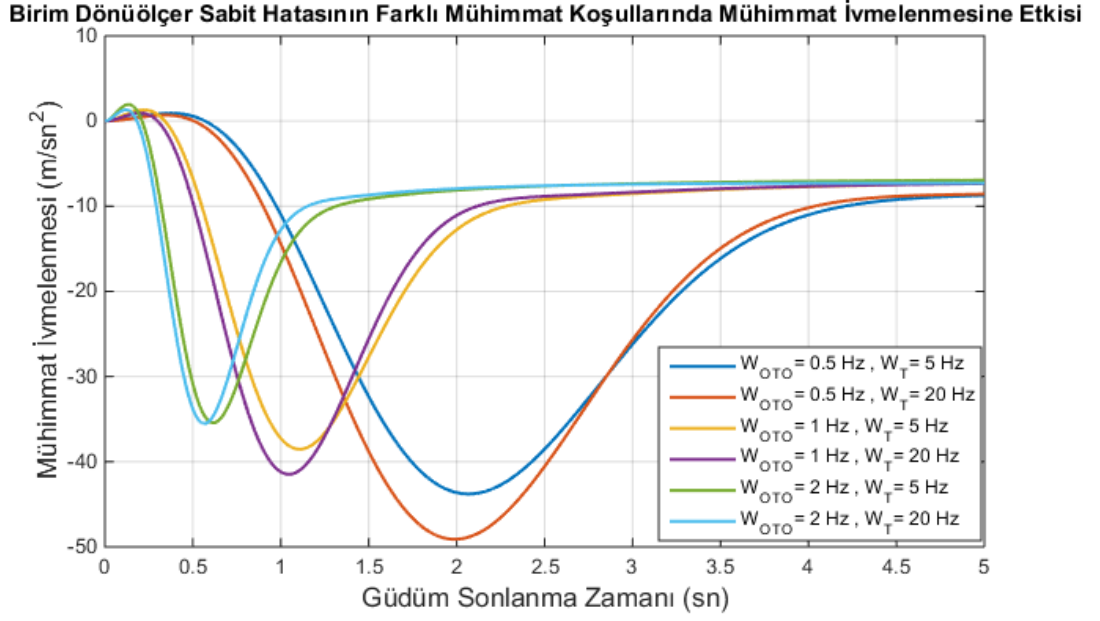
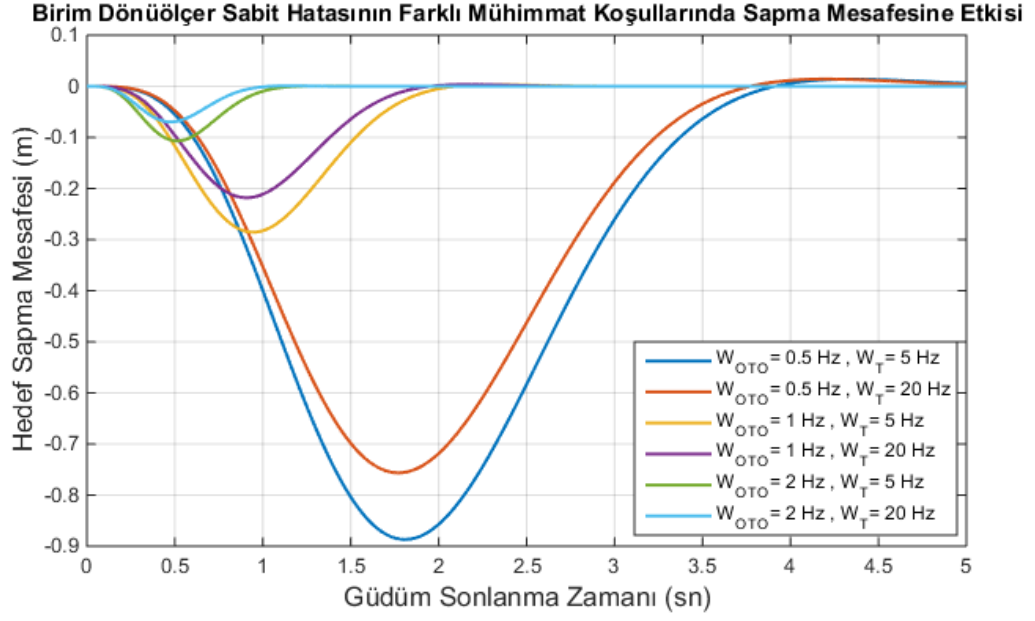
Dönüölçer bant genişliğı kararlılaştırma bant genişliğini de doğrudan etkilemektedir. Düşük bant genişlikte bir dönüölçer seçiminin, kararlılaştırma bant genişliğini de düşüreceğı ve bu düşüşün sapma mesafesinde etkisi olacağı ayrıca göz önüne alınmalıdır. Benzetim sonuçları, dönüölçerin mühimmat mimarisine göre sapma mesafesini minimumda tutacak bir başarımında seçilmesi gerektiğini göstermektedir.

### 6.3. Dönüölçer Sabit Hatasının Sapma Mesafesine Etkisi

Dönüölçer sabit hatasının angajman başarımı üzerindeki etkilerinin incelenmesi adına Şekil 5.15 ile verilen katımlı angajman modeli üzerinde birim dönüölçer sabit hatası (1 derece/sn) incelenmiştir. Dönüölçer sabit hatasının farklı mühimmat tiplerindeki etkilerinin incelenmesi adına 0.5, 1 ve 2 Hz otopilot bant genişliğine sahip 3 farklı mühimmat ele alınmıştır. Bu mühimmatlar sırasıyla manevra kabiliyeti düşük, orta manevra kabiliyetine sahip ve yüksek manevra kabiliyetli mühimmatlar olarak düşünülebilir. İlgili benzetim parametreleri Çizelge 6.4., sonuçları ise Şekil 6.8 ile verilmiştir.

Çizelge 6.4. Takip Döngü Başarımı Benzetim Parametreleri

Benzetim Parametresi	Değer
Güdüm Seyir Katsayısı (N)	3
İvme Otopilotu Bant Genişliğı ( $W_{oto}$ )	0.5 Hz – 1 Hz – 2 Hz
Takip Döngüsü Bant Genişliğı ( $W_T$ )	5 Hz – 20 Hz
Kararlılaştırma Döngüsü Bant Genişliğı ( $W_S$ )	30 Hz
Görüntüleyici Yenilenme Sıklığı ( $W_G$ )	50 Hz
Dönüölçer Bant Genişliğı ( $W_J$ )	100 Hz
Birim Dönüölçer Sabit Hatası	1 derece/sn



Şekil 6.8. Dönüölçer Sabit Hatasının Sapma Mesafesine Etkisi

Benzetim sonucundan görüldüğü üzere dönüölçer sabit ölçüm hatasının sapma mesafesini arttırıcı etkisi vardır. Bu etki mühimmat otopilotu tarafından belirli ölçüde kompanse



edilebilmektedir. Benzetim sonucundan görüleceği üzere, otopilot bant genişliği yüksek olan mühimmatlarda dönüölçer sabit hatasının etkisi daha düşüktür. Dönüölçer sabit hatasının sapma mesafesine etkisini belirleyen temel faktör otopilot bant genişliği olsa da, arayıcı başlık takip başarımı arttırılarak bu etkinin azaltılması mümkündür. Dönüölçer sabit hatasının mühimmat ivmesinde yarattığı etki ise, temel olarak sapma mesafesinde yarattığı artışla ortantılıdır. Yüksek otopilot bant genişlikli sistemlerde dönüölçer sabit hatası sapma mesafesinde yüksek bir etkiye sahip olmadığı gibi, hataya bağlı mühimmat ivmelenmesi görece düşüktür.

Otopilot ve takip döngüsü başarımı ne seçilirse seçilsin, güdüm sonlanmasına yeterli süre verildiği zaman mühimmat ivmesinin belirli bir değere yakınsadığı görülmektedir. Dönüölçer sabit hatası doğrudan güdüm birimine görüş açısı değişimi hatası olarak yansımaktadır. Bu hata seyir katsayısı ile çarpıldığı zaman, güdüm döngüsü üzerinde hedef ivmelenmesiyle aynı etkiyi yaratacaktır. Bu değer Eşitlik (69)'da hedef ivmelenmesi yerine konulursa, sonlanma zamanındaki mühimmat ivmelenmesi analitik olarak da hesaplanabilir.

#### 6.4. Dönüölçer Rastgele Hatasının Sapma Mesafesine Etkisi

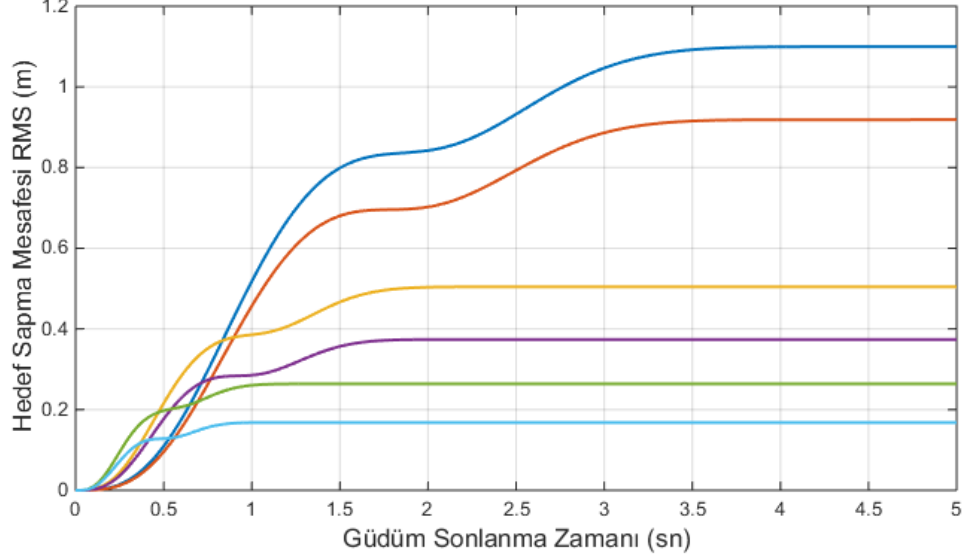
Rastgele beyaz gürültülerin katımlı sistem analizi ile nasıl karakterize edilebileceği bölüm 4.2.'de, bu yöntem ile dönüölçer rastgele gürültüsünü karakterize etmek için kurulan katımlı arayıcı başlık modeli bölüm 5.3.2'de verilmişti. Kurulan benzetim ortamı Çizelge 6.5. ile verilen benzetim parametreleriyle koşturulmuş, dönüölçer rastgele hatasının farklı mühimmat mimarilerinde sapma mesafesindeki ortalama karesel kök (RMS) etkileri Şekil 6.9 ile verilmiştir.

Çizelge 6.5. Dönüölçer Rastgele Hatası Benzetim Parametreleri

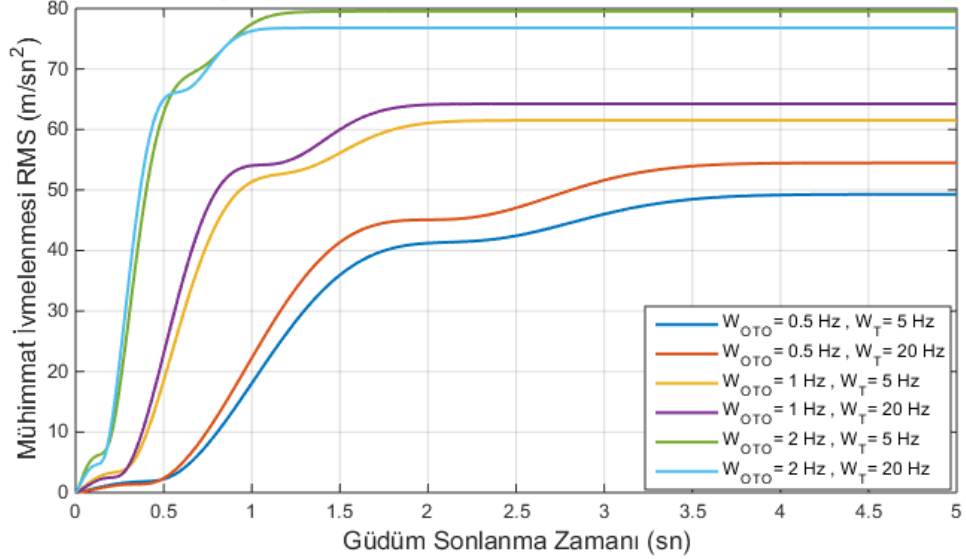
Benzetim Parametresi	Değer
Güdüm Seyir Katsayısı (N)	3
İvme Otopilotu Bant Genişliği ( $W_{oto}$ )	0.5 Hz – 1 Hz – 2 Hz
Takip Döngüsü Bant Genişliği ( $W_T$ )	5 Hz – 20 Hz

Kararlılaştırma Döngüsü Bant Genişliği ( $W_S$ )	30 Hz
Görüntüleyici Yenilenme Sıklığı ( $W_G$ )	50 Hz
Dönüölçer Bant Genişliği ( $W_f$ )	100 Hz
Birim Dönüölçer Gürültüsü Spektral Güç Yoğunluğu	1 (derece/sn) <sup>2</sup> /Hz

Birim Dönüölçer Rastgele Hatasının Farklı Mühimmat Koşullarında Sapma Mesafesine Etkisi



Birim Dönüölçer Rastgele Hatasının Farklı Mühimmat Koşullarında Mühimmat İvmelenmesine Etkisi



Şekil 6.9. Dönüölçer Rastgele Hatasının Sapma Mesafesine Etkisi

Benzetim sonuçları incelendiği zaman, dönüölçer rastgele gürültüsünün sapma mesafesinde doğrudan etkili olduğu söylenebilir. İvme otopilotu yavaş olan mühimmatlarda, angajman başarımları hedefin vurulması ise, dönüölçer rastgele gürültüsünün düşük seçilmesi gerekmektedir. Bunun nedeni ivme otopilotu yavaş mühimmatların, dönüölçer rastgele hatalarından daha çok etkilenmeleridir. Arayıcı başlık takip başarımlarını yükseltmek, dönüölçer rastgele hatasının güdüm üzerindeki etkisini azaltmaktadır. Bu sayede angajman sonundaki sapma mesafesindeki etki de azaltılmış olacaktır. Ancak dönüölçer rastgele hatalarının angajmana olan etkilerinde ivme otopilotunun daha yüksek etkisi olduğu göz ardı edilmemelidir.

Sonlanma zamanındaki mühimmat ivmelenmesine bakılırsa rastgele dönüölçer gürültüsüne bağlı ivmelenmenin otopilot bant genişliği arttıkça arttığı gözlemlenmektedir.

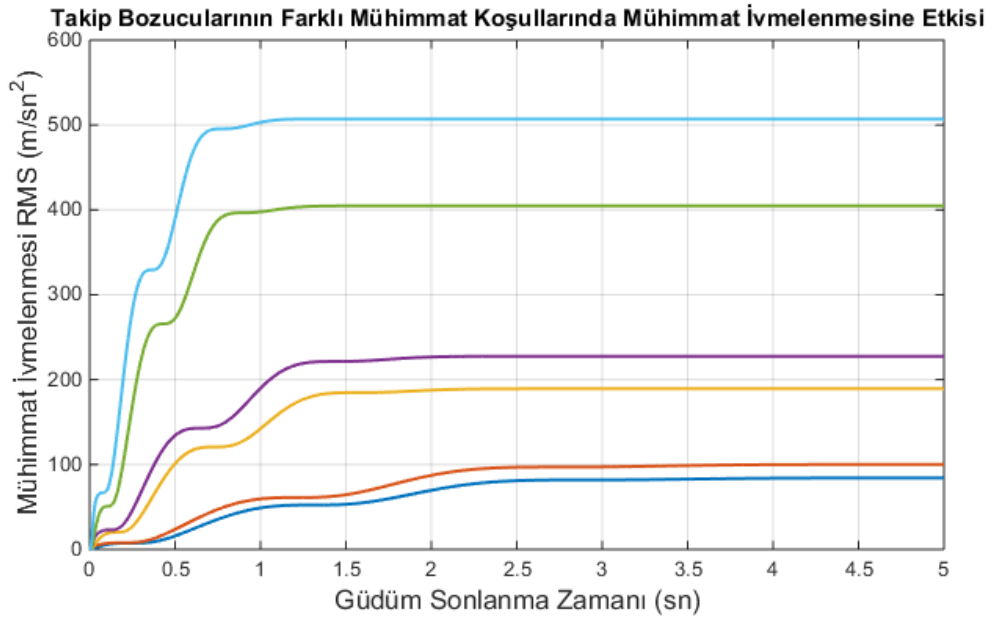
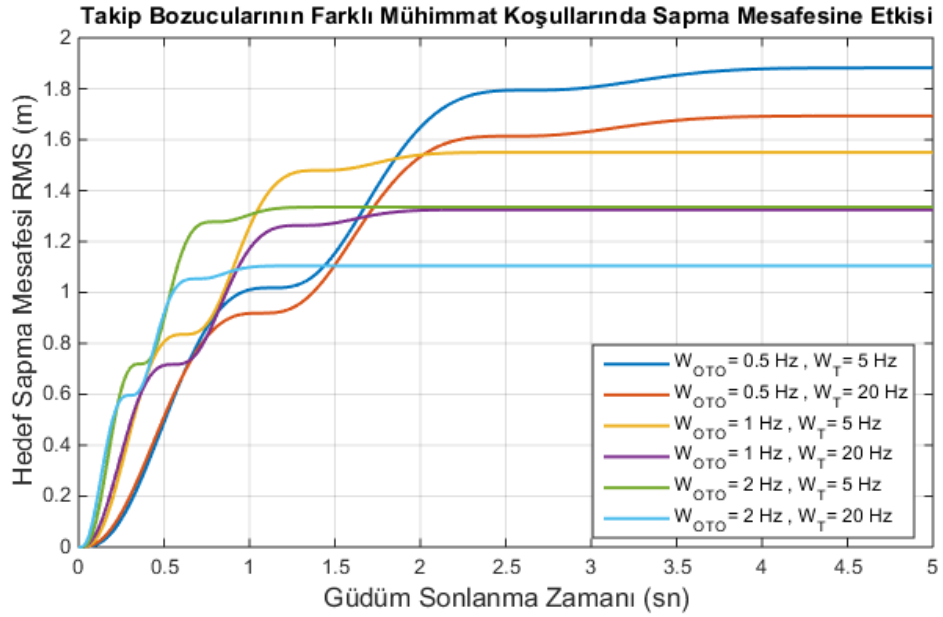
### 6.5. Takip Döngüsü Rastgele Gürültüsünün Sapma Mesafesine Etkisi

Takip döngüsü arayıcı başlığın görevini yerine getirmesini sağlayan temel döngüdür. Bu döngü üzerinde oluşacak algılayıcı ve algoritma tabanlı gürültülerin sapma mesafesindeki hata bütçelerinin karakterize edilmesi gerekmektedir. Hedef tayininde görev alan algılayıcı ve görüntü işleme biriminin, takip döngüsünde yarattığı hatalar belirli bir davranıştan uzak rastgele hatalardır. Katımlı modelin benzetimi ile rastgele takip gürültülerinin sapma mesafesindeki etkisi RMS hata olarak ifade edilebilir. İlgili benzetim parametreleri Çizelge 6.6., sonuçları ise Şekil 6.10 ile verilmiştir.

Çizelge 6.6. Takip Bozucularının Başarımlara Etkileri Benzetim Parametreleri

Benzetim Parametresi	Değer
Güdüm Seyir Katsayısı (N)	3
İvme Otopilotu Bant Genişliği ( $W_{oto}$ )	0.5 Hz – 1 Hz – 2 Hz
Takip Döngüsü Bant Genişliği ( $W_T$ )	5 Hz – 20 Hz

Kararlılaştırma Döngüsü Bant Genişliği ( $W_S$ )	30 Hz
Görüntüleyici Yenilenme Sıklığı ( $W_G$ )	50 Hz
Dönüölçer Bant Genişliği ( $W_f$ )	100 Hz
Takip gürültüsü spektral güç yoğunluğu	1 (derece) <sup>2</sup> /Hz



Şekil 6.10. Takip Gürültülerinin Sapma Mesafesine Etkisi

Benzetim sonuçları incelendiği zaman, takip gürültülerinin mühimmatın sapma mesafesinde bütçesi olduğu, otopilot ve takip döngü başarımlarını arttırmanın bu hata bütçesini düşürdüğü gözlemlenmiştir. Aynı çıkarım rastgele dönüölçer gürültüsü için yapılmış ve ivme otopilotu başarımının sapma mesafesindeki bütçeyi belirleyen temel kriter olduğu gözlemlenmişti. Takip gürültüleri için böyle bir çıkarım yapmak mümkün değildir. Benzetim sonuçları takip bant genişliğinin, takip gürültülerinin sapma mesafesinde yaratacağı bütçede önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir. 1 Hz otopilot bant genişliği, 20 Hz takip bant genişliğine sahip mühimmat ile 2 Hz otopilot bant genişliği, 5 Hz takip bant genişliğine sahip mühimmatın takip bozucularından kaynaklı oluşturduğu sapma mesafelerinin yakın değerlerde çıkması bu çıkarıma örnektir. Mühimmat ivmelenmesi incelendiği zaman, rastgele takip hatasının sonlanma ivmelenmesinin büyüklüğünü belirleyen temel unsurun otopilot olduğu söylenebilir. Bununla beraber takip döngüsünün bant genişliğini arttırmak da ivmelenmede artışa neden olmuştur.

Yapılan benzetim çalışmasında 1 (derece)<sup>2</sup>/Hz güç yoğunluğuna sahip, beyaz bir gürültü üzerinde çalışılmıştır. Bu değer takip sistemleri için çok yüksek bir değerdir. Gerçek bir mühimmattaki takip gürültüsünün güç yoğunluğu belirlendikten sonra 1 (derece)<sup>2</sup>/Hz için verilmiş sonuçlardan faydalanılarak istenilen karakterizasyon yapılabilir.

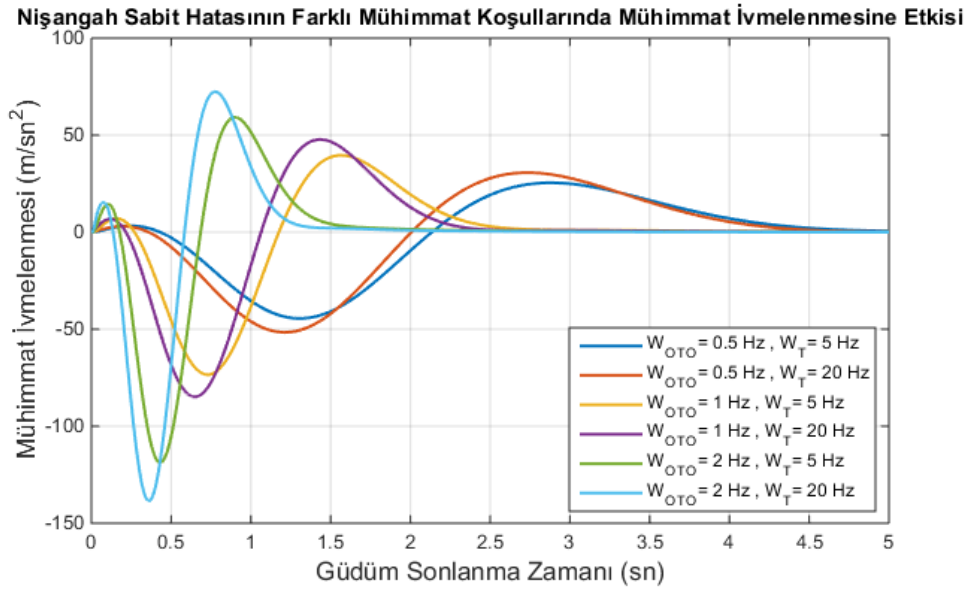
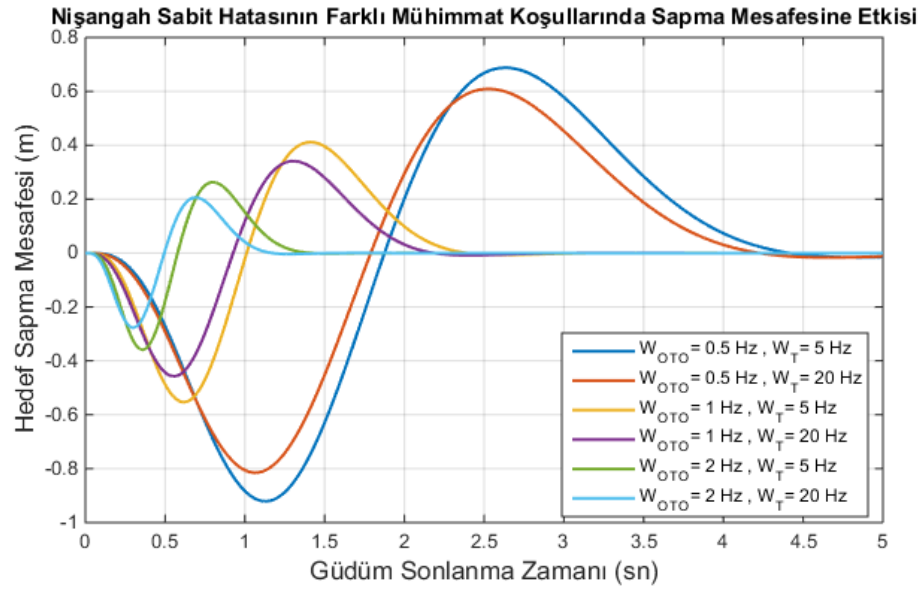
## 6.6. Nişangah Hattı Açısal Hatasının Sapma Mesafesine Etkisi

Nişangah hattı açısal hatasının nedenleri beşinci bölümde aktarılmıştır. Birim nişangah hattı açısal hatasının sapma mesafesindeki bütçesini belirlemek için angajman katımlı modeli ile benzetim çalışması yapılmıştır. İlgili benzetim parametreleri Çizelge 6.7, benzetim sonuçları ise Şekil 6.11 ile verilmiştir.

Çizelge 6.7. Sabit Nişangah Açısal Hatasının Başarıma Etkileri Benzetim Parametreleri

<b>Benzetim Parametresi</b>	<b>Değer</b>
Güdüm Seyir Katsayısı (N)	3
İvme Otopilotu Bant Genişliği ( $W_{oto}$ )	0.5 Hz – 1 Hz – 2 Hz

Takip Döngüsü Bant Genişliği ( $W_T$ )	5 Hz – 20 Hz
Kararlılaştırma Döngüsü Bant Genişliği ( $W_S$ )	30 Hz
Görüntüleyici Yenilenme Sıklığı ( $W_G$ )	50 Hz
Dönüölçer Bant Genişliği ( $W_J$ )	100 Hz
Birim Nişangah Hattı Sabit Hatası	1 derece



Şekil 6.11. Nişangah Sabit Hatasının Sapma Mesafesine Etkisi

Benzetim sonuçları, nişangah sabit hatasının sapma mesafesinde bütçesi olduğu ve bu bütçeyi belirleyen temel kriterin mühimmat ivme otopilotu olduğunu göstermektedir. Takip döngüsünün başarımını arttırmanın nişangah hatasından kaynaklı sapma mesafesini azalttığı görülmektedir. İvme otopilotu yüksek olan mühimmatlarda sapma mesafesindeki hataya bağlı olarak daha yüksek mühimmat ivmesi çekildiği gözlemlenmektedir. Takip döngüsü bant genişliğini yükseltmek sonlanma zamanındaki mühimmat ivmesini arttırmaktadır; ancak dikkat edilmelidir ki, nişangah hattı sabit açılmal hatasına bağlı ivmelenmenin büyüklüğünü belirleyen temel etken ivme otopilotudur.

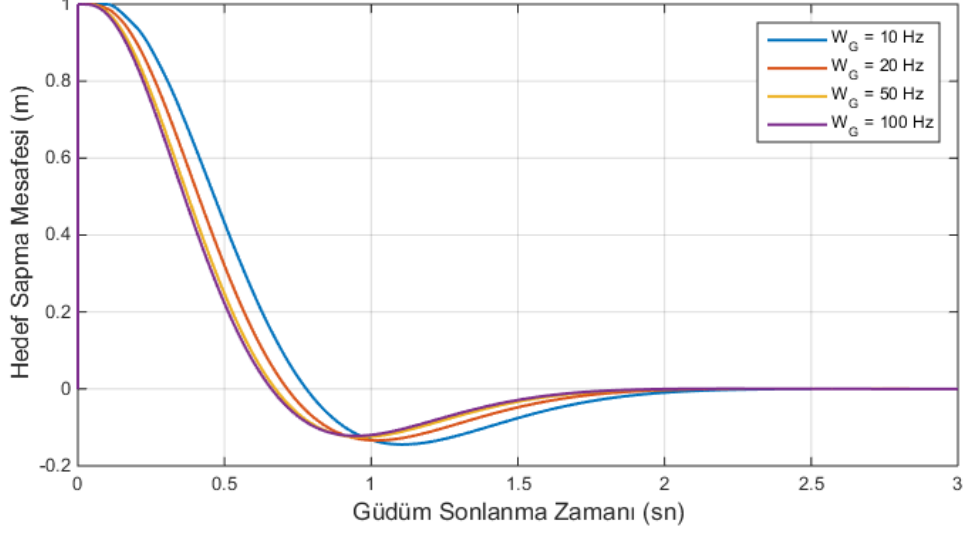
### 6.7. Görüntüleyici Çıktı Sıklığının Sapma Mesafesine Etkisi

Görüntüleyici çıktı sıklığının birim hedef ivmelenmesinde sapma mesafesine etkisi benzetim yoluyla test edilmiştir. İlgili benzetim parametreleri Çizelge 6.8. ile verilmiş, benzetim sonuçları Şekil 6.12 ile paylaşılmıştır.

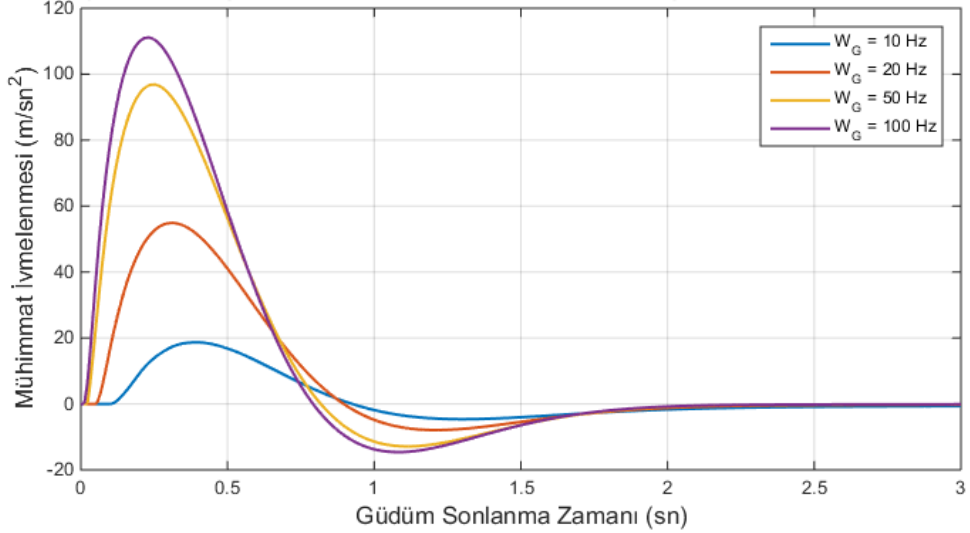
Çizelge 6.8. Görüntüleyici Çıktı Sıklığının Başarıma Etkileri Benzetim Parametreleri

Benzetim Parametresi	Değer
Güdümlü Seyir Katsayısı (N)	3
İvme Otopilotu Bant Genişliği ( $W_{oto}$ )	1 Hz
Takip Döngüsü Bant Genişliği ( $W_T$ )	10 Hz
Kararlılaştırma Döngüsü Bant Genişliği ( $W_S$ )	30 Hz
Görüntüleyici Yenilenme Sıklığı ( $W_G$ )	10 – 20 – 50 – 100 Hz
Dönüölçer Bant Genişliği ( $W_J$ )	100 Hz
Birim Mühimmat-Hedef Konum Kaçıklığı	1 m

Görüntüleyici Çıktı Sıklığının Birim Mühimmat-Hedef Konum Kaçıklığında Sapma Mesafesine Etkisi



Görüntüleyici Çıktı Sıklığının Birim Mühimmat-Hedef Konum Kaçıklığında Mühimmat İvmelenmesine Etkisi



Şekil 6.12. Görüntüleyici Çıktı Sıklığının Birim Mühimmat-Hedef Konum Kaçıklığında Sapma Mesafesine Etkisi ( $y_r(0) = 1$  metre)

Benzetim sonucundan görüldüğü üzere görüntüleyici çıktı sıklığını yükseltmek mühimmat-hedef konum kaçıklığından kaynaklı sapma mesafesini azaltmakta, sapma mesafesine verilen mühimmat ivme cevabını arttırmaktadır. Hedef hakkındaki bilginin yüksek sıklıkla güdüm birimine iletilmesi mühimmat başarımını arttırmıştır.



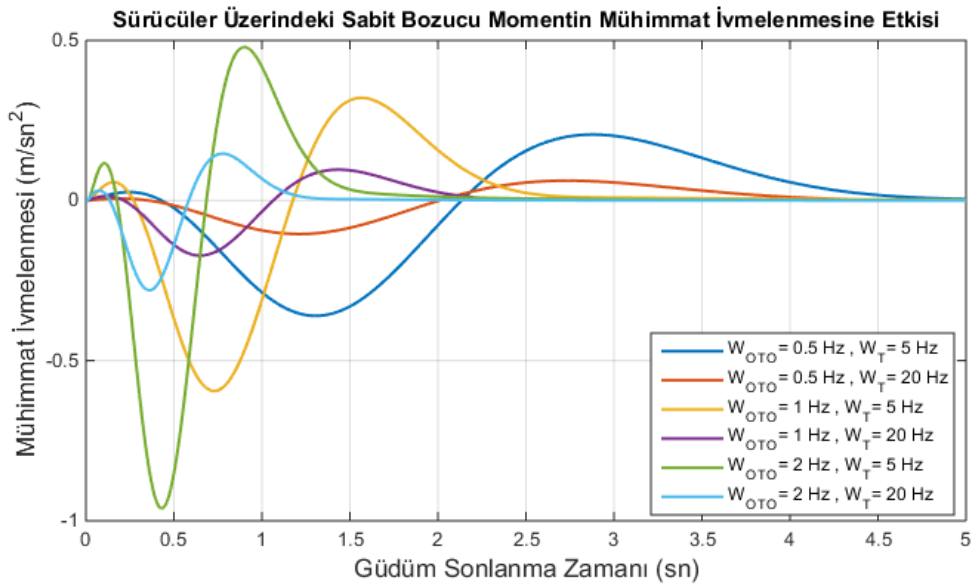
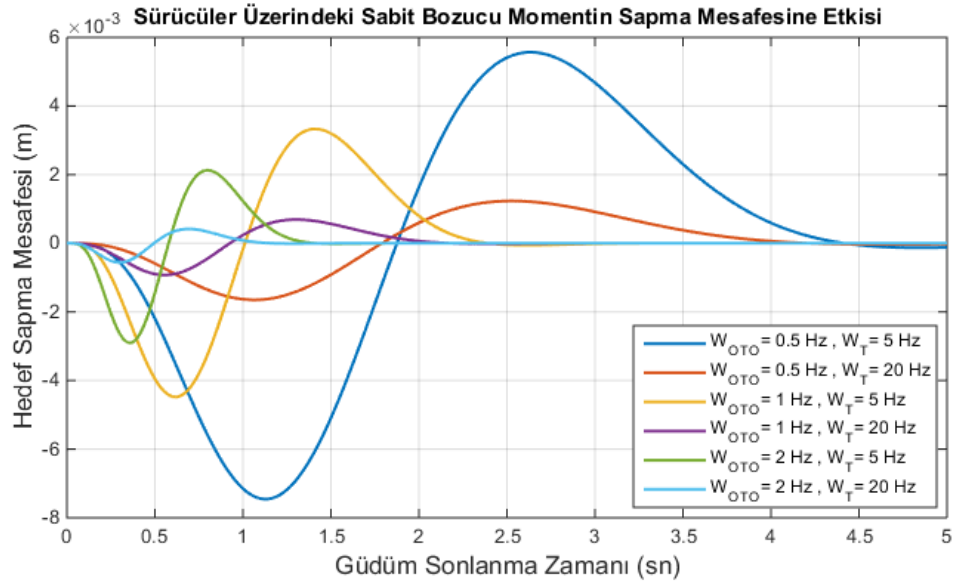
Görüntüleyici algılayıcılar mühimmat üzerindeki en pahalı sistemlerden biridir. Mühimmattan beklenen başarımlar kriterine göre bir görüntüleyici seçilmesi hem arayıcı başlığın hem de mühimmatın maliyet etkin bir yapıda olmasını sağlayacaktır.

### 6.8. Sürücüler Üzerindeki Sabit Momentin Sapma Mesafesine Etkisi

Mühimmatlar uçuş esnasında hedeflerine doğru yönelmek için agresif manevralar yapabilirler. Arayıcı başlığın ataletsel dengesizliğinden ötürü sürücüler üzerinde manevra esnasında sabit momentler oluşabilir. Bu moment arayıcı başlık ve güdüm arasında parazitik bir döngü oluşturup mühimmat başarımlarını etkileyebilir. Sürücü üzerindeki sabit momentin sapma mesafesindeki etkisini incelemek için benzetim yapılmıştır. Benzetim parametreleri 6.9. ile verilmiş, benzetim sonuçları Şekil 6.13 ile paylaşılmıştır.

Çizelge 6.9. Sürücü Üzerindeki Sabit Momentin Benzetim Parametreleri

<b>Benzetim Parametresi</b>	<b>Değer</b>
Güdüm Seyir Katsayısı (N)	3
İvme Otopilotu Bant Genişliği ( $W_{oto}$ )	0.5 – 1 – 2 Hz
Takip Döngüsü Bant Genişliği ( $W_T$ )	5 – 20 Hz
Kararlılaştırma Döngüsü Bant Genişliği ( $W_S$ )	30 Hz
Görüntüleyici Yenilenme Sıklığı ( $W_G$ )	50 Hz
Dönüölçer Bant Genişliği ( $W_J$ )	100 Hz
Sürücü Üzerinde Manevraya Bağlı Oluşan Birim Moment	1 mNm (miliNewton. metre)



Şekil 6.13. Sürücüler Üzerindeki Sabit Bozucu Momentin Sapma Mesafesine Etkisi

Sürücüler üzerinde sabit bozucu moment oluşumu arayıcı başlık döngüleri içinde parazitik bir döngü oluşturur ve bunun sonucunda güdüm birimine görüş açısı değişimi bilgisi doğru olarak aktarılamaz. Benzetim sonuçlarından görüldüğü üzere sürücüler üzerindeki sabit momentin sapma mesafesindeki bütçesini belirleyen temel etken takip döngüsü bant genişliğidir. Bunun yanında ivme otopilotunun yüksek bant genişliğe sahip

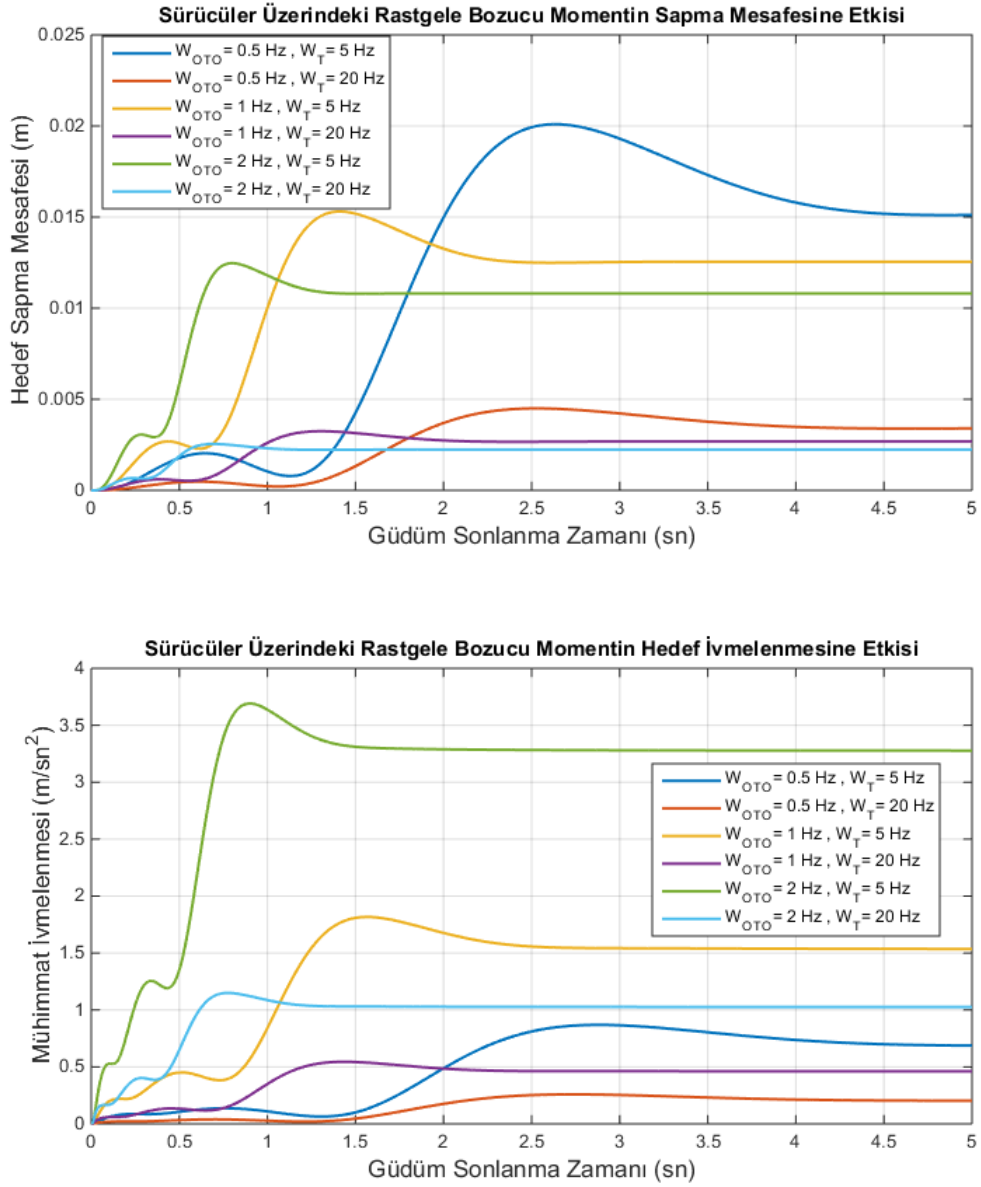
olması da sabit sürücü momentinin sapma mesafesindeki hata bütçesini küçültmekte, sapma mesafesindeki hataya karşı uygulanan mühimmat ivmelenmesini arttırmaktadır.

### 6.9. Sürücüler Üzerindeki Rastgele Momentlerin Sapma Mesafesine Etkisi

Mühimmatla beraber hareket eden arayıcı başlıklar uçuşları boyunca uçuş titreşimine maruz kalırlar. Uçuş titreşiminden kaynaklı arayıcı başlık sürücülerini üzerinde oluşan rastgele momentlerin sapma mesafesindeki etkilerinin incelenmesi için benzetim yapılmıştır. Benzetim parametreleri Çizelge 6.10. ile verilmiş, benzetim sonuçları Şekil 6.14 ile verilmiştir.

Çizelge 6.10. Rastgele Bozucu Uçuş Momentinin Başarıma Etkileri Benzetim Parametreleri

<b>Benzetim Parametresi</b>	<b>Değer</b>
Güdümlü Seyir Katsayısı (N)	3
İvme Otopilotu Bant Genişliği ( $W_{oto}$ )	0.5 – 1 – 2 Hz
Takip Döngüsü Bant Genişliği ( $W_T$ )	5 – 20 Hz
Kararlılaştırma Döngüsü Bant Genişliği ( $W_S$ )	30 Hz
Görüntüleyici Yenilenme Sıklığı ( $W_G$ )	50 Hz
Dönüölçer Bant Genişliği ( $W_J$ )	100 Hz
Sürücü Üzerinde Oluşan Rastgele Birim Bozucu Momentin Spektral Güç Yoğunluğu	1 (mNm) <sup>2</sup> /Hz



Şekil 6.14. Sürücüler Üzerindeki Rastgele Bozucu Momentin Sapma Mesafesine Etkisi

Rastgele bozucu sürücü momentlerinin sapma mesafesindeki etkileri verilmiştir. Görüldüğü üzere rastgele sürücü momentlerinin sapma mesafesindeki bütçesini belirleyen asıl etmen takip bant genişliğidir. Manevra kabiliyeti yüksek, otopilotu hızlı mühimmatlarda uçuş titreşimlerine bağlı arayıcı başlık sürücü hatalarının sapma mesafesindeki etkisi düşüktür.

## 7. SONUÇLAR

Bu tez kapsamında, akıllı mühimmatlardaki arayıcı başlık başarımının mühimmat başarımındaki rolü analiz edilmiştir. MATLAB Simulink ortamında arayıcı başlık, ivme otopilotu ve oransal seyir güdümü katımlı olarak modellenerek angajman katımlı modeli oluşturulmuş ve bu model üzerinden çeşitli benzetim çalışmaları yürütülmüştür.

Benzetim çalışmalarının başında arayıcı başlıklarda bulunan temel döngülerin başarımları incelenmiştir.

Kararlılaştırma döngüsünün bant genişliği yükseldikçe sapma mesafesinin düştüğü ancak bu düşüşün belirli bir bant genişliği değerinden sonra durduğu gözlemlenmiştir. Bu değer takip bant genişliğiyle ilintili olduğu belirtilmiş, kararlılaştırma döngüsü bant genişliğinin takip döngüsü bant genişliğinin 5 katından daha yüksek olacak şekilde tasarlanması önerilmiştir.

Benzetim çalışmalarında, arayıcı başlık takip döngüsü başarımını yükseltmenin sapma mesafesini azalttığı gözlemlenmiştir. Takip döngüsü bant genişliğini ivme otopilotu bant genişliğinin 20 katına kadar çıkarmak sapma mesafesinde düşüş sağlamıştır. Akıllı mühimmatların ivme otopilotları mühimmat kabiliyetine göre 0.5 Hz ile 4 Hz arasında değişmektedir. Görüntüleyici çıktı sıklıkları göze alındığı zaman, verilen değerlerin 20 katında takip döngüsü bant genişliğini yakalamak mümkün olmayabilir. Bunun yerine takip döngüsü başarımının mühimmat kabiliyetlerine göre belirlenmesi ve mümkün olduğunca yüksek bant genişlikte olması tasarım yaklaşımı olarak belirlenebilir.

Dönüölçer başarımının güdüme gönderilen verinin doğruluğunu arttırdığı ve bu sayede sapma mesafesini düşürdüğü görülmüştür. Çeşitli bant genişliğindeki dönüölçerler benzetim ortamında değerlendirilerek, mühimmat başarımlarına uygun olacak şekilde arayıcı başlık dönüölçerinin seçilmesi önerilmiştir.

Görüntüleyici çıktı sıklığı arttıkça güdüm birimine iletilen hedef verisinin sıklığının da arttığı yorumlanmış ve benzetim sonuçlarında bu etkinin sapma mesafesini düşürdüğü

gözlemlenmiştir. Görüntüleyici algılayıcıların maliyetli bir yapıda olmasından kaynaklı mühimmat isterlerine göre algılayıcı seçilmesi önerilmiştir.

Dönüölçer sabit ve rastgele hatalarının sapma mesafesinde bütçelerinin olduğu, ve bu bütçeleri belirleyen temel kriterin mühimmatın manevra kabiliyeti olduğu gözlemlenmiştir. Bir diğer deyişle otopilot bant genişliği yüksek olan mühimmatlarda dönüölçer hatalarının sapma mesafesindeki etkilerinin düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanında takip başarımını arttırmanın da dönüölçer hatalarının sapma mesafesindeki bütçelerini düşürdüğü gözlemlenmiştir.

Nişangah hattı hatasının sapma mesafesinde bütçesi olduğu ve düşük manevra kabiliyetli mühimmatlarda bu bütçenin daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Sürücü üzerinde oluşan sabit ve rastgele bozucu momentlerin sapma mesafesi üzerindeki etkileri incelendiği zaman, sabit bozucu momentin sapma mesafesindeki bütçesini belirleyen temel kriterin ivme otopilot başarımı, rastgele bozucu momentin sapma mesafesindeki bütçesini belirleyen temel kriterin takip başarımı olduğu gözlemlenmiştir.

Bu değerlendirmelerin ışığında, arayıcı başlığın mühimmat vuruş başarımında önemli bir yeri olduğu, maliyet etkin bir arayıcı başlık tasarımının mühimmat kabiliyet ve isterlerinin göz önüne alınarak yapılabileceği sonucuna varılmıştır. Bu tür bir çözümleme açısından katımlı model yaklaşımının çok uygun bir çerçeve sunduğu ortaya konulmuştur.

## 8. KAYNAKLAR

- [1] G. M. Siouris, Missile Guidance and Control Systems, Springer, Chapter 3,4, New York, **2004**.
- [2] P. Groves, Principles of GNSS, Inertial and Multisensor Integrated Navigation Systems 2nd Edition, Artech House, Chapter 4, **2013**.
- [3] H.O. Ünsal, Akıllı Mühimmatlar İçin Oransal Seyir ve Takip Güdümü Performansının Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2021**.
- [4] Q. Zaikang and L. Defu, Design of Guidance and Control Systems For Tactical Missiles, Chapter 7, CRC Press, Beijing, **2020**.
- [5] D. Küçükçelebi, Çoklu Görüş Alanına Sahip Kızılaltı Görüntüleyici Optik Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2015**.
- [6] Aselsan, Hisar Kızılötesi Arayıcı Başlık, [https://www.aselsan.com.tr/HISAR\\_ARAYICI\\_BASLIK\\_Hava\\_Savunma\\_Fuzesi\\_Kizilotesi\\_Arayici\\_Basligi\\_3134.pdf](https://www.aselsan.com.tr/HISAR_ARAYICI_BASLIK_Hava_Savunma_Fuzesi_Kizilotesi_Arayici_Basligi_3134.pdf) (Erişim Tarihi: **20 Kasım 2021**).
- [7] Roketsan, Laçın Güdüm Kiti, <https://www.roketsan.com.tr/tr/urunler/lacin-gudum-kiti-ve-lacin-pod-l-pod> (Erişim Tarihi: **20 Kasım 2021**).
- [8] E. Caner, Isı Güdümlü Füzelere Karşı Korunma Sistemleri ve Test Yöntemleri, <https://independent.academia.edu/ECaner> (Erişim Tarihi: **24 Kasım 2021**).
- [9] D. A. James, Radar Homing Guidance For Tacticle Missiles, Chapter 1, London, **1986**.
- [10] Anonim, Orta Menzil AIM-120 AMRAAM Hava Füzesi, <https://www.savunmasanayist.com/raytheona-768-2-milyon-dolarlik-amraam-siparisi/> (Erişim Tarihi: **25 Kasım 2021**)..
- [11] Anonim, Orta Menzil AIM-7 Sparrow Hava Füzesi, [http://www.military-today.com/missiles/aim\\_7\\_sparrow.htm](http://www.military-today.com/missiles/aim_7_sparrow.htm) (Erişim Tarihi: **25 Kasım 2021**).

- [12] Anonim, Lazer Optik Algılayıcı Yapısı, <https://www.osapublishing.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-58-28-7741> (Erişim Tarihi: **25 Kasım 2021**).
- [13] Anonim, MAM-L MAM-C mühimmatları, <https://www.millisavunma.com/roketan-mam-l-ve-mam-c/> (Erişim Tarihi: **27 Kasım 2021**).
- [14] Anonim, CİRİT ve LUMTAS Mühimmatları, <https://www.defenceturk.net/mam-l-l-umtas-ve-hisar-fotodedektorleri-tubitak-bilgemen> (Erişim Tarihi: **27 Kasım 2021**).
- [15] M. K. Masten, Inertially Stabilized Platforms for Optical Imaging Systems, IEEE Control Systems Magazine, 47 (2020) 64.
- [16] Anonim, Hellfire Füzesi, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lockheed\\_Martin\\_Longbow\\_Hellfire.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lockheed_Martin_Longbow_Hellfire.jpg) (Erişim Tarihi: **27 Kasım 2021**).
- [17] M. Zhang, Y. Guan and W. Zhao, Adaptive super-twisting sliding mode control for stabilization platform of laser seeker based on extended state observer, International Journal for Light and Electron Optics 199 (2019) 163337.
- [18] K. G. Eltohamy and C. Kuo, Analysis of Nonlinear Missile Guidance Systems Through Linear Adjoint Method, Smart Science 3 (2015) 4.
- [19] J. H. Laning and R. H. Battin, Random Processes in Automatic Control, New York, **1956**.
- [20] E. Milli, Taktik Füzelerde Kullanılan Sonlanma Güdümü Yöntemlerinin 3B Formülasyonları ve Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2012**.
- [21] P. Zarchan, Complete statistical analysis of nonlinear missile guidance systems - SLAM, Journal of Guidance and Control, 71 (1979) 78.
- [22] T. He and W. Chen, A New Interpretation of Adjoint Method in Linear Time-Varying System Analysis, IEEE 8th International Conference on CIS & RAM, China, 58 (2017) 63.
- [23] E. L. Peterson, Statistical Analysis and Optimization of Systems, New York, **1961**



- [24] R. M. Howe, System Engineering Handbook, McGraw-Hill, New York, Chapter 19, **1965**.
- [25] P. Zarchan, Tactical and Strategic Missile Guidance Sixth Edition, Vol. 239, AIAA, Reston, **2012**.
- [26] G. Alkan, Ataletsel Sensör Parametrelerinin Navigasyon Başarımına Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2021**.
- [27] Y. Özkazanç, Course Notes on Guidance, Control, and Navigation, Hacettepe Üniversitesi, **2000**