

T.C.
MİLLİ SAVUNMA ÜNİVERSİTESİ
ALPARSLAN SAVUNMA BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ASKERİ ELEKTRONİK SİSTEMLER MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
ELEKTRONİK HARP PROGRAMI

LAZER HÜZME TAKİP GÜDÜMLÜ TANK
MÜHİMMATININ MODELLENMESİ VE
ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MEHMET KUM

1881101

TEZ DANIŞMANI: DOÇ.DR. HALUK GÖZDE

ANKARA

HAZİRAN 2021

T.C.
MİLLİ SAVUNMA ÜNİVERSİTESİ
ALPARSLAN SAVUNMA BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ASKERİ ELEKTRONİK SİSTEMLER MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
ELEKTRONİK HARP PROGRAMI

LAZER HÜZME TAKİP GÜDÜMLÜ TANK
MÜHİMMATININ MODELLENMESİ VE
ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MEHMET KUM

1881101

TEZ DANIŞMANI: DOÇ.DR. HALUK GÖZDE

ANKARA

HAZİRAN 2021

ÖZGÜNLÜK RAPORU

Tez çalışmamın a) Kapak Sayfası, b) Giriş, c) Ana Bölümler ve ç) Sonuç kısmından oluşan toplam 112 sayfalık kısmına ilişkin, 15/06/2021 tarihinde şahsım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programında aşağıda belirtilen filtremeler uygulanarak alınmış olan özgünlük raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 2'dir.

Uygulanan Filtrelemeler:

- 1- Kaynakça Hariç
- 2- Alıntılar hariç/dahil
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Millî Savunma Üniversitesi Alparslan Savunma Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Çalışması Özgünlük Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Usul ve Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Mehmet KUM

12/07/2021

İmza

ETİK BEYANI

Millî Savunma Üniversitesi Enstitüleri Lisansüstü Tez Hazırlama Kılavuzu'nda yer alan kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir; aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Bu tezdeki düşünce, görüş, varsayım, sav veya tezler bana aittir; Millî Savunma Bakanlığı, Türk Silahlı Kuvvetleri, Kara Kuvvetleri Komutanlığı, Millî Savunma Üniversitesi ve Alpaslan Savunma Bilimleri Enstitüsü sorumlu tutulamaz.

Mehmet KUM

12/07/2021

İmza

Sevgili eşime ve kızıma



ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarımın başından sonuna kadar bilgi ve tecrübesi bana yol gösteren, sürekli destekleyen tez danışmanım sayın Doç.Dr. Haluk GÖZDE'ye sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunuyorum.

Yüksek Lisans eğitimim ve tez çalışmalarım süresince her türlü fedakârlığı göstererek yanımda olan eşime ve kızıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmalarım döneminde vermiş olduğu teknik bilgiler ile beni destekleyen birim arkadaşım Burak Eren BİRİNCİ'ye ve sağladığı olanaklar ve anlayışı için kurumum TÜBİTAK SAGE'ye teşekkürü borç bilirim.

Ankara; Haziran 2021

Mehmet KUM

İÇİNDEKİLER

Sayfa

| | |
|---|--------------|
| ÖZGÜNLÜK RAPORU | |
| ETİK BEYANI | |
| ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR | |
| İÇİNDEKİLER | vii |
| TABLolar LİSTESİ..... | ix |
| ŞEKİLLER LİSTESİ..... | x |
| SEMBOL LİSTESİ | xiv |
| KISALTMALAR | xvi |
| ÖZ..... | xvii |
| İNGİLİZCE ÖZ (ABSTRACT)..... | xviii |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 1.1. Güdüm Tipleri | 2 |
| 1.1.1. Hedef Güdümü | 2 |
| 1.1.2. Takip Güdümü | 4 |
| 1.1.3. Oransal Güdüm | 5 |
| 1.1.4. Komuta Bakış Hattı Güdümü..... | 6 |
| 1.2. Lazer Güdümlü Silahlar | 8 |
| 1.3. Literatürdeki Çalışmalar..... | 9 |
| 1.4. Tezin Amacı | 11 |
| 2. LAZER HÜZME TAKİP GÜDÜMÜ | 13 |
| 2.1. Lazer İşaretleyici | 14 |
| 2.2. Lazer Algılayıcı | 15 |
| 3. HEDEF ANGAJMAN KİNEMATİĞİ | 17 |
| 3.1. 2 Boyutlu Model..... | 17 |
| 3.2. 3 Boyutlu Model..... | 19 |
| 3.2.1. Mühimmat Modeli | 20 |
| 3.2.2. Hedef Modeli | 20 |
| 3.3. Kabuller | 21 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 3.3.1. | Atmosfer Modeli | 23 |
| 3.3.2. | Otopilot Dinamiği | 25 |
| 3.3.3. | Sensör Modellemesi | 26 |
| 4. | BENZETİM ORTAMI | 27 |
| 4.1. | Hedef Dinamiği | 28 |
| 4.2. | Mühimmat Dinamiği | 30 |
| 4.3. | Bakış Hattı Dinamiği | 32 |
| 4.4. | Güdüm Kontrol Bloğu | 35 |
| 4.5. | Otopilot Bloğu | 37 |
| 5. | KONTROLCÜ TASARIMI | 38 |
| 5.1. | İleri Kompansatör Tasarımı | 38 |
| 5.2. | PD Kontrolcü Tasarımı | 45 |
| 6. | SENARYOLAR | 48 |
| 6.1. | Senaryo 1 | 49 |
| 6.2. | Senaryo 2 | 54 |
| 6.3. | Senaryo 3 | 60 |
| 6.4. | Senaryo 4 | 66 |
| 6.5. | Senaryo 5 | 72 |
| 7. | TARTIŞMA | 79 |
| 8. | SONUÇLAR | 82 |
| | KAYNAKÇA | 85 |
| | Ek 1: Benzetim Başlatma ve Değerlendirme Yazılımı | 90 |
| | ÖZGEÇMİŞ | 93 |

TABLÖLAR LİSTESİ

| | Sayfa |
|---|-------|
| Tablo 3.1: Hıza Bağlı Sürüklenme Katsayıları. | 23 |
| Tablo 5.1: Yandönme Eksenı Kontrolcü Parametreleri. | 46 |
| Tablo 5.2: Yunuslama Eksenı Kontrolcü Parametreleri..... | 47 |
| Tablo 6.1: Senaryo Koşulları. | 48 |
| Tablo 7.1: Senaryo Sonuçları..... | 79 |

ŞEKİLLER LİSTESİ

| | Sayfa |
|--|-------|
| Şekil 1.1: Aktif Hedefleme..... | 3 |
| Şekil 1.2: Yarı Aktif Hedefleme..... | 4 |
| Şekil 1.3: Pasif Hedefleme..... | 4 |
| Şekil 1.4: Takip GÜdüm Geometrisi..... | 5 |
| Şekil 1.5: Oransal GÜdüm Angajmanı..... | 5 |
| Şekil 1.6: Manuel CLOS GÜdümü Çalışma Prensibi..... | 7 |
| Şekil 1.7: Yarı Otomatik CLOS GÜdümü Çalışma Prensibi..... | 7 |
| Şekil 2.1: LHTG Çalışma Prensibi..... | 13 |
| Şekil 2.2: GÜdüm Kontrol Döngüsü..... | 14 |
| Şekil 2.3: Lazer İşaretleyici..... | 14 |
| Şekil 2.4: Lazer Spot Oluşumu..... | 15 |
| Şekil 2.5: Dört Dilim Dedektör..... | 16 |
| Şekil 3.1: 2 Boyutlu Angajman Geometrisi..... | 17 |
| Şekil 3.2: Lazer Hüzme Takip GÜdümü Blok Diyagramı..... | 18 |
| Şekil 3.3: 3 Boyutlu Angajman Geometrisi..... | 19 |
| Şekil 3.4: Leopard 2 Tankı Boyutları..... | 22 |
| Şekil 3.5: COESA Atmosfer Modeli Bloğu..... | 23 |
| Şekil 3.6: Mühimmat Ölçüleri..... | 25 |
| Şekil 4.1: Benzetim Modeli..... | 27 |
| Şekil 4.2: Düzlemler Üzerinde Hedef Hızları..... | 29 |
| Şekil 4.3: Hedef Dinamiği..... | 29 |

| | |
|---|----|
| Şekil 4.4: Mühimmat Dinamiği Konum Bağlantıları..... | 30 |
| Şekil 4.5: Düzlemler Üzerinde Mühimmat Hızları..... | 31 |
| Şekil 4.6: Mühimmat Eksen Açılı ve Hız Bağlantıları..... | 32 |
| Şekil 4.7: Mühimmat ve Hedefin Menzil Hesaplamaları..... | 33 |
| Şekil 4.8: Mühimmat ve Hedef Bakış Hattı Yandönme Açılıları..... | 34 |
| Şekil 4.9: Mühimmat ve Hedef Bakış Hattı Yunuslama Açılıları..... | 35 |
| Şekil 4.10: Güdüm Kontrol Bloğu..... | 36 |
| Şekil 4.11: Yandönme Ekseni Güdüm Geometrisi..... | 36 |
| Şekil 4.12: Yunuslama Ekseni Güdüm Geometrisi..... | 37 |
| Şekil 4.13: Otopilot Bloğu..... | 37 |
| Şekil 5.1: İleri Kompansatör Bode Diyagramı..... | 39 |
| Şekil 5.2: Yandönme Ekseni Transfer Fonksiyonu Kutupları..... | 40 |
| Şekil 5.3: Kontrolcü Sonrası Yandönme Ekseni Transfer Fonksiyonu Kutupları..... | 41 |
| Şekil 5.4: Yunuslama Ekseni Transfer Fonksiyonu Kutupları..... | 41 |
| Şekil 5.5: Kontrolcü Sonrası Yunuslama Ekseni Transfer Fonksiyonu Kutupları..... | 42 |
| Şekil 5.6: Kontrolcü Benzetim Sonuçları..... | 43 |
| Şekil 5.7: Transfer Fonksiyonu Paydasının Kökleri..... | 44 |
| Şekil 5.8: Birim Basamak Cevabı..... | 44 |
| Şekil 5.9: Yandönme Ekseni Kontrol Döngüsü..... | 46 |
| Şekil 5.10: Yandönme Ekseni Adım Emri Cevabı..... | 46 |
| Şekil 5.11: Yunuslama Ekseni Kontrol Döngüsü..... | 47 |
| Şekil 5.12: Yunuslama Ekseni Adım Emri Cevabı..... | 47 |
| Şekil 6.1: İK Kontrolcüsü ile 3 Boyutlu Hedef ve Mühimmat Hareketleri..... | 49 |
| Şekil 6.2: PD Kontrolcüsü ile 3 Boyutlu Hedef ve Mühimmat Hareketleri..... | 50 |
| Şekil 6.3: İK Kontrolcüsü ile XY Düzleminde Hedef ve Mühimmat Hareketleri..... | 50 |
| Şekil 6.4: PD Kontrolcüsü ile XY Düzleminde Hedef ve Mühimmat Hareketleri..... | 51 |

| | |
|--|----|
| Şekil 6.5: İK Kontrolcüsü ile YZ Düzleminde Hedef ve Mühimmat Hareketleri..... | 51 |
| Şekil 6.6: PD Kontrolcüsü ile YZ Düzleminde Hedef ve Mühimmat Hareketleri.... | 52 |
| Şekil 6.7: Yandönme Ekseni Tarafından Yapılan İvmeler..... | 52 |
| Şekil 6.8: Yunuslama Ekseni Tarafından Yapılan İvmeler. | 53 |
| Şekil 6.9: Yandönme Ekseni Bakış Hattı Açılıarı. | 53 |
| Şekil 6.10: Yunuslama Ekseni Bakış Hattı Açılıarı..... | 54 |
| Şekil 6.11: İK Kontrolcüsü ile 3 Boyutlu Hedef ve Mühimmat Hareketi. | 55 |
| Şekil 6.12: PD Kontrolcüsü ile 3 Boyutlu Hedef ve Mühimmat Hareketi. | 56 |
| Şekil 6.13: İK Kontrolcüsü ile XY Düzleminde Hedef ve Mühimmat Hareketleri. . | 56 |
| Şekil 6.14: PD Kontrolcüsü ile XY Düzleminde Hedef ve Mühimmat Hareketleri. . | 57 |
| Şekil 6.15: İK Kontrolcüsü ile YZ Düzleminde Hedef ve Mühimmat Hareketleri... . | 57 |
| Şekil 6.16: PD Kontrolcüsü ile YZ Düzleminde Hedef ve Mühimmat Hareketleri.. | 58 |
| Şekil 6.17: Yandönme Ekseni Tarafından Yapılan İvmeler..... | 58 |
| Şekil 6.18: Yunuslama Ekseni Tarafından Yapılan İvmeler. | 59 |
| Şekil 6.19: Yandönme Ekseni Bakış Hattı Açılıarı. | 59 |
| Şekil 6.20: Yunuslama Ekseni Bakış Hattı Açılıarı..... | 60 |
| Şekil 6.21: İK Kontrolcüsü ile 3 Boyutlu Hedef ve Mühimmat Hareketi. | 61 |
| Şekil 6.22: PD Kontrolcüsü ile 3 Boyutlu Hedef ve Mühimmat Hareketi. | 61 |
| Şekil 6.23: İK Kontrolcüsü ile XY Düzleminde Hedef ve Mühimmat Hareketleri. . | 62 |
| Şekil 6.24: PD Kontrolcüsü ile XY Düzleminde Hedef ve Mühimmat Hareketleri. . | 62 |
| Şekil 6.25: İK Kontrolcüsü ile YZ Düzleminde Hedef ve Mühimmat Hareketleri... . | 63 |
| Şekil 6.26: PD Kontrolcüsü ile YZ Düzleminde Hedef ve Mühimmat Hareketleri.. | 63 |
| Şekil 6.27: Yandönme Ekseni Tarafından Yapılan İvmeler..... | 64 |
| Şekil 6.28: Yunuslama Ekseni Tarafından Yapılan İvmeler. | 64 |
| Şekil 6.29: Yandönme Ekseni Bakış Hattı Açılıarı. | 65 |
| Şekil 6.30: Yunuslama Ekseni Bakış Hattı Açılıarı..... | 65 |

| | |
|--|----|
| Şekil 6.31: İK Kontrolcüsü ile 3 Boyutlu Hedef ve Mühimmat Hareketi..... | 67 |
| Şekil 6.32: PD Kontrolcüsü ile 3 Boyutlu Hedef ve Mühimmat Hareketi..... | 67 |
| Şekil 6.33: İK Kontrolcüsü ile XY Düzleminde Hedef ve Mühimmat Hareketleri. . | 68 |
| Şekil 6.34: PD Kontrolcüsü ile XY Düzleminde Hedef ve Mühimmat Hareketleri. | 68 |
| Şekil 6.35: İK Kontrolcüsü ile YZ Düzleminde Hedef ve Mühimmat Hareketleri... | 69 |
| Şekil 6.36: PD Kontrolcüsü ile YZ Düzleminde Hedef ve Mühimmat Hareketleri.. | 69 |
| Şekil 6.37: Yandönme Ekseni Tarafından Yapılan İvmeler..... | 70 |
| Şekil 6.38: Yunuslama Ekseni Tarafından Yapılan İvmeler. | 70 |
| Şekil 6.39: Yandönme Ekseni Bakış Hattı Açılırları. | 71 |
| Şekil 6.40: Yunuslama Ekseni Bakış Hattı Açılırları..... | 71 |
| Şekil 6.41: İK Kontrolcüsü ile 3 Boyutlu Hedef ve Mühimmat Hareketleri..... | 73 |
| Şekil 6.42: PD Kontrolcüsü ile 3 Boyutlu Hedef ve Mühimmat Hareketleri..... | 73 |
| Şekil 6.43: İK Kontrolcüsü ile XY Düzleminde Hedef ve Mühimmat Hareketleri. . | 74 |
| Şekil 6.44: PD Kontrolcüsü ile XY Düzleminde Hedef ve Mühimmat Hareketleri. | 74 |
| Şekil 6.45: İK Kontrolcüsü ile YZ Düzleminde Hedef ve Mühimmat Hareketleri... | 75 |
| Şekil 6.46: PD Kontrolcüsü ile YZ Düzleminde Hedef ve Mühimmat Hareketleri.. | 75 |
| Şekil 6.47: Yandönme Ekseni Tarafından Yapılan İvmeler..... | 76 |
| Şekil 6.48: Yunuslama Ekseni Tarafından Yapılan İvmeler. | 76 |
| Şekil 6.49: Yandönme Ekseni Bakış Hattı Açılırları. | 77 |
| Şekil 6.50: Yunuslama Ekseni Bakış Hattı Açılırları..... | 77 |
| Şekil 6.51: Güncellenmiş İK Kontrolcüsüne Göre İvmeler..... | 78 |
| Şekil 7.1: Senaryolara Göre Eksik Mesafeler..... | 80 |

SEMBOL LİSTESİ

| | |
|--------------------------|---|
| A_R | : Lazer Spor Alanı |
| θ | : Lazer Sapma Açısı |
| R | : İşaretleme Menzili |
| $d_{i\text{şaretleyci}}$ | : Optik Açıklık |
| Q | : Dedektör Enerji Çıkış Sinyali |
| θ_M | : Mühimmat Bakış Hattı Açısı |
| R_M | : Mühimmat Menzili |
| d | : Mühimmatın Bakış Hattı Eksenine Uzaklığı |
| θ_T | : Hedef Bakış Hattı Açısı |
| K | : Kontrolcü Kazancı |
| \widehat{R}_M | : Ölçülen Mühimmat Menzili |
| α_M | : Yanal İvme |
| ϕ_M | : Mühimmat Yandönme Açısı |
| γ_M | : Mühimmat Yunuslama Açısı |
| ϕ_{OM} | : Mühimmat Bakış Hattı Ekseni Yandönme Açısı |
| γ_{OM} | : Mühimmat Bakış Hattı Ekseni Yunuslama Açısı |
| R_T | : Hedef Menzili |
| ϕ_T | : Hedef Yandönme Açısı |
| γ_T | : Hedef Yunuslama Açısı |
| ϕ_{OT} | : Hedef Bakış Hattı Ekseni Yandönme Açısı |
| γ_{OT} | : Hedef Bakış Hattı Ekseni Yunuslama Açısı |
| V_M | : Mühimmat Hızı |
| V_T | : Hedef Hızı |
| x_M | : Mühimmat x Ekseni Konumu |

| | |
|----------------|---|
| y_M | : Mühimmat y Ekseni Konumu |
| z_M | : Mühimmat z Ekseni Konumu |
| x_T | : Hedef x Ekseni Konumu |
| y_T | : Hedef y Ekseni Konumu |
| z_T | : Hedef z Ekseni Konumu |
| $\alpha_y M$ | : Mühimmat Yandönme Ekseni Yanal İvmesi |
| $\alpha_p M$ | : Mühimmat Yunuslama Ekseni Yanal İvmesi |
| $\alpha_y T$ | : Hedef Yandönme Ekseni Yanal İvmesi |
| $\alpha_p T$ | : Hedef Yunuslama Ekseni Yanal İvmesi |
| D_M | : Mühimmat Sürüklenme Kuvveti |
| ρ | : Hava Yoğunluğu |
| S | : Mühimmat Kesit Alanı |
| C_D | : Mühimmat Sürüklenme Katsayısı |
| m | : Mühimmat Kütlesi |
| V_R | : Rüzgâr Hızı |
| A | : Mühimmat Yüzey Alanı |
| $\omega_{n,y}$ | : Yandönme Ekseni Otopilotu Doğal Frekansı |
| $\omega_{n,p}$ | : Yunuslama Ekseni Otopilotu Doğal Frekansı |
| ξ | : Sönüm Katsayısı |
| τ | : Zaman Gecikmesi |
| z_0 | : Kontrolcü Sıfırı |
| p_0 | : Kontrolcü Kutbu |
| K_c | : Kontrolcü Kazancı |

KISALTMALAR

| | |
|---------------|---|
| CLOS | : Command Line of Sight (Komuta Bakış Hattı) |
| COESA | : Committee on Extension to Standard Atmosphere (Standart Atmosfere Genişleme Komitesi) |
| EM | : Eksik Mesafe |
| GOLIS | : Go onto Location in Space (Uzaydaki Konuma Giden) |
| GOT | : Go onto Target (Hedefe Giden) |
| GPS | : Global Positioning System (Küresel Konumlama Sistemi) |
| INS | : Inertial Navigation System (Ataletsel Seyrüsefer Sistemi) |
| İK | : İleri Kompansatör |
| LHTG | : Lazer Hüzme Takip Güdümü |
| LOS | : Line of Sight (Bakış Hattı) |
| PD | : Proportional Derivative (Oransal Türev) |
| SACLOS | : Semi-Automatic Line of Sight (Yarı Otomatik Komuta Bakış Hattı) |

ÖZ

Lazer Hüzme Takip GÜdümlü Tank Mühimmatının Modellenmesi ve Analizi

Mehmet KUM

Milli Savunma Üniversitesi, Alparslan Savunma Bilimleri Enstitüsü

Ankara, Haziran 2021

Bu çalışma kapsamında, envantere kullanılan 155 mm çapındaki genel maksat mühimmatına lazer hüzme takip güdüm kuralı uygulanarak güdüm yeteneği kazandırılması incelenmiştir. Bu maksatla, söz konusu mühimmatın açık kaynakta bulunan kütle, atalet, yüzey alanı ve sürtünme katsayıları kullanılarak mühimmat modeli oluşturulmuştur. Bu değerler ve olası hedeflerin hız ve manevra bilgileri birleştirilerek 3 boyutlu nokta kütle varsayımı ile MATLAB/Simulink ortamında güdüm benzetimi yapılmıştır. Benzetim, güdüm kontrol için bir hedef fonksiyonu oluşturularak 4. dereceden Runge Kutta yöntemi ile çözülmüştür. Ayrıca, mühimmatın yunuslama ve yandönme eksenleri için bir otopilot dinamiği modellenmiş, atmosfer modeli ve çevresel etkenler de modele eklenerek benzetim ortamı gerçeğe yaklaştırılmıştır. Güdüm kontrolü için ileri kompensatör (lead kompensatör) ve PD kontrolcüsü tasarımı yapılmış, hareketli ve hareketsiz hedefleri içeren beş farklı senaryo ile güdüm kontrol yönteminin başarımı doğrulanmıştır.

Anahtar Sözcükler: Güdüm Kontrol, Hüzme Takip Güdümü, Komuta Bakış Hattı Güdümü, CLOS, Güdümlü Mühimmatlar

Bilim Kodu : 90518

Sayfa Sayısı : 112

Tez Danışmanı: Doç.Dr. Haluk GÖZDE

İNGİLİZCE ÖZ (ABSTRACT)

Modelling and Analysis of Laser Bear Rider Guided Tank Munition

Mehmet KUM

National Defense University, Alparslan Institute of Defense Sciences

Ankara, June 2021

In the scope of this study, it was aimed to the acquisition of guidance capability was investigated by applying the laser beam tracking guidance rule to 155 mm diameter general purpose ammunition used in the inventory. For this purpose, the munition model has been established by using mass and inertia information, surface area, and friction coefficients of munition from open literature. By combining these values and the speed and maneuver information of possible targets, guidance simulation has been made in MATLAB / Simulink environment with the 3D point mass assumption. This model has been solved by 4th order Runge Kutta solver to achieve cost function for guidance rule. In addition of these, dynamic of autopilot has been modelled for pitch and yaw axis and atmosphere model and environmental effects have been also involved into model to get simulation that is more realistic. Lead compensator and PD controller have been designed for guidance control. The performance of the guidance control methods have been verified by simulation five different scenarios.

Key Words: Guidance and Control, Beam Rider Guidance, Command Line of Sight Guidance, CLOS, Guided Munitions

Science Code : 90518

Pages : 112

Supervisor : Assoc.Prof. Haluk GÖZDE

1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji ve savaş konseptlerinin değişmesi ile hassas saldırı yeteneğine sahip taktik mühimmatlar zafer kazanmada önemli bir rol oynamaktadır. Mevcut mühimmatlar kadar hassas vuruş yeteneğine sahip olmasalar da ilk güdümlü mühimmatlar 2. Dünya Savaşı'nda Almanlar tarafından kullanılmıştır. (Zarchan, 2012) Güdüm, tanım olarak hareket eden bir nesnenin istenilen yola veya hedefe göre yönlendirilmesi işlemidir. Güdüm işlemi otonom olarak veya insanlı olarak yapılabilir. Gdümlü ve güdümsüz füzenin birbirinden temel farkı: güdümlü füzenin atıldıktan sonra hedefe veya belirlenen rotaya göre kontrol edilebilmesidir. Gdümsüz füzeler de ise bütün ayarlamalar atılmadan önce yapılmaktadır ve atıldıktan sonra herhangi bir kontrol söz konusu değildir (Özkan, 2005).

Gdümlü silah sistemleri hareketli veya hareketsiz hedeflere karşı kullanılabildiği gibi belirli bir bölgeyi de hedef alabilir. Hedefe giden (GOT) silah sistemleri hedef takibi yapabilecek sensörlere sahiptir. Konuma giden (GOLIS) silah sistemleri ise yeri daha önceden belirlenmiş durağan yerlere atılırlar. Hedefe giden mühimmatlar hedefe kilitlenirken konuma giden mühimmatlar ise koordinata kilitlenir.

Tank ve topçu mühimmatları geleneksel kullanımda bir alanı baskılamak için kullanılan mühimmatlardır ve yüksek vuruş hassasiyetine ihtiyaç duymazlar. Ancak değişen savaş ortamları ve tehditler nedeniyle muharebe alanında hareketli ve durağan hedefler için yüksek hassasiyetli vuruş kabiliyeti isteri oluşmuştur. Özellikle sahada tehdit oluşturan tank gibi yüksek zırhlı hedeflerin etkisiz hale getirilebilmesi için yüksek hassasiyetli vuruşlar yapmak gerekmektedir. Bu ihtiyaçlar göz önüne alınarak farklı ülkelerde güdümlü tank ve topçu silahları geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları Amerikan menşeli M712 Copperhead, M982 Excalibur, Rus menşeli Krosnopol, Ukrayna menşeli Kvıtnyk-E olarak örnek verilebilir. M982 Excalibur GPS ve INS güdüm sistemine sahipken, diğerleri yarı aktif lazer hedefleme güdüm sistemi kullanmaktadır.

Aşağıda, öncelikle silah sistemlerinin kullandığı temel güdüm yöntemleri ele alınmış, daha sonra lazer güdüm yöntemi incelenmiştir. Ardından, literatür araştırması verilmiş ve tezin amacı ve bilimsel katkısı belirtilmiştir.

1.1. Güdüm Tipleri

Güdümlü mühimmatlar kullanım konseptleri ve operasyonel menzillerine göre iki grupta incelenebilirler. Bunlar:

- Taktik Füzeler
- Stratejik Füzeler

Taktik füzeler havadan havaya, havadan satıha, satıhtan havaya ve satıhtan satıha füzeler olup, kısa menzilli, düşük yıkım gücü olan ancak yüksek vuruş hassasiyetine sahip, hareketli ve durağan hedeflere karşı kullanılabilen silah sistemleridir. Bu tür füzeler hassas güdüm için lazer, kızılötesi veya radar arayıcı sensör sistemleri barındırır. Stratejik füzeler ise genel itibariyle balistik veya seyir füzeleri olup, daha uzun menzillerde hedef konumu tam olarak bilinen hedeflere karşı kullanılırlar. Taktik füzelere kıyasla tahrip gücü yüksektir ve savaş sonucuna direk etki edecek sistemlerdir (Moran & Altılar, 2005).

Taktik füze sistemlerinin kullandığı güdüm kuralları iki ana başlık altında incelenebilir. Bunlar:

- Hedef Güdümü (*Homing Guidance*)
- Takip Güdümü (*Pursuit Guidance*)
- Oransal Güdüm (*Proportional Guidance*)
- Komuta Bakış Hattı Güdümü (*Command LOS Guidance*)
- Hüzme Takip Güdümü (*Beam Riding Guidance*)

1.1.1. Hedef Güdümü

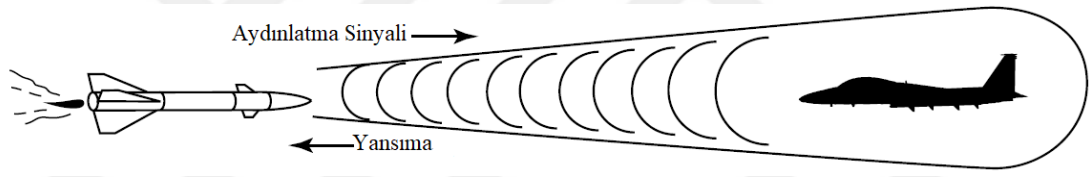
Hedef güdümü (*Ing. Homing Guidance*), hedefi kendi üzerindeki sensör ile algılayabilen, üzerindeki güdüm birimi ile kendi kontrol komutlarını üreterek hedefe ynlenebilen güdüm yöntemi olarak tanımlanır. Atıldıktan sonra dışardan bir müdahaleye ihtiyaç duymadan hedefe ynelebildiği için at unut füze sistemleri için oldukça kullanışlı bir güdüm yöntemidir. Hedef güdüm yöntemi kullanan füze sistemleri, hedeften gelen radar ve/veya kızılötesi sinyalleri görüntü işleme ve sinyal işleme algoritmaları kullanarak tespit ve takip eden sistemlerdir. Hedef tespit ve takip algoritmaları yüksek işlem gücü gerektirdiği için karmaşık ve gcl donanıma ihtiyaç duyarlar. Bunun yanında füze üzerindeki algılayıcı sensörlerin algılama limitlerinden ötürü hedef parametreleri her durumda tam olarak belirlenmemektedir (Siouris,

2004). Kullanılan hedef algılama tekniklerine göre hedef güdümün üç ayrı yöntemi vardır.

- Aktif hedefleme
- Yarı aktif hedefleme
- Pasif hedefleme

1.1.1.1. Aktif Hedefleme

Aktif hedefleme ile güdümlenen sistemlerde füze üzerinde verici ve sensör olmak üzere iki ekipman bulunur. Füze üzerinde bulunan verici ile hedef aydınlatılır. Hedeften yansıyan aydınlatma sinyalleri alıcı sensör ile alınıp işlendikten sonra hedef takibi ve güdüm yapılır. Aydınlatma sinyali radyo dalgaları ya da lazer ışınları şeklinde olabilir. Bu yöntemin dezavantajı hedef platformu üzerine sinyal gönderildiği için hedef, bunu fark edip karşı tedbir uygulayabilir. Çalışma konsepti Şekil 1.1’de gösterilmiştir (Siouris, 2004).

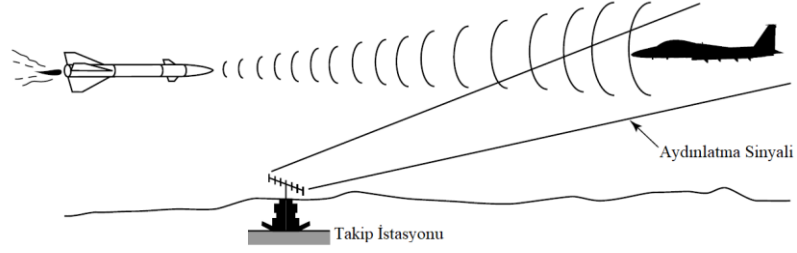


Şekil 1.1: Aktif Hedefleme.

(Siouris, 2004)’den uyarlanmıştır.

1.1.1.2. Yarı Aktif Hedefleme

Yarı aktif hedefleme metodunda hedef aydınlatması füzeden bağımsız ayrı bir platform üzerinden yapılır. Füze üzerinde sadece yansıyan sinyalleri alıcı sensör bulunur. Aydınlatma platformu kara, hava veya su üstü konuşlu olabilir. Bu yöntemin avantajı, hedefleme platformunun enerji kısıtı daha az olduğundan daha uzun mesafelerde hedefleme yapılabilmesidir (Siouris, 2004). Ayrıca işaretleme doğrultusu ile füze yaklaşma doğrultusu farklı olduğundan, hedefin karşı tedbir manevrası uygulaması daha zordur. Çalışma yöntemi Şekil 1.2’de gösterilmiştir.

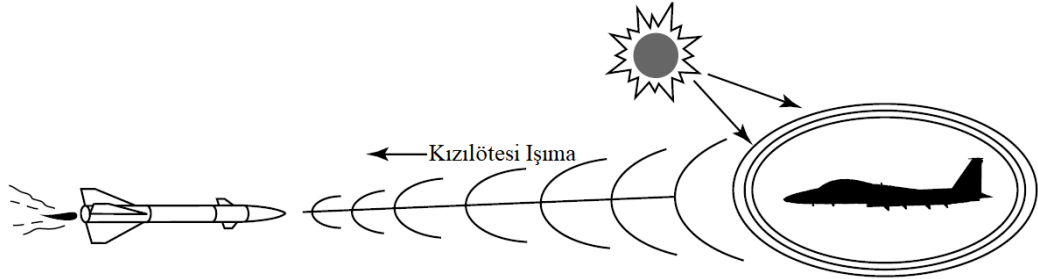


Şekil 1.2: Yarı Aktif Hedefleme.

(Siouris, 2004)'den uyarlanmıştır.

1.1.1.3. Pasif Hedefleme

Pasif hedefleme yöntemlerinde aydınlatma yapacak sisteme ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu yöntemde hedeften, doğal ya da yapay fenomenlerle açığa çıkan ya da yansıyan sıcaklık, ışık, ses ya da radyo dalgaları füze bulunan sensör ya da sensörler tarafından algılanır. Bu sistemlerde yaygın olarak hedeften yansıyan termal enerjiyi algılayan kızılötesi algılama sistemleri kullanılır. Kızılötesi hedefleme algoritması kullanan füze sistemleri kara, hava ve deniz hedeflerinin birçoğuna karşı etkin olarak kullanılabilir. Bu sistemin en büyük avantajı aktif yayılım yapmadığı için tespiti ve karşı tedbir uygulanması zor sistemlerdir. Dezavantajı ise temiz, bulutsuz, yağış ve kar olmayan atmosfere ihtiyaç duymasıdır. Hava koşulları kötüleştiğinde kızılötesi ışınlarda saçılmalar artacağından kullanılması mümkün olmamaktadır. Çalışma yöntemi Şekil 1.3'de gösterilmektedir.



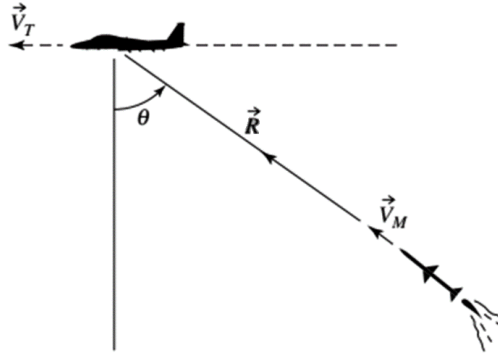
Şekil 1.3: Pasif Hedefleme.

(Siouris, 2004)'den uyarlanmıştır.

1.1.2. Takip Güdümü

Füzenin çarpışma olana kadar hedef yolu üzerinde kalmasını amaçlayan güdüm yöntemidir. Güdüm kuralı tarafından füze her zaman hedefe doğru yönlendirilir ve füzenin dönüş hızı görüş hattı değişim hızına eşittir. Hedefin takip edilen parametresine göre gövde takip ve hız takibi yapılarak iki ayrı şekilde uygulanabilir. Gövde takip kuralında füzenin boylamasına eksenini veya merkez çizgisi hedefe

yönlendirilir. Hız takip kuralında ise füzenin hız vektörü hedefin mevcut konumuna yönlendirilir. Hareketli hedeflere arkadan saldırı durumlarında gereken zor manevraları gerçekleştirmekte zorlandığı için takip güdümü çok kullanışlı değildir. Bir diğer dezavantajı ise hedefin kaçınmaya çalıştığı senaryolarda takip güdüm kuralı ile eksik mesafeyi azaltmak için yüksek yanal ivme isteri oluşmasıdır. Bu ivmelerin füzenin aerodinamik limitlerini aşması durumunda güdüm etkisiz kalmaktadır (Siouris, 2004). Çalışma geometrisi Şekil 1.4’de gösterilmektedir.

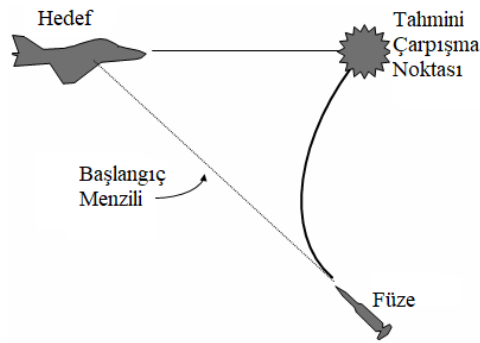


Şekil 1.4: Takip Güdüm Geometrisi.

(Siouris, 2004)’den uyarlanmıştır.

1.1.3. Oransal Güdüm

Oransal güdüm yöntemi hedefi direk olarak takip etmek yerine tahmini çarpışma noktası hesaplayarak hedefi vurmaya amaçlar. Bunu yaparken hedefe olan bakış hattının açısal hızı ile orantılı bir şekilde füze yönlendirilir. Füze üzerindeki arayıcı başlık sayesinde bakış hattı değişimini algılayarak efektif güdüm oranını belirler. Sabit hızlı hedeflere karşı yüksek başarımlar sağlarken ivmeli hareket eden hedeflere karşı etkinliği azalmaktadır (Siouris, 2004). Oransal güdümün hedef angajmanı Şekil 1.5’de gösterilmektedir.



Şekil 1.5: Oransal Güdüm Angajmanı.

(Siouris, 2004)’den uyarlanmıştır.

1.1.4. Komuta Bakış Hattı Güdümü

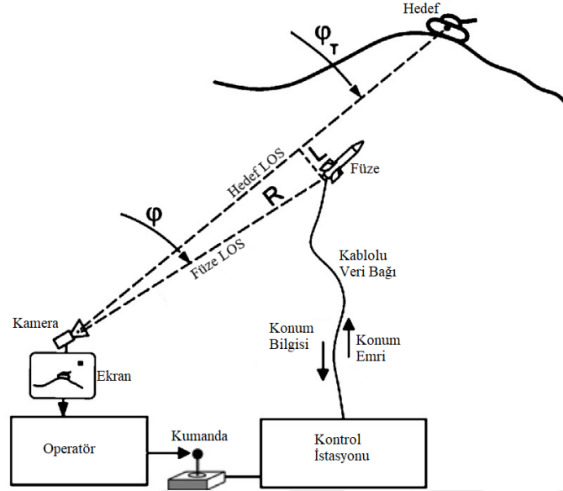
Komuta bakış hattı (*Ing.* Command Line of Sight - CLOS) güdüm yöntemi yüksek başarımlı vuruşlar yapabilmek için geliştirilmiş maliyeti etkin bir yöntemdir. Temelde, takip edici bir platform tarafından işaretlenen hedefi vurmaya yönelik olarak çalışır. Füze işaretleme yapılırken ki nişan hattı üzerinde kalmayı hedefler (Ouda vd., 2011). Bakış hattı güdüm yöntemi işaretleyici, füze ve hedef olmak üzere üç bileşenden oluştuğu için üç nokta güdüm kuralı olarak da bilinir. İşaretleme işlemi dar huzmeye sahip radar veya kodlanmış lazer sinyali ile yapılabilir. Füze üzerinde, işaretleme yapılan sinyali algılayabilmek için arka bölümünde sensörlere sahiptir (Szilvassy, 2014). Güdüm komutları işaretleyici platform üzerinde hesaplanarak kablo veya bir kablosuz veri bağı yolu ile füzeyle iletir. Diğer bir deyişle güdüm ve kontrol sistemleri füze dışında başka bir platformda bulunmaktadır. İşaretleme radar sinyali, kızılötesi veya elektro-optik sistemler ile yapılabilmektedir (Zarchan, 1997). Bu yöntemin en büyük avantajı görerek takip yapıldığı için vurma oranı yüksektir. Dezavantajları ise işaretleme yapılan sinyalin uzak mesafelerde dağılarak hedef takibini yapamaması ve hedefin kaçış manevraları yaptığı durumlarda takip yapamamasıdır. Yani, CLOS güdüm yöntemi daha çok kısa menzilli, sabit hızlı hedeflere karşı etkin olarak çalışmaktadır. Bakış hattı güdüm yöntemi hedef takibi ve füze kontrolünün yapılaş yöntemine göre üç ayrı kategoride incelenebilir. Bunlar:

- Manuel Komuta LOS Güdümü
- Yarı Otomatik Komuta LOS Güdümü
- Otomatik Komuta LOS Güdümü

1.1.4.1. Manuel Komuta LOS Güdümü

CLOS güdüm yönteminin ilk nesil kullanımınıdır. Füze, işaretleme yapılan LOS çizgisi üzerinde kalmaya çalışarak hatayı minimize eder. Hem hedef takibi hem de füze kontrolü manuel olarak operatör tarafından gerçekleştirilir. Operatör hem füzeyi hem hedefi takip ederek yönlendirme yapar. Operatör füze kontrolünü genellikle yönetme kolu veya tuşlar yardımıyla gerçekleştirir. Tamamıyla operatör becerisine bağlı olduğu için hedef takibi yapıp başarılı vuruş gerçekleştirmek zordur. Sadece gündüz kullanımına veya hava şartlarının uygun görüş mesafesinin yeterli olduğu durumlarda yavaş hedeflere karşı etkin olarak kullanılabilir (Ramakrishna ve Prasanna,

2018). Anti-tank füzeleri buna örnek verilebilir. Çalışma prensibi Şekil 1.6’da gösterilmektedir.

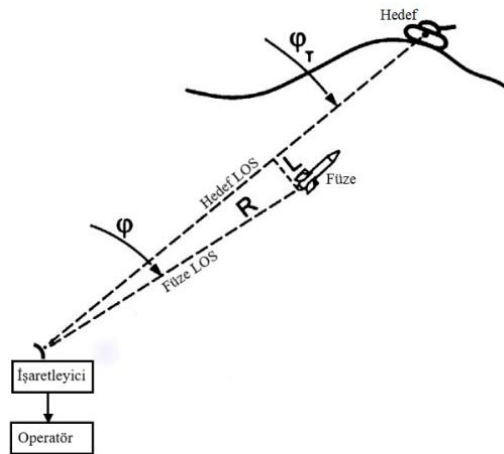


Şekil 1.6: Manuel CLOS Güdümü Çalışma Prensibi.

(Ramakrishna ve Prasanna, 2018)’dan uyarlanmıştır.

1.1.4.2. Yarı Otomatik Komuta LOS Güdümü

CLOS güdüm yönteminin ikinci nesil ve daha gelişmiş halidir. Operatör sadece hedef takibini gerçekleştirir, füze takip ve kontrolü otomatik olarak yer istasyonunda yapılabildiği için SACLOS bu noktada avantaj sağlamaktadır. İşaretleme kızılötesi veya elektro optik sistemlerle yapıldığı zaman hava koşullarından ve gece gündüz farkından etkilenmeden daha etkin kullanım sağlamaktadır (Ćosić ve diğ., 1999). Bu tez çalışması kapsamında çalışılan lazer hüzmeye güdüm yöntemi de bu kategoriye girmektedir. Detaylı anlatımı 2. Bölüm’de yapılmıştır. Çalışma prensibi Şekil 1.7’de gösterilmektedir.



Şekil 1.7: Yarı Otomatik CLOS Güdümü Çalışma Prensibi.

(Ramakrishna ve Prasanna, 2018)’dan uyarlanmıştır.

1.1.4.3. Otomatik Komuta LOS Güdümü

CLOS güdüm yöntemlerinin en gelişmiş halidir. Hedef işaretlemesi ve takibi ile füze güdüm ve kontrolü otomatik olarak gerçekleştirilir. Operatörden bağımsızdır ve bu nedenle at unut füzeler olarak da bilinirler. Diğer tekniklerden farklı olarak füze ön kısmında radar, kızılötesi veya elektro-optik arayıcı başlığa sahiptirler. Hedef takibi yapabilmek için gelişmiş sinyal işleme ve/veya görüntü işleme tekniklerini kullanırlar (Maini, 2018).

1.2. Lazer Güdümlü Silahlar

Lazer güdümlü silahlar kritik hedefleri yüksek hassasiyetle vurabilmek için 1960'lı yıllarda geliştirilmeye başlanmış ve Vietnam savaşında başarı ile kullanılmışlardır. İlk dönem uygulamalarındaki en büyük problem lazer üreteçlerin çok büyük ve güç ihtiyaçlarının yüksek olmasıydı. Menzilleri de kısa olduğu için öncü gözetleyicilerin hedeflere fazla yaklaşması gerekiyordu. Sürekli ışına yapan lazer işaretleyiciler yerine kodlu darbe lazer üreteçler geliştirildikten sonra işaretleyiciler saha kullanımı için daha uygun hale gelmiştir (Güner, 2004).

Basit arayıcı teknolojisi ve tasarımı, ucuz maliyeti ve yüksek hassasiyeti ile lazer güdümlü silahlar karadan havaya mühimmatlarda, anti tank füzelerinde ve birçok çeşitli platformlarda hareketli ve sabit hedeflere karşı yüksek başarımla kullanılmaktadırlar.

Lazer güdümlü mühimmatlar da diğer güdümlü mühimmatlara benzer alt sistemler barındırır. Temelde bu mühimmatlar 4 dilimli dedektör, optik bütün ve kodlanmış lazeri çözecek elektronik karttan oluşan sabit veya gimballi lazer arayıcı, hedef analizini yapıp ivme komutlarını üreten güdüm birimi, otopilot birimi, harp başlığı, tapa ve varsa itki sisteminden oluşur. Lazer güdümü için iki bileşen elzemdir. Bunlar; lazer işaretleyici ve lazer arayıcıdır. Operatör yardımı ile işaretleyiciler hedef üzerini kodlanmış lazer ışınları ile aydınlatır. Silah sistemi ise güdüm algoritması ve arayıcı yerleşimine göre hedeften yansıyan lazer ışınına veya direk işaretleyiciden çıkan ışına kilitlenerek hedefi vurmayı amaçlar.

Hedefe kilitlenme türüne göre lazer güdümlü silahlar atılmadan önce hedefe kilitlenenler ve atıldıktan sonra hedefe kilitlenenler olarak iki gruba ayrılabilirler. Atılmadan önce hedefe kilitlenen mühimmatlarda lazer arayıcı, platformdan

ayrılmadan önce lazer sinyaline kilitlenir ve uçuş boyunca hedefi takipte kalır. Atıldıktan sonra hedefe kilitlenen sistemlerde ise mühimmat, platformdan ayrıldıktan sonra lazer sinyaline kilitlenir ve hedefi vurur. Bu tür mühimmatlar hibrit güdüm sistemine sahiptir ve lazer güdümünü terminal fazında kullanırlar. Bu çalışmada incelenecek lazer hüzme güdüm yöntemi atılmadan önce hedefe kilitlenen ve işaretleyiciden çıkan sinyali direk takip eden bir güdüm yöntemidir.

Lazer güdümlü sistemlerin en büyük dezavantajı atmosferdeki kötü koşullardan kolay etkileniyor olmasıdır. Dumanlı ve tozlu koşullarda lazer ışınları havadaki parçacıklara çarparak saçınım yaparlar. Bu saçınım nedeniyle hem arayıcı hem de işaretleyici istenilen performansta çalışmayabilir. Yağmur, kar ve sis gibi doğa olayları da lazer arayıcının ve işaretleyicinin görüş alanına negatif etkisi olduğu için kullanımına kısıtlama getirmektedir. Bu tür ortamlarda lazer ışınının gücü düşeceğinden ve algılama mesafesi kısılacığından lazer güdüm yapılabilecek süre de düşecektir. Bu nedenle vuruş oranı da benzer şekilde azalacaktır (Joint Chiefs Of Staff Washington DC, 1999).

1.3. Literatürdeki Çalışmalar

Bu tezde ele alınan hüzme takip güdüm yöntemi hem donanım hem de algoritma olarak geliştirmesi diğer güdüm yöntemlerine göre daha basit ve kullanışlı olduğu için güdümlü füze sistemlerinin erken dönem çalışmalarında uygulanmaya başlanmıştır.

1960 yılında Clemow, Missile Guidance kitabında hüzme güdüm yöntemini detaylı olarak ele almış ve açıklamıştır (Pastrick ve diğ., 1979).

Bu yöntem ilk uygulamalarında hava-hava ve kara-hava angajmanlarında kullanılan füzelerde uygulanmaya başlanmıştır. İlk uygulamalarda füzelerin aerodinamik yapısından ötürü yüksek irtifalarda ivme komutlarına hızlı cevap verememesi nedeniyle bu alanda çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda geleneksel kanat kanatçık tasarımından, hüzme güdümüne özel optimum tasarımlara geçiş yapılmıştır (Staros, 1959).

Hüzme sinyali radar veya kızılötesi bantta yayınım yapan lazer ışını tarafından oluşturulmaktadır. Füze bu sinyali takip ederken sinyaldeki bozulmalardan etkilenecek başarımı düşmekteydi. Bu sorunu çözebilmek için 1976 yılında yapılan çalışma sonucunda güdüm algoritmasına stokastik optimal kontrol yöntemi ve Kalman filtresi

eklenerek takip sinyalindeki bozulmalara karşı daha gürbüz hale gelmiştir (Kain ve Yost, 1977).

Güdümlü kontrol geliştirilmesi çalışmalarında benzetim ortamı kurulmasının temelini hedef ve füze hareketlerinin modellenmesi almaktadır. Bu hareket modelleri doğrusal olmayan dinamik denklemlerden oluştuğu için çözülmesinde farklı yaklaşımlar kullanılmaktadır. Bu yaklaşımlardan biri Maggi denklemleri holonomik olmayan dinamik sistemlerin modellenmesinde kullanılmaktadır. Maggi denklemleri temelde Lagrange ve Hamilton mekaniğinin bir uzantısı olarak geliştirilmiştir. Doğrusal olmayan dinamik denklemlerin oluşturulması ve çözümü için Maggi denklemleri kullanılmış ve hüzme takip güdümlü kuralı başarı ile uygulanmıştır (Maryniak ve diğ., 2005).

Hiperonik hızlara çıkabilen silah sistemlerinin geliştirilmesi ve bu sistemlere güdümlü yeteneğinin kazandırılması 2000'li yıllardan sonra önemli bir araştırma alanı olmaya başlamıştır. 6.5 Mach üzerinde seyir yapabilen, kısa menzildeki hedefleri yüksek hassasiyet ile vurmaya amaçlayan bir silah sistemi için eksen-dışı hüzme güdümlü yöntemi modellenmiş ve kurulan döngüde donanım altyapısı ile başarımlı doğrulanmıştır (Châteauneuf ve diğ., 2005).

Hüzme takip güdümlü yöntemi uygulanırken sistemlerin doğası gereği bazı belirsizlikler ve dinamikler oluşmaktadır. Bunun için hedef belirsizliklerini ve kontrol döngüsü dinamiklerini dahil ederek dördüncü dereceden durum denklemleri çıkarılarak ikinci dereceden süper bükümlü kayan kipli bir kontrolcü geliştirilmiştir. Sıfır efor eksik mesafe, durum denkleminin geçiş matrisine göre çarpışma mesafesi dahil edilmeden yeniden tanımlanmıştır. Benzetim sonuçlarına göre eksik mesafe, kısıtlı zaman içerisinde herhangi bir aşım yapmadan sifira yaklaşmıştır (T. Wang ve Zhou, 2009).

Hesaplama kabiliyetleri ve uygulamaları matematikteki gelişmelere paralel olarak gürbüz kontrolcü çalışmaları da gelişme kaydetmiştir. Gürbüz kontrolcü yöntemi bozucular ve belirsizlikler altında yüksek başarımlı göstermektedir. Bu yöntemi aerodinamik ve rüzgâr hızı bozucuları ve ölçüm belirsizlikleri ile birlikte modelleyerek hüzme takip güdümlü algoritması içerisinde kullanılmış ve başarımlı sağlanmıştır (Ouda ve diğ., 2011). Yine benzer bir çalışmada gürbüz kontrolcü bulanık adaptif yaklaşımı ile tasarlanarak daha düşük eforla daha hızlı tepki sağlayan bir kontrolcü geliştirilmiştir (Sadeghinasab ve diğ., 2016).

Lazer hüzme takibi yapan mühimmatlar için, lazer ışını toplayan optik sistem, yüksek hassasiyetli vuruşlar yapabilmesi için kritik önem taşır. İşaretleyiciden gelen lazer ışınının algılanmasında yaşanan sorunlar stabilizasyon problemlerine yol açmaktadır. Optik sistemin performansını arttırmak ve güdüm sürekliliğini sağlamak için zoom mekanizmasına sahip bir optik sistem tasarlanmıştır (Qu ve diğ., 2016; Yan ve diğ., 2014).

Hüzme takip güdüm yönteminin başarı ile uygulanabilmesi için uçuş süresi boyunca işaretleme ihtiyacı bulunmaktadır. İşaretleyicinin savaş ortamında yok edilmesi veya bir şekilde işaretleme sinyali kesilmesi durumunda başarımlar sağlanamamaktadır. Bu durum yaşandığında füzenin hedefe ulaşabilmesi için sisteme gelen işaretleme sinyalini kaydeden hafıza ve küçük aktif hedefleme güdüm algoritması entegre edilmiştir. Böylelikle kriz anında füze hedefe hafızasındaki veriler ve hedef güdüm yöntemi kullanarak ulaşması sağlanmıştır (Debnath, 2016).

Askeri uygulamalarının yanında alan gözetleme, arazi tarama ve fotoğraflama, doğal afet durumlarında hasar tespiti gibi alanlarda kullanılan insansız hava araçlarının koordineli çalışabilmesi için hüzme takip güdüm yöntemi geliştirilmiştir. Bazı durumlarda İHA'ların bir araya gelerek veri toplayıp bilgi paylaşımında bulunması gerekmektedir. İHA'ları bir randevu noktasına getirebilmek için hüzme takip yöntemi bir lider İHA belirlenerek uygulanmıştır (Parayil ve Ratnoo, 2019).

Hedef işaretleme hataları ve kalıcı durum takip hatalarındaki kısıtlamalardan ötürü hüzme takip güdümlü silah sistemlerinin uzun menzillerde ve yüksek manevra kabiliyetli hedeflere karşı çok kullanışlı olmamaktadır. Bu sorunu çözmek için aynı hüzme takip eden, aralarında hata bilgisini paylaşan çoklu füzeler ardı ardına güdümlendirilmektedir. Aralarındaki hata paylaşımı sayesinde bakış hattındaki sapmaları daha iyi düzeltmekte ve kalıcı durum hatasını minimize etmektedir (Guodong ve diğ., 2019).

1.4. Tezin Amacı

Cephe savaşlarında kullanılan geleneksel tank ve topçu mühimmatları temel eğik atış prensiplerini kullanarak hedefi vurmayı amaçlamaktadır. Savaş ortamında vuruş hassasiyeti, gelişen teknoloji ve değişen muharebe konsepti ile birlikte önemli bir güç çarpanı haline gelmiştir. Tank ve top sistemlerine kazandırılan güdümlü silah

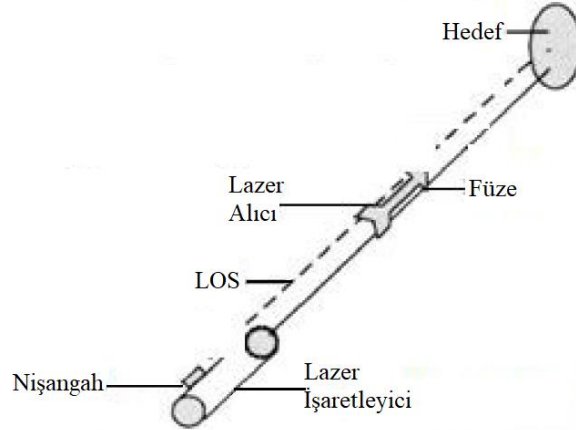
yetenekleri düşman hedeflerini daha az mühimmat harcayarak etkin şekilde etkisiz hale getirmektedir. Bu bağlamda tez çalışması kapsamında, envanterde kullanılan 155 mm çapındaki genel maksat tank mühimmatına lazer hüzme takip güdüm kuralı uygulanarak güdüm yeteneği kazandırılması konusu incelenmiştir.

Çalışma kapsamında mühimmatın açık literatürde bulunan kütle, atalet, yüzey alanı ve sürtünme katsayıları kullanarak mühimmat modeli oluşturulmuştur. Bu değerler ve olası hedeflerin hız ve manevra bilgileri birleştirilerek MATLAB/Simulink ortamında nokta kütle model benzetimi yapılmıştır. Bu model 4. dereceden Runge Kutta yöntemi ile çözülerek 3 boyutta 5 farklı atış senaryosu ile başarımlar incelenmiştir. Kontrol yöntemi olarak klasik kontrol yöntemleri ile hareketli ve hareketsiz hedeflere karşı düşük eksik mesafe başarımları hedeflenmiştir. Benzetimi gerçeğe yakın hale getirmek için ölçüm hatası ve gecikmeleri, atmosferik etkiler ve otopilot modeli benzetime eklenmiştir.

Tez kapsamında geliştirilen kinematik güdüm algoritması ile hem tank hem de topçu mühimmatlarının lazer hüzme güdümü ile kullanılabilirliği ortaya konmuştur. Tez sonucunda ortaya çıkan kazanımlar, sistem mühendisliği seviyesinde geliştirilebilecek olası silah sistemlerine girdi ve ister oluşturabilecektir.

2. LAZER HÜZME TAKİP GÜDÜMÜ

Yarı otomatik komuta LOS güdüm tekniklerinden biri olan lazer hüzme takip güdümü, mühimmatın işaretleyicinin LOS hattı üzerinde kalmasını hedefler. Karşı tedbir karıştırmalarına karşı dayanıklı oluşu, basit yapısı ve düşük maliyeti ile yaygın olarak kullanılmaktadır (Guodong ve diğ., 2019). Bu hat üzerinde kalmak için gerekli yanıl ivme güdüm komutlarını füze kendi içerisinde üretir. LHTG yönteminde işaretlemeler genellikle kızılötesi spektrumda kısa dalga boyuna (700 nm – 1400 nm) denk gelen lazer ışını kullanarak yapılır. Bu lazer ışınının algılanabilmesi için füzenin arka tarafında kısa dalga boyunda algılama yapabilen kızılötesi dedektör ve bir mercek sistemi bulunmaktadır (P. Wang ve diğ., 2018; Yan ve diğ., 2014). Sensör sistemi füzenin burun kısmına yerleştirilmediği için füze burnu aerodinamik sürtünmeyi en aza indirecek şekilde tasarlanabilmektedir (Lin, 1991). LHTG çalışma prensibi Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1: LHTG Çalışma Prensibi.

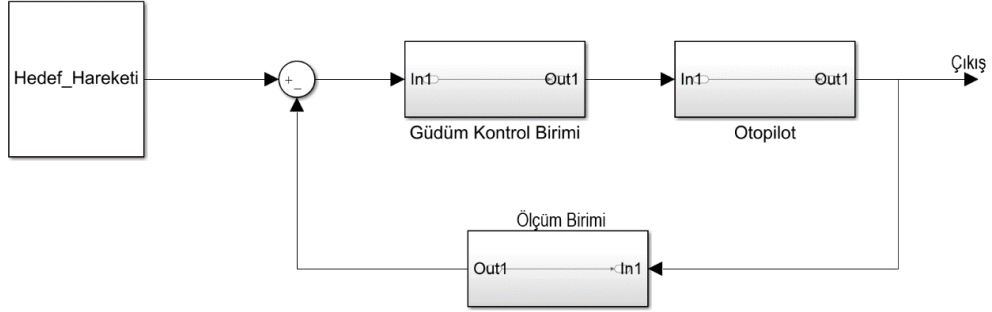
(Qu ve diğ., 2016)'dan uyarlanmıştır.

LHTG yöntemi kullanan bir füze sistemi temelde şu alt bileşenleri içerir:

- Lazer Algılayıcı
- GPS&INS Birimi
- Güdüm İşlem Birimi
- Otopilot

Lazer alıcı, işaretleyiciden gönderilen sinyali alarak LOS eksenine göre açı bilgisi türeterek güdüm işlem birimine girdi yapar. GPS&INS birimi füzenin referans eksene göre konum bilgisini ölçerek güdüm işlem birimine girdi yapar. Güdüm işlem birimi

aldığı girdileri içerisindeki gömülü algoritmaya göre işleyerek yanal ivmelenme komutlarını üretir. Otopilot birimi ise güdüm biriminden çıkan ivme emirlerini açılı komutuna dönüştürerek kontrol yüzeylerine emir gönderir. Bu şekilde güdüm kontrol döngüsü kapatılmış olur. Şekil 2.2’de güdüm kontrol döngüsü gösterilmektedir.



Şekil 2.2: Güdüm Kontrol Döngüsü.

2.1. Lazer İşaretleyici

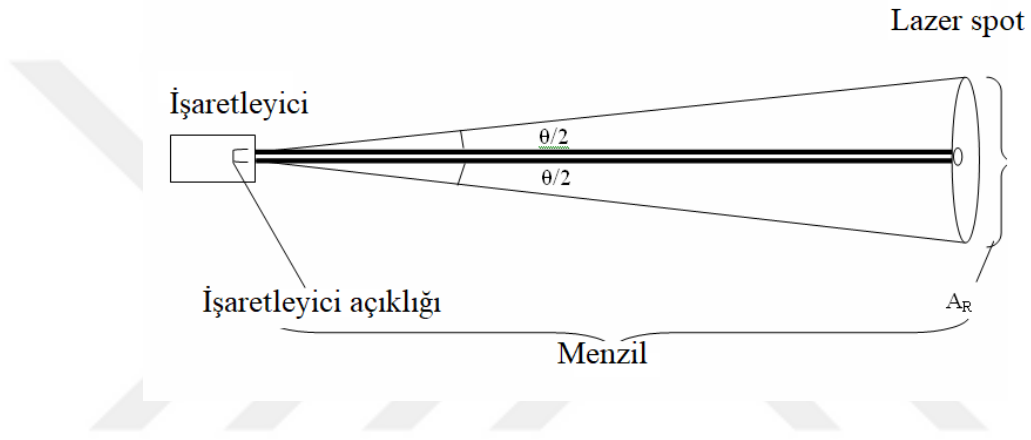
Lazer işaretleyiciler modern mühimmat hedefleme ve ateş kontrol sistemleri için gerekli cihazlardır. Bu sistemlerin temel görevi lazer sinyali üreterek istenilen menzildeki hedef veya bölgeleri işaretlemektir. İşaretleyiciler çok kısa zaman aralığında yüksek darbe güçlü, koşutlanmış, dar hüzmeli ürettiği lazer ışınlarını hedef üzerine doğrultur. İşaretleyiciler askeri ihtiyaçları karşılamak ve silah sistemlerinin hedef vuruş hassasiyetlerini arttırmak için geliştirilmiştir. Özellikle hedef çok küçük ve iyi savunuluyor ise bu sistemler büyük avantaj sağlamaktadır.

İşaretleme sistemleri üzerindeki alıcı ve verici birimleri sayesinde işaretlemenin yanında mesafe ölçümü de yapabilirler. İşaretleyiciler kara, deniz ve hava platformlarında farklı yapılarla bulunabilirler. Kara konuşlu taşınabilir bir işaretleyici Şekil 2.3’de gösterilmiştir. Farklı konuşlu sistemlerde işaretleyici içerisinde farklı dalga boylarında görüntüleme yapabilen elektro-optik sistemler de bulunmaktadır.



Şekil 2.3: Lazer İşaretleyici.

İşaretleme için kullanılan sistemler genellikle kısa dalga boyu aralığında, darbe süresi 10-20 ns olan ve sapma açısı düşük olan lazer ışınları kullanırlar. Üretilen lazer ışınları çıkış penceresi öncesindeki uygun optik sistemler ile çok küçük çaplarda kolime edilerek düşük sapma açıları ile yüksek menzilde işaretleme yapabilirler. Lazer üreticinin ve optik sistemlerin doğası gereği sapma açısının tamamen sıfırlanması mümkün değildir. Bu nedenle her işaretleme sisteminin kendine has ışın sapma karakteristiği vardır. Işınlar işaretleme sisteminin çıkışındaki dar optik açıklıktan küçük dairesel bölümler olarak gönderilir, bu daire çapı mesafe arttıkça genişler. Lazer spot genişliğinin, menzil ve optik açıklığa bağlı ilişkisi Şekil 2.4’de gösterilmiştir.



Şekil 2.4: Lazer Spot Oluşumu.

İşaretleme sistemi ve hedefin aynı yükseltide olduğu kabul edilmiştir. Bu durumda lazer spot büyüklüğü şöyle bulunabilir:

$$A_R = \frac{\pi(\theta R + d_{\text{işaretleme}})^2}{4} \quad (2.1)$$

Denklem 2.1’de R işaretleme sistemi ve hedef arasındaki mesafe, θ sapma açısı, $d_{\text{işaretleme}}$ işaretleme sistemi optik sistem açıklığını belirtmektedir.

2.2. Lazer Algılayıcı

Lazer algılayıcılar hedeften yansıyan ve direk olarak işaretleme sisteminin çıkışından çıkan sinyali algılayan foto dedektörlerdir. Optik sistemin odak uzunluğu ve gelen ışının optik ekseninden uzaklığı biliniyorsa bakış hattı ile füze eksenindeki açı hesaplanabilmektedir (Joint Chiefs Of Staff Washington Dc, 1999). Kullanılan yarı

iletken türüne ve algılama tekniklerine göre çok çeşitli dedektör tipleri mevcuttur. Bu çalışmada yaygın olarak kullanılan 4 dilim dedektörden bahsedilecektir.

4 dilim denmesinin sebebi algılayıcı yüzeyinin 4 eşit alana bölünmesinden kaynaklanmaktadır. Her bölme birbirinden bağımsız olarak üzerine gelen ışının gücüne göre çıkış sinyali oluşturmaktadır. Bütün bölmelere eşit seviyede enerji düştüğünde, mühimmat bakış hattı ile tam eksnendiğini anlamaktadır. Bakış hattı ekseninde bir kayma olduğu durumda bazı dilimler daha fazla enerji alırlar. Bu tür algılayıcıların dezavantajları; eğer lazer spot genişliği çok küçük olursa, ışın dilimler arasına düşerek anlamsız sinyal çıkışı üretebilir. Bunun yanında ışının tek bir dilime düşmesi durumunda ilgili dilim doyuma ulaşarak çalışmaz hale gelebilir. Bu sorunlar sisteme entegre edilen optik sistemler ile çözülmeye çalışılmaktadır. Optik sistemin içerisindeki mercekler yardımı ile spot büyüklüğünün belli çapın altına düşmesi engellenmektedir (Güner, 2004).

4 dilim dedektörler üzerine düşen lazer ışınları tam merkezlenmediğinde gerilim olarak hata sinyali üretirler. Varış açısının ölçümü ile üretilen bu sinyal, toplam ve fark mantığına göre formüle edilir ve sinyal gücüne göre normalize edilir. Hata sinyali varış açısı ve sinyal gücüne göre doğrusal olarak değişmektedir (Marett, 2012). Dedektörün yapısı Şekil 2.5’de gösterilmektedir. Yunuslama ve yandönme eksenleri için hata denklemi Denklem 2.2 ve 2.3 verilmiştir.



Şekil 2.5: Dört Dilim Dedektör.

$$yunuslama_{hatası} = \frac{(Q_1 + Q_2) - (Q_3 + Q_4)}{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4} \quad (2.2)$$

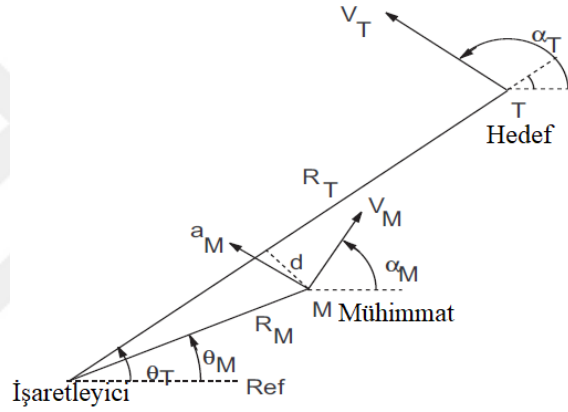
$$yandönme_{hatası} = \frac{(Q_1 + Q_4) - (Q_2 + Q_3)}{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4} \quad (2.3)$$

3. HEDEF ANGAJMAN KİNEMATİĞİ

Bu bölümde işaretleyici, mühimmat ve füze arasındaki kinematik ilişki ve güdüm yöntemi anlatılacaktır. İşaretleyici konumu sıfır noktası kabul edilerek benzetim modeli kurulmuştur. Bütün modellemeler yapılırken hedef ve mühimmat nokta kütle olarak ele alınmıştır.

3.1. 2 Boyutlu Model

2 boyutlu modelde işaretleyici, mühimmat ve hedef tek bir düzlem üzerinde kabul edilerek güdüm denklemleri elde edilir. Şekil 3.1’de 2 boyutlu angajman geometrisi gösterilmektedir.



Şekil 3.1: 2 Boyutlu Angajman Geometrisi.

Bu geometriye ve hüzme takip güdüm temel mantığına göre mühimmat, işaretleyiciden çıkan lazer ışınının üzerinde olmaya çalışır. Bu maksatla güdüm kuralı d mesafesini minimize edecek yanal ivme komutlarını üretir. Buna göre yanal ivmenin hesaplanabilmesi için hedef ve mühimmatın lazer ışınına göre yapmış oldukları θ_T ve θ_M açıları önem taşımaktadır. Bu açılar Şekil 3.1’deki geometriden Denklem 3.1 ve 3.2 verilen eşitlikler ile bulunabilir.

$$\theta_M = \tan^{-1} \left(\frac{R_M \sin \theta_T}{R_M \cos \theta_T} \right) \quad (3.1)$$

$$\theta_M = \tan^{-1} \left(\frac{R_T \sin \theta_T}{R_T \cos \theta_T} \right) \quad (3.2)$$

Bu açılara bağlı olarak d mesafesi Denklem 3.3’deki trigonometrik bağıntıdan bulunabilir.

$$d = R_M \sin(\theta_T - \theta_M) \quad (3.3)$$

Hedef ve mühimmat arasındaki bakış hattı sapma açısı farkı küçük olduğu için, küçük açı yaklaşımı ile d mesafesi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

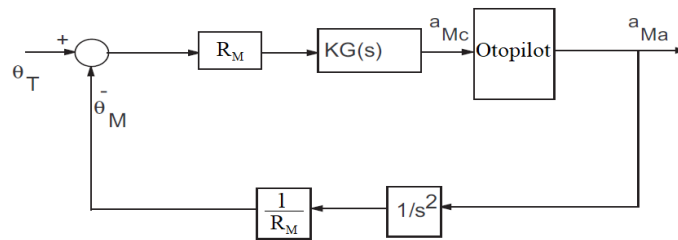
$$d = R_M(\theta_T - \theta_M) \quad (3.4)$$

Hız vektörüne her zaman dik olan yanal ivmelenme vektörü a_m en basit şekilde aşağıdaki denklemlerle formüle edilir.

$$a_m = Kd = K\widehat{R}_M(\theta_T - \theta_M) \quad (3.5)$$

Burada \widehat{R}_M füze üzerinde bulunan INS ve/veya GPS sistemleri üzerinden ölçülen ve tahmini işaretleyiciden olan mesafedir. K ise güdüm sabitidir. Bu denkleme göre yanal ivme üretildiğinde K ile eksik mesafe doğru orantılı iken a_m 'in salınım frekansı ters orantılı olmaktadır. Bu noktada eksik mesafeyi düşürmek için tek başına K denetleyicisi yeterli olmamaktadır. Bu nedenle sisteme bir $G(s)$ denetleyici transfer fonksiyonu ekleyerek daha iyi sonuçlar etmek gerekir. Denetleyici tasarımı ilgili bölümde ele alınacaktır. Bu güdüm bileşenleri ile sistemin kapalı çevrim blok diyagramı Şekil 3.2'de gösterildiği gibi olacaktır.

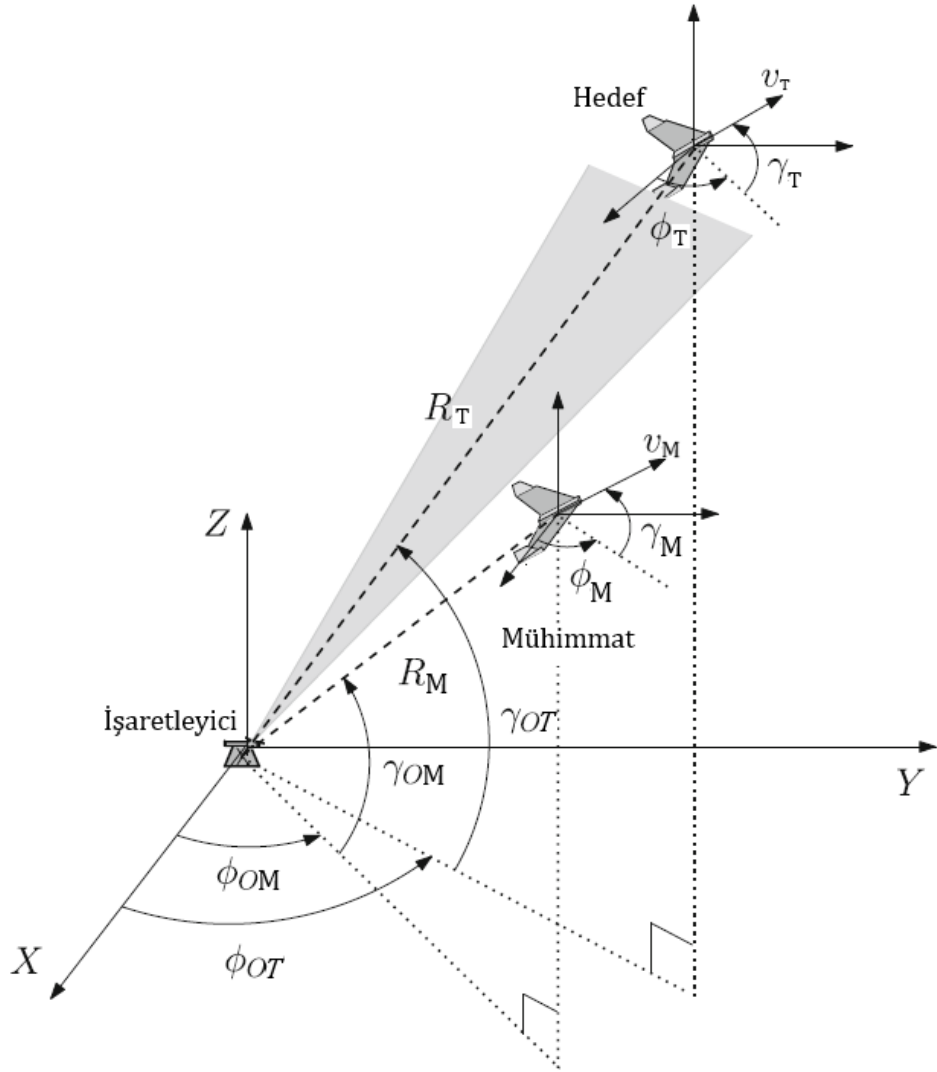
Bu diyagrama göre geri besleme yolu doğrusal olmayan angajman kinematiği denklemleri ile yer değiştirilebilir. Yanal ivme denkleminde de anlaşılacağı üzere, bu güdüm yöntemi sadece görüş hattı açısına bağlı olarak çalışmaktadır. Hedefi sabit hızlarda hareket eden veya durağan hedef olarak kabul etmektedir. Yüksek manevra kabiliyetine sahip hedeflere karşı etkinliğinin artırılması için hedef hızı ve bakış hattı değişim hızı bilgilerinin ileri yol beslemesi olarak bu kontrol döngüsüne eklenmesi gerekmektedir. Farklı hedef manevralarına karşı başarımlar tartışma bölümünde ele alınacaktır.



Şekil 3.2: Lazer Hüzme Takip Güdümü Blok Diyagramı.

3.2. 3 Boyutlu Model

Temelde tek düzlem üzerinde uygulanan güdüm kuralı üç düzlem üzerinde uygulanarak 3 boyutlu model elde edilmektedir. Mühimmat ve hedefin bakış hattı ile yaptığı açı yunuslama ve yandönme eksenlerinde ele alınarak denklemler oluşturulmaktadır. Şekil 3.3'de 3 boyutlu angajman geometrisi gösterilmektedir. Şekilde $R_M, \phi_M, \gamma_M, \phi_{OM}, \gamma_{OM}$ sırasıyla mühimmatın menzil, yandönme açısı, yunuslama açısı, yandönme eksenini bakış hattı açısı ve yunuslama eksenini bakış hattı açısını belirtmektedir. Yine aynı şekilde $R_T, \phi_T, \gamma_T, \phi_{OT}, \gamma_{OT}$ ise hedefin menzil, yandönme açısı, yunuslama açısı, yandönme eksenini bakış hattı açısı ve yunuslama eksenini bakış hattı açısını belirtmektedir.



Şekil 3.3: 3 Boyutlu Angajman Geometrisi.

(Parayil ve Ratnoo, 2019)'den uyarlanmıştır.

3.2.1. Mühimmat Modeli

Mühimmatın x, y, z eksenlerindeki konumu ve bu eksenlere göre yapmış olduğu açılar aşağıdaki diferansiyel denklemler ile formüle edilmiştir.

$$\dot{x}_M = V_M \cos \gamma_M \cos \phi_M \quad (3.6)$$

$$\dot{y}_M = V_M \cos \gamma_M \sin \phi_M \quad (3.7)$$

$$\dot{z}_M = V_M \sin \gamma_M \quad (3.8)$$

$$\dot{R}_{OM} = V_M \cos \gamma_M \cos \gamma_{OM} \cos(\phi_M - \phi_{OM}) + V_M \sin \gamma_M \sin \gamma_{OM} \quad (3.9)$$

$$\dot{\phi}_{OM} = \frac{V_M \cos \gamma_M \sin(\phi_M - \phi_{OM})}{R_{OM} \cos \gamma_{OM}} \quad (3.10)$$

$$\dot{\gamma}_{OM} = \frac{-V_M \cos \gamma_M \sin \gamma_{OM} \cos(\phi_M - \phi_{OM})}{R_{OM}} + \frac{V_M \sin \gamma_M \cos \gamma_{OM}}{R_{OM}} \quad (3.11)$$

$$\dot{\phi}_M = \frac{a_y M}{V_m \cos \gamma_m} \quad (3.12)$$

$$\dot{\gamma}_M = \frac{a_p M}{V_M} \quad (3.13)$$

Denklemler 3.12 ve 3.13'te belirtilen $a_y M$ ve $a_p M$ sırasıyla mühimmat için oluşturulan yandönme ve yunuslama eksenleri yanıl ivmeleridir. Bu ivmeleri elde etmek için kullanılan eşitlikler Denklem 3.14 ve 3.15'te verilmiştir.

$$a_y M = K_y G(s) R_M \cos \gamma_{OM} ((\phi_{OT} - \phi_{OM})) \quad (3.14)$$

$$\theta_p M = K_p G(s) R_M (\gamma_{OT} - \gamma_{OM}) \quad (3.15)$$

3.2.2. Hedef Modeli

Hedefin x, y, z eksenlerindeki konumu ve bu eksenlere göre yapmış olduğu açılar aşağıdaki diferansiyel denklemler ile formüle edilmiştir.

$$\dot{x}_T = V_T \cos \gamma_T \cos \phi_T \quad (3.16)$$

$$\dot{y}_T = V_T \cos \gamma_T \sin \phi_T \quad (3.17)$$

$$\dot{z}_T = V_T \sin \gamma_T \quad (3.18)$$

$$\dot{R}_{OT} = V_T \cos \gamma_T \cos \gamma_{OT} \cos(\phi_T - \phi_{OT}) + V_T \sin \gamma_T \sin \gamma_{OT} \quad (3.19)$$

$$\dot{\phi}_{OT} = \frac{V_T \cos \gamma_T \sin(\phi_T - \phi_{OT})}{R_{OT} \cos \gamma_{OT}} \quad (3.20)$$

$$\dot{\gamma}_{OT} = \frac{-V_T \cos \gamma_T \sin \gamma_{OT} \cos(\phi_T - \phi_{OT})}{R_{OT}} + \frac{V_T \sin \gamma_T \cos \gamma_{OT}}{R_{OT}} \quad (3.21)$$

$$\dot{\phi}_T = \frac{a_y T}{V_T \cos \gamma_T} \quad (3.22)$$

$$\dot{\gamma}_T = \frac{a_p T}{V_T} \quad (3.23)$$

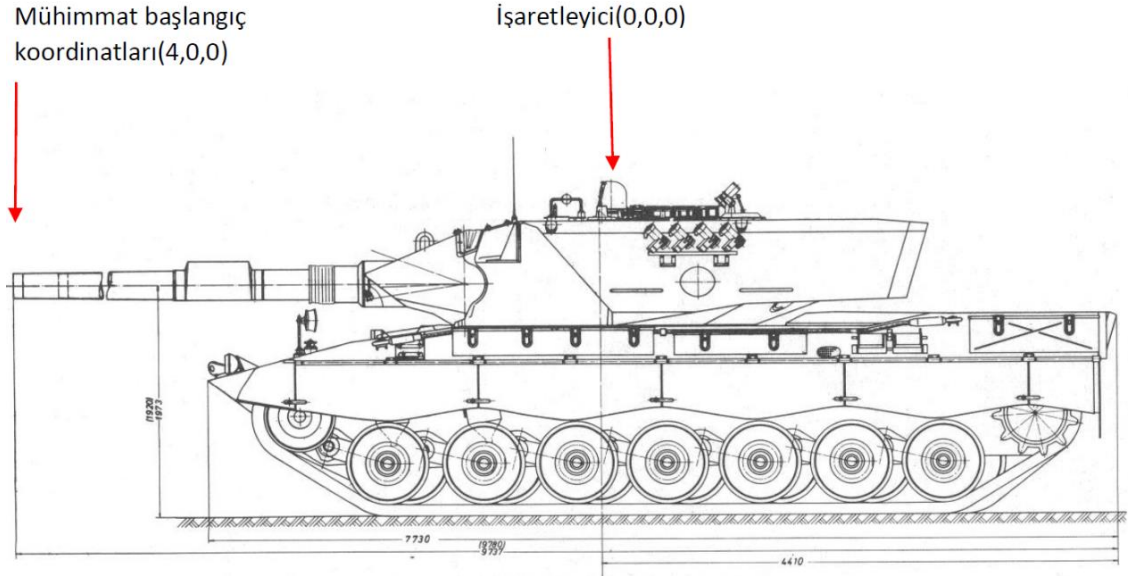
Denklemler 3.22 ve 3.23'te belirtilen $a_y T$ ve $a_p T$ sırasıyla hedef için oluşturulan yandönme ve yunuslama eksenleri yanal ivmeleridir. Bu ivmeler senaryolara göre manuel olarak belirlenmiştir.

3.3. Kabuller

Angajman kinematiğinde anlatılan denklemlerin çözümü ve operasyon ortamı benzetimleri için bazı kabuller yapılmıştır. Denklemlerin çözümleri için 4. dereceden Runge Kutta çözümü kullanılmış ve her denklem için başlangıç parametreleri belirlenmiştir. Mühimmata ait denklemlerde verilen açıların operasyonel karşılıkları şu şekildedir:

- ϕ_M : Mühimmat gövde ekseninin yandönme ekseninde yaptığı açıdır. Başlangıç koşulu olarak tank namlusunun Y eksenine yaptığı açı olarak alınmıştır.
- γ_M : Mühimmat gövde ekseninin yunuslama ekseninde yaptığı açıdır. Başlangıç koşulu olarak tank namlusunun yükseliş açısı olarak alınmıştır.
- ϕ_{OM} : Mühimmat bakış hattı ekseninin yandönme ekseninde yaptığı açıdır. Başlangıç koşulu, mühimmatın başlangıç konumuna bağlı olarak trigonometrik hesapla bulunmuştur.
- γ_{OM} : Mühimmat bakış hattı ekseninin yunuslama ekseninde yaptığı açıdır. Başlangıç koşulu, mühimmatın başlangıç konumuna bağlı olarak trigonometrik hesapla bulunmuştur.
- x_m, y_m ve z_m konumları Leopard 2 tankının ölçüleri temel alınarak namlu ucu konumu olarak alınmıştır. Şekil 3.4'te tank ölçüleri verilmiştir.

- $a_y M$ ve $a_p M$ ivme komutları ise mühimmatın gerçekleştirebileceği ve dayanabileceği limit olarak öngörülen 50 g ile sınırlandırılmıştır.
- V_M değeri envanterdeki tankların namlu çıkış hızlarına bakılarak 500-700 m/s hız arasında farklı senaryolarda kullanılmıştır.
- V_T değeri olası kara hedefleri göz önüne alınarak en yüksek 3 m/s² ile ivmelenebileceği ve maksimum hız limiti olarak da 160 km/h belirlenmiştir.
- Olası kara hedeflerinden en büyüğü olarak 10 m uzunluğunda 3.5 m genişliğinde ve 2.5 m yüksekliğinde tank, en küçüğü olarak da 5 m uzunluğunda 2.3 m genişliğinde ve 2 m yüksekliğinde zırhlı personel taşıyıcı kabul edilmiştir.
- Lazer işaretleyiciden çıkan ışının spot genişliği Denklem 2.1'e göre menzile arttıkça artacağından, bunun yanında dedektöre düşen güç seviyesi de düşeceğinden işaretleme menzili azami 5 km olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.4: Leopard 2 Tankı Boyutları.

(Leopard 2 Blueprint - Download Free Blueprint for 3D Modeling, t.y.)'den uyarlanmıştır.

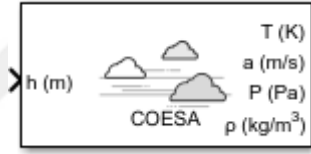
Bu çalışma kapsamında karadan karaya bir mühimmat modellendiği için hedef olarak da kara hedefine uygun olarak benzetim yapılmıştır. Bu bağlamda hedefin Z ekseninde hareket etmediği X ve Y eksenleri üzerinde hareket ettiği kabulü yapılmıştır. Z ekseninde hareketin olmaması nedeniyle γ_T sıfır kabul edilmiştir ve yunuslama ekseninde hedef modeline yanal ivme uygulanmamıştır. Diğer açı parametreleri ise senaryolara bağlı olarak belirlenmiştir.

Bu kabullere ek olarak benzetim ortamının gerçeğe yakın olması için bazı eklemeler yapılmıştır. Bunlar:

- Atmosfer modeline bağlı sürüklenme kuvveti
- Uçuş anında gelen anlık yanal rüzgârlar
- Yunuslama ve yandönme eksenleri için otopilot dinamiği
- R_M mesafesine GPS ve/veya INS bazlı gelen gecikme ve ölçüm hataları

3.3.1. Atmosfer Modeli

Atmosfer modeli olarak MATLAB yazılımı içerisinde hazır olan COESA atmosfer modeli kullanılmıştır. Bu modeli kullanmaktaki temel amaç yükseltiye bağlı olarak hava yoğunluğu ve ses hızındaki değişiklikleri elde etmektir. Bu değişikliklere bağlı olarak mühimmata etki eden sürtünme kuvveti çıkarılmış ve hız vektöründeki değişiklikler bulunmuştur. Şekil 3.5’de gösterilen model girdi olarak yükselti bilgisi almakta ve o yükseltideki sıcaklık, basınç, ses hızı ve hava yoğunluğu verilerini üretmektedir (*Implement 1976 COESA lower atmosphere - Simulink, 2020*).



Şekil 3.5: COESA Atmosfer Modeli Bloğu.

Hava araçlarında atmosfer yoğunluğu, aracın hızı ve yüzey alanına göre sürüklenme kuvveti oluşmaktadır. Bu kuvvet şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$D_M = 0.5\rho V_M^2 S C_D \quad (3.24)$$

Denklem 3.24’e göre ρ hava yoğunluğu, V_M mühimmat hızını, S mühimmat kesit alanını, C_D ise mühimmatın sürüklenme katsayısını belirtmektedir. Açık kaynak literatürden alınan bilgilere göre, 155 mm çapındaki mühimmatın hızına bağlı olarak sürüklenme katsayısı Tablo 3.1’de verilmiştir (Balon ve Komenda, 2006; Defense Technical Information Center, 1958).

Tablo 3.1: Hıza Bağlı Sürüklenme Katsayıları.

| Hız (Mach) | C_D | Hız (Mach) | C_D |
|------------|-------|------------|-------|
| 0.400 | 0.138 | 0.975 | 0.244 |

| Hız (Mach) | C _D | Hız (Mach) | C _D |
|------------|----------------|------------|----------------|
| 0.600 | 0.138 | 1 | 0.290 |
| 0.700 | 0.139 | 1.025 | 0.309 |
| 0.750 | 0.140 | 1.050 | 0.329 |
| 0.800 | 0.141 | 1.1 | 0.326 |
| 0.850 | 0.148 | 1.2 | 0.318 |
| 0.875 | 0.152 | 1.35 | 0.305 |
| 0.900 | 0.156 | 1.500 | 0.291 |
| 0.925 | 0.177 | 1.750 | 0.269 |
| 0.950 | 0.199 | 2.000 | 0.249 |

Hesaplanan sürüklenme kuvvetine ve mühimmatın yunuslama eksenine açısına bağlı olarak mühimmat hızı da değişecektir. Mühimmat hızının sürüklenme kuvveti ile olan ilişkisi Denklem 3.25’de belirtilmektedir (Lee ve diğ., 2016).

$$\dot{V}_M = \frac{-D_M}{m} - g \sin \gamma_M \quad (3.25)$$

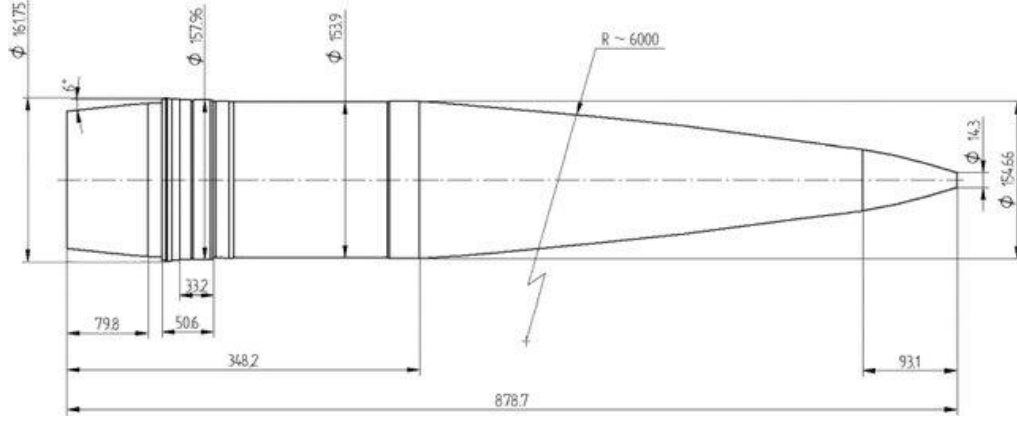
Bu denkleme göre m mühimmatın kütlesi, g ise yerçekimi ivmesidir.

Sürüklenme kuvvetinin yanında mühimmatın üzerine etki eden anlık yanal rüzgârlarda hedefi yüksek başarımlarla vurabilmek için göz önüne alınması gereken kritik bozucu etkilerdendir. Bu bozucu etki benzetim ortamına dışardan gelen yanal ivme olarak sisteme eklenmiş ve kontrolcünün bu bozucuyu düzeltmesi beklenmiştir. Sürüklenme kuvvetine benzer bir hesaplama ile bulunmaktadır.

$$F_D = 0.5\rho V_R^2 A \quad (3.26)$$

Bu denkleme göre ρ hava yoğunluğu, V_R rüzgâr hızı, A ise mühimmat yüzey alanıdır. Mühimmat yüzey alanı Şekil 3.6’da belirtilen 155 mm çapındaki mühimmatın yüzey alanı kullanılarak hesaplanmıştır (Baranowski, 2013).

Senaryolar bölümünde farklı açılarla gelen rüzgâr hızlarına göre rüzgâr kuvvetleri yunuslama ve yandönme eksenlerine bozucu olarak indirgenmiştir.



Şekil 3.6: Mühimmat Ölçüleri.

3.3.2. Otopilot Dinamiği

Otopilot görev olarak güdümden aldığı ivme emirlerini kontrol yüzeylerine açı olarak aktarıp gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Bu çalışma kapsamında otopilot modellemesindeki amaç otopilot dinamiğinden kaynaklı oluşacak kalıcı durum hatalarının, maksimum aşmaların ve gecikmelerin güdüm algoritmasına etkisinin görülmesidir. Bu nedenle detaylı bir otopilot tasarımı yapılmamış ikinci dereceden bir transfer fonksiyonu olarak kabul edilmiştir.

İkinci dereceden transfer fonksiyonu kabulü yapılırken literatürdeki yandönme ve yunuslama eksenleri için tasarlanmış otopilotlar incelenmiş ve ona göre kabuller yapılmıştır. (Siouris, 2004) Buna göre yandönme eksenini için kullanılan otopilot transfer fonksiyonu:

$$\frac{w_{n_y}^2}{s^2 + 2\zeta w_{n_y} s + w_{n_y}^2} \quad (3.27)$$

olarak kullanılmıştır. Otopilotun eksik sönümlü ve 25 Hz bant genişliğine sahip olması hedeflenerek w_{n_y} değeri 23, ζ değeri ise 0.8 olarak seçilmiştir. Yunuslama eksenini için kullanılan transfer fonksiyonu ise:

$$\frac{w_{n_p}^2 (\tau s + 1)}{s^2 + 2\zeta w_{n_p} s + w_{n_p}^2} \quad (3.28)$$

olarak kullanılmıştır. Otopilotun eksik sönümlü ve 25 Hz bant genişliğine sahip olması hedeflenerek w_{n_y} değeri 3.5, ζ değeri 0.8, τ değeri ise 0.1 olarak seçilmiştir. Mühimmatı yönlendirebilecek olası kontrol yüzeylerini yönlendirecek elektromekanik sistemler dikkate alındığında 25 Hz bant genişliğinde bir sistem kabulü yapılmıştır.

3.3.3. Sensör Modellemesi

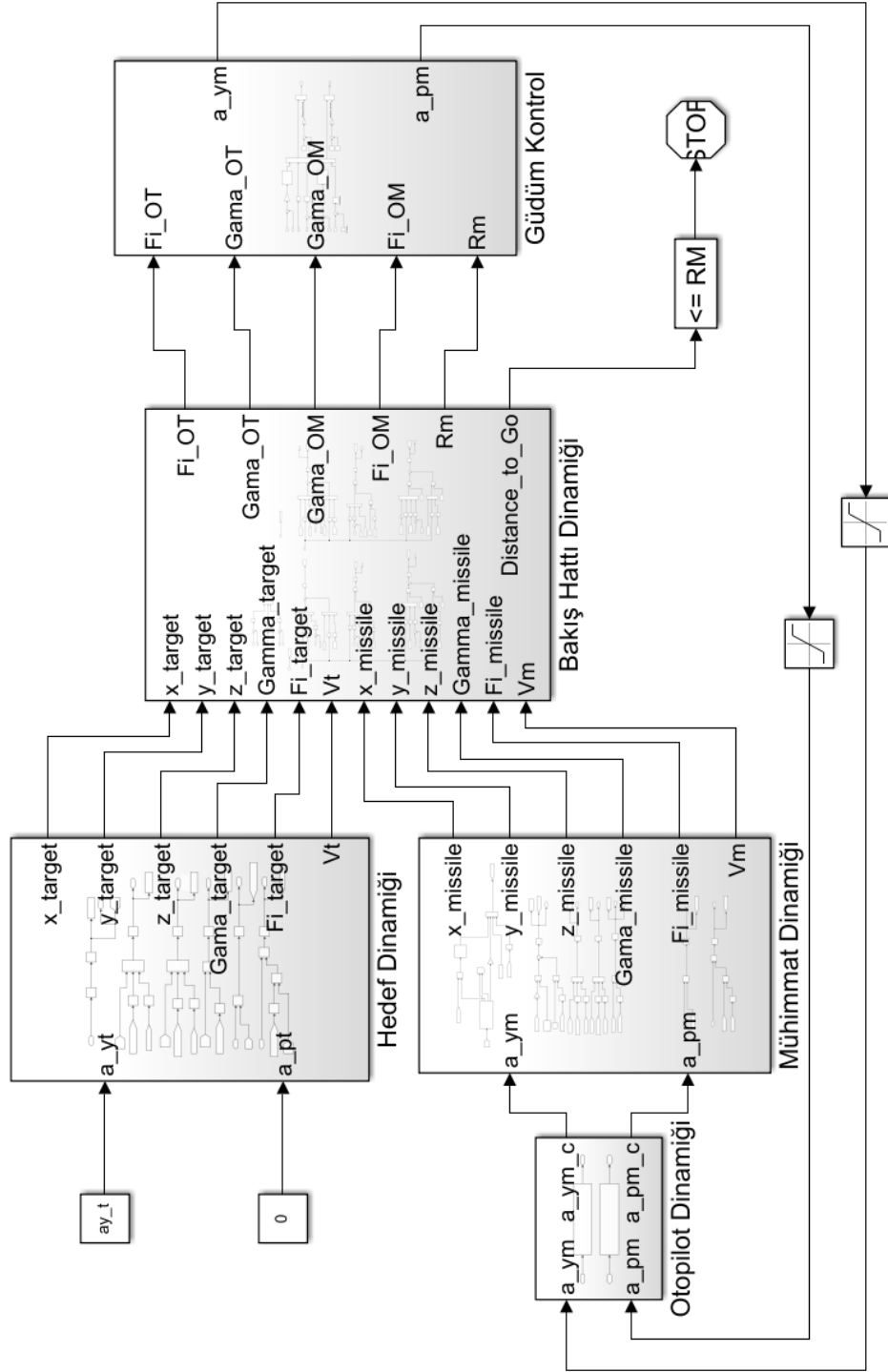
Güdümlü silah sistemleri mevcut konum bilgilerini ölçümlemek için sensör sistemleri kullanırlar. Bunlar küresel konumlama sistemine bağlı olarak çalışan GPS veya uydulardan bağımsız olarak çalışan INS sistemleri olabilir. Bu iki sistemin de temel çıktısı konum bilgisidir. Mevcut konumun bilinmesi lazer hüzme takip güdüm yöntemi için hayati önem taşımaktadır.

Sensörler doğası gereği belirli bir örnekleme frekansı, tepki süresi ve doğrulukta çalışırlar. Hem GPS hem de INS sistemleri yüksek frekanslarda çalıştıkları için gecikmelerden çok etkilenmezler. Ancak GPS sisteminin doğruluk hataları ve INS sisteminin de mühimmat içerisindeki yalıtımından kaynaklı hatalardan oluşan ölçüm belirsizleri ortaya çıkmaktadır. Burada ortaya çıkan hataları lazer işaretleme, kontrolcü kazançları ve bazı filtre teknikleri ile minimize etmek mümkündür.

Bu tez çalışması kapsamında R_M mesafesine ortalaması 1.1m ve standart sapması 0.527 olan beyaz gürültü ve gecikme ekleyerek bahsedilen belirsizlik ve gecikmeler benzetime dahil edilmiştir (Heng vd., t.y.). Bu sayede askeri seviye GPS sinyali hatası modellenmiştir. Gecikme olarak 2 örnekleme zamanı gecikme eklenmiştir.

4. BENZETİM ORTAMI

Çalışma kapsamında üçüncü bölümde anlatılan hedef angajman kinematiğindeki denklemler ve kabullere göre MATLAB/Simulink yazılımında benzetim ortamı kurulmuştur. Bu bölümde kurulan benzetim ortamı detaylı olarak ele alınacak ve denklemler arasındaki ilişki anlatılacaktır.



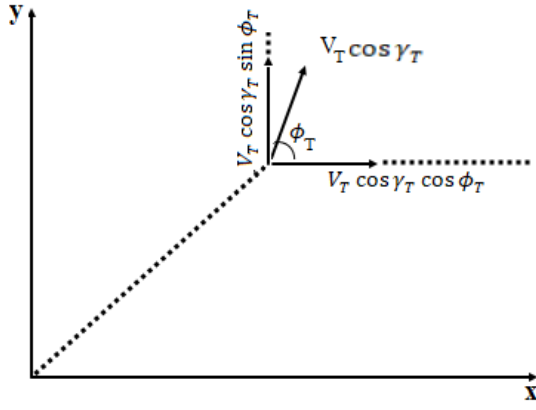
Şekil 4.1: Benzetim Modeli.

Şekil 4.1’de gösterilen Simulink modeli 5 ana alt modelden oluşacak şekilde oluşturulmuştur. Benzetime başlangıç noktası olarak hedef ve mühimmat dinamiği çözülerek başlanmaktadır. Bu bloklardan çıkan konum ve açı çıktıları bakış hattı dinamiğini beslemektedir. Bakış hattı dinamiği bloğunda mühimmatın ve hedefin konum ve açı bilgileri işlenerek güdüm kontrol bloğunun kullanacağı açı bilgilerine dönüştürmektedir. Güdüm kontrol bloğunda lazer hüzmeye takip güdüm kuralına göre yanal ivme komutları türetilerek otopilota gönderilmektedir. Otopilot bloğu ise gelen emirleri transfer fonksiyonundan geçirerek mühimmat dinamiğine girdi yaparak döngüyü tamamlamaktadır.

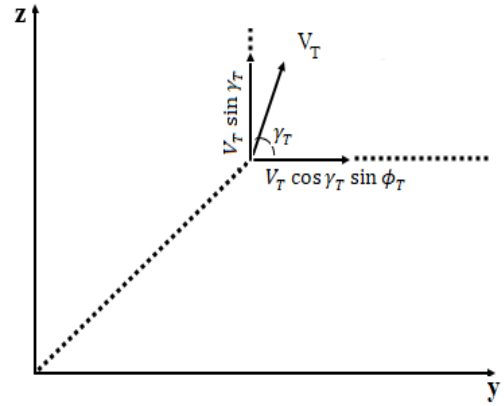
4.1. Hedef Dinamiği

Hedef dinamiği bloğu yunuslama ve yandönme eksenleri için beslenen ivmelere ve Denklem 3.16-3.18 arasındaki eşitliklere göre hedefin x, y ve z koordinatları üzerindeki konum bilgisini hesaplamaktadır. Bloğun içerisindeki bağlantılar Şekil 4.3’de gösterilmektedir. Hedefin x ve y konum bileşenleri hedefin hızına, yandönme ve yunuslama eksenine açılarına bağlı olarak değişmektedir. Z eksenindeki konum bileşeni hıza ve yunuslama eksenine açısına bağlıdır. Hedefi tanımlayan diğer önemli iki parametre olan yunuslama ve yandönme açıları da ivme ile bağlantılı olarak Denklem 3.22 ve 3.23’e göre hesaplanmaktadır.

Hedefin hızı ise girişte verilen ivme emirlerine bağlı olarak değişmektedir. İlgili denklemlerden anlaşılacağı üzere ilgili eksenindeki konumun bulunması için hız vektörünün ilgili eksene indirgenmesi gerekmektedir. İlgili eksenindeki hız bulunduğundan sonra integrali alınarak konum bilgisi elde edilmektedir. İntegral blokları içerisinde hedefin başlangıç parametrelerini içeren ilk değerler girilmiştir. Hız vektörünün XY ve YZ düzlemlerine indirgenmesine ait geometrik ilişki Şekil 4.2’de verilmiştir.

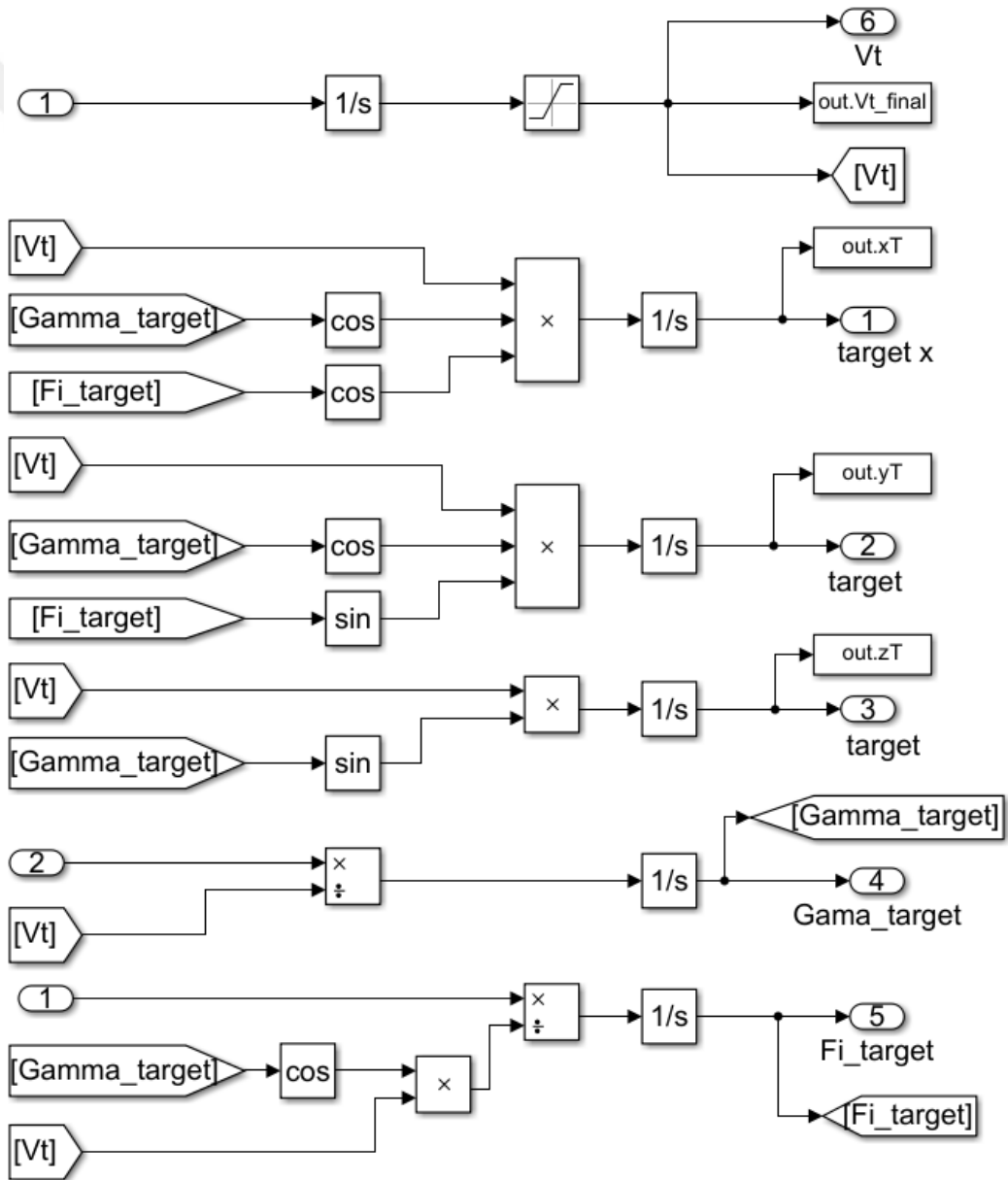


a: XY Düzlemi Üzerindeki Hedef Hızları



b: YZ Düzlemi Üzerindeki Hedef Hızları

Şekil 4.2: Düzlemler Üzerinde Hedef Hızları.

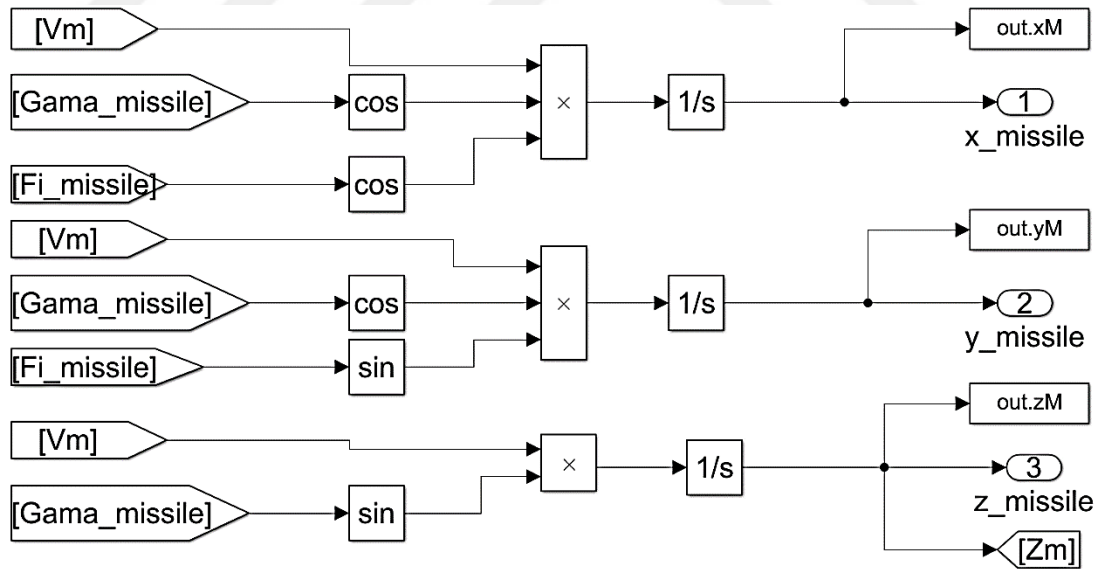


Şekil 4.3: Hedef Dinamiği.

4.2. Mühimmat Dinamiği

Mühimmatın x, y ve z eksenindeki konum bilgilerini, yunuslama ve yandönme açılarını mühimmat dinamiği bloğu Denklem 3.6-3.8 arasındaki eşitliklere göre hesaplamaktadır. Bu blok otopilottan çıkan yunuslama ve yandönme eksenini ivme bilgilerini aynı eksenindeki açılara dönüştürmektedir. Hedef dinamiğine benzer şekilde, mühimmatın x ve y konum bileşenleri hedefin hızına, yandönme ve yunuslama eksenini açılara bağlı olarak değişmektedir. Z eksenindeki konum bileşeni ise hıza ve yunuslama eksenini açısına bağlıdır. Hedef dinamiğinden farklı girdi olarak aldığı ivme emirleri sabit olarak değil güdüm algoritması tarafından türetilmektedir. Bloğun içerisindeki konum denklemleri ile ilgili bağlantılar Şekil 4.4’de gösterilmektedir.

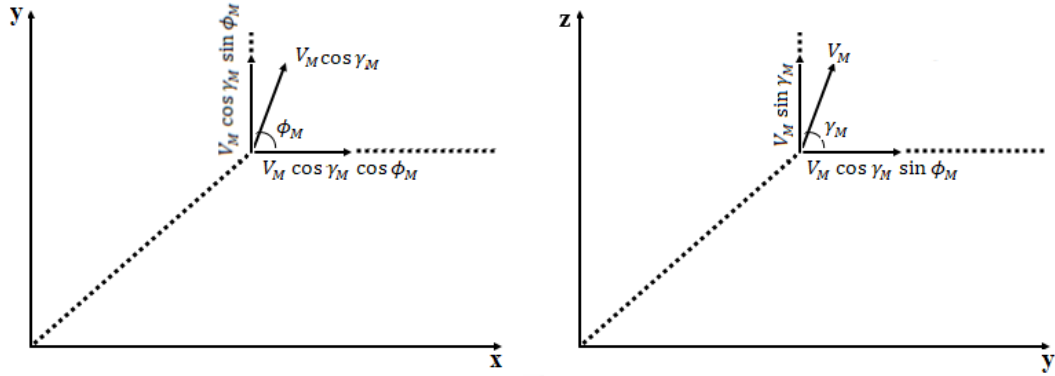
Hedef dinamiğine benzer şekilde mühimmatın konumunun bulunabilmesi için ilgili eksenindeki hız bileşeninin bulunması gerekmektedir. Hız vektörü XY düzlemi üzerine indirgenerek mühimmatın X ve Y eksenlerindeki hızları, YZ düzlemine indirgenerek Z eksenindeki hızı bulunmaktadır. Eksenlerdeki hız değişkenlerinin integralleri alınarak konum bilgisine ulaşılmaktadır. Hız vektörünün XY ve YZ düzlemlerine indirgenmesine ait geometrik ilişki Şekil 4.5’de verilmiştir.



Şekil 4.4: Mühimmat Dinamiği Konum Bağlantıları.

Mühimmat dinamiği bloğu içerisinde üçüncü bölümde kabuller kısmında bahsedilen atmosfer modeli bulunmaktadır. Bu model ile ilişkili olarak da sürüklenme kuvveti ve mühimmat hız vektörünün genliği hesaplanmaktadır. Denklem 3.24’e göre mühimmata etki eden sürüklenme kuvveti, Denklem 3.25’e göre de hız vektörü genliği

hesaplanmaktadır. Mühimmatın yunuslama ve yandönme açıları da ilgili eksenlerdeki yanal ivmeler girdi alınarak Denklem 3.12 ve 3.13'e göre bulunmaktadır. Atmosfer, sürüklenme kuvveti ve mühimmat eksen açısı hesapları ile ilgili bloklar Şekil 4.6'de gösterilmektedir.

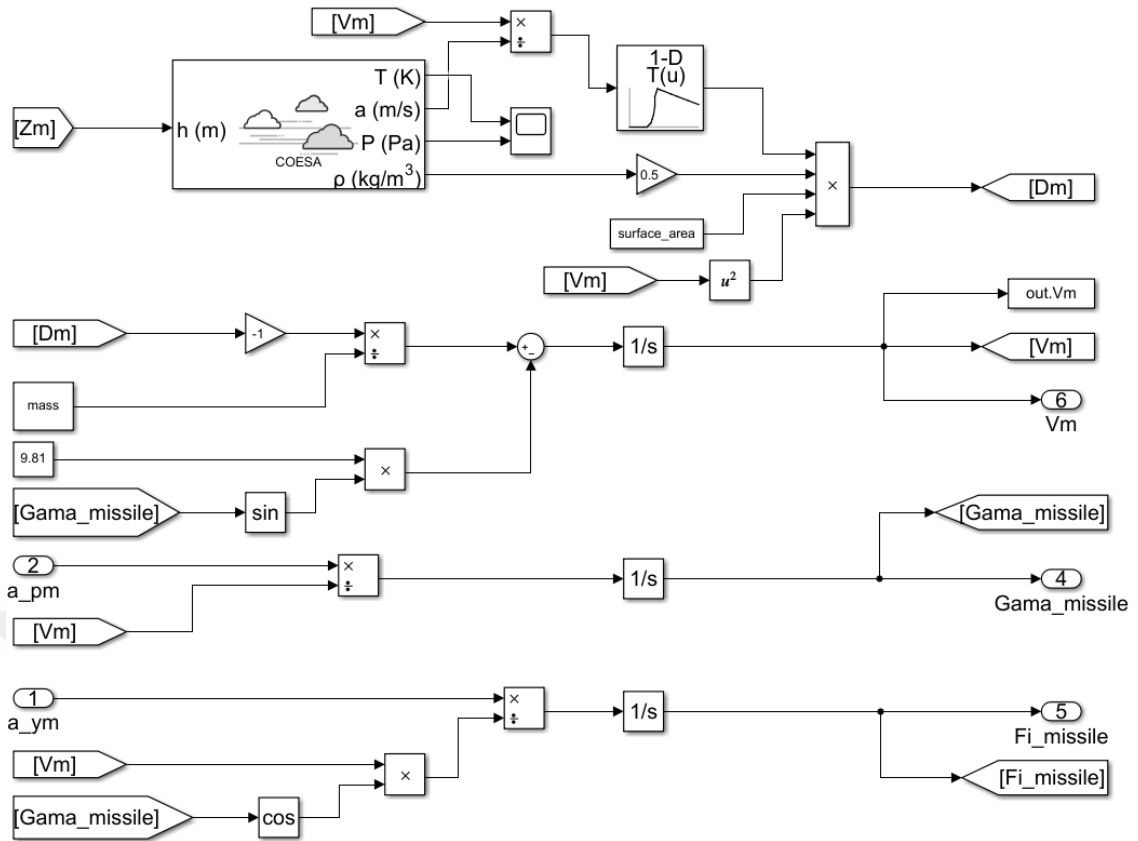


a: XY Düzlemi Üzerindeki Mühimmat Hızları

b: YZ Düzlemi Üzerindeki Mühimmat Hızları

Şekil 4.5: Düzlemler Üzerinde Mühimmat Hızları.

Atmosfer modeli girdi olarak mühimmatın bulunduğu yükseklik olan Z eksenini konumunu kullanmaktadır. Bu konuma göre sıcaklık, hava basıncı, hava yoğunluğu ve ses hızı çıktıları üretmektedir. Bu çıktılarından ses hızı mühimmatın o anki hızına bölünerek Mach sayısına çevrilmektedir. Model içerisindeki lookup-table bloğu ise bu Mach sayısını Tablo 3.1'deki değerlere göre sürüklenme katsayısına çevirerek çıktı üretmektedir. Atmosfer modelinin bir diğer çıktısı olan hava yoğunluğu da sürüklenme kuvvetini bulmak için girdi olarak kullanılmaktadır. Mach sayısı, hava yoğunluğu, mühimmatın anlık hızı ve kesit alanı çarpılarak sürüklenme kuvveti elde edilmektedir. Sürüklenme kuvveti mühimmat hızını, mühimmatın kütlesi ile bağlantılı olacak şekilde azaltmaktadır. Bunun yanında yerçekimi ivmesi de mühimmatın yunuslama açısı ile bağlantılı şekilde hıza azaltıcı etki etmektedir. Mühimmat hızı hesaplanırken kullanılan integratör bloğuna başlangıç koşulu olarak mühimmatın namludan çıkış hızı verilmektedir. Mühimmatın yunuslama açısı hesaplanırken kullanılan integratör bloğunun başlangıç koşulu ise namlunun yükseliş açısı olarak belirlenmiştir. Yandönme eksenini başlangıç koşulu olarak da tank taretinin lazer işaretleyiciden aldığı yönelim bilgisine göre hedefe baktığı açı değeri girilmiştir.



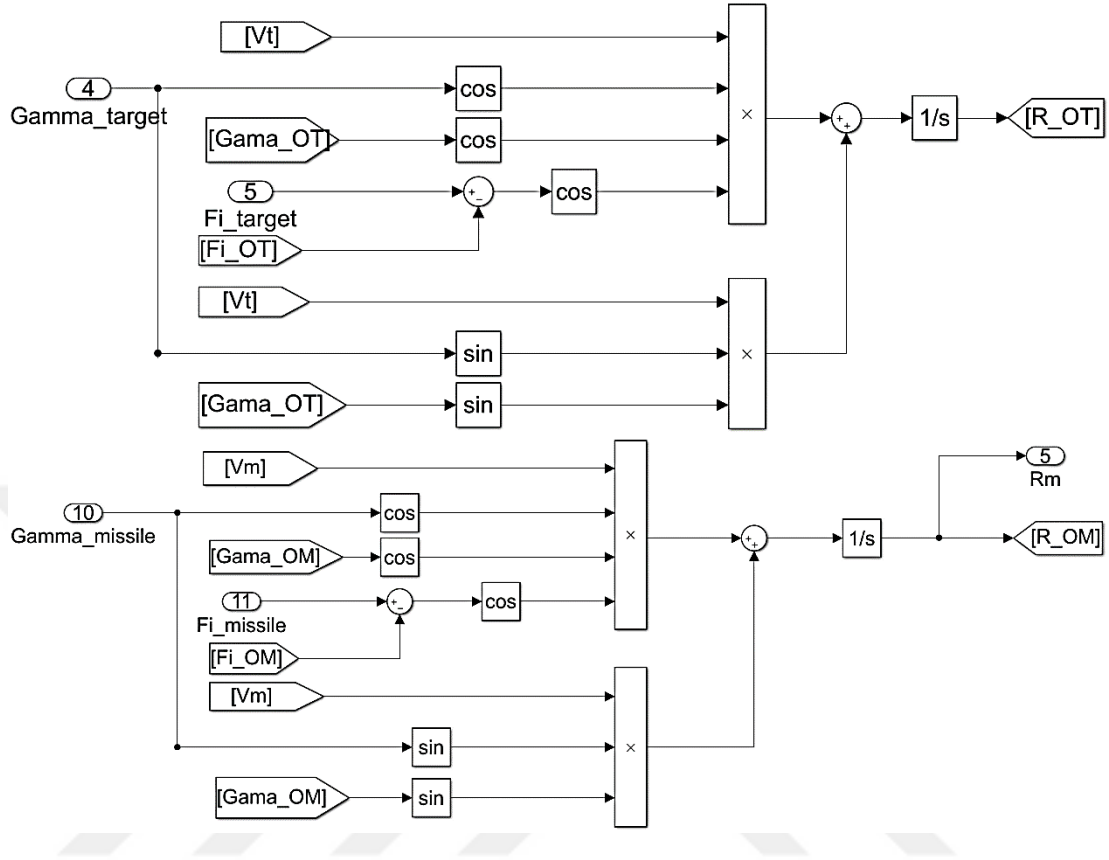
Şekil 4.6: Mühimmat Eksen Açılı ve Hız Bağlantıları.

4.3. Bakış Hattı Dinamiği

Hedef dinamiği ve mühimmat dinamiği blokları tarafından üretilen açı ve konum bilgileri 3 boyutlu bir benzetimde güdüm kuralı oluşturmak için yeterli olmamaktadır. Güdüm kontrol algoritması yunuslama ve yandönme eksenlerindeki d mesafelerini ayrı ayrı sıfıra yaklaştırmayı hedeflemektedir. Bu nedenle d mesafesini XY düzlemi ve YZ düzlemi üzerinde tanımlanması gerekmektedir. Bu tanımlamayı yapabilmek için de mühimmat ve hedefin bakış hattı doğrusunun XY düzlemine göre izdüşümünün hesaplanması gerekmektedir. Bakış hattı dinamiği bloğu ilgili indirgemeleri yapacak bağlantıları içermektedir.

Mühimmat ve hedefin sıfır noktası olarak kabul edilen işaretleyiciye göre menzil değişim hızlarının hesaplanması için hız vektörlerinin bütün eksenlerdeki izdüşümlerinin bakış hattı doğrusu üzerine düşürülmesi gerekmektedir. R_{OT} ve R_{OM} mesafelerine etki eden yunuslama ve yandönme eksenleri hız bileşenleri olduğu için iki eksen üzerindeki etkiler Denklem 3.9 ve 3.19'da belirtildiği gibi toplanmaktadır. Bu denklemlere ilişkin blok diyagram bağlantıları Şekil 4.7'da gösterilmektedir. Bu

bağlantılardaki integratörlerin başlangıç koşulları, ilk atış anındaki menziller olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.7: Mühimmat ve Hedefin Menzil Hesaplamaları.

Bakış hattı doğrusunun yandönme açısının bulunması için bakış hattı ekseninin XY düzlemi üzerindeki iz düşümünün X eksenine ile yaptığı açının hesaplanması gerekmektedir. Mühimmat ve hedef için bakış hattı doğrusu yandönme açılarının değişim hızı sırasıyla Denklem 3.10 ve 3.20’de belirtilmiştir. Bu denklemler ile ilgili bağlantılar Şekil 4.8’de gösterilmiştir.

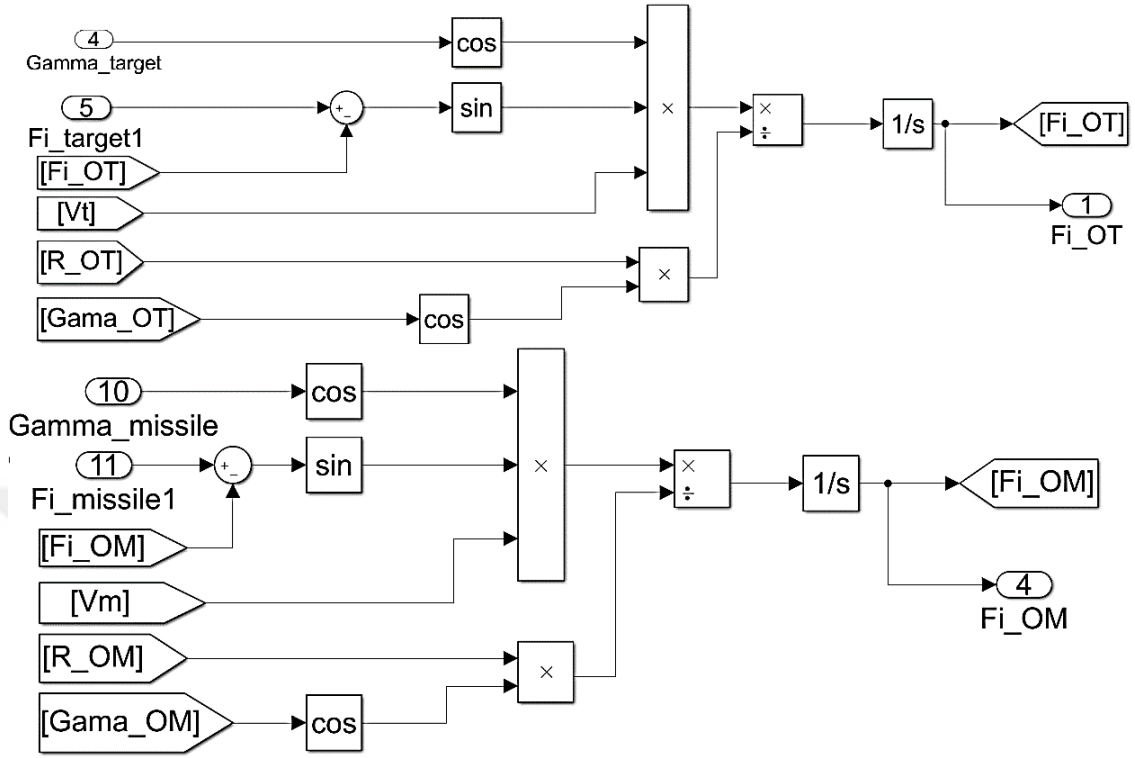
Diferansiyel denklemlerin çözümü için gerekli olan başlangıç koşulu olarak da Denklem 4.1 ve 4.2’deki eşitliklerden elde edilen değerler kullanılmıştır.

$$\phi_{OM_0} = \tan^{-1} \frac{y_{M_0}}{x_{T_0}} \quad (4.1)$$

$$\phi_{OT_0} = \tan^{-1} \frac{y_{T_0}}{x_{T_0}} \quad (4.2)$$

Mühimmat ve hedef için bakış hattı doğrusunun yunuslama açısı geometrik olarak, bakış hattı doğrusunun kendisi ve XY düzlemine izdüşümü ile yaptığı açı olarak tanımlanmaktadır. Mühimmat ve hedef için bu açıların değişim hızı sırasıyla Denklem

3.11 ve 3.21’de belirtilmiştir. Bu denklemler ile ilgili bağlantılar Şekil 4.9’da gösterilmiştir.

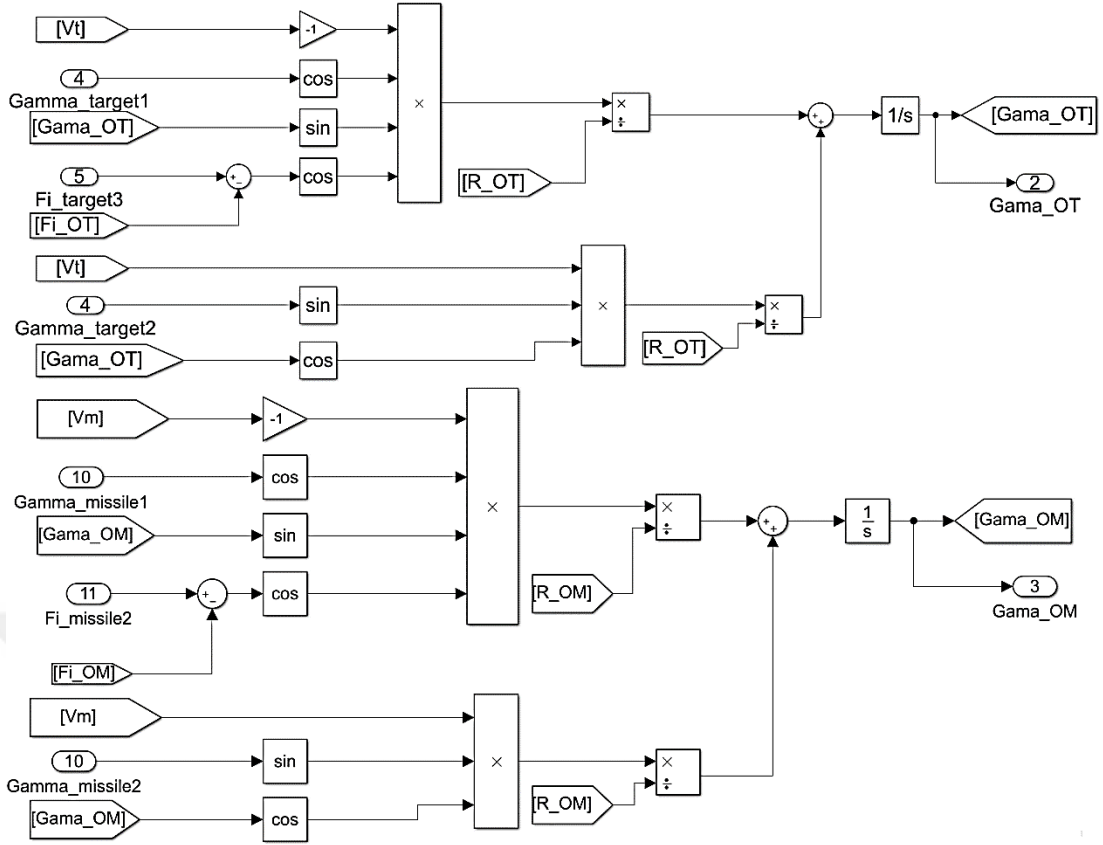


Şekil 4.8: Mühimmat ve Hedef Bakış Hattı Yandönme Açıları.

Diferansiyel denklemlerin çözümü için gerekli olan başlangıç koşulu olarak da Denklem 4.3 ve 4.4’deki eşitliklerden elde edilen değerler kullanılmıştır.

$$\gamma_{OM_0} = \tan^{-1} \frac{z_{M_0}}{\sqrt{x_{M_0}^2 + y_{M_0}^2}} \quad (4.3)$$

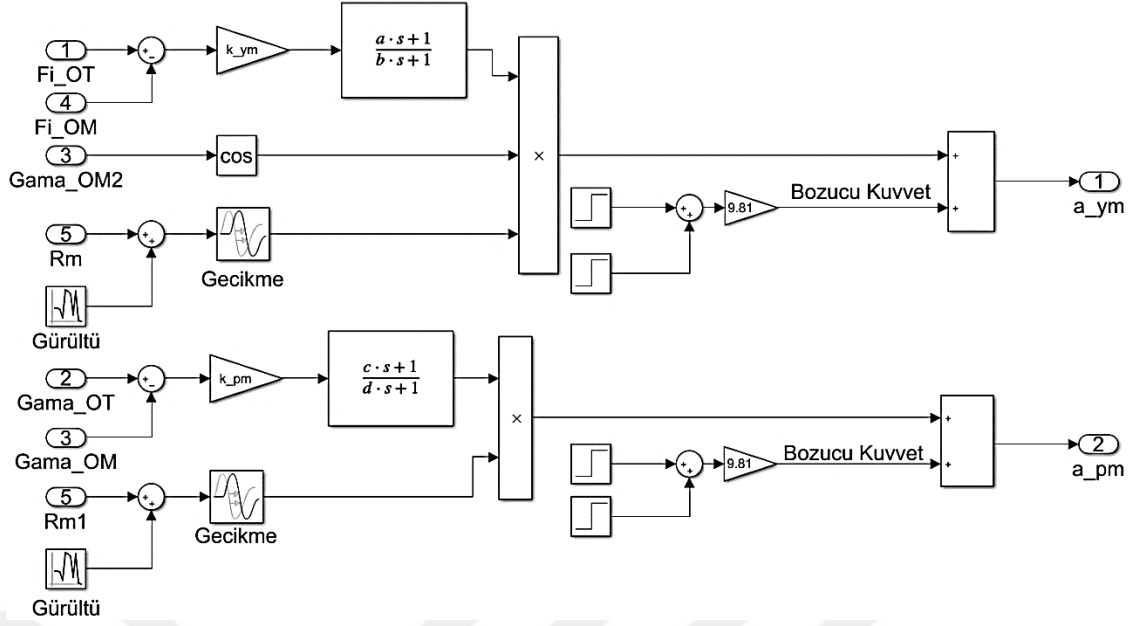
$$\gamma_{OT_0} = \tan^{-1} \frac{z_{T_0}}{\sqrt{x_{T_0}^2 + y_{T_0}^2}} \quad (4.4)$$



Şekil 4.9: Mühimmat ve Hedef Bakış Hattı Yunuslama Açılıarı.

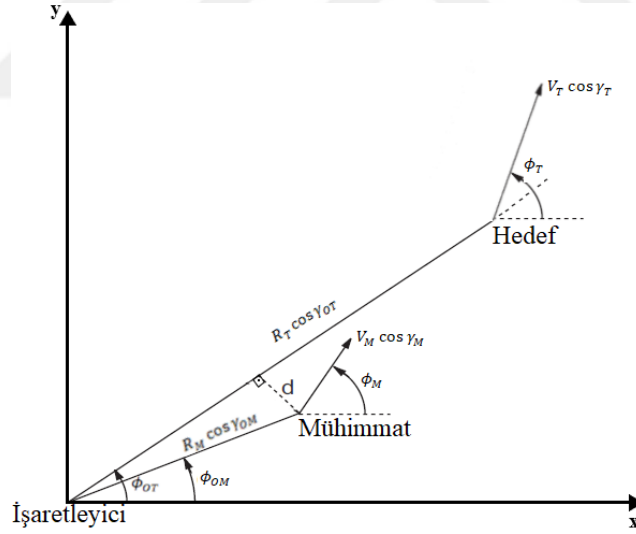
4.4. Güdüm Kontrol Bloğu

Bakış hattı açıları ve mühimmat menzili bilgileri kullanılarak lazer hüzme takip güdümü algoritmasına göre ivme komutlarının türetildiği bloktur. Bu blokta Denklem 3.14 ve 3.15'deki eşitliklere göre açılar ve mühimmat menzili arasındaki bağlantılar yapılmıştır. Bu bağlantılara göre türetilen ivmeler, mühimmatın gerçekleştirebileceği limitler dahilindeki doyum bloklarından geçerek otopilota girdi yapmaktadır. Bu blok içerisinde ayrıca sensör hataları ve bozucu etkiler de benzetime eklenmiştir. Sensör modellemesi bölümünde anlatılan gürültü ham veriye toplam olarak eklenmiş ve gecikme bloğu ile çarpılarak kontrolcüye beslenmiştir. Bozucu kuvvetler için tümden gelim yaklaşımı yapılmıştır. Bu yaklaşıma göre bozucu kuvvete karşılık gelen rüzgâr hızı Denklem 3.26'ya göre el ile hesaplanmıştır. Bu kuvvet kütle ile bağlantılı olarak ivmeye çevrilmiş ve bozucu olarak ivme emrine beslenmiştir. Blok içerisindeki bağlantılar Şekil 4.10'de gösterilmiştir.



Şekil 4.10: Güdüm Kontrol Bloğu.

Yandönme eksenindeki güdüm kuralı mühimmat ve hedefin bakış hattı eksenlerinin XY düzlemindeki izdüşümlerine göre türetilmektedir. XY düzlemi üzerindeki geometrik ilişki Şekil 4.11’de gösterilmektedir.

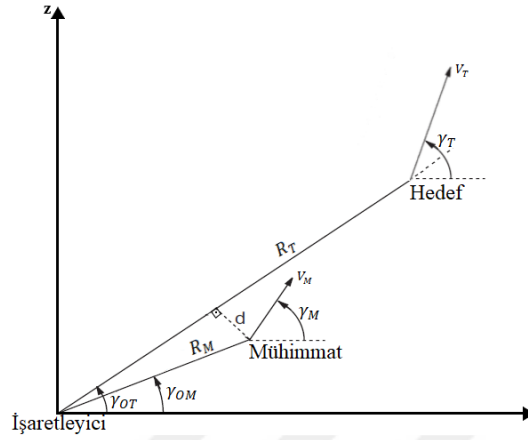


Şekil 4.11: Yandönme Ekseni Güdüm Geometrisi.

Hedef ve mühimmat XY düzlemi üzerine 2 boyuta indirgendikten sonra angajman kinematiği bölümünde anlatılan yaklaşıma göre d mesafesi çıkarılabilir. Bu geometriye göre d mesafesi Denklem 4.5’de gösterilen eşitliğe göre bulunur.

$$d = R_M \cos \gamma_{om} (\phi_{OT} - \phi_{OM}) \quad (4.5)$$

Yunuslama eksenindeki güdüm kuralı mühimmat ve hedefin bakış hattı eksenlerinin YZ düzlemindeki izdüşümlerine göre türetilmektedir. YZ düzlemi üzerindeki geometrik ilişki Şekil 4.12’de gösterilmektedir.



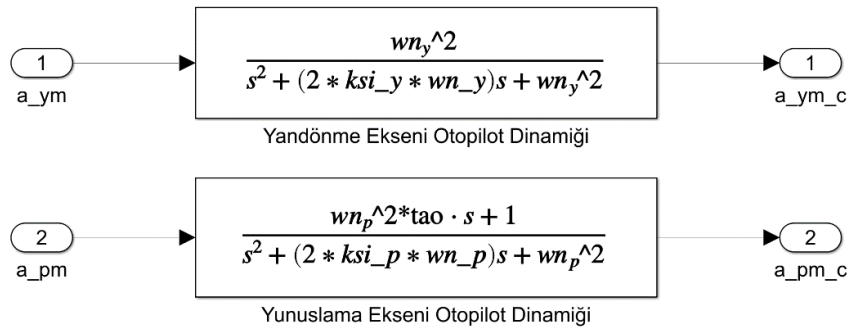
Şekil 4.12: Yunuslama Ekseni Güdüm Geometrisi.

Hedef ve mühimmat YZ düzlemi üzerine 2 boyuta indirgendikten sonra angajman kinematiği bölümünde anlatılan yaklaşıma göre d mesafesi çıkarılabilir. Bu geometriye göre d mesafesi Denklem 4.6’de gösterilen eşitliğe göre bulunur.

$$d = R_M(\gamma_{OT} - \gamma_{OM}) \quad (4.6)$$

4.5. Otopilot Bloğu

Otopilot bloğu, güdüm kontrol bloğundan aldığı emirleri, kabuller bölümü otopilot dinamiği kısmında belirlenen ikinci dereceden transfer fonksiyonundan geçirerek hedef dinamiği bloğuna girdi oluşturan alt sistemdir. Her iki eksen için de ayrı transfer fonksiyonları tanımlanmıştır. Bloğun içeriği Şekil 4.13’de gösterilmektedir.



Şekil 4.13: Otopilot Bloğu.

Dördüncü bölümde anlatılan alt sistem bloklarını, başlangıç koşullarını ve bütün benzetimin çalıştırılıp raporlanmasına dair yazılım kodları Ek 2’de verilmiştir.

5. KONTROLCÜ TASARIMI

Klasik güdüm yöntemleri endüstriden, askeri alanlara birçok farklı alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Geliştirilmesi ve sistemlere entegrasyonu kolay olduğu için maliyeti etkin sistemlerde kullanılması avantaj sağlamaktadır. Tez çalışması kapsamında yandönme ve yunuslama eksenleri kontrolcülerini için ileri kompansatör ve PD kontrolcü geliştirilmiştir.

İdeal mühimmat kontrol döngüsünün kapalı döngü transfer fonksiyonunun zaman uzayında karşılığı kontrol kazancına bağlı bir sinüs fonksiyonu olduğu için sistem salınımlı bir sistemdir. Mühimmat doğası gereği yüksek hızlarda hareket ettiği için kontrol edilebilmesi için de agresif yapıda bir kontrolcü istenmektedir. Bu nedenlerden ötürü kontrolcü tasarımı gerçekleştirilirken yükselme zamanı düşük salınımı azaltıcı etkileri olan ileri kompansatör ve PD kontrolcüsü seçilmiştir. Bu sistemlerin en büyük avantajı hızlı ve salınımsız sistemler ortaya çıkarırken kalıcı durum hatasını sıfıra indirgeyememektedir. İçerisinde integratör etkisi barındıran PID kontrolcü ile yapılan denemelerde sistem salınımı arttığı ve tepki süreleri düştüğü için yüksek hızlı mühimmat senaryolarında başarımlı yakalanamamıştır. Modern kontrol yöntemleri ile ilgili yapılabilecek çalışmalar sonuç bölümünde belirtilmiştir.

5.1. İleri Kompansatör Tasarımı

İleri ve geri kompansatörler klasik kontrol yöntemleri arasında yaygın olarak uygulanan bir yöntemdir. İleri kompansatör sistemin tepki süresini kısaltıp daha agresifleştirirken geri kompansatör ise sistemi daha gürbüz hale getirerek kalıcı durum hatasını azaltmaktadır. Her iki eksen için de uygulanan K oransal kontrolcüsü salınımı engelleyemediği için sisteme yeni kutup ve sıfırlar ekleyerek salınım engellenmeye çalışılmaktadır. İsminden de anlaşılacağı üzere sisteme ileri bir eleman eklenerek kontrol sağlanmaktadır. Eklenen kutbun büyüklüğünün sıfırın büyüklüğünde çok daha büyük olması nedeniyle sistemin çıktısı faz olarak girdiden hep önde olacaktır, bu nedenle ileri kompansatör olarak isimlendirilmektedir.

Birinci dereceden ileri kompansatörün transfer fonksiyonu şu şekildedir:

$$C(s) = K_C \frac{s - z_0}{s - p_0} \quad (5.1)$$

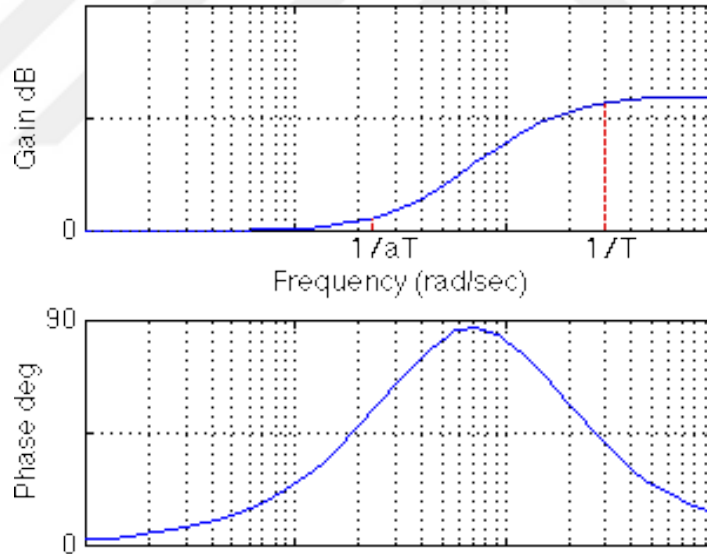
İleri kompensatör karmaşık düzlemde kök yer eğrilerini sola kaydırma eğilimindedir. Bunun da sonucu olarak sistem stabilizasyonu ve tepki hızında gelişme meydana gelir. Kontrolcünün frekans düzlemindeki davranışını da Şekil 5.1'deki Bode Diyagramından gözlemlenebilmektedir. Diyagramdan da anlaşılacağı üzere ileri kompensasyonu sisteme köşe frekansları olan $1/aT$ ile $1/T$ arasında pozitif faz ekler. Burada:

$$a = K_C \quad (5.2)$$

$$p_0 = 1/T \quad (5.3)$$

$$z_0 = 1/aT \quad (5.4)$$

Eğer sisteme daha fazla faz kayması eklenmek istenirse ilave ileri kompensatörü seri olarak eklenebilir.

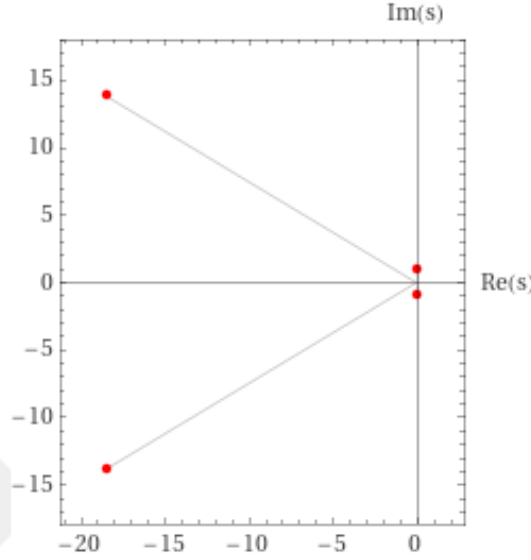


Şekil 5.1: İleri Kompensatör Bode Diyagramı.

Angajman kinematığında ele alınan denklemlerde kontrolcü hedef ve mühimmatın bakış hattı eksenleri arasındaki açı farkını minimize etmesi amaçlanmaktadır. Kontrolcü tasarımına başlamadan önce sistemin kapalı çevrim transfer fonksiyonunu Şekil 3.2'deki blok diyagrama göre bulunmalı ve analizi yapılmalıdır. Yandönme eksenini için kapalı çevrim transfer fonksiyonu:

$$\frac{529s^2}{s^4 + 36.8s^3 + 529s^2 + 529} \quad (5.5)$$

Transfer fonksiyonunun paydasının köklerinden ikisi Şekil 5.2’de görüldüğü üzere sağ yarı düzlemde olduğu için sistem kararsızdır.



Şekil 5.2: Yandönme Ekseni Transfer Fonksiyonu Kutupları.

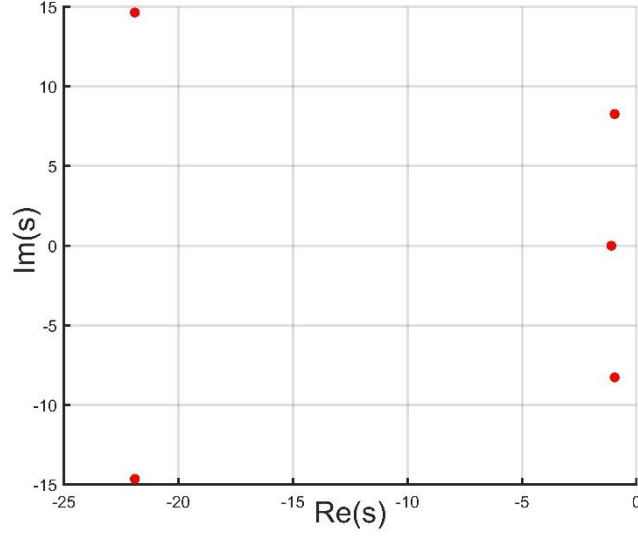
Bu kararsızlığı gidermek için sisteme bir kutup ve bir sıfır’dan oluşan ileri kompensatör ve kontrolcü kazancı eklenebilir. Eklenecek olan kontrolcü transfer fonksiyonu şu şekilde olacaktır:

$$K_y \frac{1 + \frac{s}{a}}{1 + \frac{s}{b}} \quad (5.6)$$

Yandönme ekseni kontrolcüsü için $a = 1$ ve $b = 10$ alınmış ve K_y kontrolcü kazancı 10 olarak hesaplanmıştır. Kontrolcü eklendikten sonra kapalı yunuslama ekseni için kapalı çevrim transfer fonksiyonu şu şekilde olacaktır:

$$\frac{52900s^3 + 52900s^2}{s^5 + 46.8s^4 + 897s^3 + 5290s^2 + 52900s + 52900} \quad (5.7)$$

Denklem 5.7’de bulunan transfer fonksiyonunun paydasının kökleri Şekil 5.3’de görüldüğü üzere sağ yarı düzlemden y eksenine üzerine ve sol yarı düzleme taşınmıştır. Bu sayede sistem kritik kararlı duruma gelmiştir.

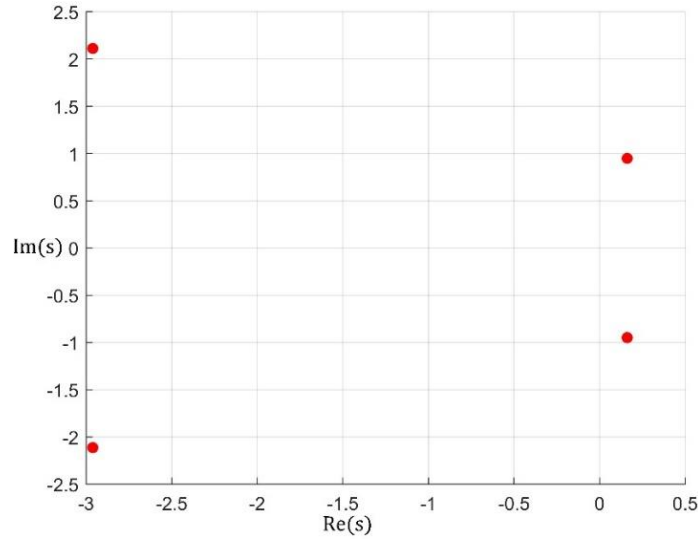


Şekil 5.3: Kontrolcü Sonrası Yandönme Eksenli Transfer Fonksiyonu Kutupları.

Yunuslama ekseninde yandönme eksenine göre otopilot dinamiği farklı olduğu için transfer fonksiyonu da farklı olacaktır. Yunuslama eksenine ait kapalı çevrim transfer fonksiyonu şu şekildedir:

$$\frac{1.225s^3 + 12.25s^2}{s^4 + 5.6s^3 + 12.25s^2 + 1.225s + 12.25} \quad (5.8)$$

Transfer fonksiyonunun paydasının köklerinden ikisi Şekil 5.4’de görüldüğü üzere sağ yarı düzlemde olduğu için sistem kararsızdır.



Şekil 5.4: Yunuslama Eksenli Transfer Fonksiyonu Kutupları.

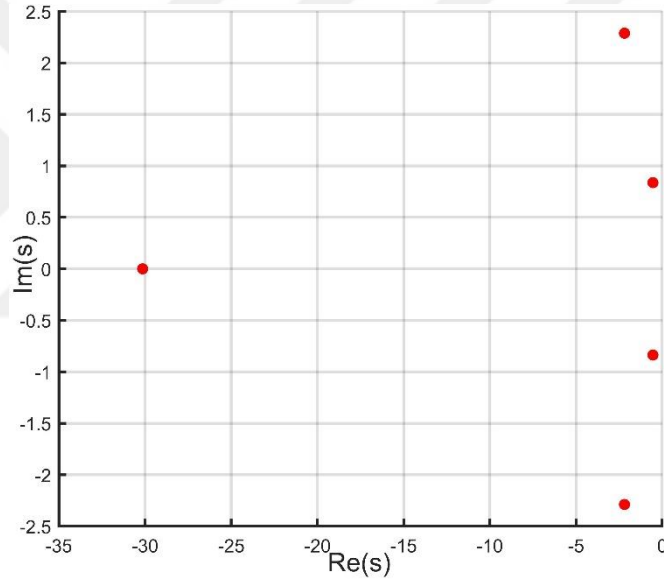
Bu kararsızlığı gidermek için sisteme bir kutup ve bir sıfırdan oluşan ileri kompanseör ve kontrolcü kazancı eklenebilir. Eklenecek olan kontrolcü transfer fonksiyonu şu şekilde olacaktır:

$$K_p \frac{1 + \frac{s}{c}}{1 + \frac{s}{d}} \quad (5.9)$$

Yandönme eksen kontrolcüsü için $c = 3$ ve $d = 30$ alınmış ve K_p kontrolcü kazancı 10 olarak hesaplanmıştır. Kontrolcü eklendikten sonra kapalı yunuslama eksenini için kapalı çevrim transfer fonksiyonu şu şekilde olacaktır:

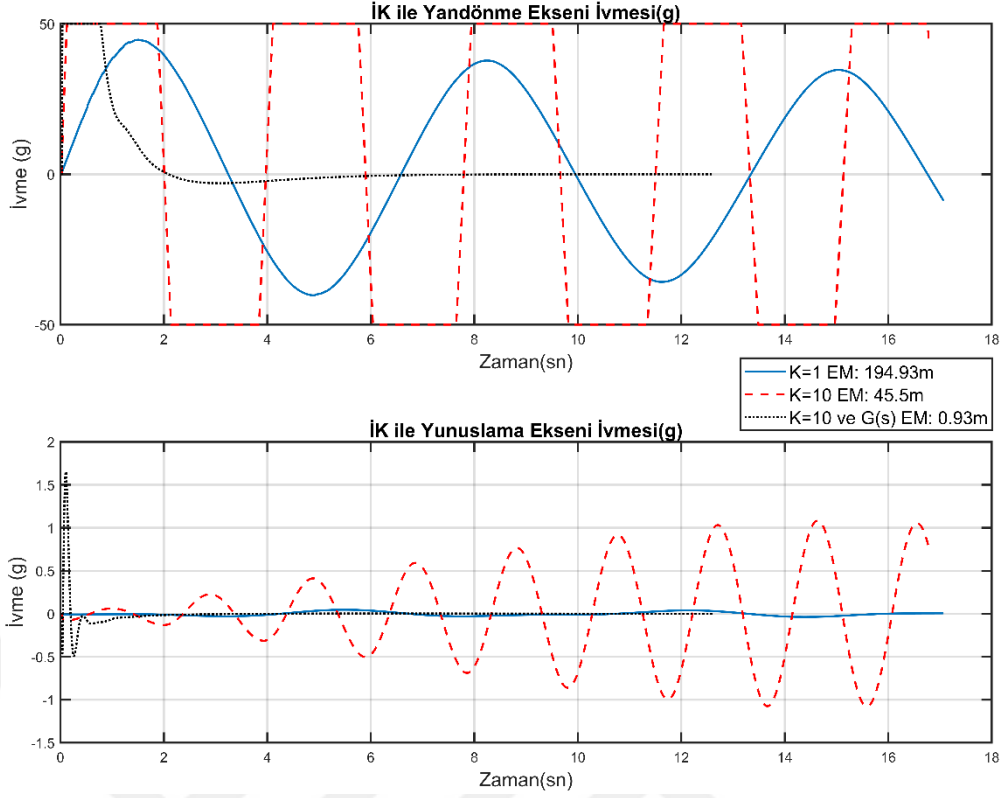
$$\frac{122.5^4 + 467.5s^3 + 300s^2}{s^5 + 35.6s^4 + 180.3s^3 + 490s^2 + 467.5s + 300} \quad (5.10)$$

Denklem 5.10'da bulunan transfer fonksiyonunun paydasının kökleri Şekil 5.5'de görüldüğü üzere sağ yarı düzlemde sol yarı düzleme taşınmıştır. Bu sayede sistem kararlı duruma gelmiştir.



Şekil 5.5: Kontrolcü Sonrası Yunuslama Eksenini Transfer Fonksiyonu Kutupları.

Kontrolcü kazancı ve kompensatörün yanal ivmeler ve eksik mesafe üzerindeki etkilerini görmek için farklı kontrolcü kazançları, kompensatörlü ve kompensatörsüz benzetimler yapılmıştır. Benzetimler ideal sistem için yapılmıştır, otopilot dinamiği 1 kabul edilmiştir ve bozucular sistemden kaldırılmıştır. Aynı senaryo içerisinde farklı kazançlar ve kompensatör ile elde edilen yanal ivme grafikleri Şekil 5.6'de gösterilmektedir.



Şekil 5.6: Kontrolcü Benzetim Sonuçları.

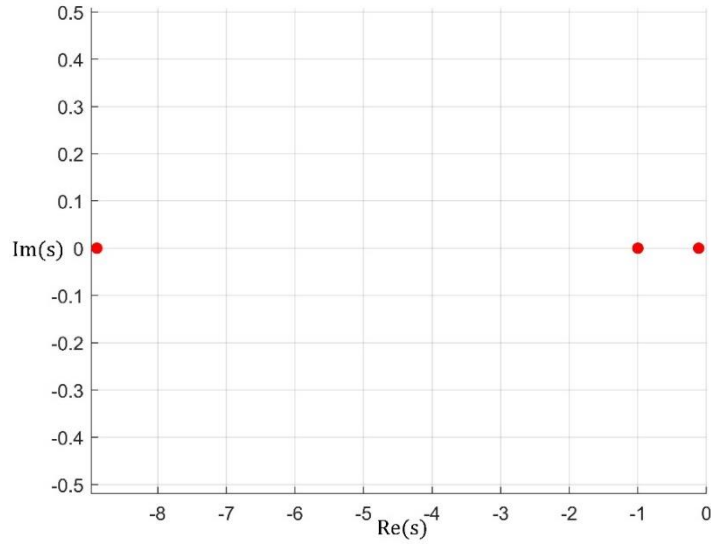
İdeal sistem göz önüne alındığında sistemin transfer fonksiyonu şu şekilde olacaktır:

$$\frac{\alpha_m}{\theta_T} = \frac{KR_M s^2}{s^2 + K} \quad (5.11)$$

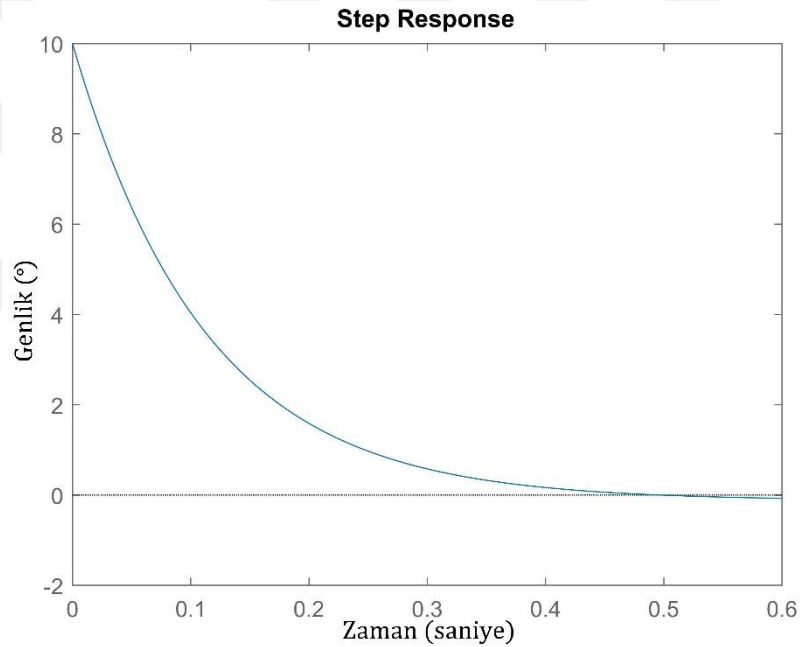
Denklem 5.11'deki transfer fonksiyonunun zaman uzayında K doğal frekanslı bir sinüs fonksiyonuna karşılık gelmektedir. Bu nedenle K kontrolcü kazancı arttıkça ivmelerdeki salınım da artmaktadır. K büyüklüğü arttıkça sistemin hataya karşı verdiği tepki arttığı için de eksik mesafe azalmaktadır. Benzetimde kullanılan kompensatörün sıfır ve kutup değerleri sırasıyla $z_0 = -1$ ve $p_0 = -10$ 'dur. Bu değerler ile birlikte sistemin kapalı çevrim transfer fonksiyonu Denklem 5.12'de belirtildiği gibi olmuştur.

$$\frac{\alpha_m}{\theta_T} = \frac{s^2(s + 1)10R_M}{s^3 + 10s^2 + 10s + 1} \quad (5.12)$$

Denklem 5.12'deki transfer fonksiyonunun paydasının kökleri ve birim basamak girişine karşılık kalıcı durum hatası sırasıyla Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de gösterilmektedir.



Şekil 5.7: Transfer Fonksiyonu Paydasının Kökleri.



Şekil 5.8: Birim Basamak Cevabı.

Şekil 5.7'deki sistem köklerine bakıldığında sol yarı düzlemde çıkmakta ve sistem kararlılığını sağlamaktadırlar. Şekil 5.8'deki kalıcı durum hatası grafiğine göre de sistem birim basamak girişine göre kalıcı durum hatasını sıfıra yaklaştırmaktadır. Tip 0 bir sistem olduğu için ve teorik olarak değer hiçbir zaman 0 olamayacağı için her koşulda eksik mesafe oluşacaktır.

Yukardaki grafikteki sonuçlar ve üç ayrı koşuldaki benzetime göre kontrolcü tasarımı doğrulanmıştır. Burada elde edilen kontrolcü senaryolar bölümündeki benzetimlerde kullanılacaktır.

5.2. PD Kontrolcü Tasarımı

PD kontrolcülerin genel kullanım amacı sistem kararlılığını arttırmaktır. Bunu sistemin gelecekteki hatasını tahmin etmesini sağlayan türev kontrolcüsü sayesinde gerçekleştirir. Hata sinyali değerindeki ani, değişiklikleri önleyip salınımı azaltmak için oransal kontrolcü türev kontrolcüsü ile birlikte kullanılır. Oransal kontrolcü oturma zamanı ve kalıcı durum hatasını azaltırken, maksimum aşmayı arttırmakta ve salınıma neden olmaktadır. Türev kontrolcüsü ise salınımı ve maksimum aşmayı azaltıcı etki göstermektedir.

PD kontrolcü 5.13 numaralı denklemde belirtildiği gibi 2 katsayıdan oluşmaktadır. K_p oransal kontrolcü katsayısını, K_d ise türev kontrolcüsünün katsayısını belirtmektedir. Kontrolcü, hata sinyalini çarpma ve türev alma işlemlerinden geçirerek sıfır indirgemeyi amaçlamaktadır.

$$K(s) = K_p + K_d s \quad (5.13)$$

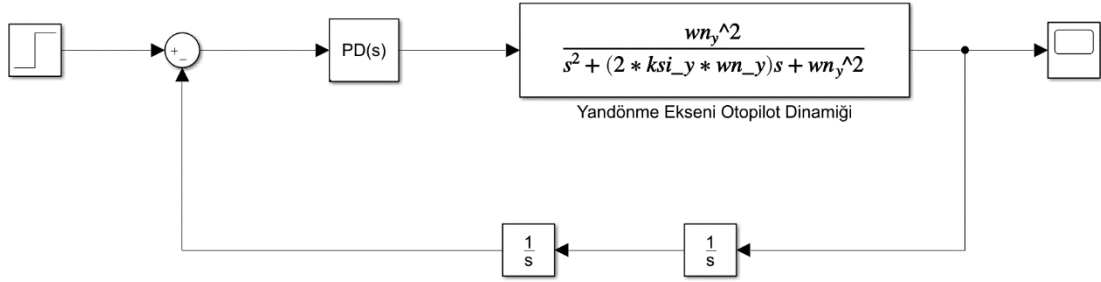
5.13 numaralı denklemde belirtilen PD kontrolcüsü, türev alma işlemini gerçek sistem uygulamalarında gerçekleştiremeyebilir. Bunun nedeni türev alma işlemine bir basamak emri geldiğinde, türev işleminin bir noktada sonsuza gitmesidir. Bu duruma engel olmak için türev kontrolcüsü alçak geçiren bir filtre ile birlikte uygulanmalıdır. Filtre eklendikten sonraki kontrolcü transfer fonksiyonu Denklem 5.14'de belirtilmiştir. Bu filtre sensör gürültülerinin de yükseltilmesini engellemektedir (Doğan, Hasan 2019).

$$K_f(s) = K_p + K_d \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}} \quad (5.14)$$

Denklem 5.14'de N filtre katsayısını ifade etmektedir. Bu denkleme göre yandönme ve yunuslama eksenleri için PD kontrolcü tasarımı aşağıda belirtildiği şekilde yapılmıştır.

Yandönme eksenini için MATLAB/Simulink ortamında kontrol döngüsü Şekil 3.2'de belirtilen döngü esas alınarak yeniden tanımlanmıştır. Bu döngüde hata sinyaline PD kontrolcüsü uygulanmıştır. Kontrolcü katsayılarının ve filtre katsayısının

optimizasyonu PID Tuner bloğu ile yapılmıştır. Yandönme eksenini için kontrol döngüsü Şekil 5.9'da gösterilmiştir.



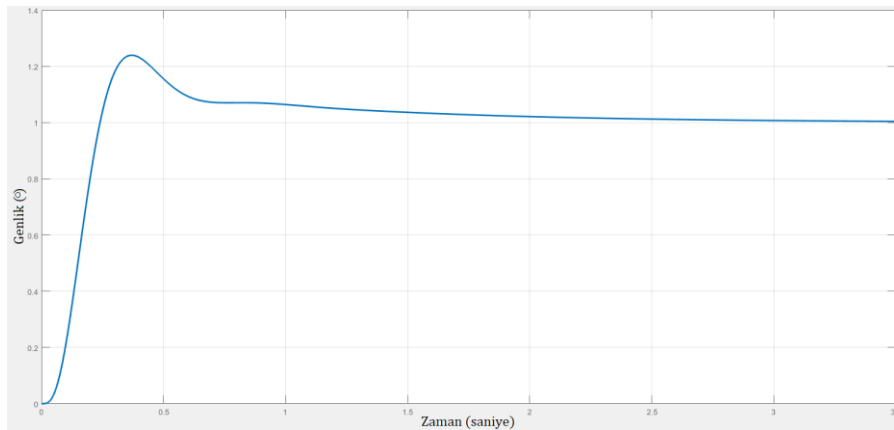
Şekil 5.9: Yandönme Eksenini Kontrol Döngüsü.

Yandönme eksenini için kontrol parametreleri ve performans sonuçları Tablo 5.1'de ifade edilmiştir.

Tablo 5.1: Yandönme Eksenini Kontrolcü Parametreleri.

| | |
|-----------------|----------------------|
| K_p | 6.743 |
| K_d | 7.229 |
| N | 103.061 |
| Yükselme Zamanı | 0.144 sn |
| Oturma Zamanı | 2.06 sn |
| Maksimum Aşma | 23.8% |
| Faz Payı | 11.2 dB @ 19.1 rad/s |
| Kazanç Payı | 49.9 ° @ 7.12 rad/s |

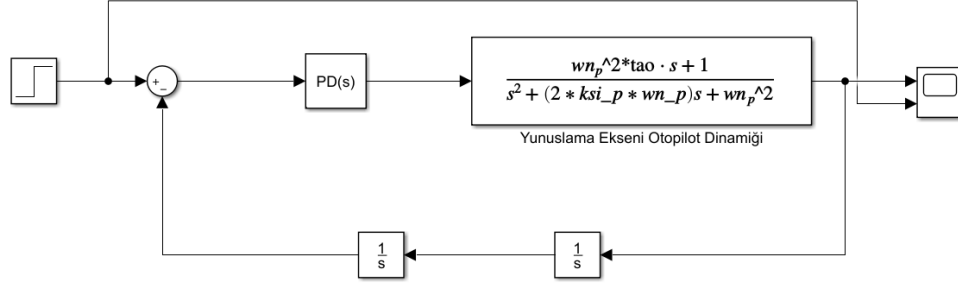
Tablo 5.1'deki parametrelere göre sistemin adım emrine karşı verdiği tepki Şekil 5.10'da gösterilmiştir.



Şekil 5.10: Yandönme Eksenini Adım Emri Cevabı.

Yunuslama eksenini için MATLAB/Simulink ortamında kontrol döngüsü Şekil 3.2'de belirtilen döngü esas alınarak yeniden tanımlanmıştır. Bu döngüde hata sinyaline PD

kontrolcüsü uygulanmıştır. Kontrolcü katsayılarının ve filtre katsayısının optimizasyonu PID Tuner bloğu ile yapılmıştır. Yunuslama eksenini için kontrol döngüsü Şekil 5.11’de gösterilmiştir.



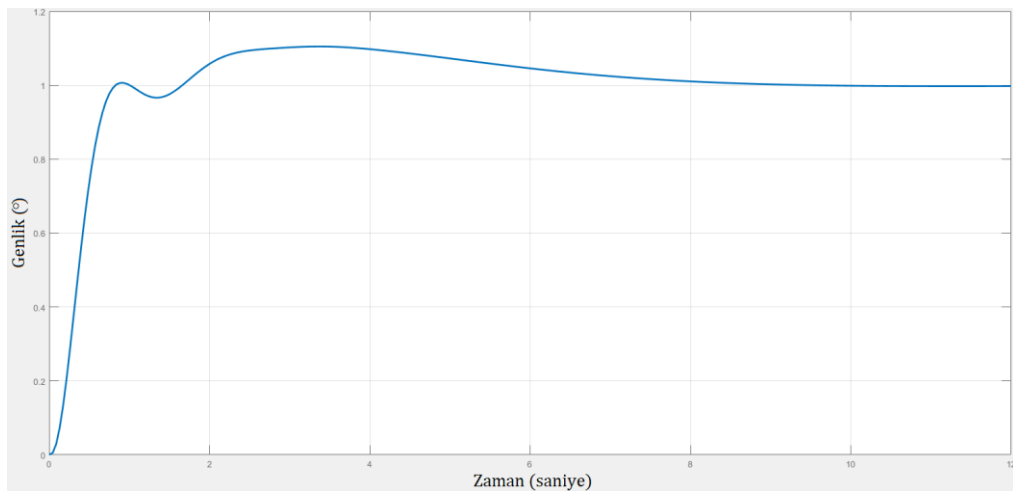
Şekil 5.11: Yunuslama Ekseni Kontrol Döngüsü.

Yandönme eksenini için kontrol parametreleri ve performans sonuçları Tablo 5.1’de ifade edilmiştir.

Tablo 5.2: Yunuslama Ekseni Kontrolcü Parametreleri.

| | |
|-----------------|-------------------|
| K_p | 8.393 |
| K_d | 12.316 |
| N | 68.0166 |
| Yükselme Zamanı | 0.503 sn |
| Oturma Zamanı | 7.22 sn |
| Maksimum Aşma | 10.5% |
| Faz Payı | 25.9 dB @17 rad/s |
| Kazanç Payı | 73.5 ° @2.8 rad/s |

Tablo 5.2’deki parametrelere göre sistemin adım emrine karşı verdiği tepki Şekil 5.10’da gösterilmiştir.



Şekil 5.12: Yunuslama Ekseni Adım Emri Cevabı.

6. SENARYOLAR

Savaş ortamı içerdiği dinamikler nedeniyle çok farklı senaryolara sahiptir. MATLAB ortamında kurulan benzetim ortamı birden farklı senaryoların denenmesini mümkün kılmaktadır. Tez çalışması kapsamında temelde yaşanabilecek 5 farklı senaryo için benzetim yapılmıştır. Senaryolardaki ortam koşulları ve başlangıç değerleri tabloda özetlenmiştir. Senaryolarda kullanılan mühimmat başlangıç yunuslama ve yandönme açıları bütün senaryolarda aynı kabul edilmiştir.

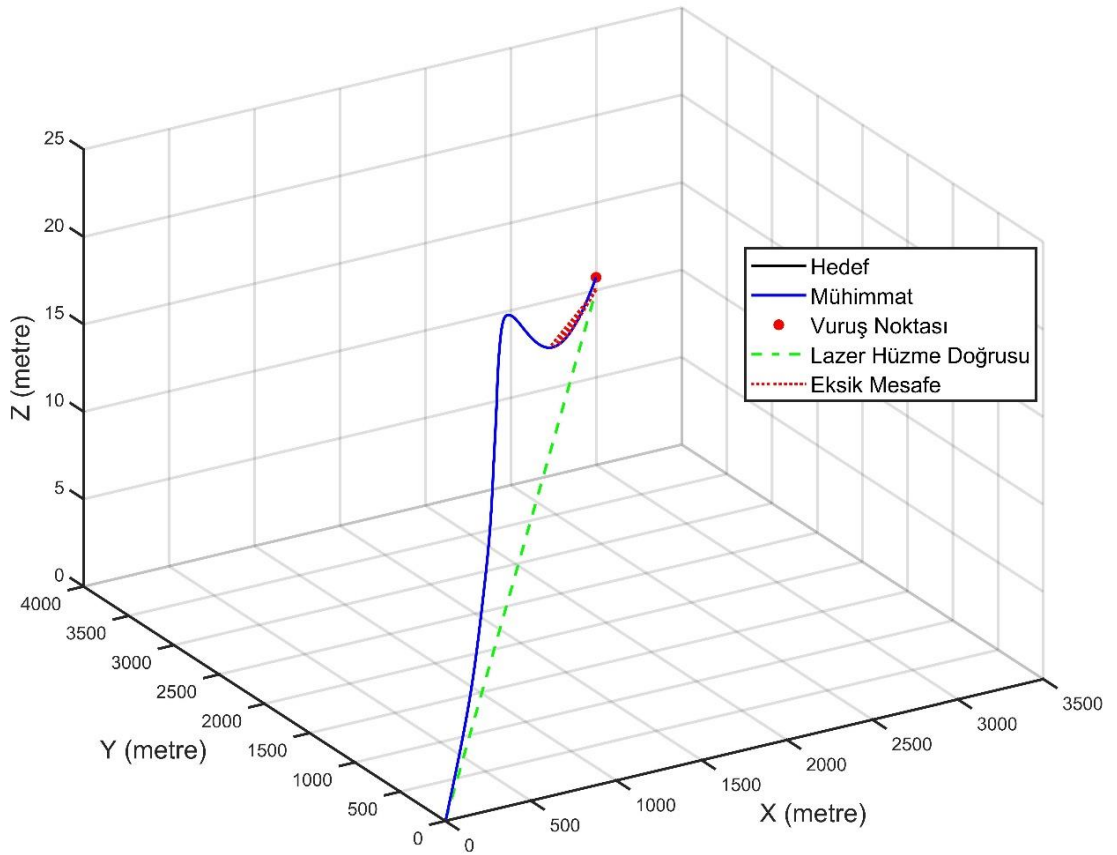
Senaryo koşulları oluşturulurken güdüm algoritmasını etkileyebilecek etkenlerin hepsinin gözlenmesi amaçlanmıştır. Bu etkenler R_M mesafesi ve hedef bakış hattı açıları olan γ_{OT} ve ϕ_{OT} açılarıdır. R_M mesafesinin başlangıç notasına göre en yüksek artış ve azalış hızlarını gözlemek için hedefe ikinci ve üçüncü senaryolarda 45° 'lik açılar ile yaklaşma ve uzaklaşma hareketi yaptırılmıştır. Bakış hattı açılarının değişiminin etkisini gözlenmesi için de dördüncü ve beşinci senaryolarda ivmeli manevralar yaptırılmıştır.

Tablo 6.1: Senaryo Koşulları.

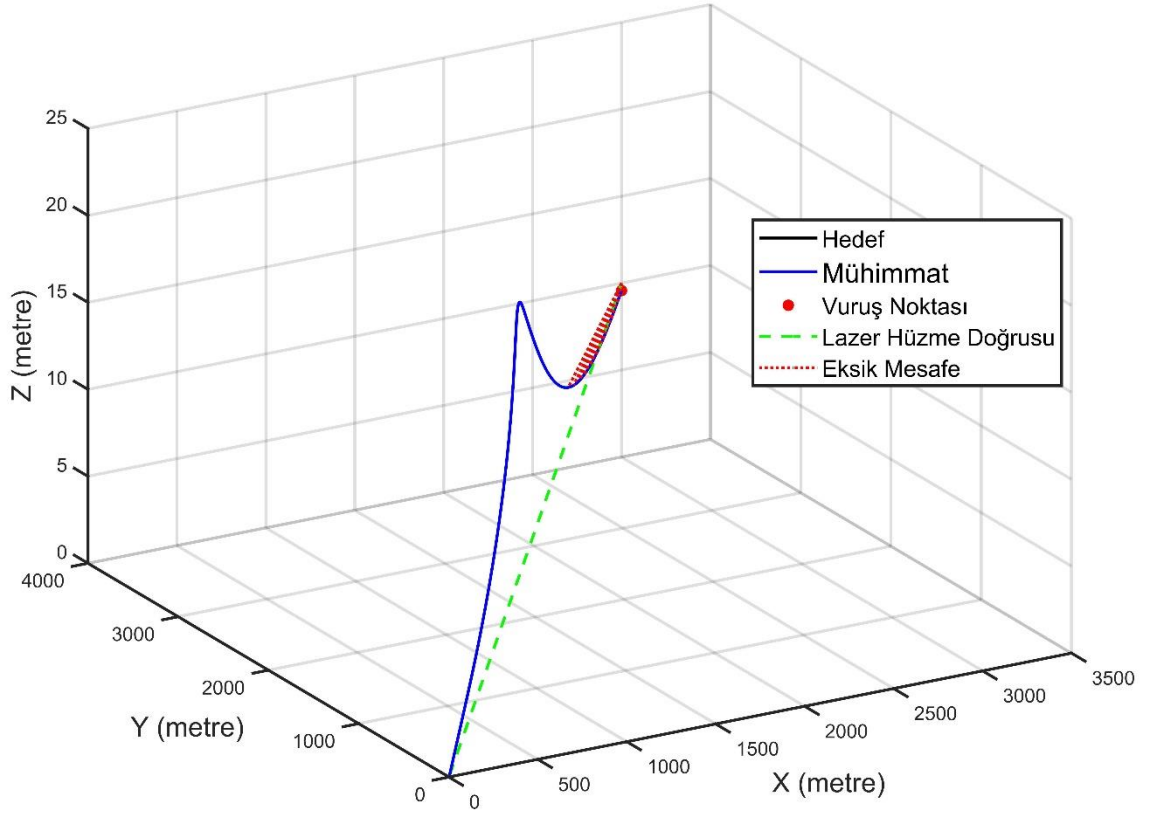
| | Hedef Başlangıç Koordinatları (x, y, z) | Mühimmat Namlu Çıkış Hızı (m/s) | Hedef Hareketi | Rüzgâr Durumu |
|-----------|---|---------------------------------|--|----------------------------------|
| Senaryo 1 | 3000, 4000, 10 | 550 | Sabit | Yok |
| Senaryo 2 | 3000, 4000, 10 | 600 | Sabit 30 m/s hız ve 45° açı ile yaklaşma | 20 m/s (45° 45°) |
| Senaryo 3 | 3000, 4000, 10 | 600 | Sabit 30 m/s hız ve 45° açı ile uzaklaşma | 20 m/s (45° 45°) |
| Senaryo 4 | 3000, 4000, 10 | 650 | 3 m/s ² ivme ile yaklaşma | 20 m/s (45° 45°) |
| Senaryo 5 | 3000, 4000, 10 | 650 | 3 m/s ² ivme ile uzaklaşma | 20 m/s (45° 45°) |

6.1. Senaryo 1

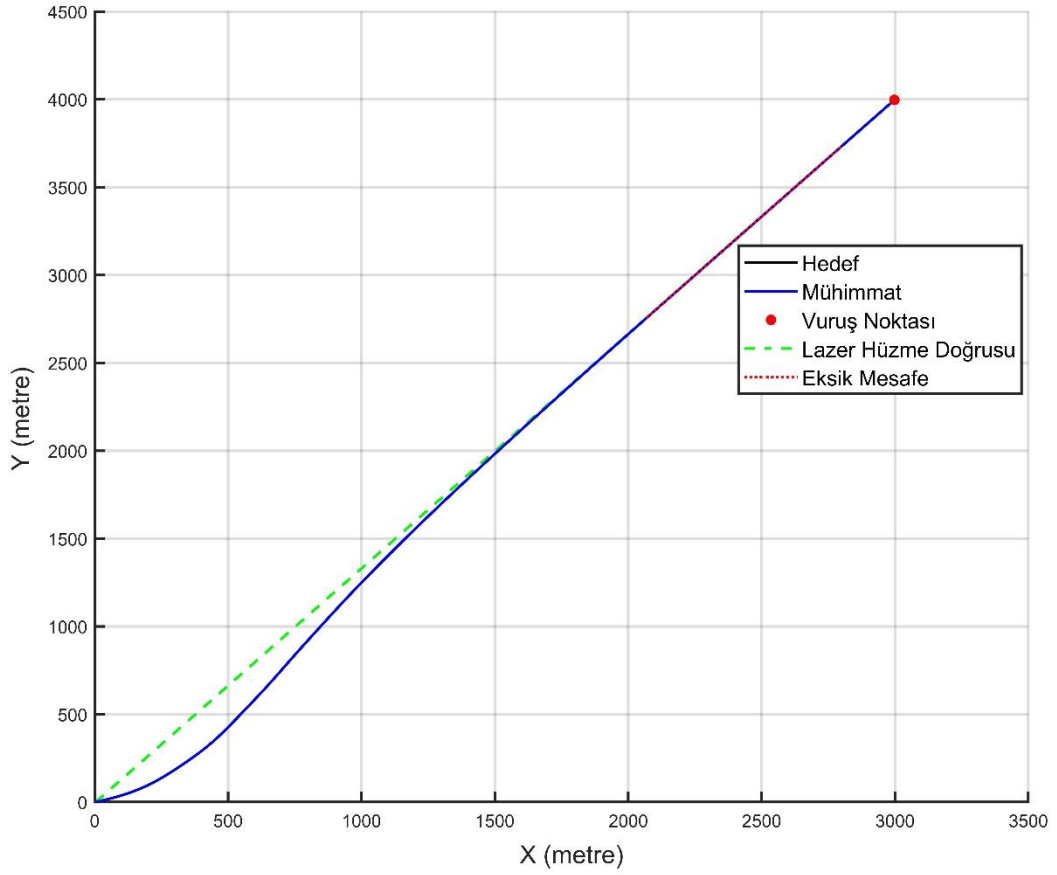
Birinci senaryo güdüm kuralının en iyi çalışabildiği hedefin sabit kabul edildiği durumdur. 5 km uzaktaki hedefe herhangi bir yanal rüzgâr kuvveti olmadan atış yapılmaktadır. Benzetim sonuçlarına göre hedef İK kontrolcüsü ile 11.46 sn sonunda 0.742 m eksik mesafe ile vurulmaktadır. Yunuslama eksenindeki maksimum ve ortalama ivmeler sırası ile 1.113g ve 0.201g, yandönme eksenindeki maksimum ve ortalama ivmeler ise sırasıyla 50.758g ve 3.879g olarak gerçekleşmiştir. PD kontrolcüsü ile yapılan benzetimlere göre hedef 11.31 sn sonunda 0.708 m eksik mesafe ile vurulmaktadır. Yunuslama eksenindeki maksimum ve ortalama ivmeler sırası ile 1.101g ve 0.220g, yandönme eksenindeki maksimum ve ortalama ivmeler ise sırasıyla 40.689g ve 4.044g olarak gerçekleşmiştir. Benzetim sonuçları Şekil 6.1 ile Şekil 6.10 arasında gösterilmektedir.



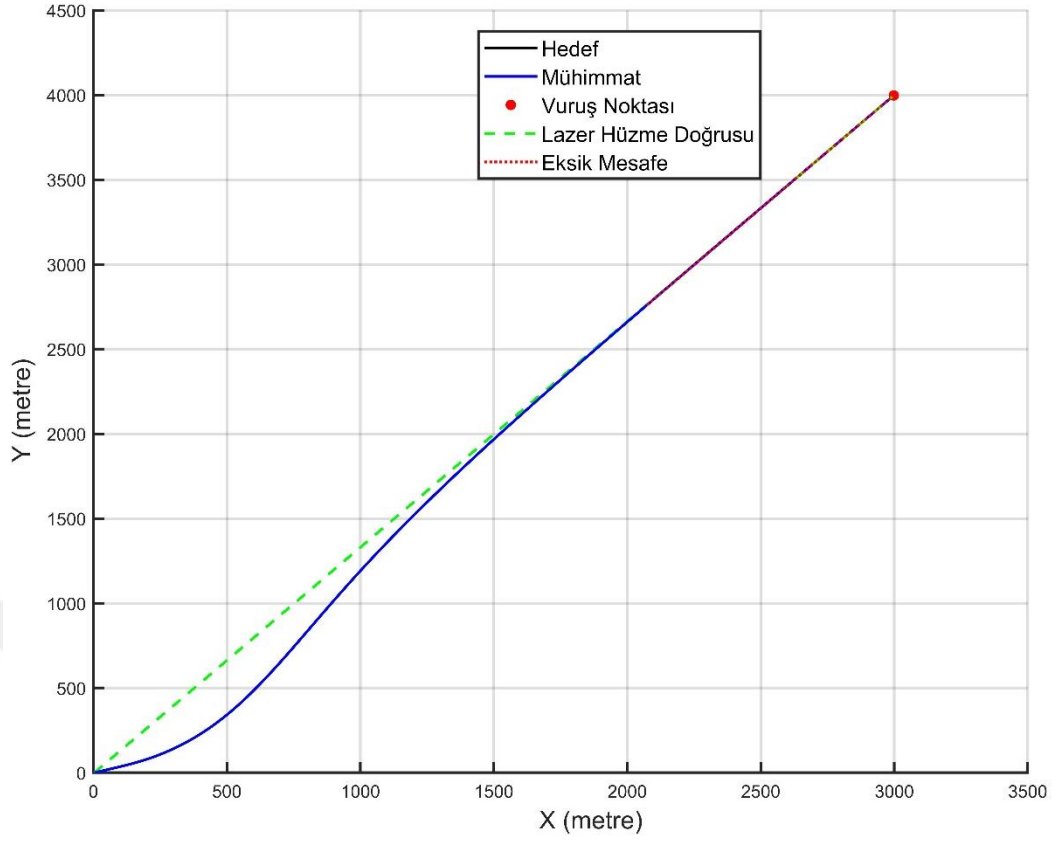
Şekil 6.1: İK Kontrolcüsü ile 3 Boyutlu Hedef ve Mühimmat Hareketleri.



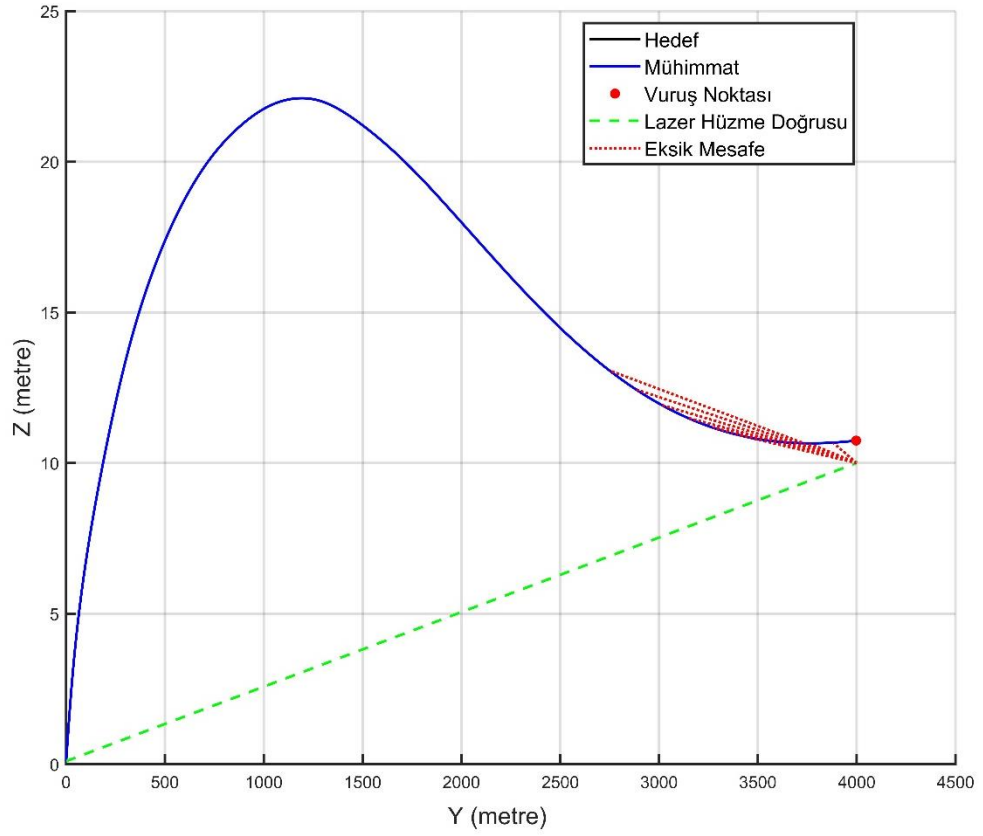
Şekil 6.2: PD Kontrolcüsü ile 3 Boyutlu Hedef ve Mühimmat Hareketleri.



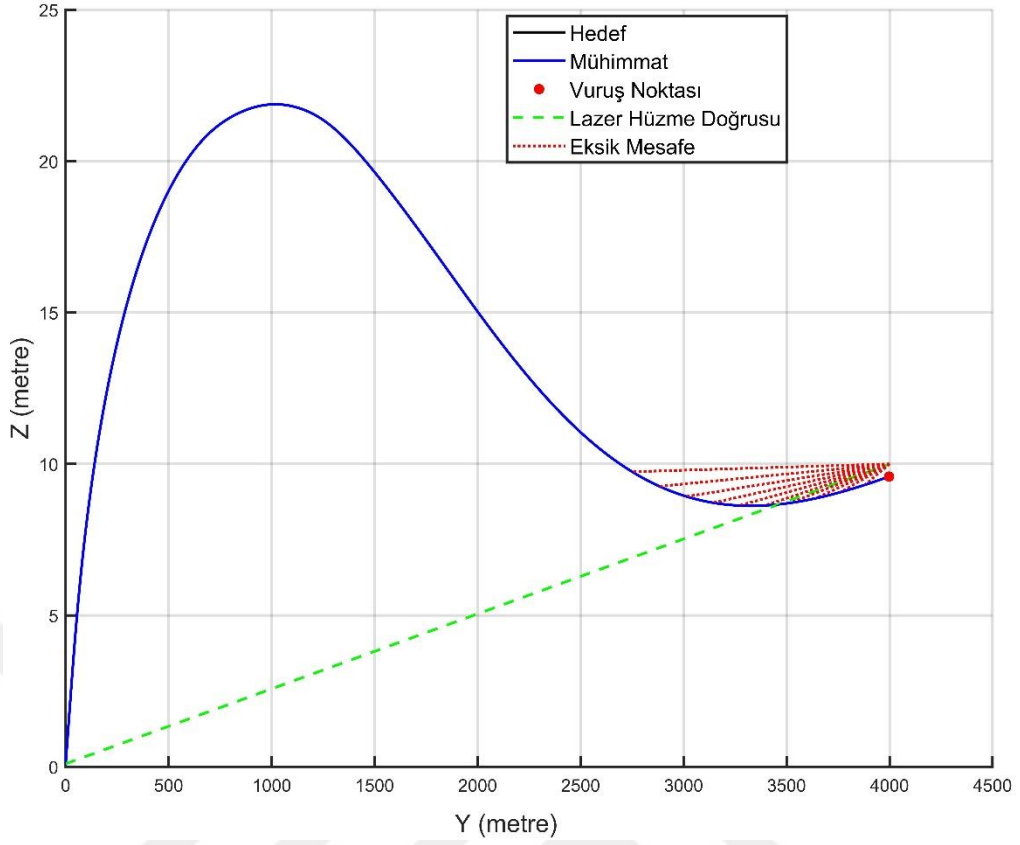
Şekil 6.3: İK Kontrolcüsü ile XY Düzleminde Hedef ve Mühimmat Hareketleri.



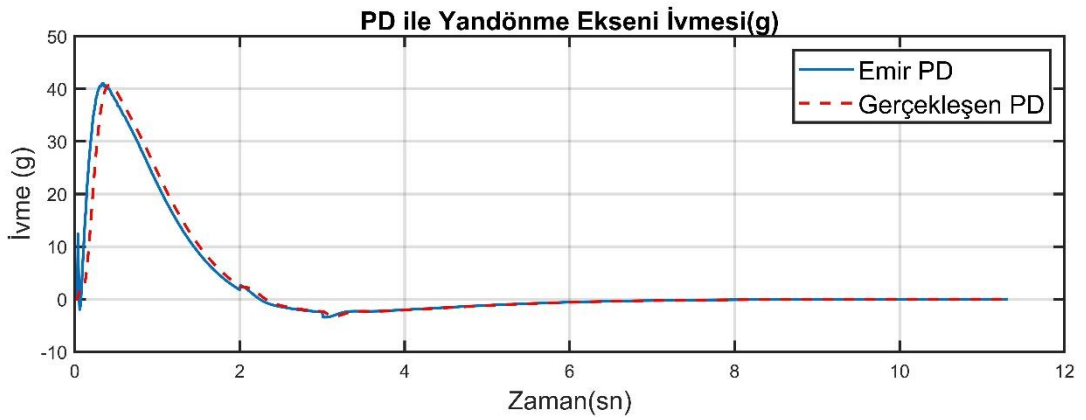
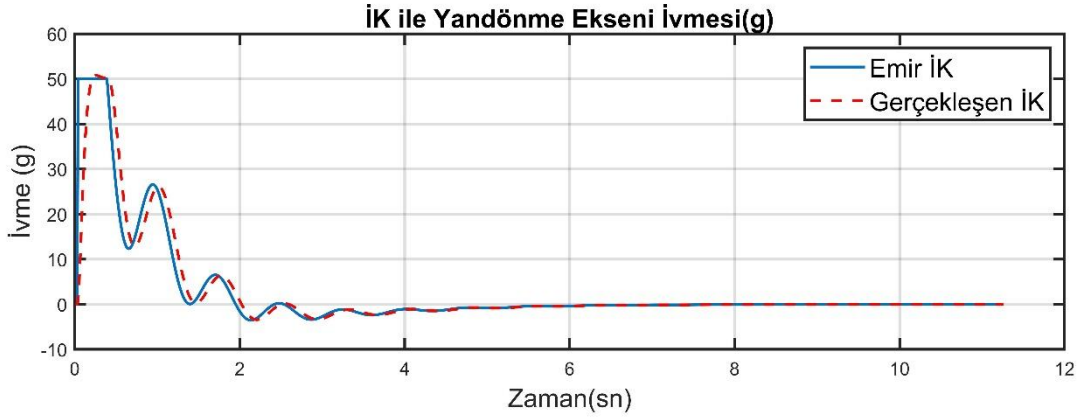
Şekil 6.4: PD Kontrolcüsü ile XY Düzleminde Hedef ve Mühimmat Hareketleri.



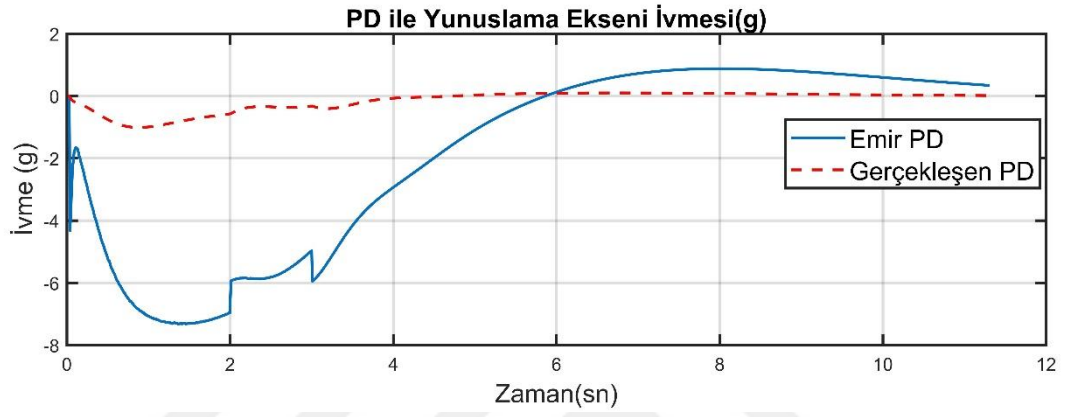
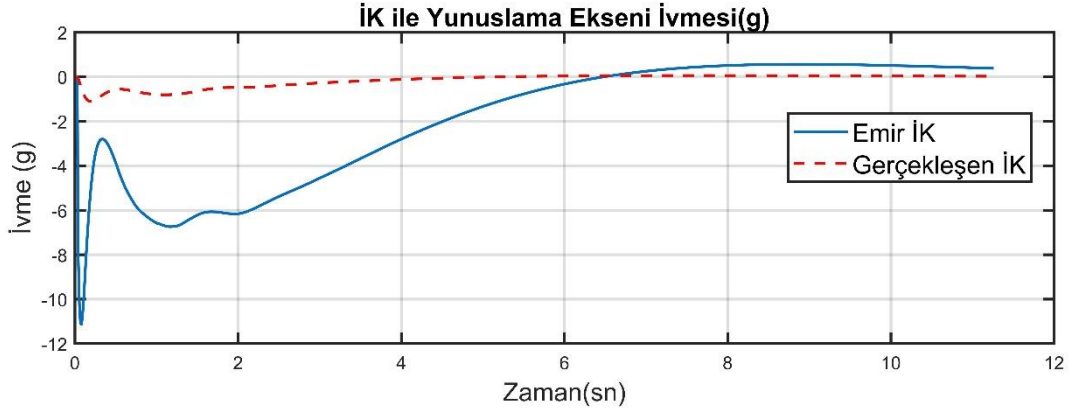
Şekil 6.5: İK Kontrolcüsü ile YZ Düzleminde Hedef ve Mühimmat Hareketleri.



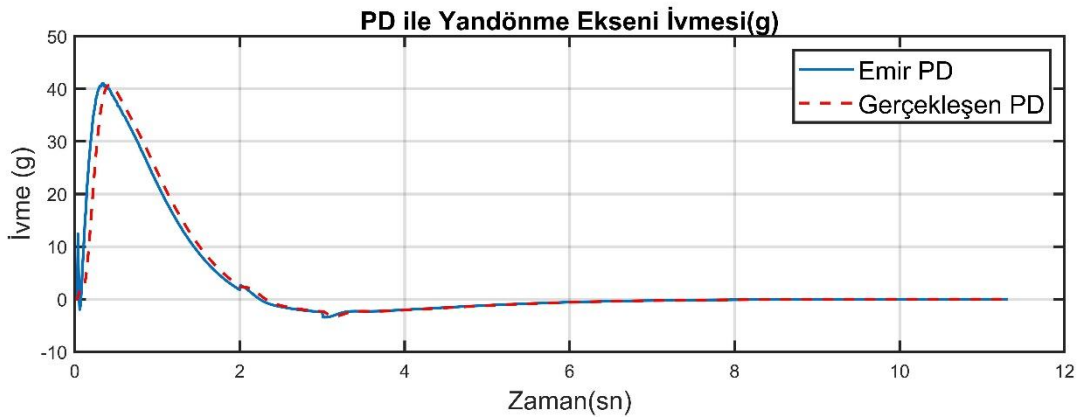
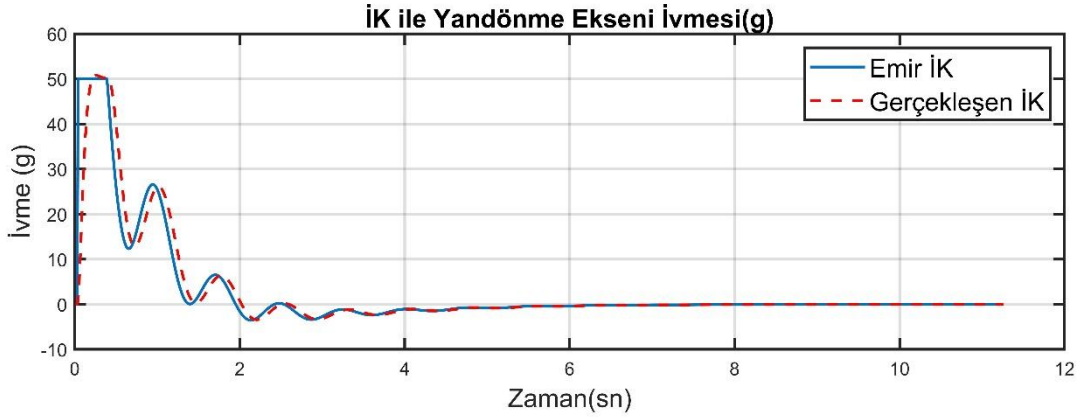
Şekil 6.6: PD Kontrolcüsü ile YZ Düzleminde Hedef ve Mühimmat Hareketleri.



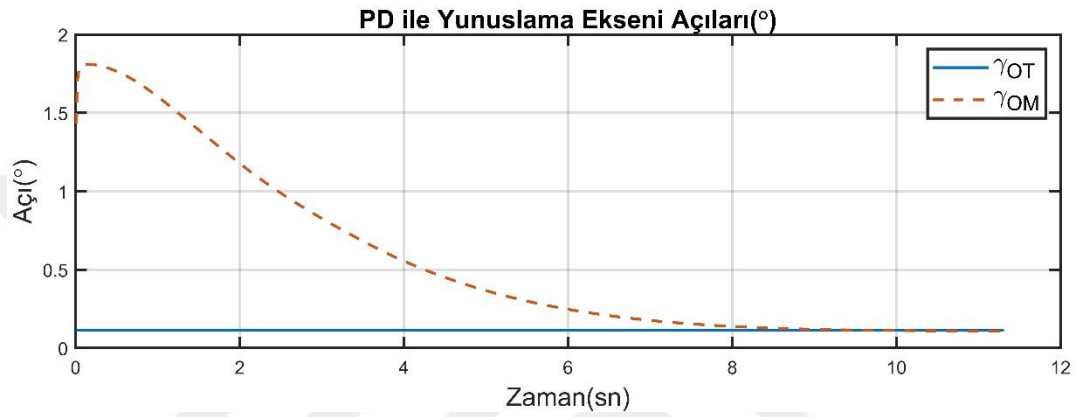
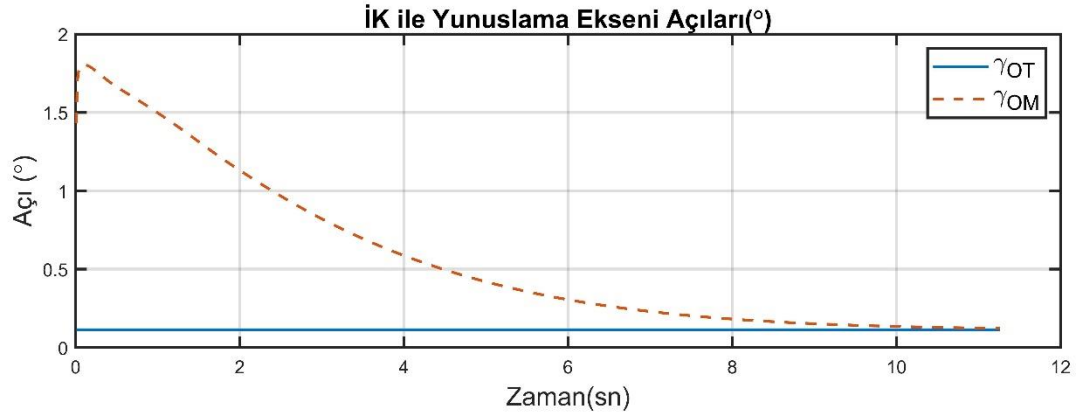
Şekil 6.7: Yandönme Ekseni Tarafından Yapılan İvmeler.



Şekil 6.8: Yunuslama Ekseni Tarafından Yapılan İvmeler.



Şekil 6.9: Yandönme Ekseni Bakış Hattı Açılı.



Şekil 6.10: Yunuslama Ekseni Bakış Hattı Açıları.

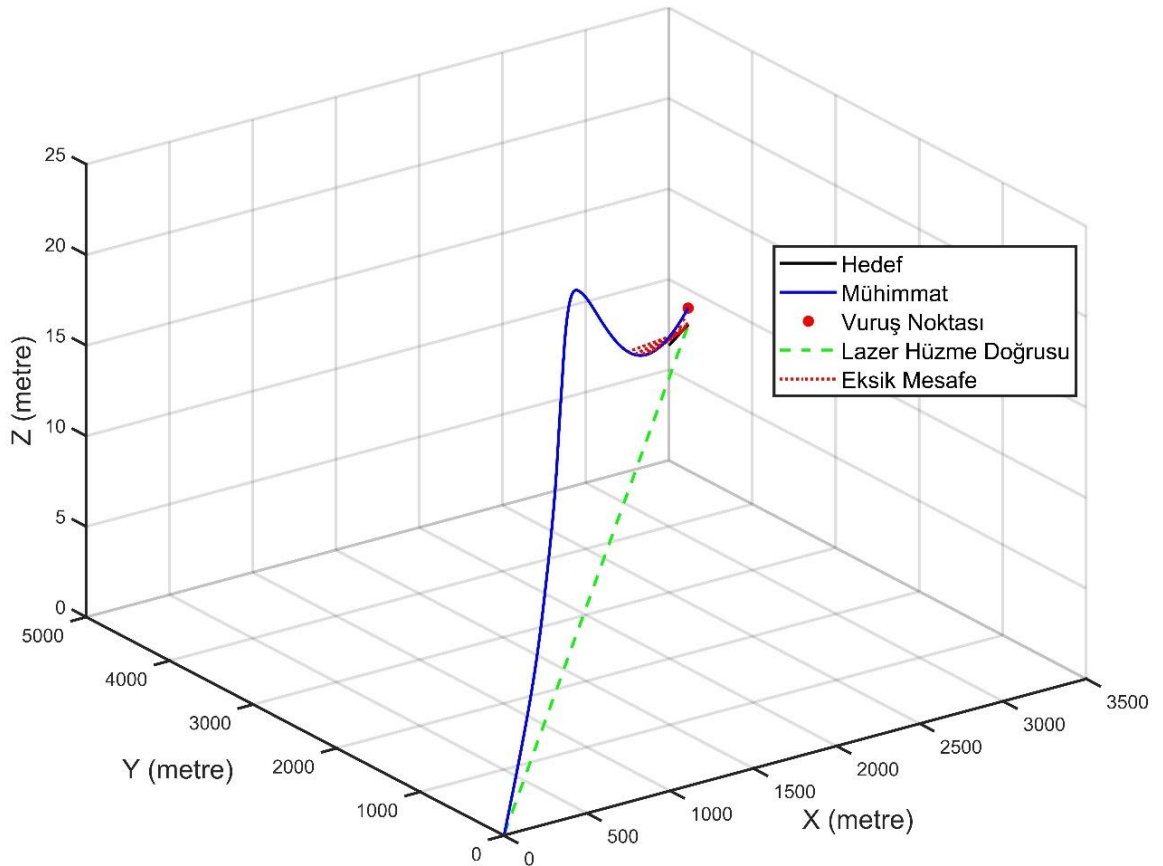
Sonuç grafiklerine göre mühimmat ilk çıkış anında hedef bakış hattı eksenine oturabilmek için yüksek değerlerde yandönme ivmesine mağruz kalmıştır. Kısa süreli yandönme eksenini doyuma ulaştırarak hedef takip başarımını sağlamıştır. Her iki eksene de 2-3. sn aralığında gelen yanal rüzgâr kuvvetini de güdüm algoritması bastırmıştır. Mühimmat ve hedef arasında yükselti farkı az olduğu için yunuslama eksenini ilk atımda meydana gelen tırmanışı düzelterek hedefe yönelimi sağlamıştır. Mühimmatın konumu değişmediği için bakış hattı açılarında da değişiklik olmamıştır. PD kontrolcüsü İK'ya göre yandönme eksenindeki hataları daha stabil ve düşük ivme isteri ile kontrol etmeyi başarmıştır.

6.2. Senaryo 2

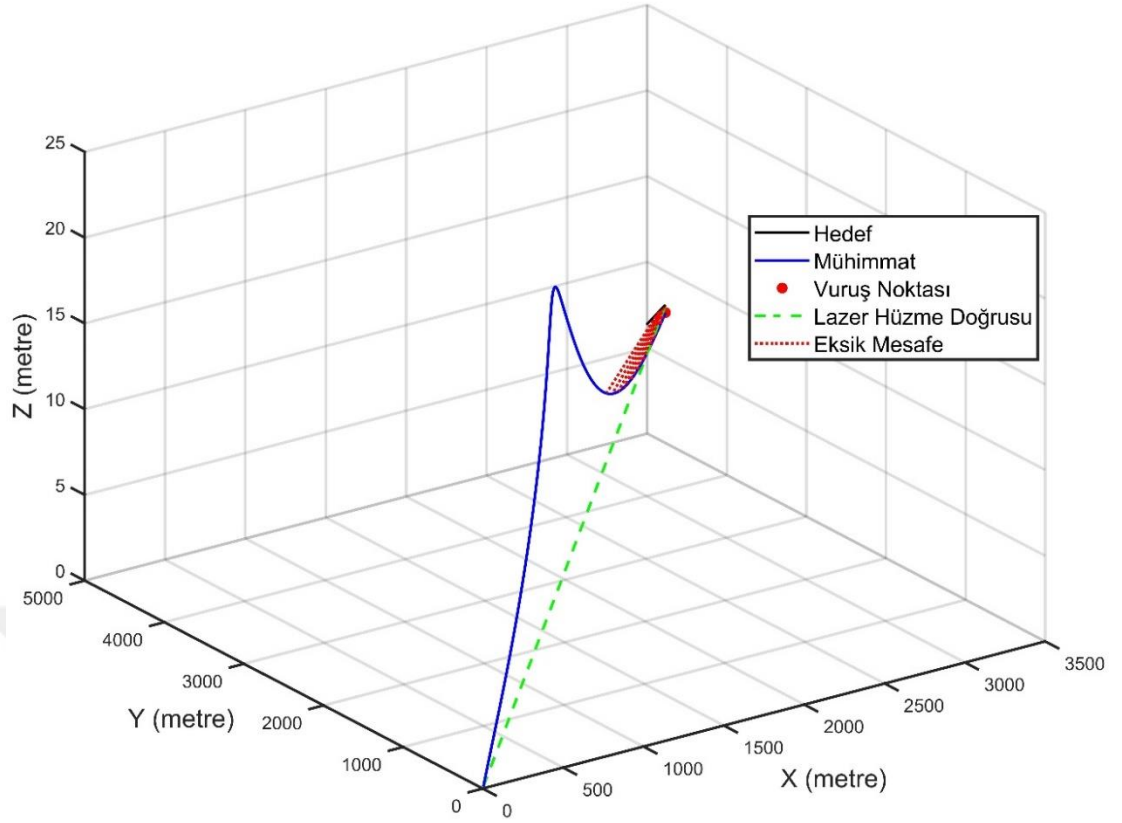
İkinci senaryoda olası kara hedefi sabit 30 m/s hızla 45° açı ile mühimmata doğru yaklaşmaktadır. 5 km uzaktaki hedefe yunuslama ve yandönme eksenlerinde 45°'lik açı ve 20 m/s'lik hız ile yanal rüzgâr kuvveti altında atış yapılmıştır. Benzetim sonucuna göre İK kontrolcüsü hedefi 11.07 sn sonunda 1.682 m eksik mesafe ile vurulmaktadır. Yunuslama eksenindeki maksimum ve ortalama ivmeler sırası ile

1.183g ve 0.222g, yandönme eksenindeki maksimum ve ortalama ivmeler ise sırasıyla 50.758g ve 4.372g olarak gerçekleşmiştir. PD kontrolcüsü ile yapılan benzetimlere göre hedef 11.11 sn sonunda 1.621 m eksik mesafe ile vurulmaktadır. Yunuslama eksenindeki maksimum ve ortalama ivmeler sırası ile 1.104g ve 0.244g, yandönme eksenindeki maksimum ve ortalama ivmeler ise sırasıyla 44.084g ve 4.554g olarak gerçekleşmiştir. Benzetim sonuçları Şekil 6.11 ile Şekil 6.20 arasında gösterilmektedir.

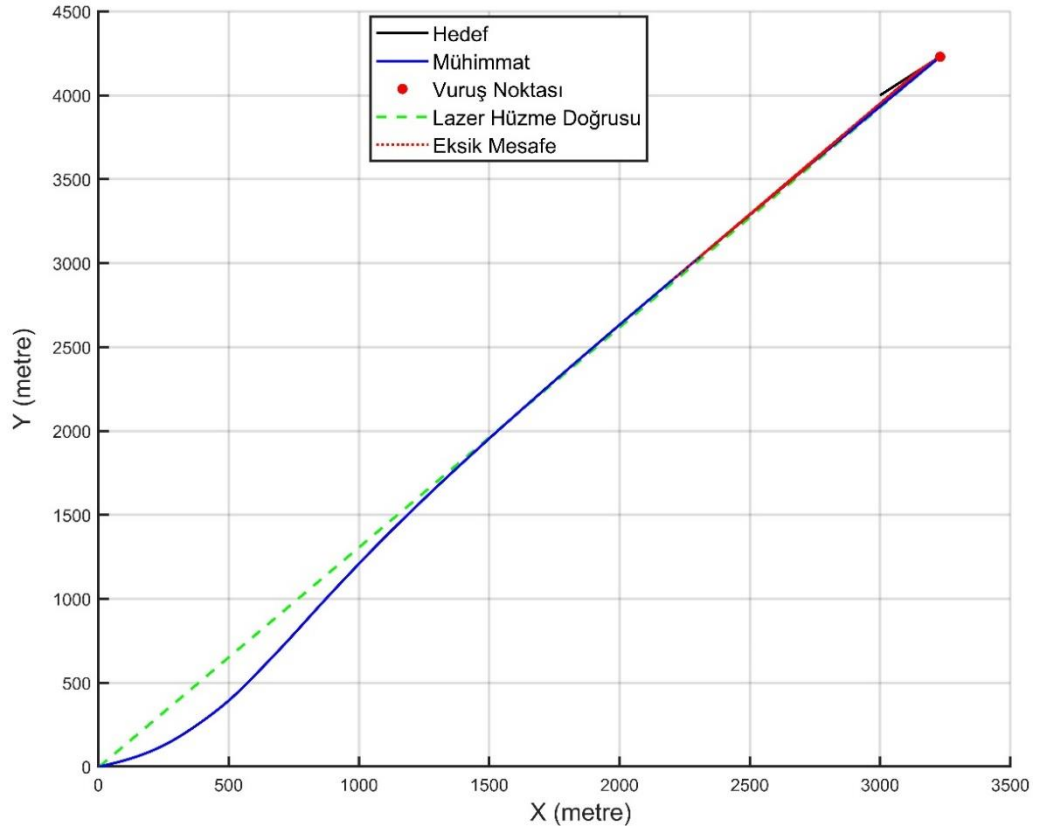
Hedef XY düzlemi üzerinde sabit hızlı hareket ettiği için sadece hedef bakış hattı yandönme açısında değişiklik olurken yunuslama açısı sabit kalmıştır. Yandönme eksenindeki bakış hattı açısının azalması nedeniyle güdüm kontrol algoritmasının takip performansı düşmüş ve eksik mesafe artmıştır. Yandönme eksenini namli yönelim açısından kaynaklı oluşan mesafeyi İK kontrolcüsü minimize etmek için 0.3 sn süresince doyuma ulaşmış ve sonrasında bakış hattı çizgisine oturmuştur. PD kontrolcüsü İK'ya göre yandönme eksenindeki hataları daha stabil ve düşük ivme isteri ve daha düşük eksik mesafe ile kontrol etmeyi başarmıştır. Mühimmat hızının artışı ve hedefin yaklaşması ile orantılı olarak çarpışma zamanı da azalmıştır.



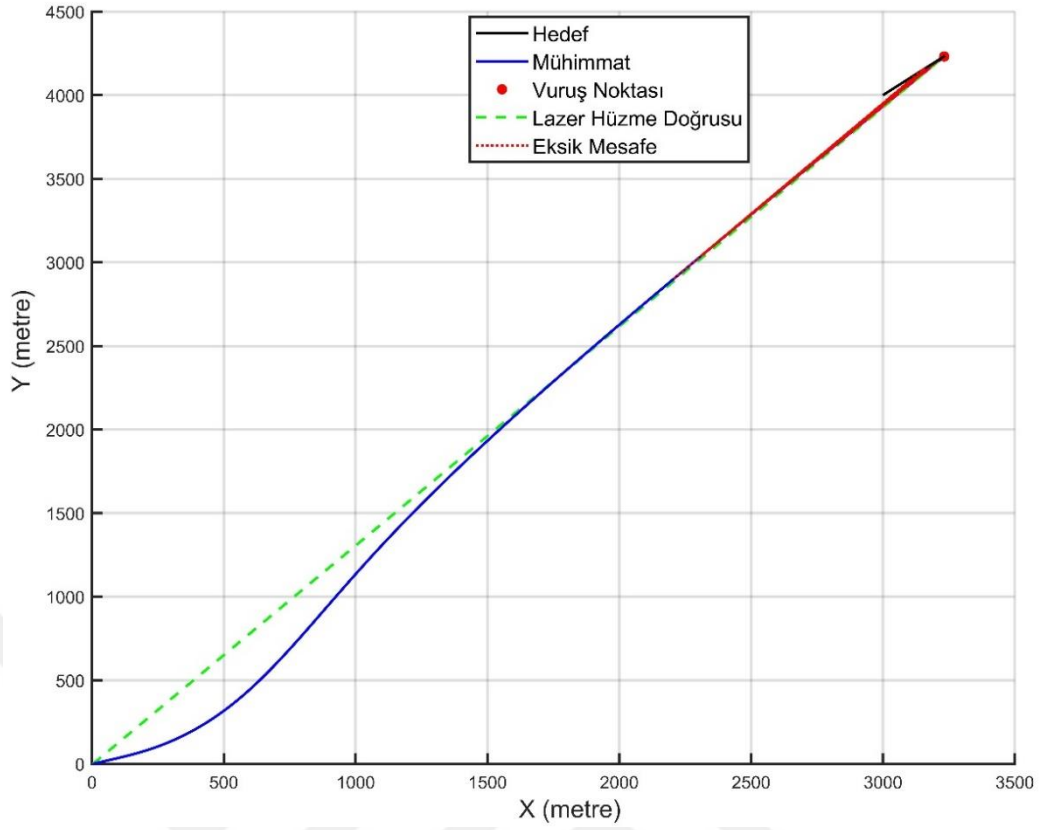
Şekil 6.11: İK Kontrolcüsü ile 3 Boyutlu Hedef ve Mühimmat Hareketi.



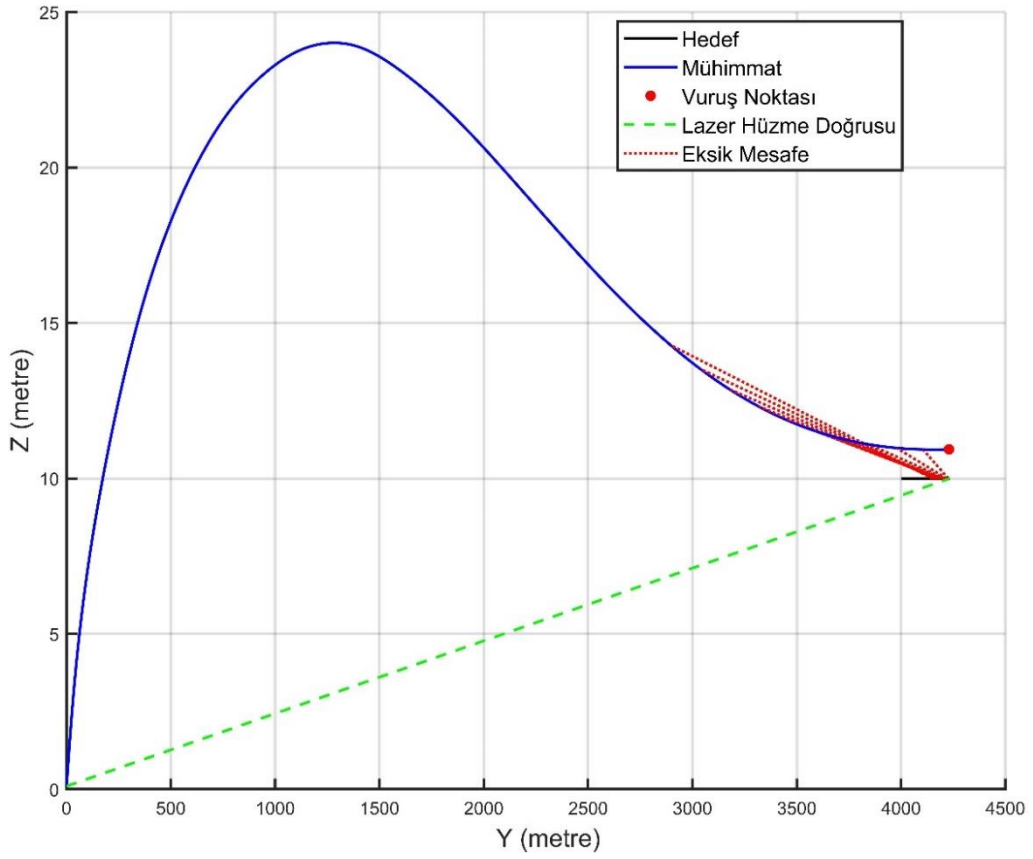
Şekil 6.12: PD Kontrolcüsü ile 3 Boyutlu Hedef ve Mühimmat Hareketi.



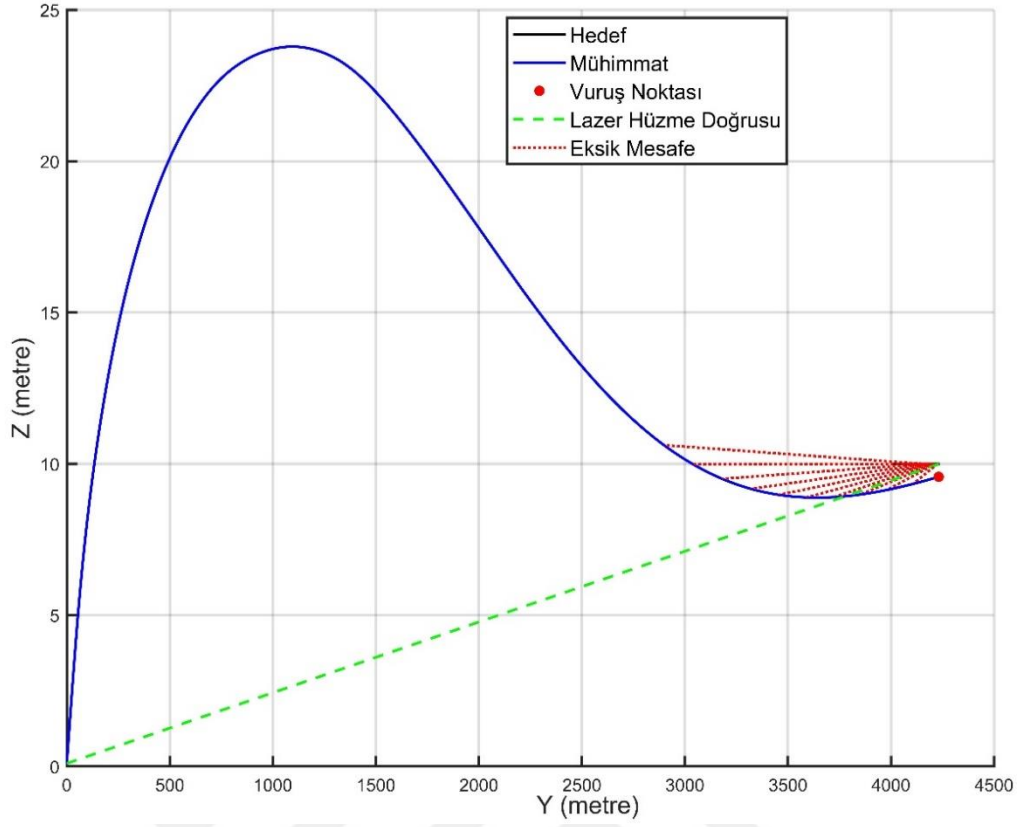
Şekil 6.13: İK Kontrolcüsü ile XY Düzleminde Hedef ve Mühimmat Hareketleri.



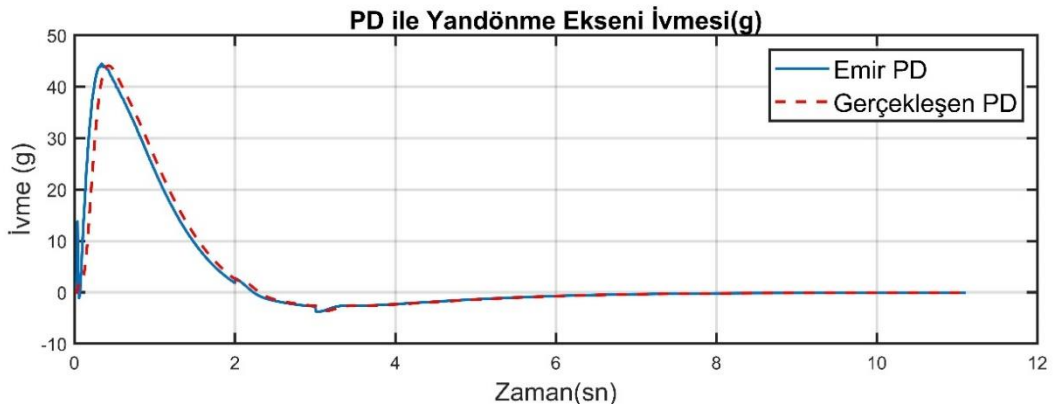
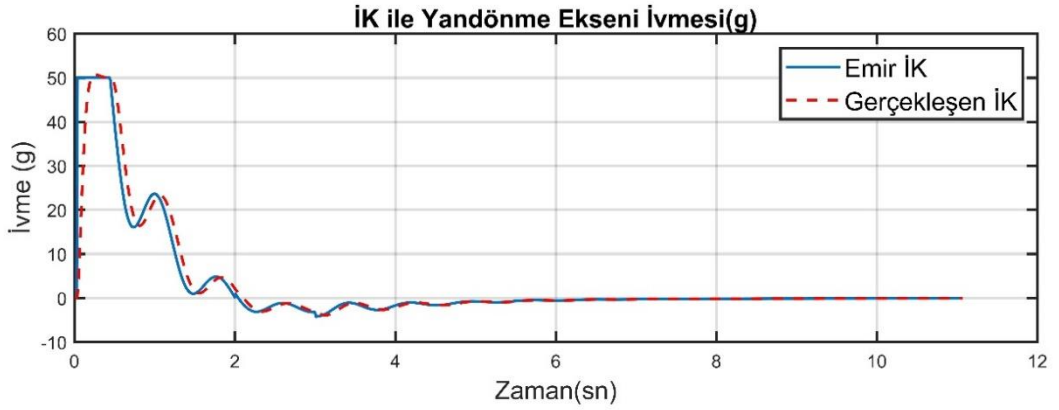
Şekil 6.14: PD Kontrolcüsü ile XY Düzleminde Hedef ve Mühimmat Hareketleri.



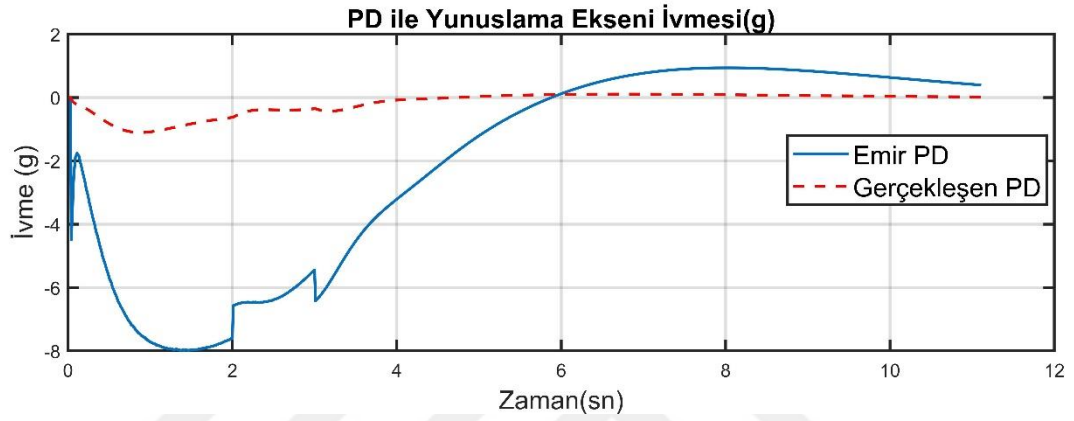
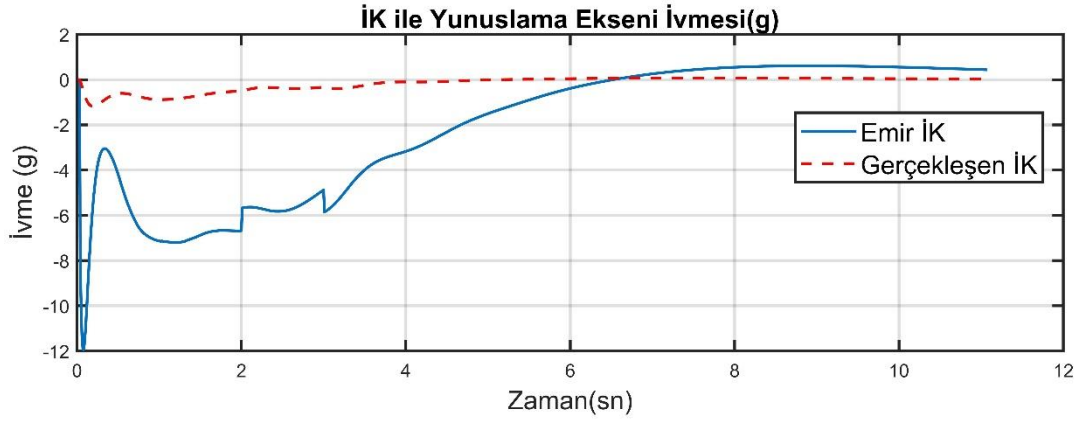
Şekil 6.15: İK Kontrolcüsü ile YZ Düzleminde Hedef ve Mühimmat Hareketleri.



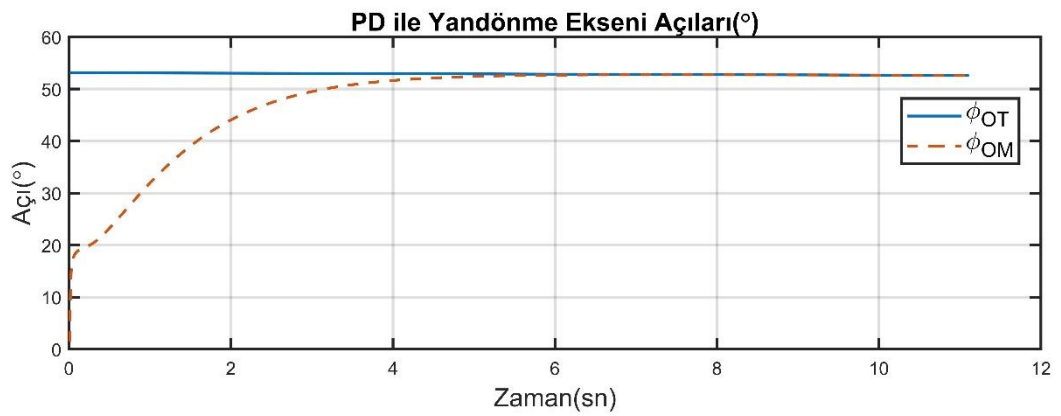
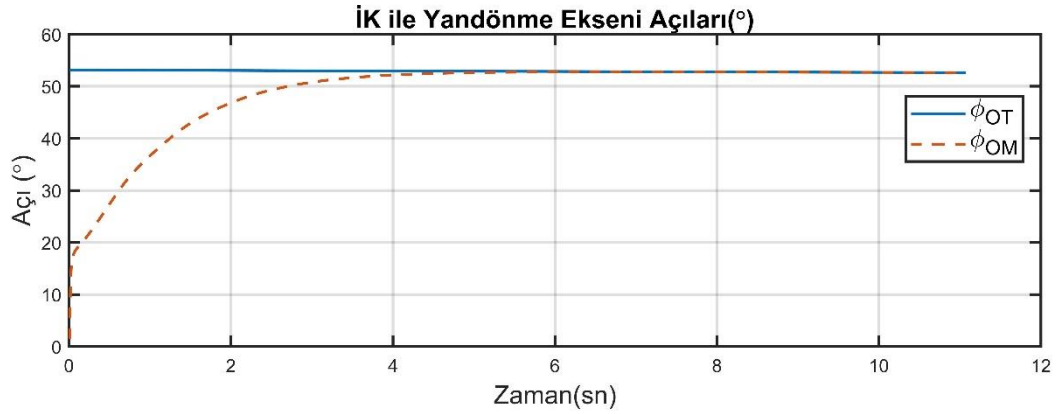
Şekil 6.16: PD Kontrolcüsü ile YZ Düzleminde Hedef ve Mühimmat Hareketleri.



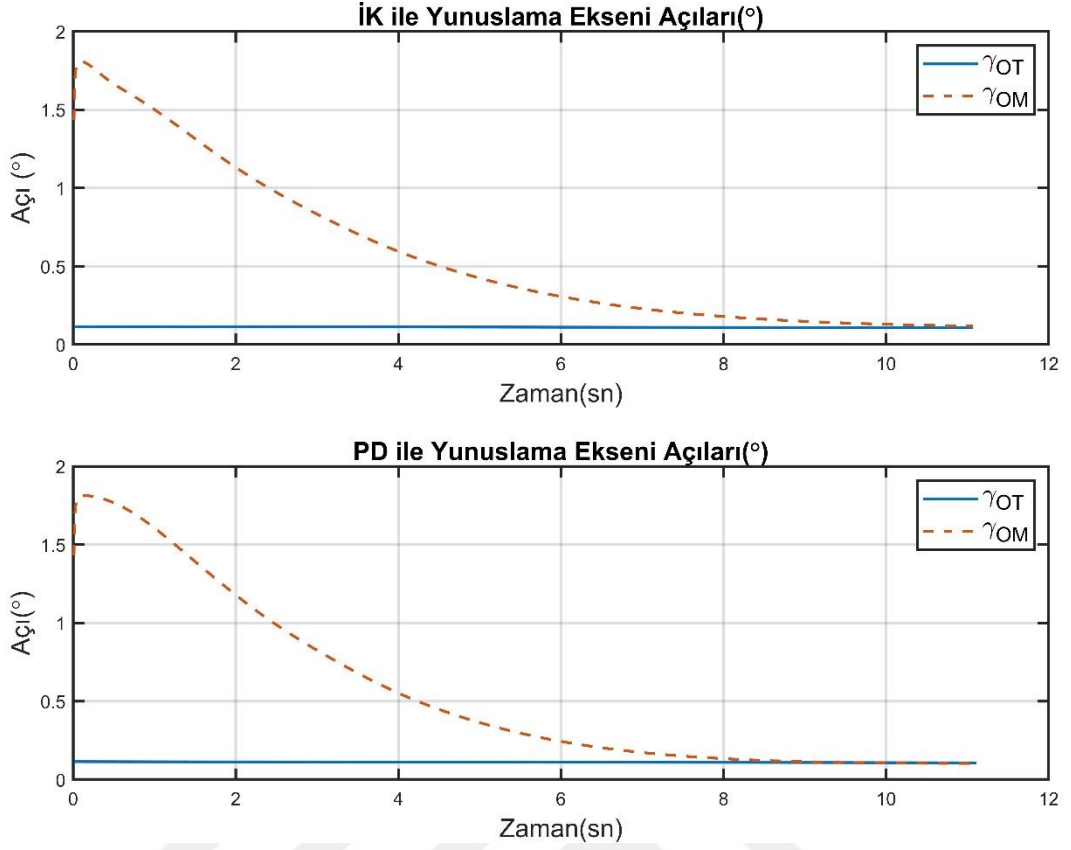
Şekil 6.17: Yandönme Ekseni Tarafından Yapılan İvmeler.



Şekil 6.18: Yunuslama Ekseni Tarafından Yapılan İvmeler.



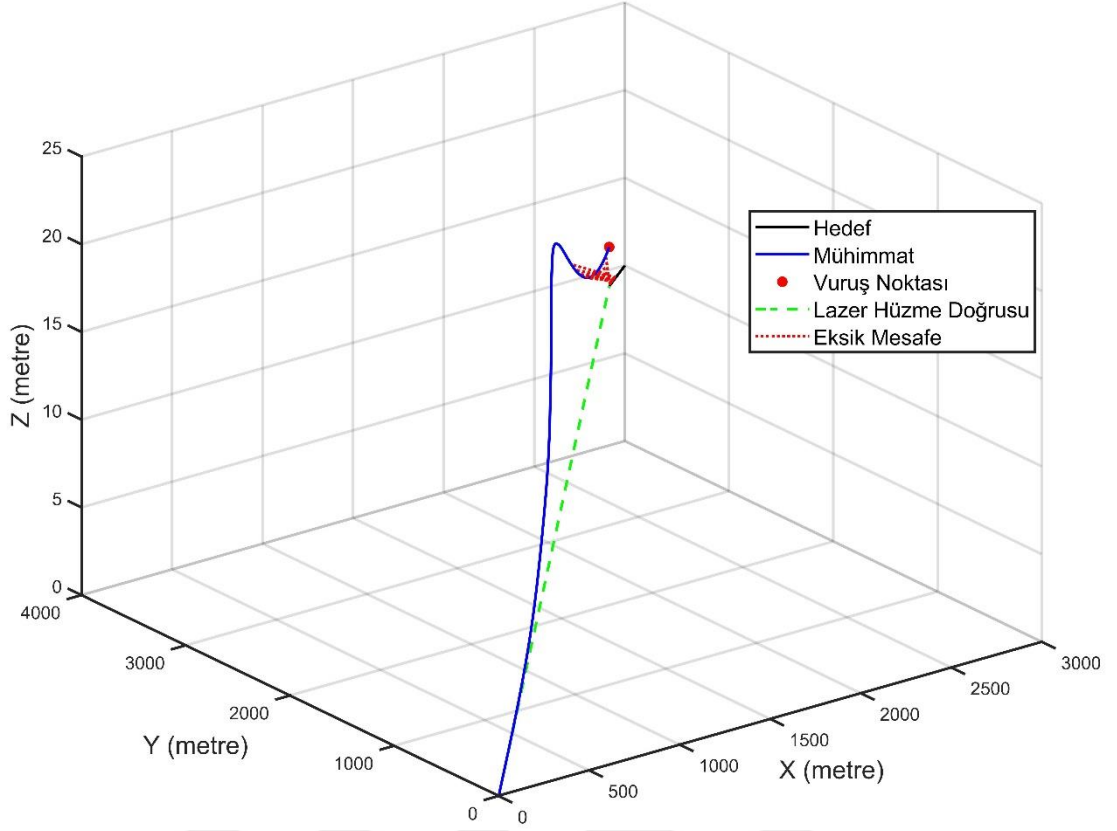
Şekil 6.19: Yandönme Ekseni Bakış Hattı Açılı.



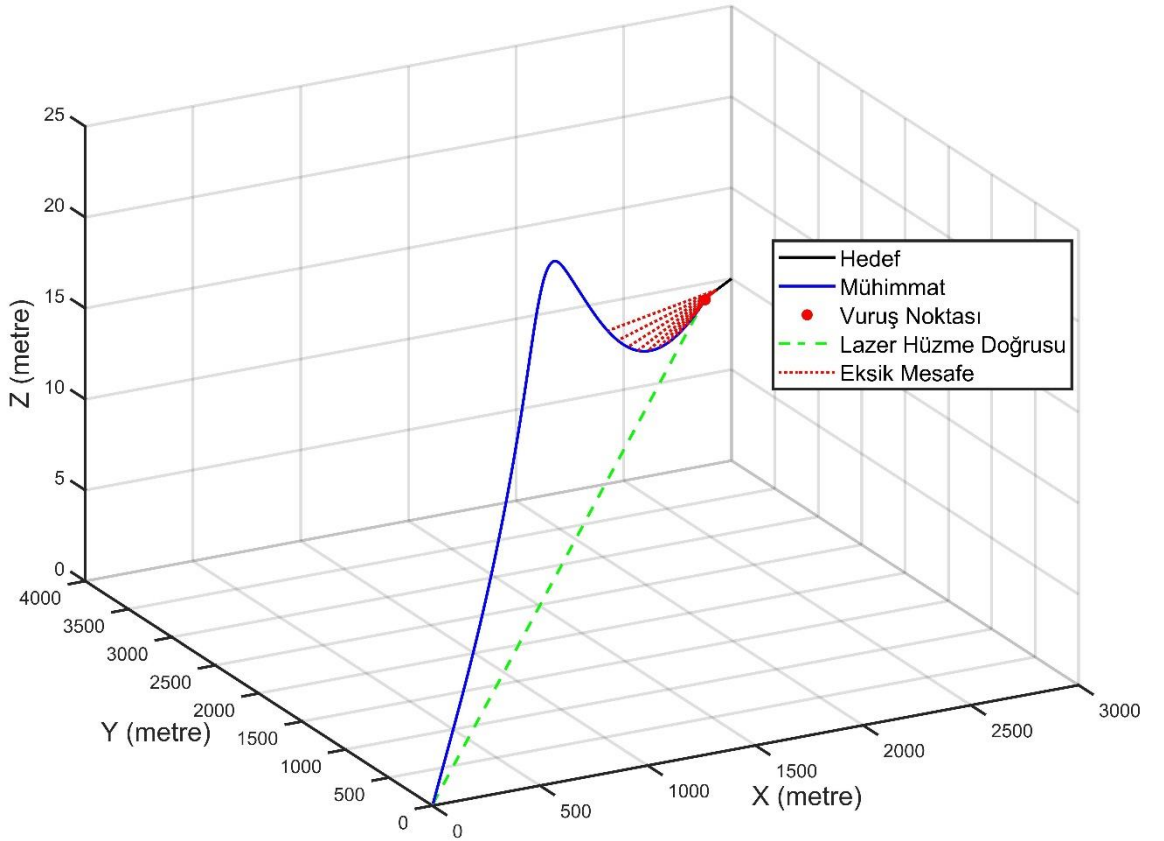
Şekil 6.20: Yunuslama Eksenini Bakış Hattı Açılıları.

6.3. Senaryo 3

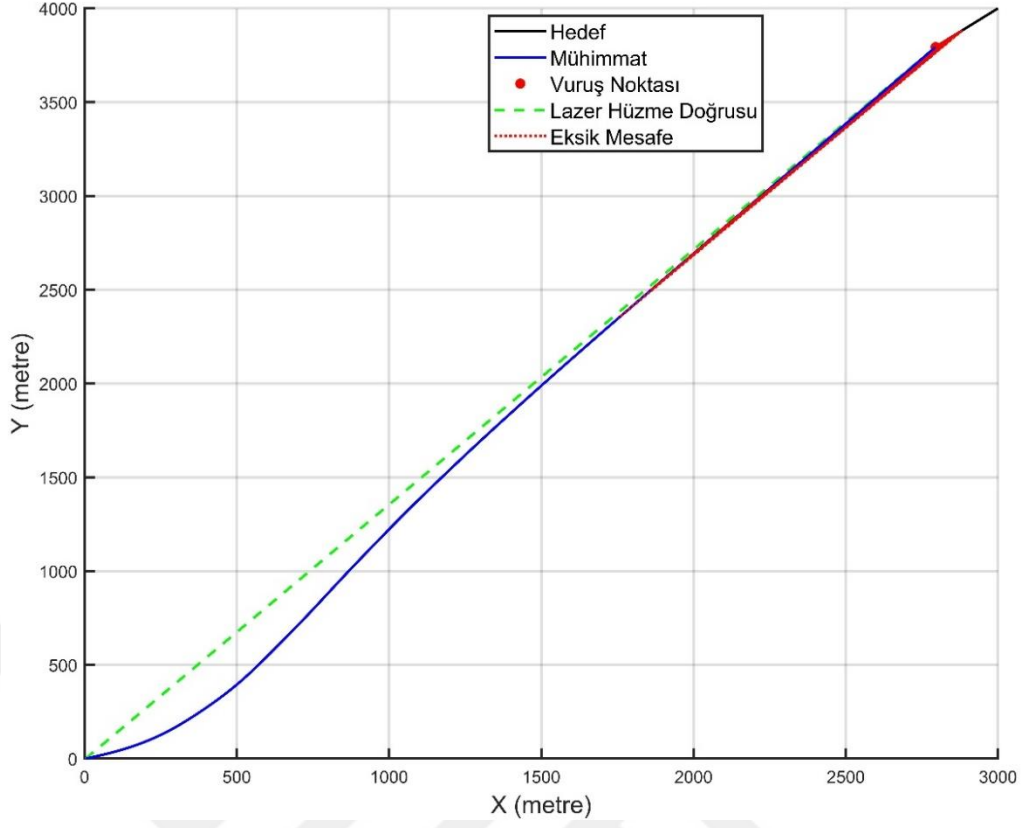
Üçüncü senaryoda olası kara hedefi sabit 30 m/s hızla 45° açı ile mühimmattan uzaklaşmaktadır. 5 km uzaktaki hedefe yunuslama ve yandönme eksenlerinde 45°'lik açı ve 20 m/s'lik hız ile yanal rüzgâr kuvveti altında atış yapılmıştır. Benzetim sonucuna göre İK kontrolcüsü hedefi 9.55 sn sonunda 2.317 m eksik mesafe ile vurulmaktadır. Yunuslama eksenindeki maksimum ve ortalama ivmeler sırası ile 1.183g ve 0.251g, yandönme eksenindeki maksimum ve ortalama ivmeler ise sırasıyla 50.758g ve 4.977g olarak gerçekleşmiştir. PD kontrolcüsü ile yapılan benzetimlere göre hedef 9.590 sn sonunda 0.994 m eksik mesafe ile vurulmaktadır. Yunuslama eksenindeki maksimum ve ortalama ivmeler sırası ile 1.103g ve 0.278g, yandönme eksenindeki maksimum ve ortalama ivmeler ise sırasıyla 44.275g ve 5.180g olarak gerçekleşmiştir. Benzetim sonuçları Şekil 6.21 ile Şekil 6.30 arasında gösterilmektedir.



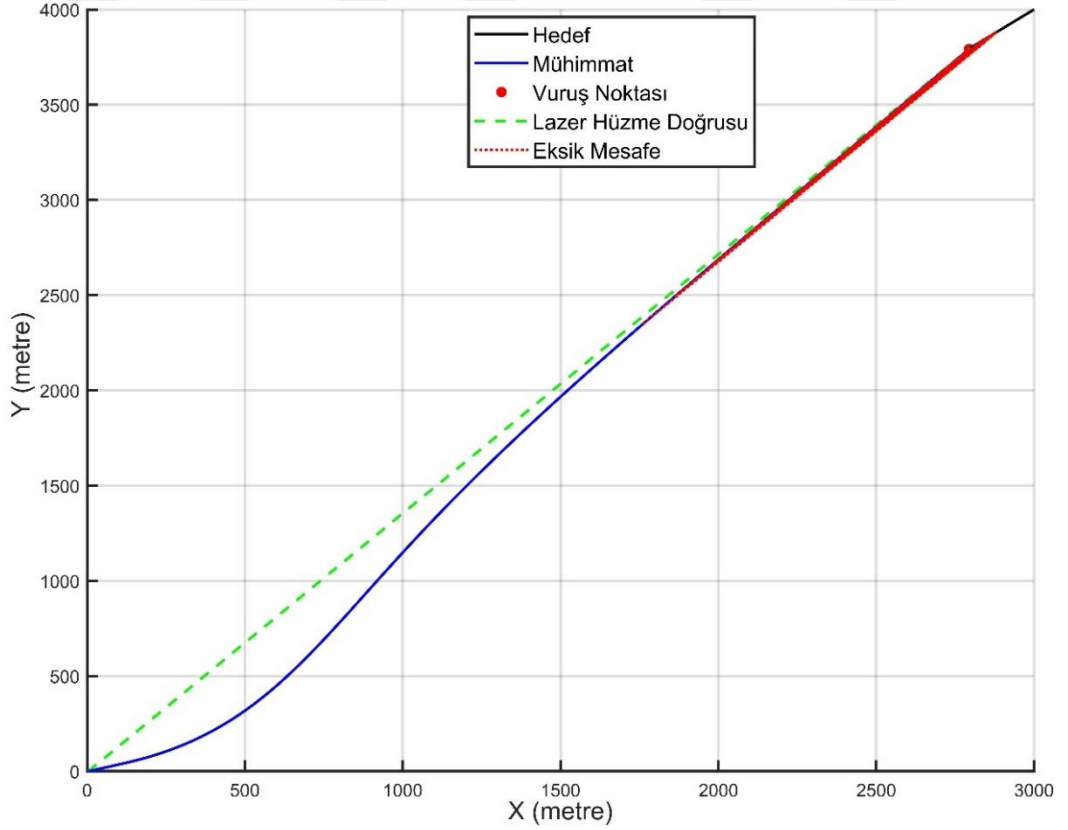
Şekil 6.21: İK Kontrolcüsü ile 3 Boyutlu Hedef ve Mühimmat Hareketi.



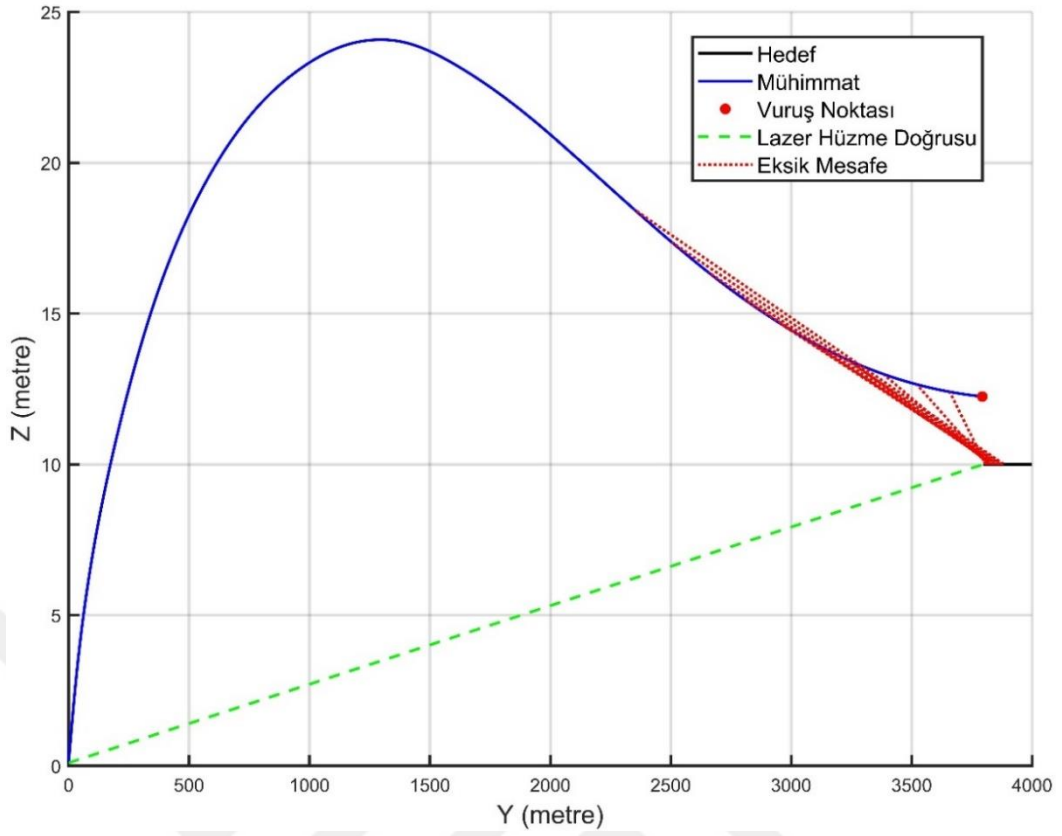
Şekil 6.22: PD Kontrolcüsü ile 3 Boyutlu Hedef ve Mühimmat Hareketi.



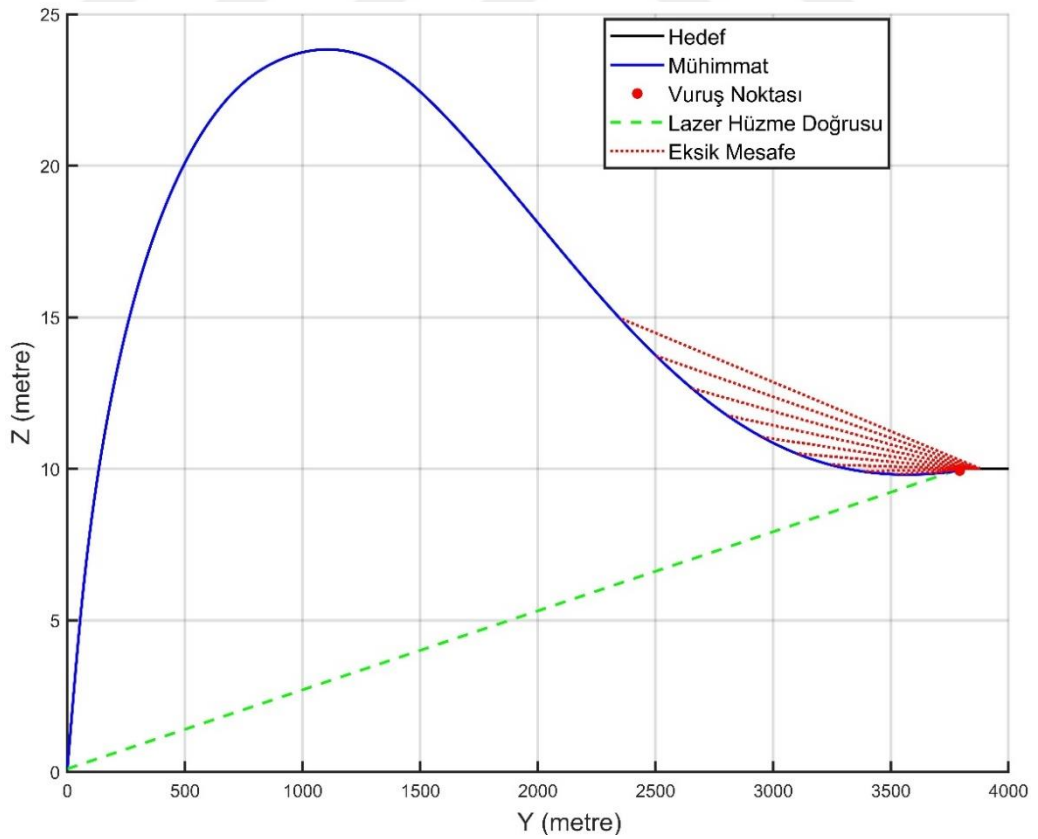
Şekil 6.23: İK Kontrolcüsü ile XY Düzleminde Hedef ve Mühimmat Hareketleri.



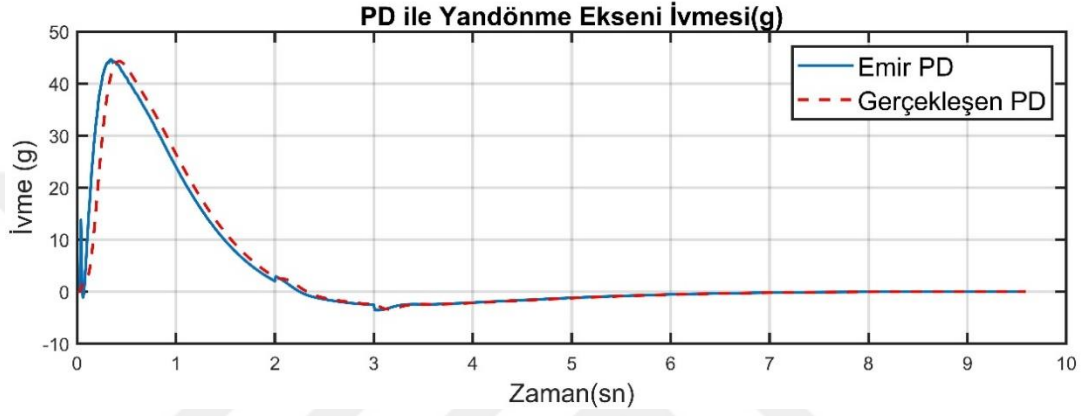
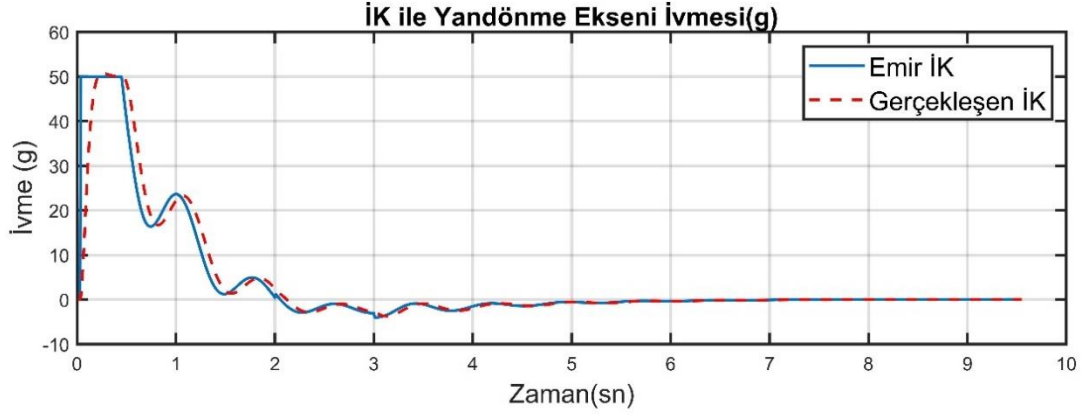
Şekil 6.24: PD Kontrolcüsü ile XY Düzleminde Hedef ve Mühimmat Hareketleri.



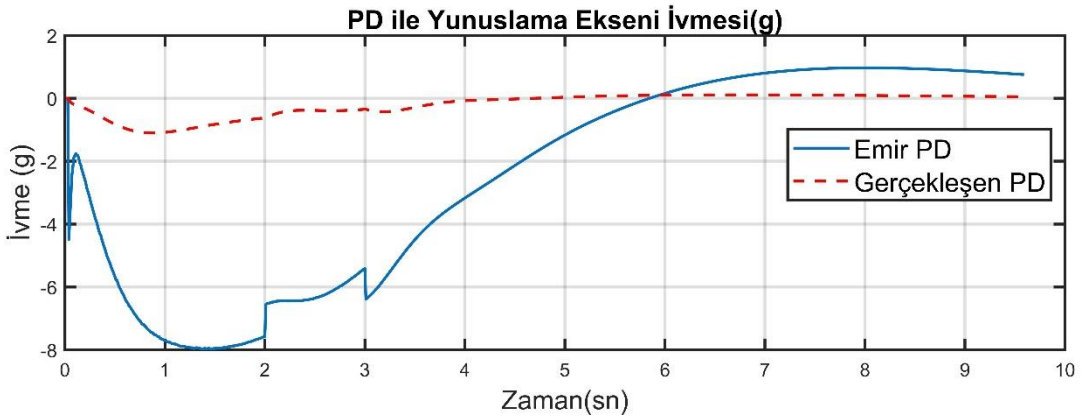
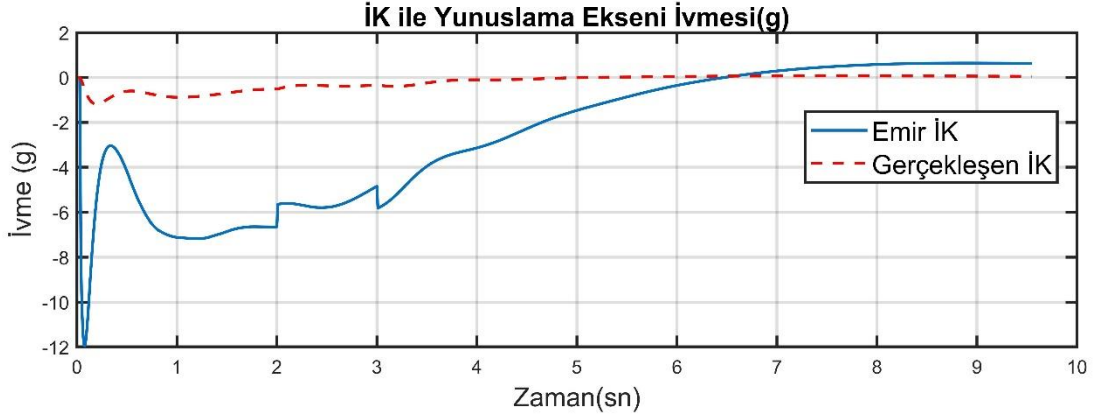
Şekil 6.25: İK Kontrolcüsü ile YZ Düzleminde Hedef ve Mühimmat Hareketleri.



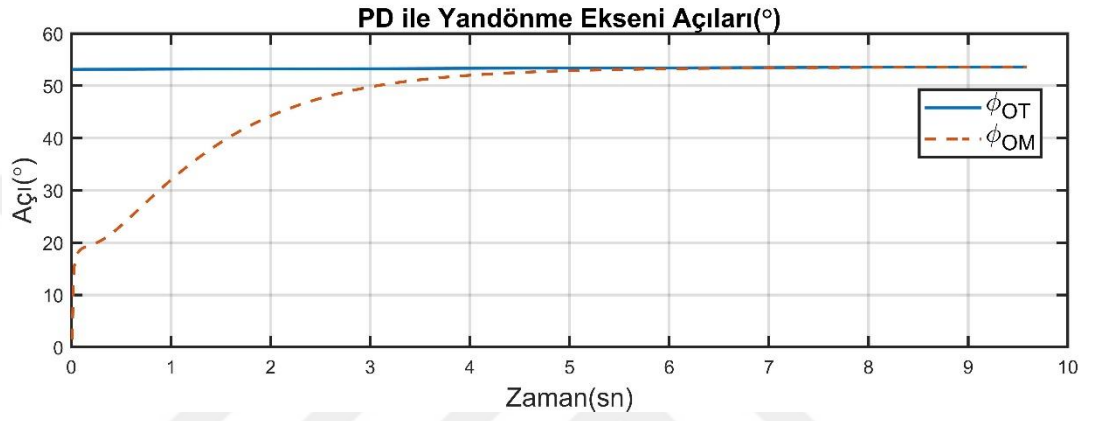
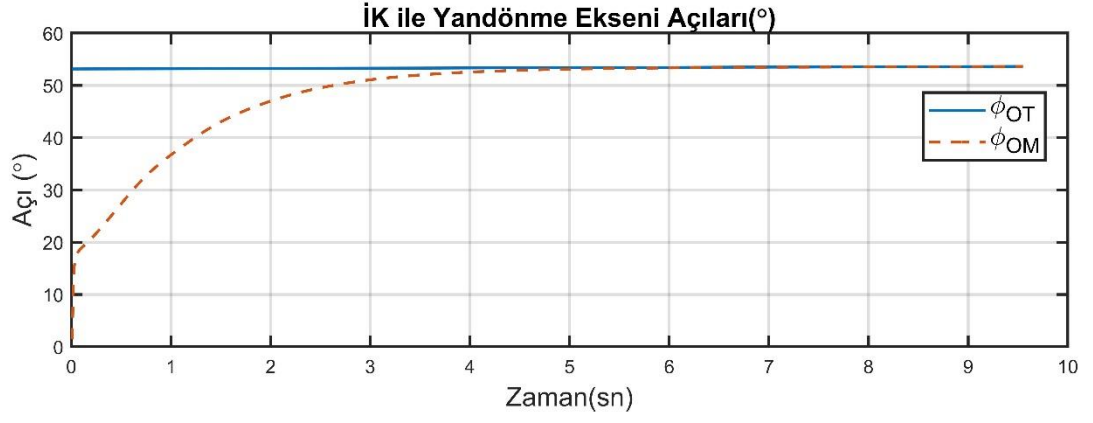
Şekil 6.26: PD Kontrolcüsü ile YZ Düzleminde Hedef ve Mühimmat Hareketleri.



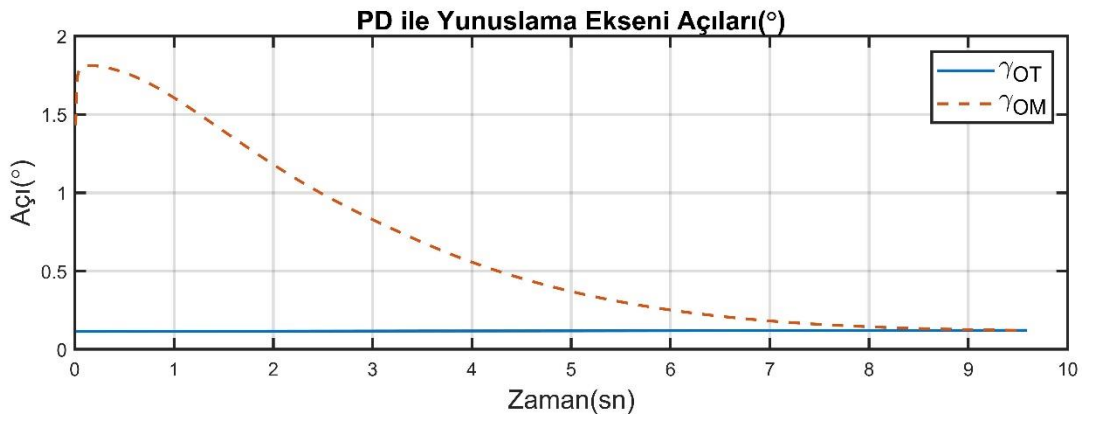
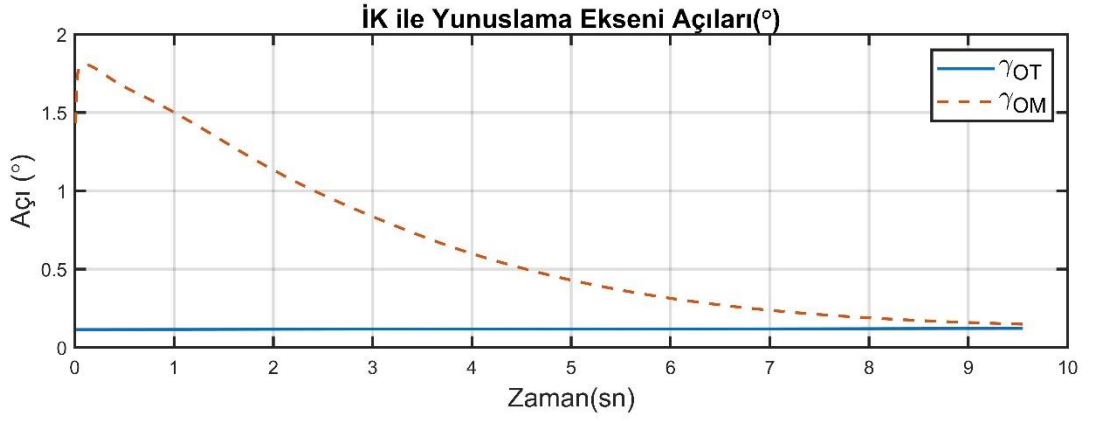
Şekil 6.27: Yandönme Eksenı Tarafından Yapılan İvmeler.



Şekil 6.28: Yunuslama Eksenı Tarafından Yapılan İvmeler.



Şekil 6.29: Yandönme Eksenî Bakış Hattı Açılı.



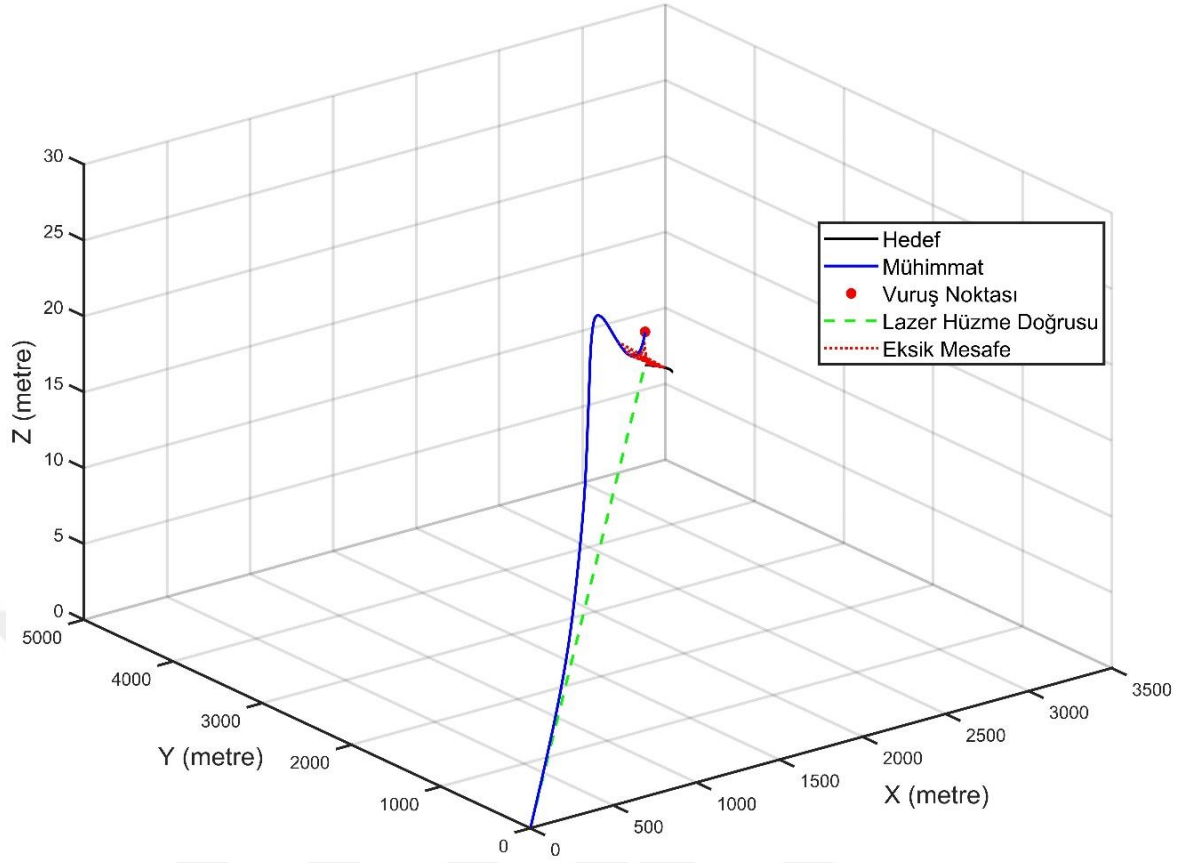
Şekil 6.30: Yunuslama Eksenî Bakış Hattı Açılı.

Sonuç grafiklerine göre hedef sabit hızla kaçınma manevrası yaparken bakış hattı eksenini açıları çok az değişiklik göstermektedir. Her iki eksen de birinci ve ikinci senaryolara benzer hareketler gerçekleştirmiştir. Hedef uzaklaştığı için en yakın ilk kesişim noktasından sonra mühimmatın ve hedefin birbirlerinden uzaklaşmaya başladığı görülmüştür. PD kontrolcüsü İK'ya göre yandönme eksenindeki hataları daha stabil ve düşük ivme isteri ve daha düşük eksik mesafe ile kontrol etmeyi başarmıştır.

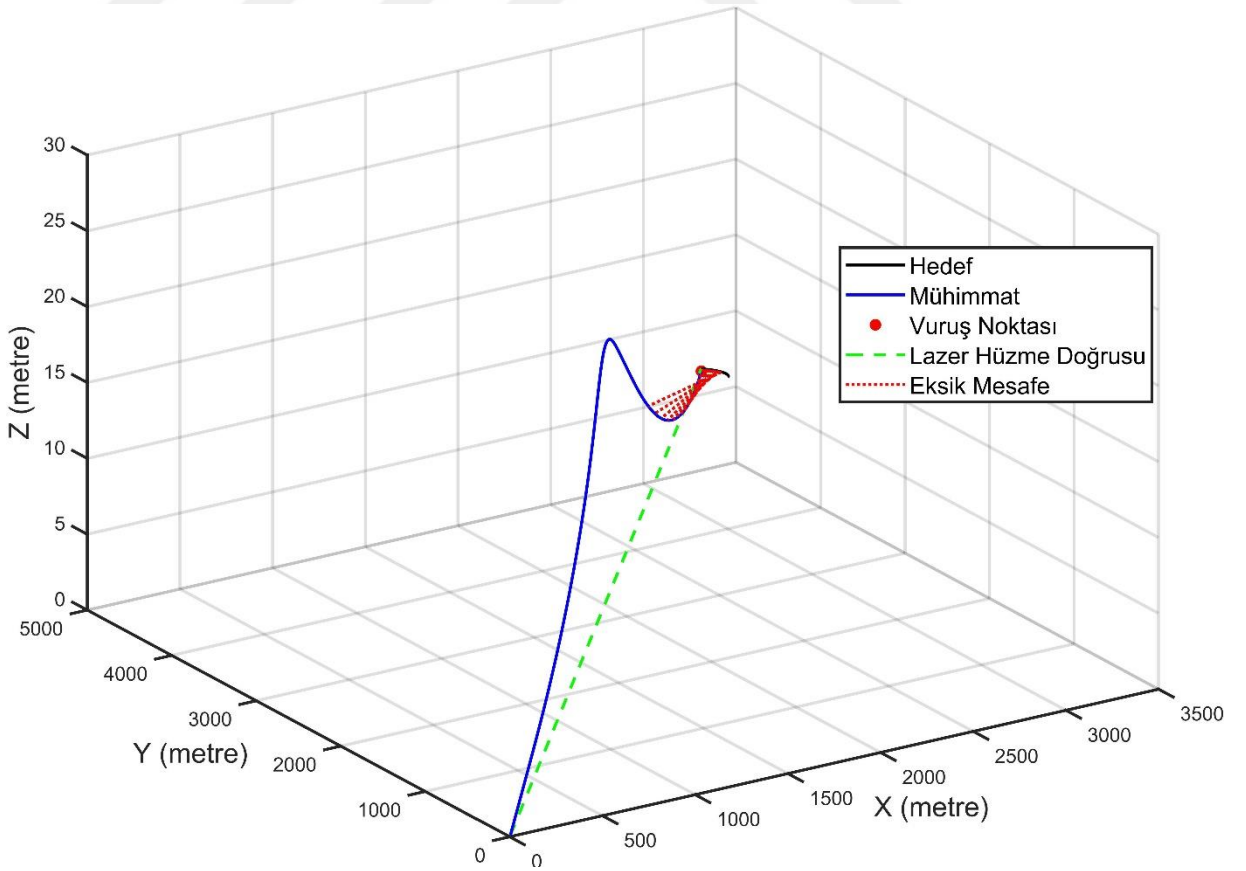
6.4. Senaryo 4

Dördüncü senaryoda olası kara hedefi 10 m/s hızla başlayıp sabit 3 m/s^2 sabit ivme ve 45° açı ile mühimmatta doğru yaklaşmaktadır. 5 km uzaktaki hedefe yunuslama ve yandönme eksenlerinde 45° 'lik açı ve 20 m/s'lik hız ile yanal rüzgâr kuvveti altında atış yapılmıştır. Benzetim sonucuna göre IK kontrolcüsü hedefi 9.75 sn sonunda 2.564m eksik mesafe ile vurulmaktadır. Yunuslama eksenindeki maksimum ve ortalama ivmeler sırası ile 1.265g ve 0.267g, yandönme eksenindeki maksimum ve ortalama ivmeler ise sırasıyla 50.759g ve 5.441g olarak gerçekleşmiştir. PD kontrolcüsü ile yapılan benzetimlere göre hedef 9.790 sn sonunda 2.323 m eksik mesafe ile vurulmaktadır. Yunuslama eksenindeki maksimum ve ortalama ivmeler sırası ile 1.196g ve 0.295g, yandönme eksenindeki maksimum ve ortalama ivmeler ise sırasıyla 47.656g ve 5.560g olarak gerçekleşmiştir. Benzetim sonuçları Şekil 6.31 ile Şekil 6.40 arasında gösterilmektedir.

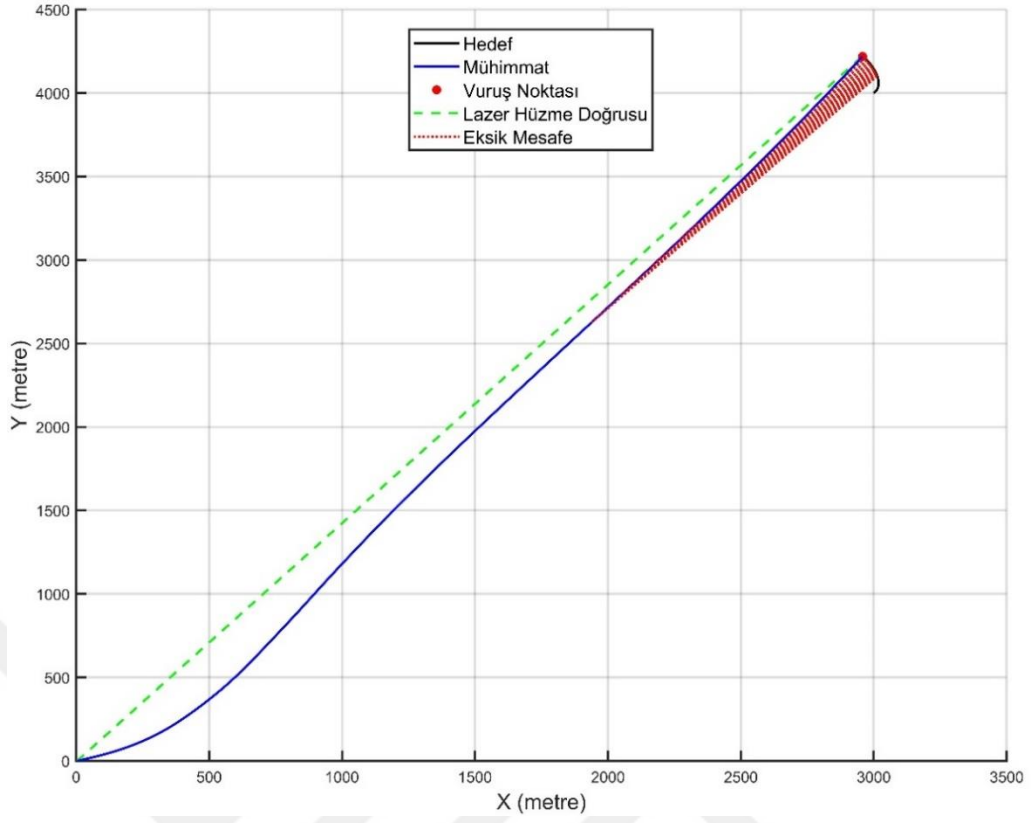
Hedef 3 m/s^2 'lik bir ivme ile XY düzlemi üzerinde parabolik bir hareket gerçekleştirerek mühimmata doğru yaklaşmıştır. Buna bağlı olarak da bakış hattı eksenini yaklaşık olarak 2° artmıştır. Artış hızı düşük olduğu için güdüm algoritmaları bu değişimi kompanse edebilmiştir. Diğer senaryolarda olduğu gibi yunuslama eksenini otopilot dinamiği nedeniyle gelen emirleri tam takip sağlanamadığı için eksik mesafeye temel olan ana bileşen Z eksenini üzerinden gelmektedir. Olası kara hedefleri düşünüldüğünde 2.5 m'nin altında kalan eksik mesafeler başarılı kabul edilebileceğinden bu senaryo sonuçları başarılı kabul edilebilir seviyededir (Is a conventional shell 155mm effective against a tank if it explodes next to it or hits it? - Quora, 2021). Diğer senaryo sonuçlarına benzer şekilde PD kontrolcüsü daha az ivme isteri ve salınım ile daha düşük eksik mesafeye ulaşmıştır.



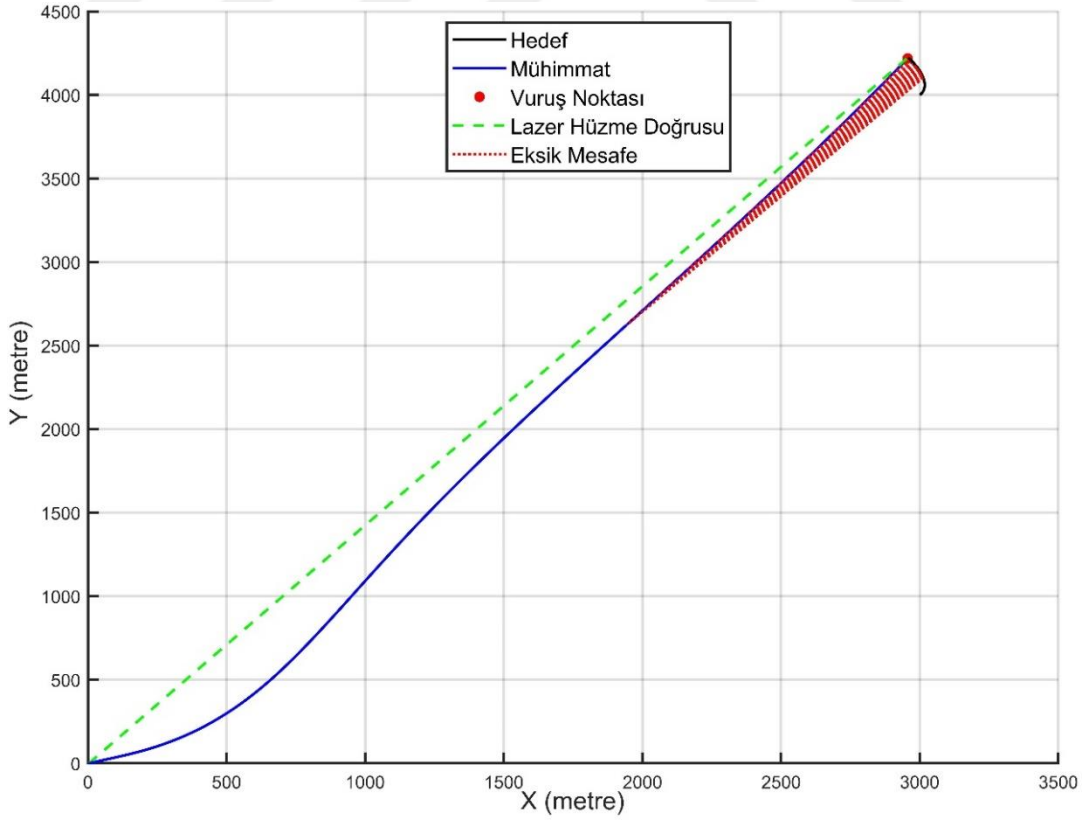
Şekil 6.31: İK Kontrolcüsü ile 3 Boyutlu Hedef ve Mühimmat Hareketi.



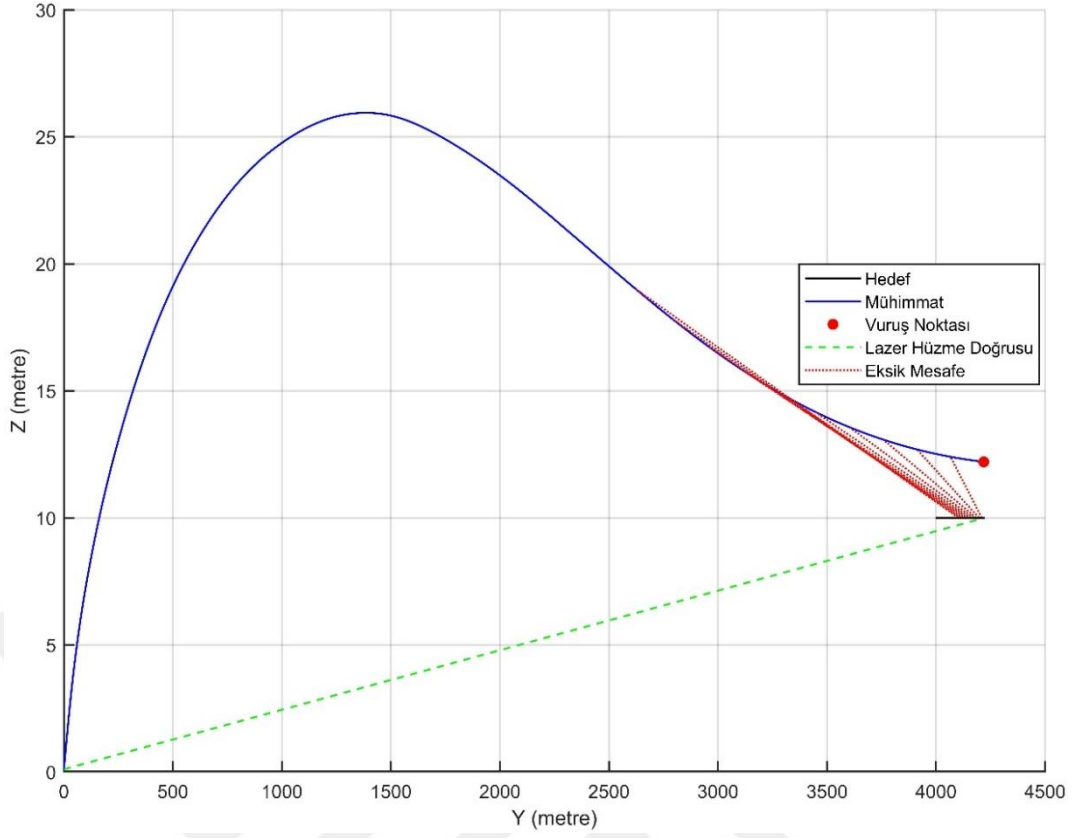
Şekil 6.32: PD Kontrolcüsü ile 3 Boyutlu Hedef ve Mühimmat Hareketi.



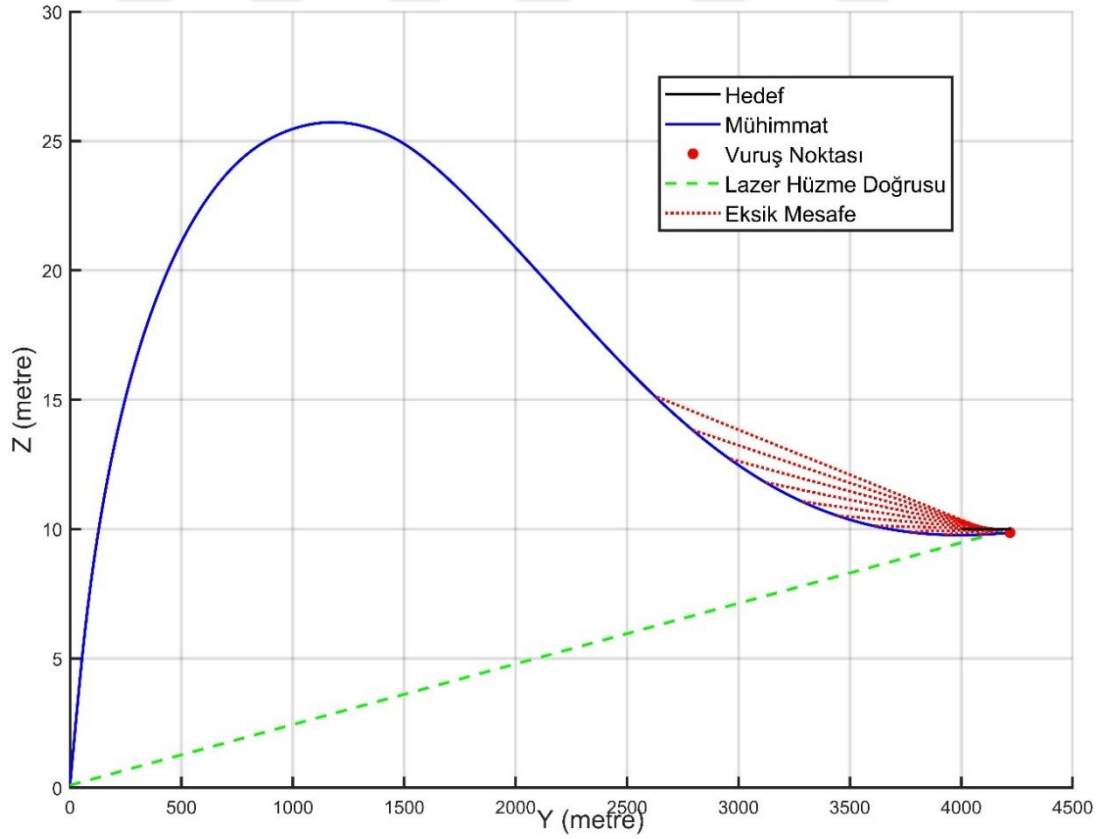
Şekil 6.33: İK Kontrolcüsü ile XY Düzleminde Hedef ve Mühimmat Hareketleri.



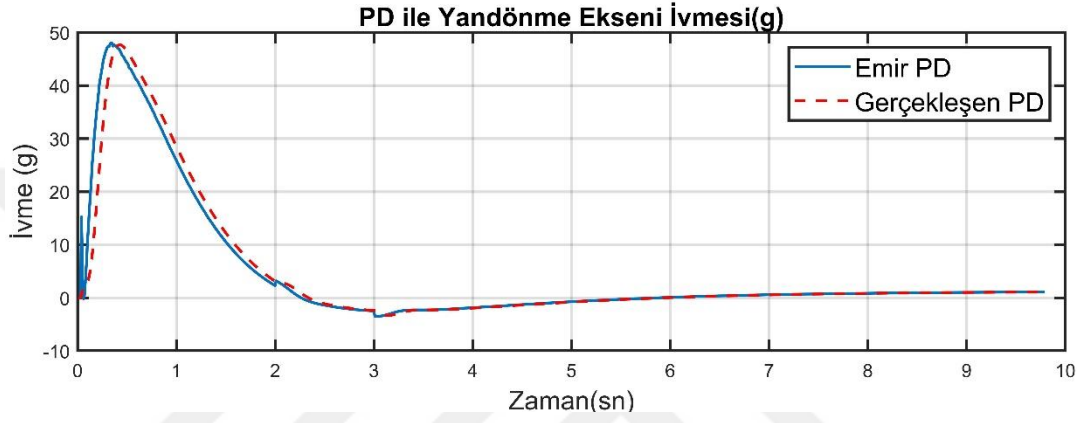
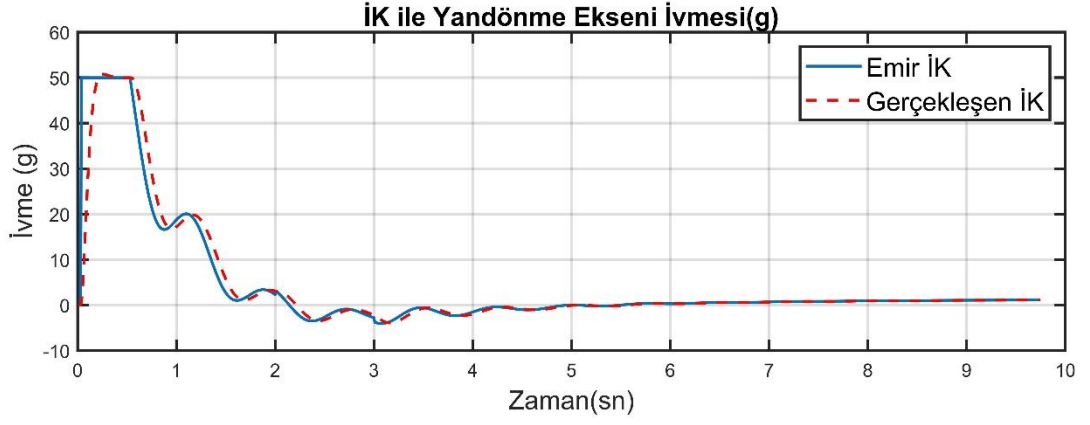
Şekil 6.34: PD Kontrolcüsü ile XY Düzleminde Hedef ve Mühimmat Hareketleri.



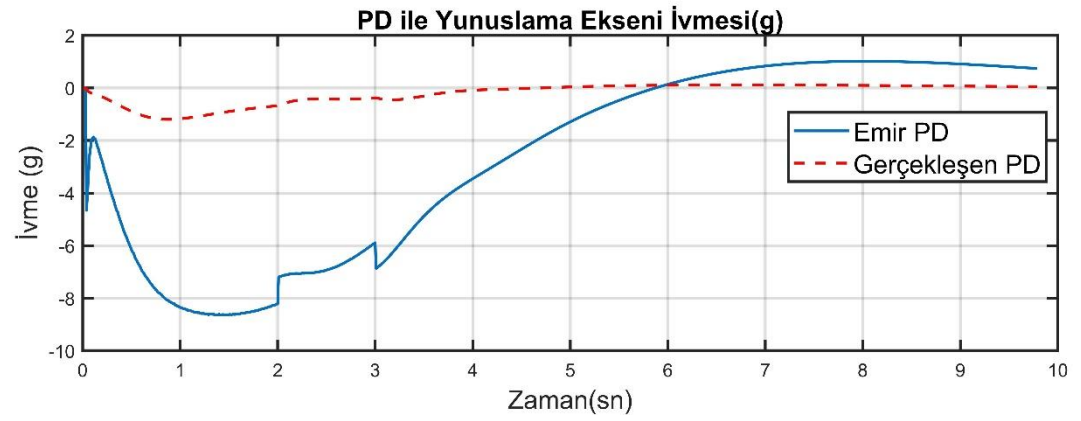
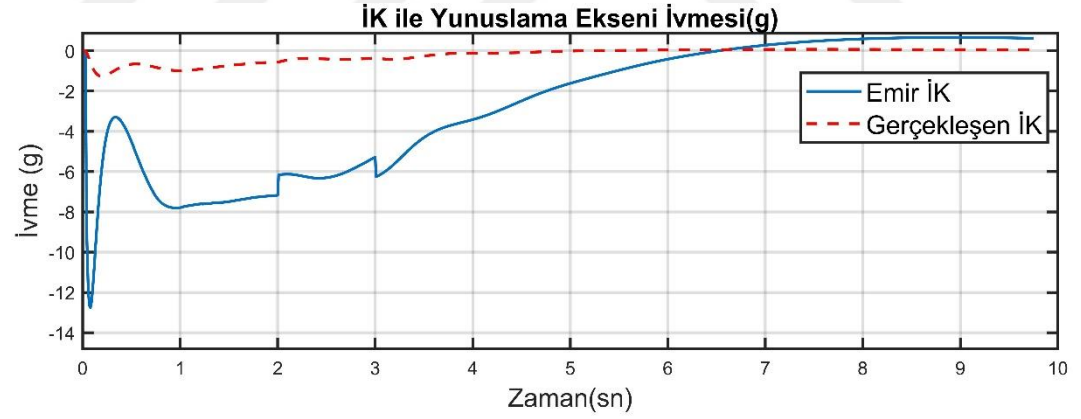
Şekil 6.35: İK Kontrolcüsü ile YZ Düzleminde Hedef ve Mühimmat Hareketleri.



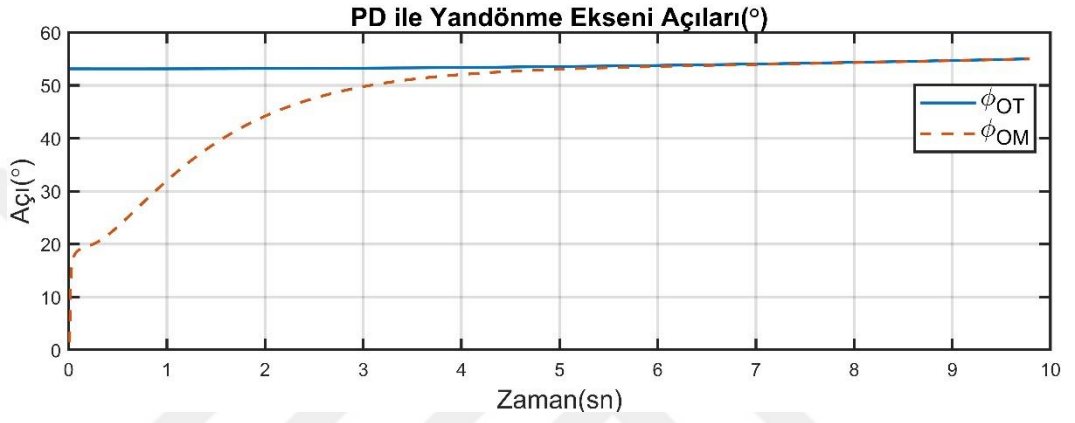
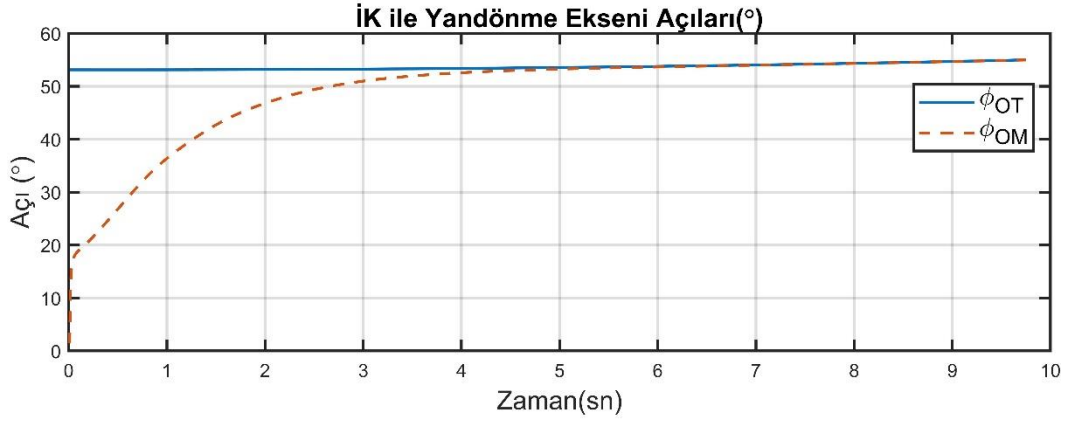
Şekil 6.36: PD Kontrolcüsü ile YZ Düzleminde Hedef ve Mühimmat Hareketleri.



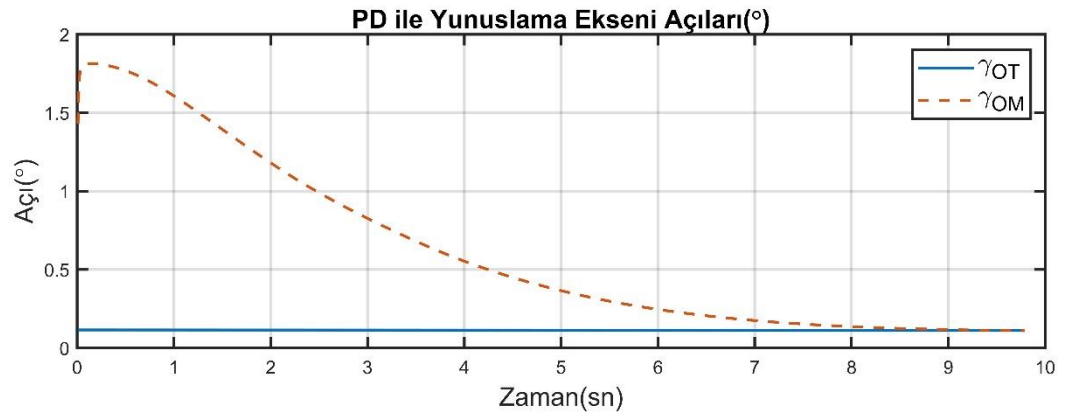
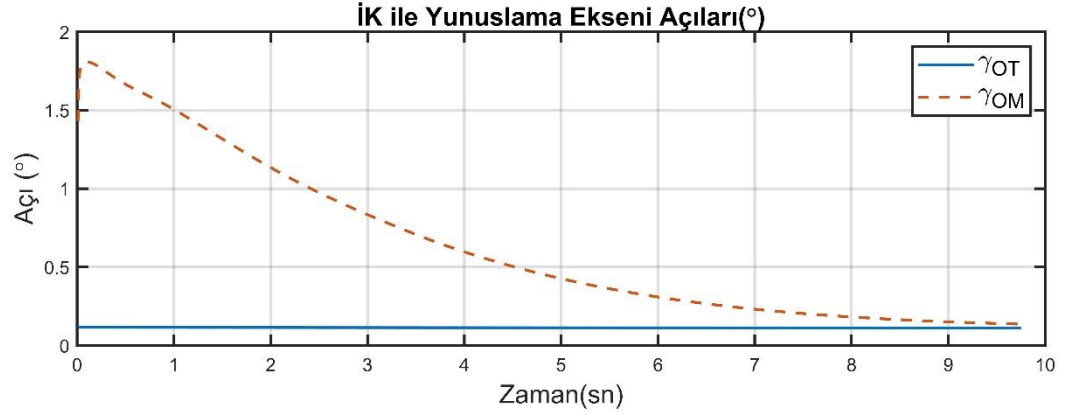
Şekil 6.37: Yandönme Ekseni Tarafından Yapılan İvmeler.



Şekil 6.38: Yunuslama Ekseni Tarafından Yapılan İvmeler.



Şekil 6.39: Yandönme Ekseni Bakış Hattı Açılı.

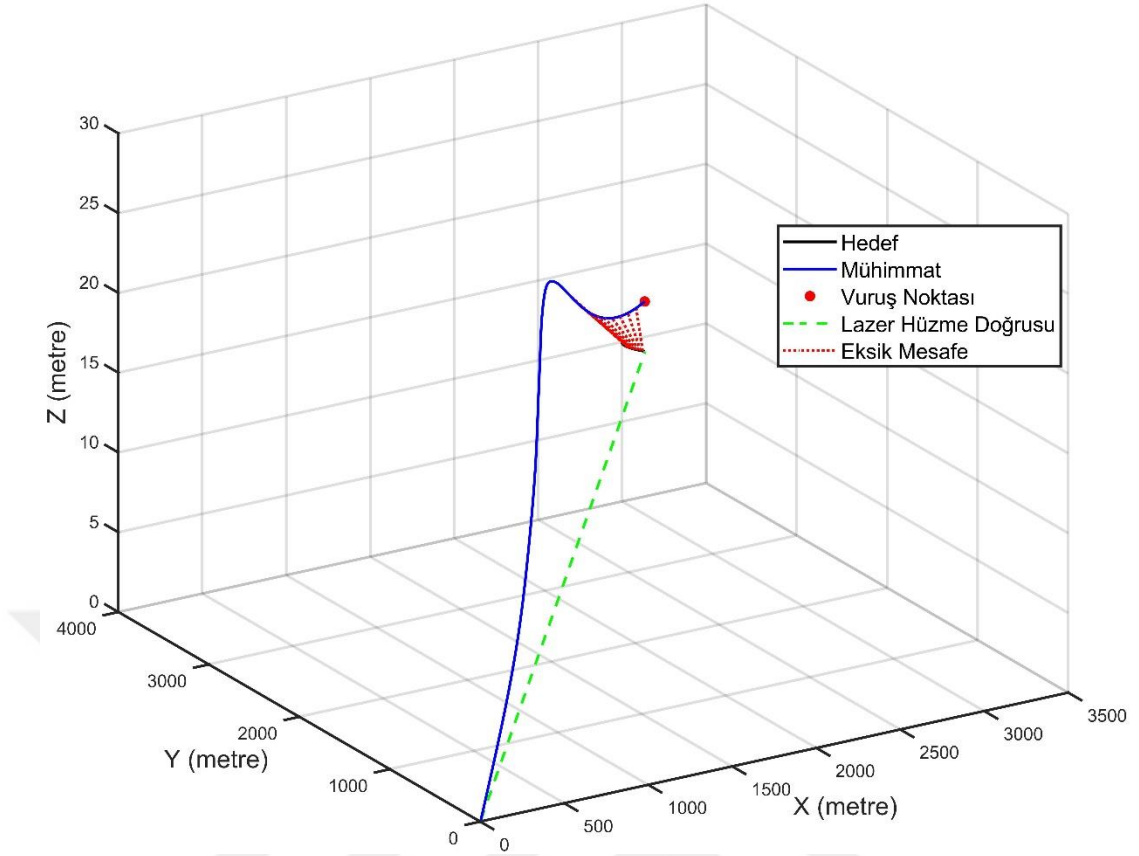


Şekil 6.40: Yunuslama Ekseni Bakış Hattı Açılı.

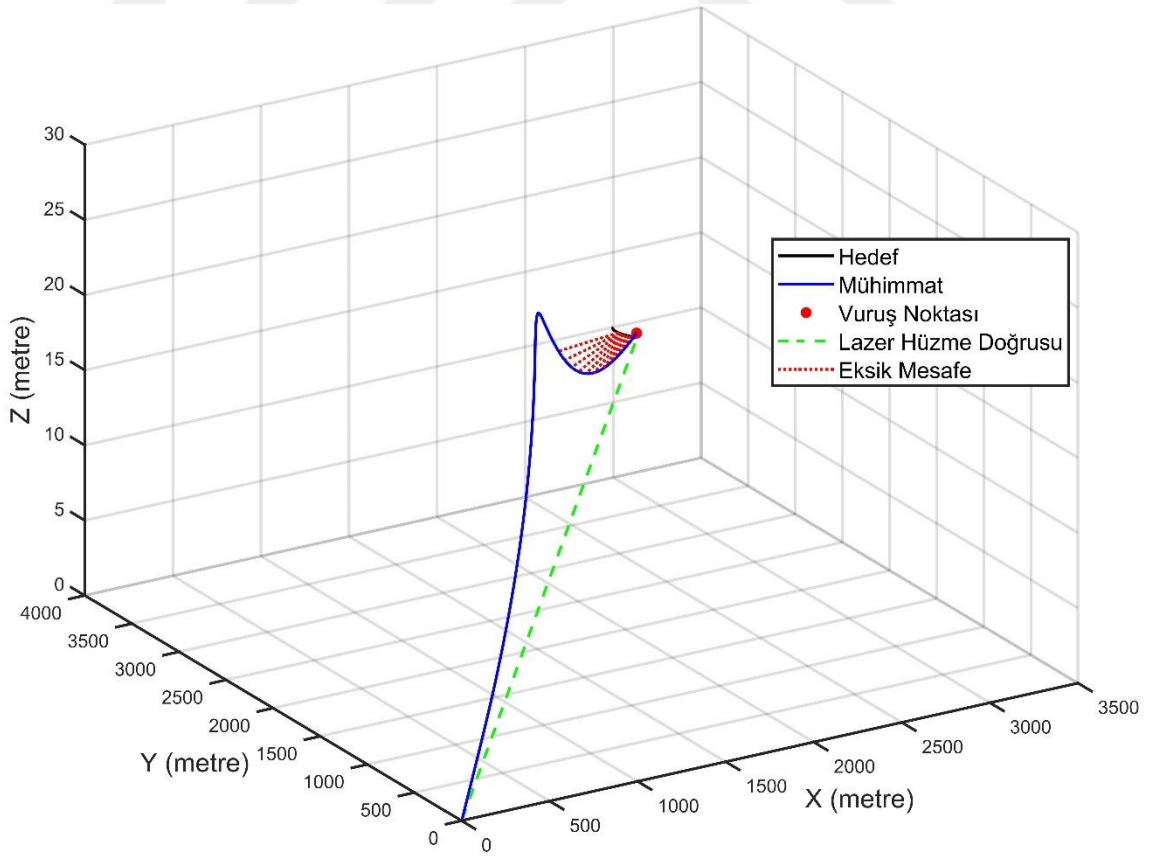
6.5. Senaryo 5

Beşinci senaryoda olası kara hedefi 10 m/s hızla başlayıp sabit 3 m/s^2 sabit ivme ve 45° açı ile başlayıp mühimmattan uzaklaşmaktadır. 5 km uzaktaki hedefe yunuslama ve yandönme eksenlerinde 45° 'lik açı ve 20 m/s'lik hız ile yanal rüzgâr kuvveti altında atış yapılmıştır. Benzetim sonucuna göre İK kontrolcüsü hedefi 9.07 sn sonunda 3.495 m eksik mesafe ile vurulmaktadır. Yunuslama eksenindeki maksimum ve ortalama ivmeler sırası ile 1.265g ve 0.283g, yandönme eksenindeki maksimum ve ortalama ivmeler ise sırasıyla 50.759g ve 6.281g olarak gerçekleşmiştir. PD kontrolcüsü ile yapılan benzetimlere göre hedef 9.100 sn sonunda 1.775 m eksik mesafe ile vurulmaktadır. Yunuslama eksenindeki maksimum ve ortalama ivmeler sırası ile 1.195g ve 0.313g, yandönme eksenindeki maksimum ve ortalama ivmeler ise sırasıyla 47.674g ve 6.497g olarak gerçekleşmiştir. Benzetim sonuçları Şekil 6.41 ile Şekil 6.50 arasında gösterilmektedir.

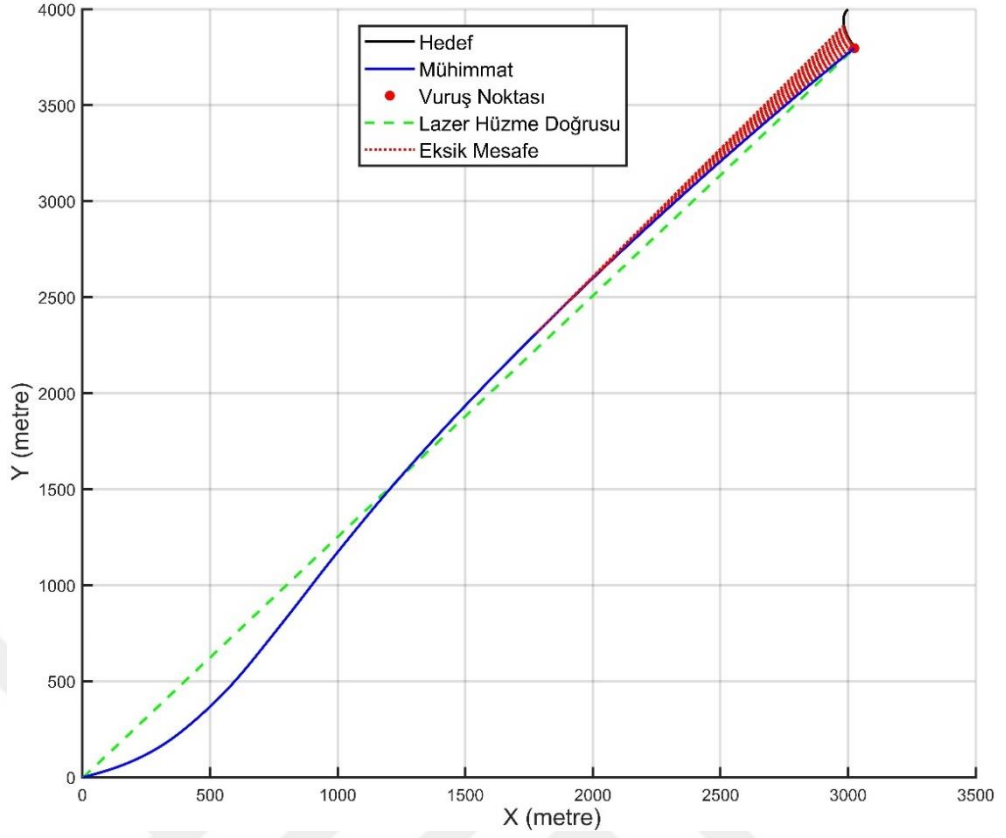
Hedef işaretleyiciden uzaklaşırken yandönme bakış hattı eksenini açısı 1.7 derece azalmıştır. Bu azalma hızı yavaş olduğu için güdüm algoritmaları açı takibini diğer senaryolara benzer şekilde yapabilmıştır. İK kontrolcüsü Senaryo 3'e benzer şekilde uzaklaşan hedeflere yunuslama eksenini kontrolcüsü çevikliği yeterli gelmediği için eksik mesafe 2.5 m'nin üzerinde kalmaktadır. Kontrolcüyü daha agresif ve stabil yapmak için yunuslama eksenindeki kontrolcü kazancını 30, ileri kompanseörün sıfır ve kutuplarını da sırasıyla -1 ve -30 yapılmıştır. Yeni kazanç ve kontrolcüye göre ivme çıktıları Şekil 6.51'de gösterilmektedir. Güncel kazanç ve kontrolcü ile yapılan benzetime göre eksik mesafe 1.809 m'ye düşürülmüştür. PD kontrolcüsü bütün senaryolar için aynı kazanç değerlerini kullanarak daha düşük maksimum ivme isteri ile eksenleri doyuma ulaştırmadan hedef vuruş başarımını sağlamıştır.



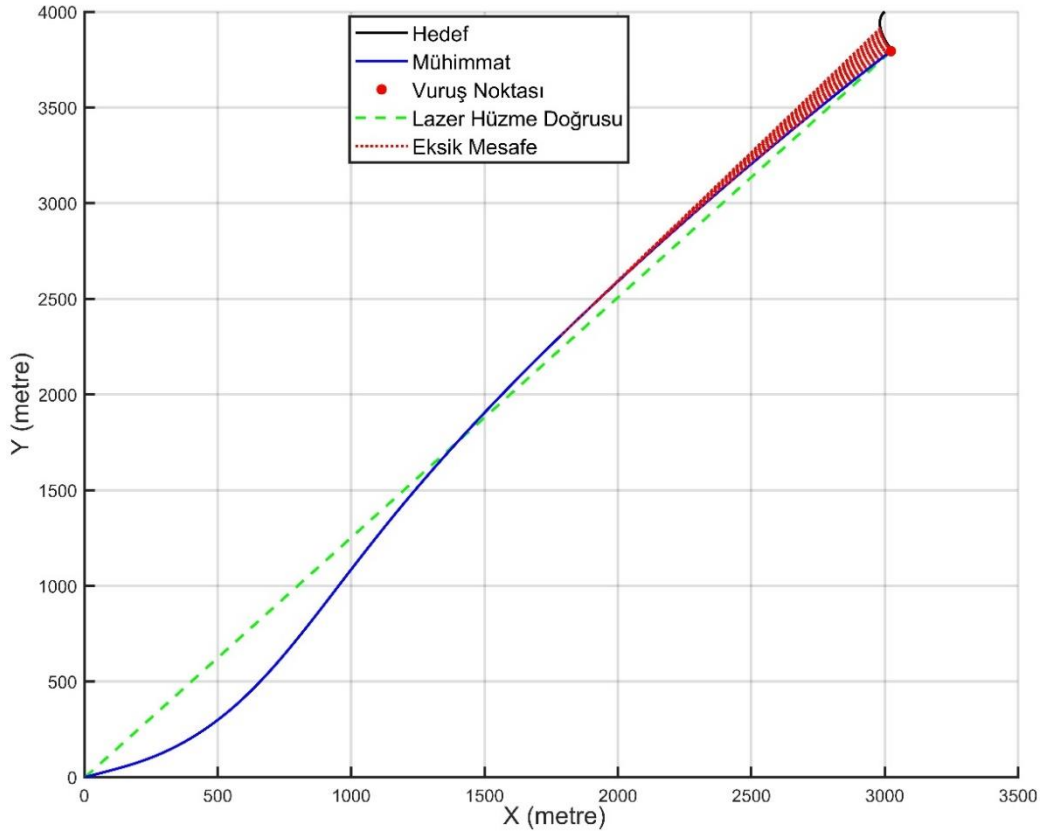
Şekil 6.41: İK Kontrolcüsü ile 3 Boyutlu Hedef ve Mühimmat Hareketleri.



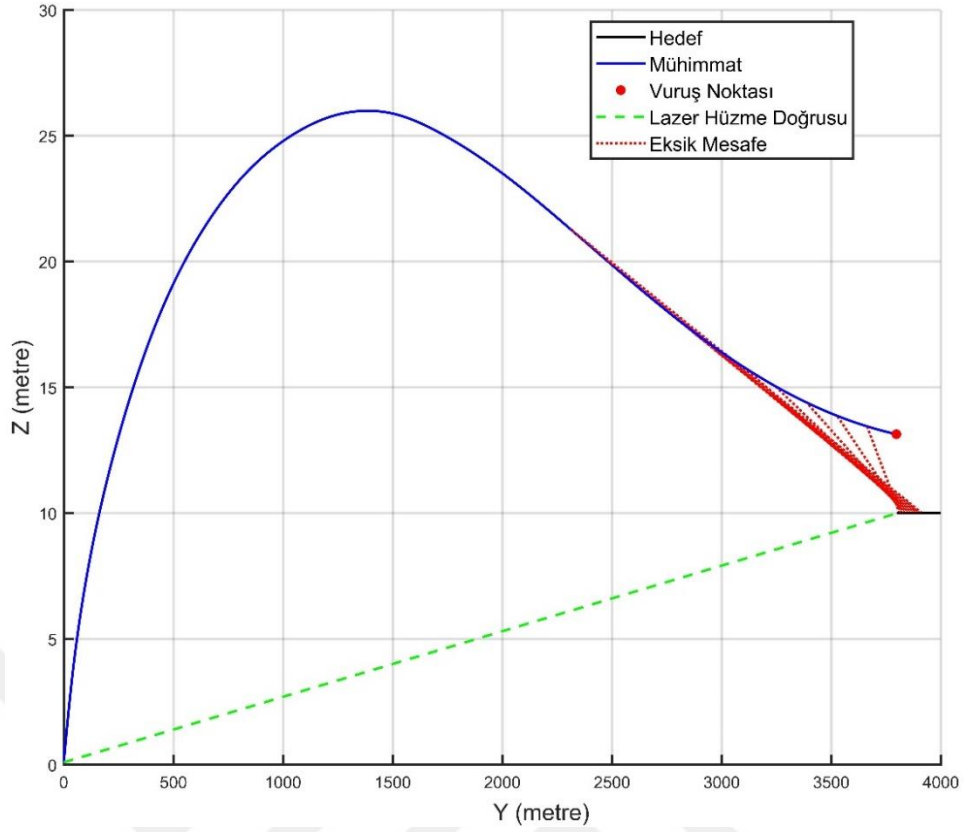
Şekil 6.42: PD Kontrolcüsü ile 3 Boyutlu Hedef ve Mühimmat Hareketleri.



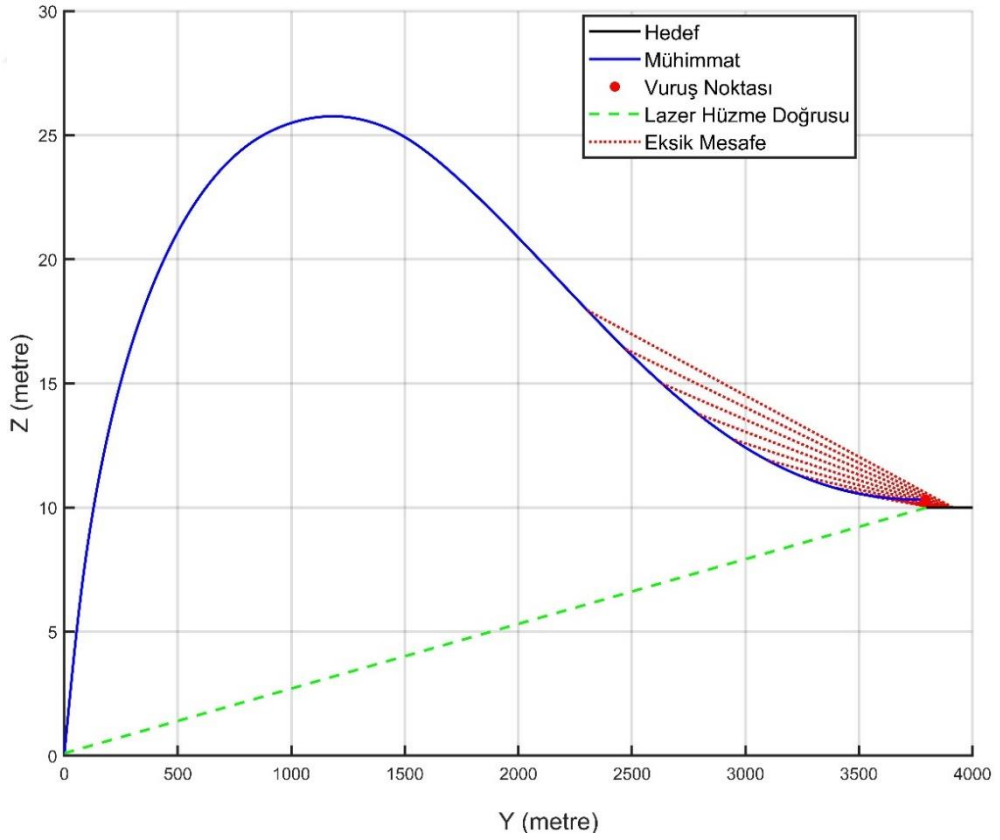
Şekil 6.43: İK Kontrolcüsü ile XY Düzleminde Hedef ve Mühimmat Hareketleri.



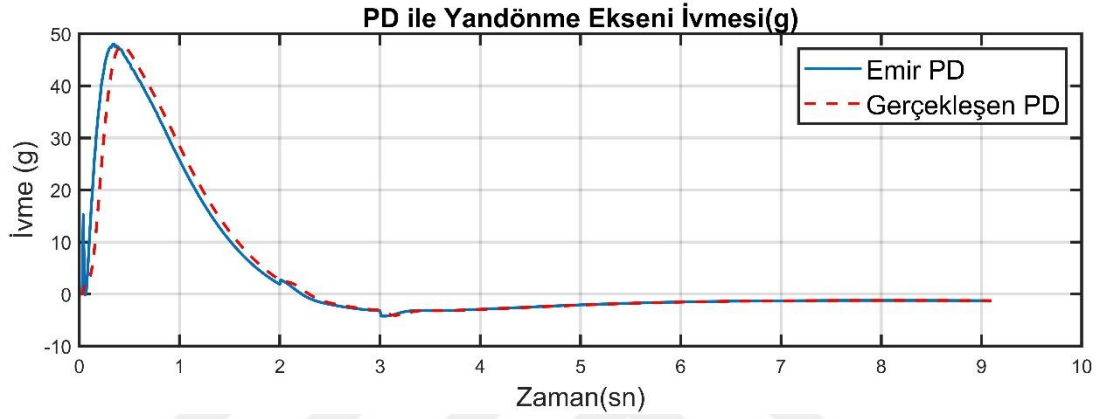
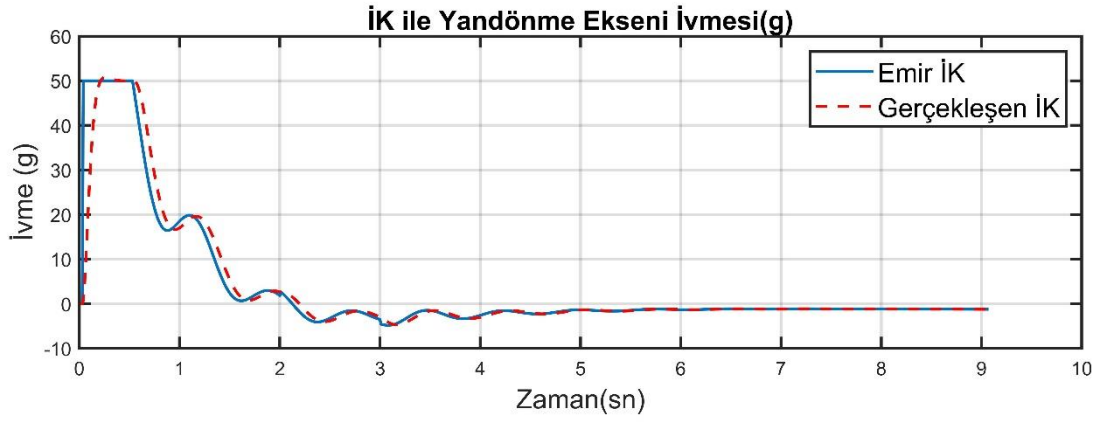
Şekil 6.44: PD Kontrolcüsü ile XY Düzleminde Hedef ve Mühimmat Hareketleri.



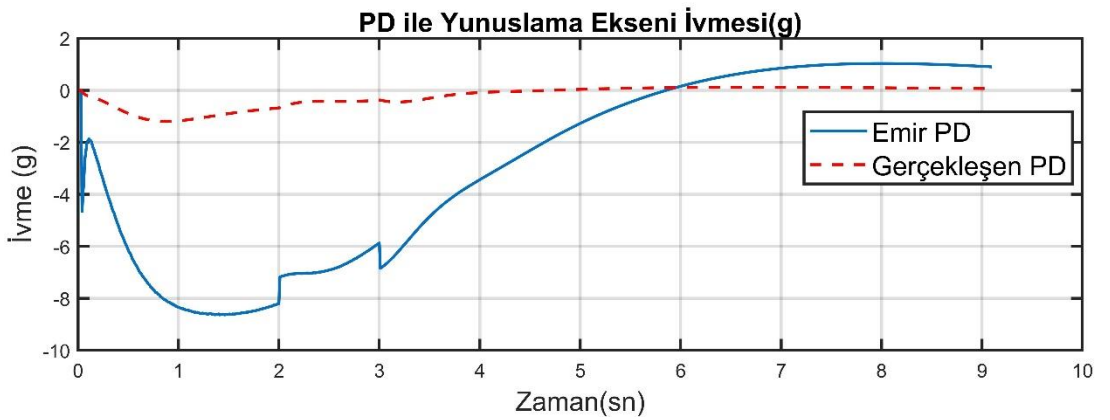
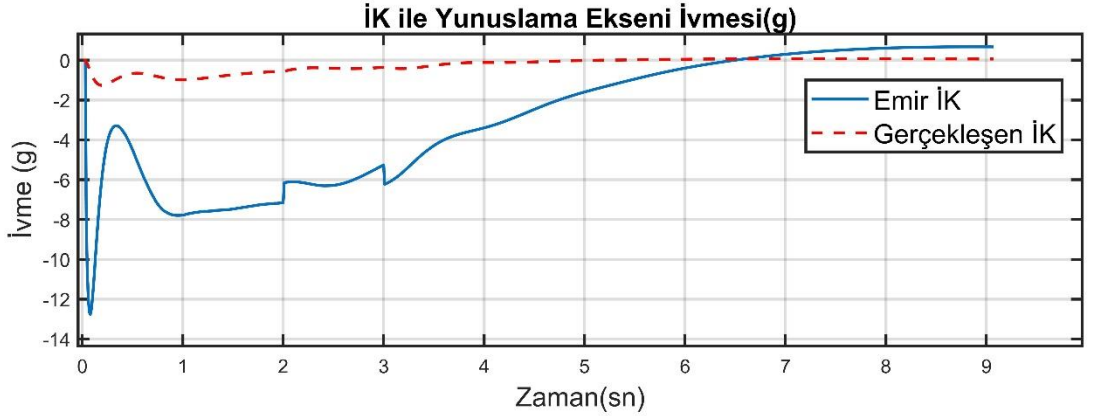
Şekil 6.45: İK Kontrolcüsü ile YZ Düzleminde Hedef ve Mühimmat Hareketleri.



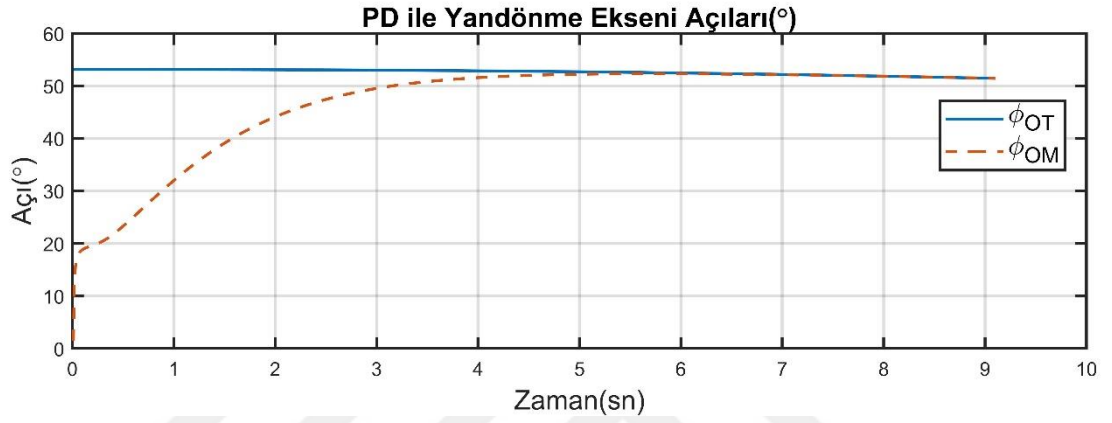
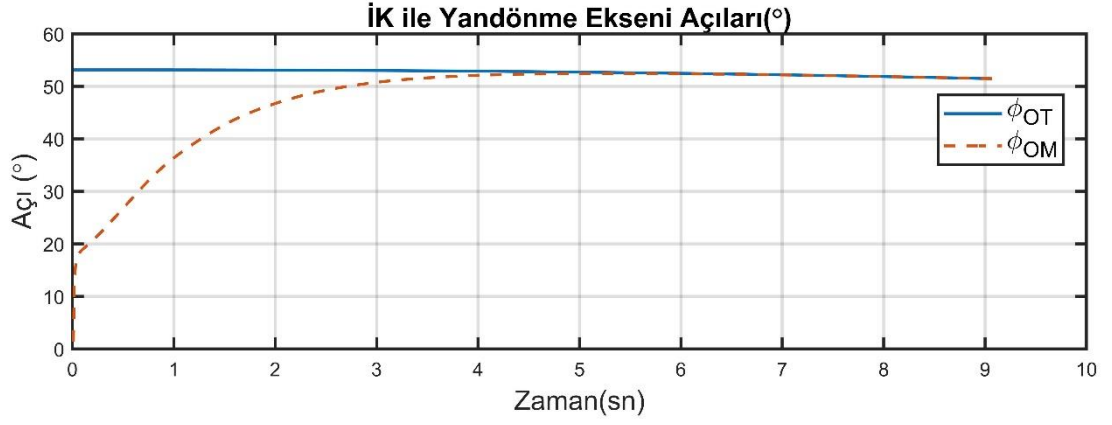
Şekil 6.46: PD Kontrolcüsü ile YZ Düzleminde Hedef ve Mühimmat Hareketleri.



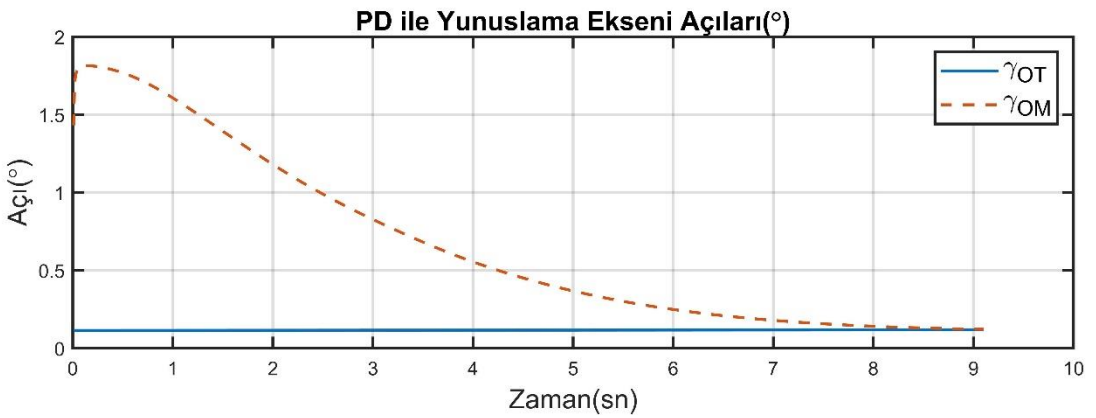
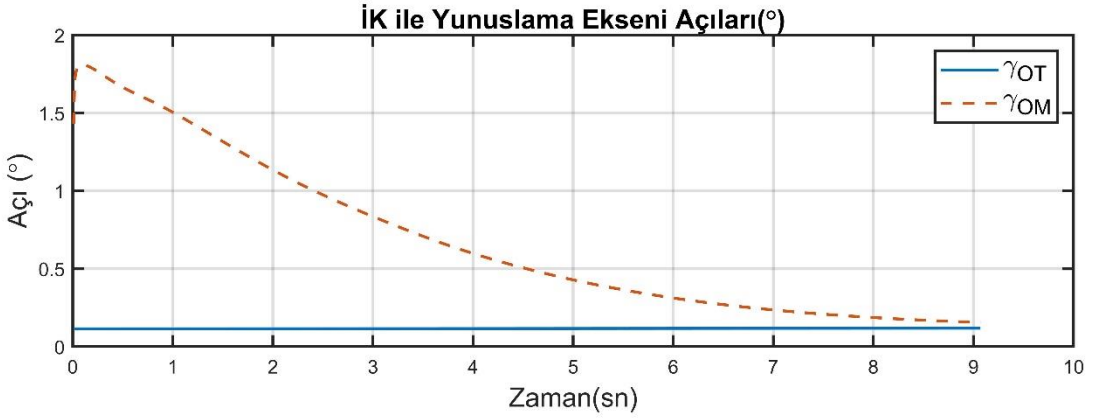
Şekil 6.47: Yandönme Ekseni Tarafından Yapılan İvmeler.



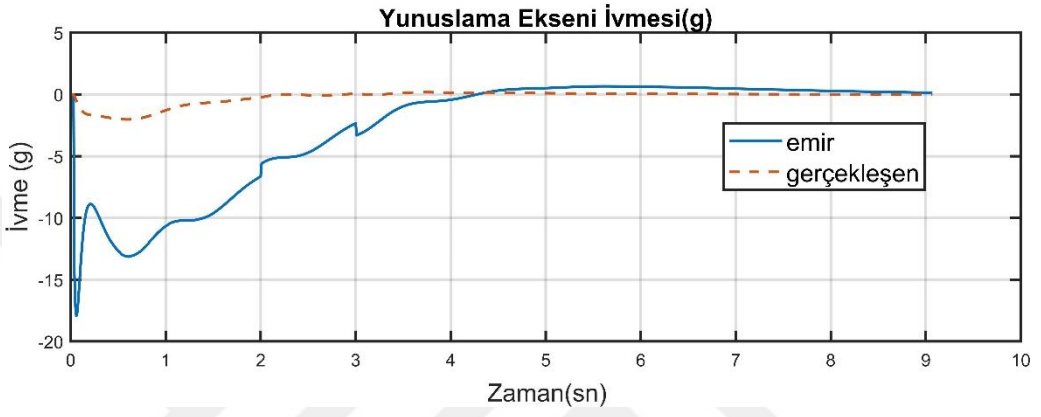
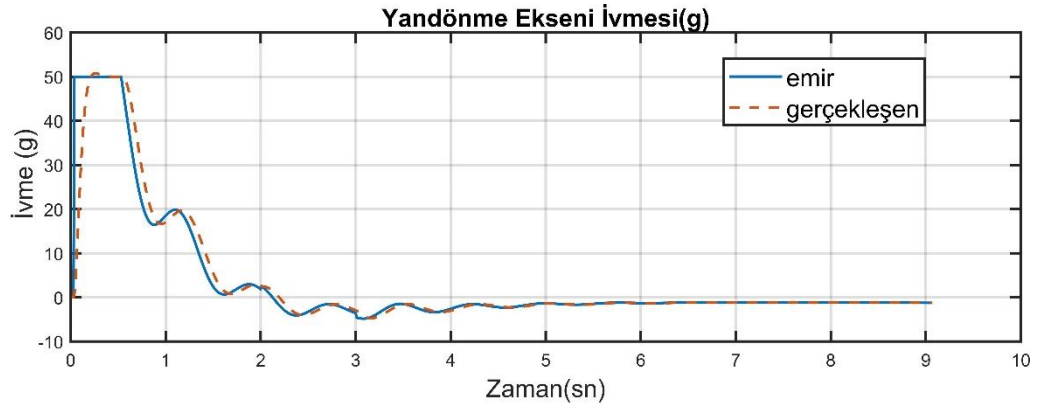
Şekil 6.48: Yunuslama Ekseni Tarafından Yapılan İvmeler.



Şekil 6.49: Yandönme Eksenî Bakış Hattî Açılı.



Şekil 6.50: Yunuslama Eksenî Bakış Hattî Açılı.



Şekil 6.51: Güncellenmiş İK Kontrolcüsüne Göre İvmeler.

7. TARTIŞMA

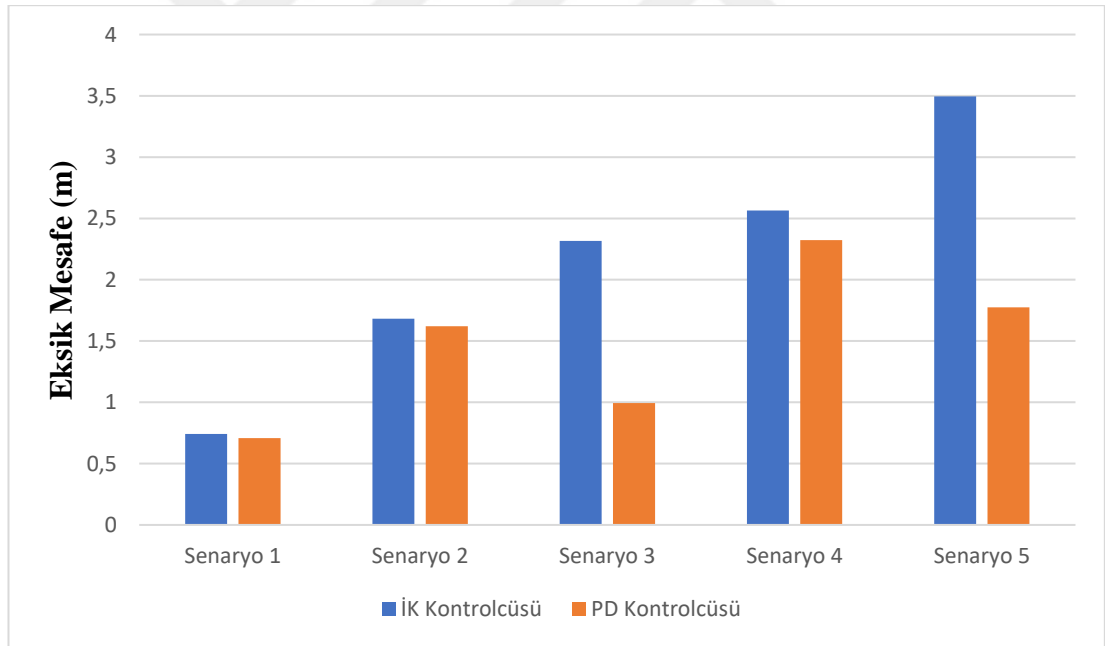
Tez çalışması kapsamında 155 mm çapındaki genel maksat mühimmatına lazer hüzme takip güdüm kuralı uygulanarak güdüm yeteneği kazandırılması incelenmiştir. Hedef ve mühimmat modeli angajman geometrisine uygun bir şekilde ortaya konarak mühimmatın kontrol edilecek parametreler belirlenmiştir. Bu parametrelere göre mühimmatın yandönme ve yunuslama açıları, hedefin bakış hattı eksenli açılara ve mühimmat menziline göre kontrol edilmiştir. Mühimmat açılarının kontrolünü sağlamak için türetilen yanal ivmeler ileri kompansatör ve PD kontrolcüsü olmak üzere iki ayrı kontrolcü tasarımı yapılarak türetilmiştir. Bunun yanında diğer bir klasik kontrol yöntemi olan PID ve PI kontrolcüleri de denenmiş ancak sistem salınımlı bir sistem olduğu için integral kontrolcüsü nedeniyle başarımlı sağlanamamıştır. İntegratör içeren kontrolcüler salınımlı sistemlerin salınımını daha fazla arttırdığı için bu güdüm yöntemine uygun bir kontrol performansı ortaya koyamamıştır. Bunun yanında mühimmatın amacının hedefi son noktada vurmak olduğu için seyir uçuşu boyunca bire bir hüzme takibi gerçekleştirmesine gerek yoktur. Bundan dolayı kalıcı durum hatası, sistem agresifliğine göre ikinci planda olduğu için integratör içeren kontrolcüler tercih edilmemiştir. Her iki kontrolcü için beş ayrı senaryo için benzetim yapılmış ve sonuçları Tablo 7.1’de özetlenmiştir.

Tablo 7.1: Senaryo Sonuçları.

| | Kontrolcü | Eksik Mesafe (m) | Ortalama İvmeler (g) (Yunuslama, Yandönme) | Maksimum İvmeler(g) (Yunuslama, Yandönme) |
|-----------|------------------|-------------------------|---|--|
| Senaryo 1 | İK | 0.742 | (0.201, 3.879) | (1.113, 50.758) |
| | PD | 0.708 | (0.220, 40.689) | (1.101, 40.689) |
| Senaryo 2 | İK | 1.682 | (0.222, 4.372) | (1.183, 50.758) |
| | PD | 1.621 | (0.244, 4.554) | (1.104, 44.084) |
| Senaryo 3 | İK | 2.317 | (0.251, 4.977) | (1.183, 50.758) |
| | PD | 0.994 | (0.278, 5.180) | (1.103, 44.275) |
| Senaryo 4 | İK | 2.564 | (0.267, 5.541) | (1.265, 50.759) |
| | PD | 2.323 | (0.295, 5.560) | (1.196, 47.656) |
| Senaryo 5 | İK | 3.495 | (0.283, 6.281) | (1.265, 50.759) |
| | PD | 1.775 | (0.301, 6.497) | (1.195, 47.674) |

Güdümlü yöntemlerinin başarımı incelenirken, eksik mesafe, türetilen ivmelerin maksimum değerleri ve ortalama değerleri göz önüne alınmaktadır. Çalışma kapsamında türetilen ivmeler ileride geliştirilecek olan gerçek sistemler için sistem mühendisliği seviyesinde ister oluşturacaktır. Bu nedenle ortaya çıkacak ivmelerin, tasarlanacak kontrol yüzeylerini sürececek elektrik motorları tarafından yapılabilir olması gerekmektedir. Bu bağlamda incelendiğinde tasarlanan her iki kontrolcüde yüksek doyuma ulaşmadan limitler dahilinde yanal ivmeler türetmiştir.

Güdümlü algoritmaları açı ve mesafeye göre çalıştığı için hedef manevraları ve angajman süresi arttıkça eksik mesafe de artmıştır. Bunun yanında yunuslama eksenini otopilotu sistemin agresifliğini azalttığı için bütün senaryolar boyunca eksik mesafeye Z eksenini bileşeni baskın olmuştur. Beşinci senaryoda sistem tepki hızını ve kararlılığını arttırmak için İK kontrolcüsünün kontrolcü kazançları, sıfır ve kutupları güncellenmiştir. Güncel kontrolcü ile eksik mesafe 1.852 m'ye düşürülmüştür. Eksik mesafeler senaryolara göre Şekil 7.1'de özetlenmiştir.



Şekil 7.1: Senaryolara Göre Eksik Mesafeler.

PD kontrolcüsü türev etkisi ile birlikte aşma ve salınımları azaltarak kontrol yüzeylerini daha az zorlayıcı ivmeler türetmiştir. Bunun yanında eksik mesafeyi özellikle hedefin sabit hızla hareket ettiği ve ivmeli manevra yaptığı senaryolarda ileri kompanseöre göre daha az eksik mesafe ile vurmayı başarmıştır. Bunun nedeni PD kontrolcüsü içerisindeki türev kontrolcüsünün tahmin özelliğinden kaynaklanmaktadır.

Benzetimlerin sonucu olarak her iki kontrolcü de sabit hedeflere ve ivmesiz hareket eden sistemlere karşı düşük eksik mesafe elde etmeyi başarmıştır. İvmeli hedeflere karşı ise PD kontrolcüsünün daha etkin olduğu gözlemlenmiştir. Bütün senaryolar genelinde bakıldığında PD kontrolcüsü sistemi doyuma ulaştırmadan daha düşük eksik mesafeler elde edebildiği için bu sistemde daha başarılı olmuştur.

Benzetim ortamı modellenirken ölçer hataları olarak mesafe ölçümünden gelen hatalar modele eklenmiştir. Bu hataları mevcut kontrol döngüleri telafi edebilmiş ve başarılı olmuştur. INS'den, hedef işaretleyiciden ve lazer algılayıcıdan kaynaklı açı ölçümü hataları modele eklenmemiştir. INS ve lazer algılayıcıdan gelecek açı hataları mühimmatın Euler açılarına etki edecektir. Hedef işaretleyiciden kaynaklanan açı hataları bakış hattı açılarına etki edecektir. Bu hatalar eksik mesafeyi arttırıcı bir sonuç ortaya koyacaktır.

8. SONUÇLAR

Değişen savaş konseptleri ve gelişen teknoloji ile birlikte yüksek yıkım gücünden ziyade hassas vuruş kabiliyetine sahip silah sistemlerinin önemi artarak devam edecektir. İlk olarak havadan karaya silah sistemlerine kazandırılan güdüm yeteneği, gelişen ihtiyaç ve kabiliyetler ile birlikte havadan havaya ve karadan karaya silah sistemlerine de entegre edilmiştir. Tez çalışması kapsamında kara muharebesindeki birliklere önemli bir güç çarpanı olacak güdümlenebilir tank ve topçu mühimmatının modellenmesi ve analizi gerçekleştirilmiştir.

Tezin birinci bölümünde farklı güdüm yöntemleri ve çalışma prensipleri incelenmiştir. İnceleme sonucunda diğer güdüm tiplerine kıyasla daha basit sensör yapısı ve geliştirilmesi uygun maliyetli bir sistem olacağı için lazer hüzme takip yöntemi tercih edilmiştir. Bir diğer tercih sebebi ise envanterdeki mevcut 155 mm çapındaki mühimmatların geometrik yapısına uygun arayıcı entegrasyonu lazer hüzme takip güdümünde mümkün olmasıdır.

Çalışmanın ikinci kısmında lazer hüzme takip güdüm kuralı temel prensiplerine değinilmiş ve bu sistem için gerekli alt sistemler açıklanmıştır. Sistemin temel bileşenlerinden olan lazer işaretleyici ve lazer algılayıcılar hakkında bilgi verilmiş ve bu sistemlerin zayıf ve güçlü yönleri ele alınmıştır.

Üçüncü kısımda hedef, mühimmat ve işaretleyici arasındaki angajman kinematiği 2 boyutlu ve 3 boyutlu olarak ele alınmıştır. Bu kinematik ilişkiden hareket denklemleri türetilerek hedef ve mühimmat için nokta kütle modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan bu model 4. Dereceden Runge Kutta yöntemi ile MATLAB/Simulink ortamında çözdürülmüştür. Kinematik denklemlerden yola çıkarak güdüm kontrol için hedef fonksiyonlar belirlenmiştir. Yine aynı bölümde benzetim kurgulanırken yapılan kabuller anlatılmıştır. Kabullerin yanında atmosfer modeli, sürtünmeye bağlı mühimmattaki değişiklikler, otopilot modeli ve yanal bozucu etkiler de benzetime eklenmiştir. GPS ve INS'den kaynaklı konum hataları sisteme eklenmiştir. Ancak INS, lazer algılayıcı ve hedef işaretleyiciden gelen açı hataları sisteme eklenmemiştir. Gelecek çalışmalar kapsamında bu noktalardan kaynaklanabilecek açı hataları modellenerek, bu hataları telafi edecek kontrolcü tasarımları yapılması önerilmektedir.

Yapılan kabuller ve belirlenen hedef fonksiyona göre beşinci bölümde kontrolcü tasarımı açıklanmıştır. Öncelikle klasik kontrol metodlarından İK yöntemi karmaşık

düzlemde ve frekans düzleminde anlatılmıştır. Daha sonra yandönme ve yunuslama eksenleri için otopilot dahil kapalı çevrim transfer fonksiyonları bulunup kararlılık analizi yapılmıştır. Her iki eksene de İK kontrolcüsü eklenerek güncel transfer fonksiyonuna göre kararlılığa bakılıp nihai kontrol parametreleri belirlenmiştir.

Bu tasarımın doğrulanması ve kontrolcü parametrelerinin sistemin başarımına etkisinin incelenmesi için ideal sistemin transfer fonksiyonu çıkarılmış ve ideal sisteme farklı kazançlar uygulanmıştır. Kompansatör kontrolcüsü olmayan durumda sistem salınımı ve eksik mesafe artarak sistem kararsız hale gelmiştir. Kontrolcü kazancı da 1 ve 10 değerleri için incelenmiş eksik mesafeye etkisi gözlemlenmiştir. Kazancı arttırmak sistemi daha agresif yaparken, sistemin doğal frekansını artırarak salınıma neden olmuştur. Sonuç olarak kompansatör ile birlikte yüksek kontrol kazancı ile sistem tasarlanmış ve doğrulanmıştır. Bir diğer klasik kontrol yöntemi olan PD kontrolcüsünün kontrol çevrimine eklenerek yandönme ve yunuslama eksen dinamiklerine göre tasarımı yapılmıştır. Tasarım sonuçlarına göre sistemin performans parametreleri çıkartılmıştır. Kontrolcü tasarım çalışmaları kapsamında ideal sistemin davranışı incelenerek salınımlı bir sistem olduğu ortaya konmuştur. Salınımlı sistemlerde integral kontrolcüsü salınımı arttıracığı için PID ve PI kontrolcüleri ile yapılan denemelerde başarımlı elde edilememiştir. Bunun yanında kontrolcünün agresifliği kalıcı durum hatası performansından daha önde tutulduğu için PD kontrolcüsü ve İK kontrolcüleri tercih edilmiştir.

Beşinci bölümde MATLAB Simulink ortamında kurulan benzetim ortamı detaylı olarak açıklanmıştır. Benzetimi oluşturan alt sistemler belirtilmiş ve bu alt sistemler arasındaki ilişkiler ortaya konmuştur. Mühimmat ve hedefin bileşenleri ilgili düzlemlere taşınarak denklemler ile benzetim arasındaki ilişki anlatılmıştır.

Altıncı bölümde 3 boyutlu angajman denklemleri, kabuller ve çevresel bozucular altında dördüncü bölümde tasarlanan kontrolcüler kullanılarak beş farklı senaryo çalıştırılmıştır. Bu senaryoların benzetim sonuçları Tablo 7.1’de belirtilmiştir.

Benzetimlerin ve kontrolcü tasarımlarının sonucu olarak, PD kontrol yönteminin İK kontrolcüsüne göre daha iyi çalıştığı incelenmiştir. Ancak kullanılan yöntem olan lazer hüzmeye takip güdümü yönteminin hareketli hedeflere karşı zafiyetinin olduğu ortaya konmuştur. Bu zafiyete sebep olan etmenlerin ise, hedef hareketine bağlı olarak bakış hattı açıları ve menzil değişimleri olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu zafiyetin giderilip

başarımın artırılabilmesi için hedef bakış hattı açısı hızının, ivmesinin ve mühimmat menzil değişim hızının da kontrol döngüsüne dahil edilmesi gerekmektedir. Kontrolcü döngüsünün ileri besleme yoluna mühimmat menzil değişim hızı ve hedef bakış hattı açısının hız ve ivmeleri eklenerek lazer hüzme takip güdümüne komuta güdüm yeteneği de eklenmelidir. Bunun yanında ileri besleme yoluna eklenen hız ve ivmelere göre mühimmatın kontrolcü kazançlarını otomatik değiştirebileceği adaptif kontrol yöntemi de gelecek çalışmalar kapsamında ele alınmalıdır.

Sonuç olarak lazer hüzme takip güdümü 155 mm çapındaki genel maksat mühimmata benzetim ortamında başarı ile entegre edilmiştir. Kullanılan sensör teknolojisi ve güdüm kuralı sayesinde yüksek işaretleme hassasiyeti, düşük spot genişliği, gece, gündüz görev yapabilme, soft-kill ve hard-kill karşı tedbirlerine karşı dayanıklılık, mühimmat aerodinamiğini etkilememe ve gecikmesiz takip özellikleri ile kullanıldığı sisteme avantaj sağlamaktadır. Öne çıkan dezavantajları ise işaretleme ve lazer alıcıdan kaynaklı uzun menzillerde kullanılamama, manevra yapan hedeflere karşı düşük etkinlik, mühimmat çıkışında oluşan gazlardan etkilenme ve kötü hava koşullarında işaretleme sinyalinde kesilmelerdir.

Gelecek çalışmalar kapsamında, 155 mm mühimmat için 6 serbestlik dereceli benzetim ortamı kurularak kontrol yüzeylerine gelen kuvvetler çıkarılıp gerçeğe daha yakın otopilot ve güdüm tasarımı yapılması önerilmektedir. Farklı operasyon konseptlerinde kullanılmak üzere işaretleme platformu olarak insansız hava araçlarının kullanılması önerilmektedir. Bu noktada güdüm kuralına hibrit bir yapı kazandırılıp terminal safhada lazer hüzme takip güdümü kullanılabilir. Kara hedeflerinin koruma sistemleri sürekli geliştiği için bu tür güdümlü mühimmatlara karşı üzerlerinde aktif koruma sistemleri bulundurmaktadırlar. Bu koruma sistemlerine yakalanmamak için daha kısa süreli işaretleme ile çalışabilecek seviyede lazer hüzme takip algoritması geliştirilebilir. Bahsedilebilecek nihai gelecek çalışması ise geleceğin silahları olarak gösterilen hipersonik hızlarda hareket eden yüksek enerjili manyetik toplara lazer hüzme takip kuralı geliştirilebilir.

KAYNAKÇA

- Balon, R., & Komenda, J. (2006). *Analysis of the 155 mm ERFB/BB projectile trajectory. 1*, 91-114.
- Baranowski, L. (2013). Effect of the mathematical model and integration step on the accuracy of the results of computation of artillery projectile flight parameters. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 61(2), 475-484. <https://doi.org/10.2478/bpasts-2013-0047>
- Châteauneuf, M., Lestage, R., & Dubois, J. (2005). *Laser beam rider hardware-in-the-loop facility* (R. G. Driggers & D. A. Huckridge, Ed.; s. 598707). <https://doi.org/10.1117/12.630996>
- Ćosić, K., Kopriva, I., Kostić, T., Slamić, M., & Volarević, M. (1999). Design and implementation of a hardware-in-the-loop simulator for a semi-automatic guided missile system. *Simulation Practice and Theory*, 7(2), 107-123. [https://doi.org/10.1016/S0928-4869\(98\)00027-5](https://doi.org/10.1016/S0928-4869(98)00027-5)
- Debnath, M. (2016). *A Backup System for the Beam Rider Guided Missile when the Guidance-beam is absent or the Radar-antenna of the System is destroyed. 9*, 7.
- Defense Technical Information Center. (1958). *DTIC AD0209134: A DRAG COEFFICIENT, KD, BASED ONT 155MM SHELL, HE, M101*. http://archive.org/details/DTIC_AD0209134
- Doğan,Hasan. (2019). *STIRLING SOĞUTUCULU VE İKİ SERBESTLİK DERECELİ BİR KARDAN MEKANİZMASININ GÜRBÜZ KONTROLÜ* [Yüksek Lisans, KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ].

https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=4J_FzTwlrMCH4qBR0pXPHzfePuCTm2Htn_f4M_7Vtf0g7b79MiEci7w9Xi5ZCbY5

Guodong, Q., Jianqiao, Y., Xiaolin, A., & Jun, J. (2019). Multi-missile Coordination High Precision Guidance and Control Method for Beam-riding Guidance. *Journal of Physics: Conference Series*, 1215, 012013. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1215/1/012013>

Güner, D. R. L. (2004). *Modeling of a generic laser guided weapon with velocity pursuit guidance and its performance analysis using various control strategies*. <https://open.metu.edu.tr/handle/11511/14448>

Heng, L., Gao, G. X., Walter, T., & Enge, P. (t.y.). *Statistical Characterization of GPS Signal-In-Space Errors*. 8.

Implement 1976 COESA lower atmosphere—Simulink. (t.y.). Geliş tarihi 15 Mayıs 2021, gönderen <https://www.mathworks.com/help/aeroblks/coesaatmospheremodel.html>

Is a conventional shell 155mm effective against a tank if it explodes next to it or hits it? - *Quora*. (t.y.). Geliş tarihi 20 Mayıs 2021, gönderen <https://www.quora.com/Is-a-conventional-shell-155mm-effective-against-a-tank-if-it-explodes-next-to-it-or-hits-it>

Joint Chiefs Of Staff Washington Dc. (1999). *Joint Tactics, Techniques, and Procedures for Laser Designation Operations*: Defense Technical Information Center. <https://doi.org/10.21236/ADA434233>

Kain, J. E., & Yost, D. J. (1977). Command to Line-of-Sight Guidance: A Stochastic Optimal Control Problem. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 14(7), 438-444. <https://doi.org/10.2514/3.57220>

- Lee, Y.-L., Chen, K.-Y., & Liao, S.-J. (2016). Using proportional navigation and a particle swarm optimization algorithm to design a dual mode guidance. *Computers & Electrical Engineering*, 54, 137-146. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2016.01.025>
- Leopard 2 Blueprint—Download free blueprint for 3D modeling*. (t.y.). Geliş tarihi 15 Mayıs 2021, gönderen <https://drawingdatabase.com/leopard-2/>
- Lin, C.-F. (1991). *Modern navigation, guidance, and control processing*. Prentice Hall.
- Maini, A. K. (2018). *Handbook of defence electronics and optronics: Fundamentals, technologies and systems*. John Wiley & Sons.
- Marett, D. (2012). *A 4 quadrant photo detector for measuring laser pointing stability*. 12.
- Maryniak, J., Ladyzynska-Kozdras, E., Wolski, K., & Sibilski, K. (2005, Ağustos 15). Modeling of Spatial Motion of an Automatically Controlled Beam-Riding Guided Missile in Terms of the Maggi Equations. *AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit*. AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit, San Francisco, California. <https://doi.org/10.2514/6.2005-6038>
- Moran, I., & Altılar, T. (2005, Ağustos 15). Three Plane Approach for 3D True Proportional Navigation. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, San Francisco, California. <https://doi.org/10.2514/6.2005-6457>
- Ouda, A., El-Sheikh, G., Elhalwagy, Y., & Ashry, M. (2011). *Robust CLOS Guidance and Control: Part-1: System Modeling and Uncertainty Evaluation*.

- Özkan, B. (2005). Dynamic modeling, guidance, and control of homing missiles. *The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University*.
- Parayil, A., & Ratnoo, A. (2019). Cooperative Beam-Rider Guidance for Unmanned Aerial Vehicle Rendezvous. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 95(2), 585-599. <https://doi.org/10.1007/s10846-018-0873-x>
- Pastrick, H., Seltzer, S., & Warren, M. (1979, Ocak 15). Guidance laws for short range tactical missiles. *17th Aerospace Sciences Meeting*. 17th Aerospace Sciences Meeting, New Orleans, LA, U.S.A. <https://doi.org/10.2514/6.1979-59>
- Qu, Z., Jin, Y., Xu, Z., & Xing, H. (2016). *Laser beam riding guided system principle and design research* (W. Bao & Y. Lv, Ed.; s. 97960Y). <https://doi.org/10.1117/12.2229234>
- Ramakrishna, G., & Prasanna, V. (2018). *A Literature Study On Command To Line Of Sight Missile System*. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.1147484>
- SADEGHINASAB, E., KOOFIGAR, H., & Ataei, M. (2016). Design of robust command to line-of-sight guidance law: A fuzzy adaptive approach. *Journal of Engineering Science and Technology*, 11, 1528-1542.
- Siouris, G. M. (2004). *Missile guidance and control systems*. Springer.
- Staros, B. (1959). Selection of an Aerodynamic Configuration for Improved Beam Rider Guidance. *ARS Journal*, 29(2), 115-118. <https://doi.org/10.2514/8.4694>
- Szilvassy, L. (2014). *2014-41 Aviation anti-tank missile AT-16 (9A4172)*.

Wang, P., Ai, J., Yan, W., & An, Y. (2018). Generation Method Of Laser Beam Riding Guidance Information Field Based On Optical Phased Array. *MATEC Web of Conferences*, 232, 04045. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823204045>

Wang, T., & Zhou, J. (2009). *Design of integrated guidance-control (IGC) system for beam-riding guided missile*. 27, 173-177.

Yan, M., Huo, Z., & Chen, W. (2014). *Laser beam riding artillery missiles guidance device is designed* (Y. Zhang & W. Gao, Ed.; s. 92822X). <https://doi.org/10.1117/12.2073322>

Zarchan, P. (1997). *Tactical and strategic missile guidance* (3rd ed). American Institute of Aeronautics and Astronautics.

Zarchan, P. (2012). *Tactical and strategic missile guidance* (Sixth edition). American Institute of Aeronautics and Astronautics.

Ek 1: Benzetim Başlatma ve Değerlendirme Yazılımı

```
% *****
% BR GÜDÜM BENZETİMİ
% Mayıs, 2021 Ankara Mehmet KUM
% *****

clear; clc; close all;

Time_step = 0.01;      % [s] Benzetim örnekleme zamanı
sim_time = 60;        % [s]
Adim_sayisi = (sim_time/Time_step)+1;

% *****
% Hedef Başlangıç Değerleri
% *****
xT_init = 3000;        % [m]
yT_init = 4000;        % [m]
zT_init = 10;          % [m]
Vt = 30;               % m/s %Hedef İlk Hızı
ay_t = 0;              % m/s2 Hedef ivme emri
gama_target_init = deg2rad(0); % [rad]
fi_target_init = deg2rad(45); % [rad]
R_OT_init = sqrt(xT_init^2 + yT_init^2 + zT_init^2); %%Hedef
Başlangıç Menzili
% *****
% Mühimmat Başlangıç Değerleri
% *****
xM_init = 4;           % [m]
yM_init = 0.1;         % [m]
zM_init = 0.1;         % [m]
Vm_init = 600;         % m/s %%Mühimmat Namlu Çıkış Hızı
gamma_missile_init = 0.03+atan((zT_init-
zM_init)/sqrt(xT_init^2+yT_init^2)); %%Namlu Yükseliş Açısı
fi_missile_init = deg2rad(20); % Namlu Yandönme Açısı
R_OM_init = sqrt(xM_init^2 + yM_init^2 + zM_init^2); %%Mühimmat
Başlangıç Menzili

%%Aerodinamik Bileşenler
surface_area = pi*(77.35*10^-3)^2; %%Mühimmat Kesit Alanı
mass = 43.0961;        % Mühimmat Kütlesi

dist_y = 1;           %Rüzgar Bozucu İvmesi
dist_p = 1;           %Rüzgar Bozucu İvmesi
% *****
% LOS Başlangıç Parametreleri
% *****
gama_OT_init = atan(zT_init/sqrt((xT_init^2+yT_init^2)));
fi_OT_init = atan(yT_init/xT_init);
gama_OM_init = atan(zM_init/sqrt((xM_init^2+yM_init^2)));
fi_OM_init = atan(yM_init/xM_init);

% *****
% GÜDÜM ALGORİTMASI PARAMETRELERİ
% *****
k_ym = 10; %%Yandönme Ekseni Kontrolcü Kazancı
k_pm = 10; %%Yunuslama Ekseni Kontrolcü Kazancı
a = 1; b = 1/10; %%Yandönme Ekseni Kontrolcüsü Sıfır ve Kutupları
c=2; d=1/20; %%Yunuslama Ekseni Kontrolcüsü Sıfır ve Kutupları
```

```

ap_max = 50*9.81; %% Yunuslama Ekseni Ivme Limiti
ay_max = 50*9.81; %% Yandönme Ekseni Ivme Limiti
% *****
%%Otopilot model parametreleri
wn_y = 23;
ksi_y = 0.8;
wn_p = 3.5;%%3.5
ksi_p = 0.8;
tao = 0.1;
%%
RM = 3; % [m] Ölüm Bölgesi Yarıçapı

adim = (5-3)/Adim_sayisi;

SimOut = sim('BR_dist_19b')

for i = 1:length(SimOut.xM)
    MDx(i) = abs(SimOut.xT(i)-SimOut.xM(i));
    MDy(i) = abs(SimOut.yT(i)-SimOut.yM(i));
    MDz(i) = abs(SimOut.zT(i)-SimOut.zM(i));
    MD(i) = sqrt(MDx(i)^2 + MDy(i)^2 + MDz(i)^2);

    if MD(i) <= RM
        t = i-1;
        miss_distance = MD(i);%%Eksik Mesafeyi Bulma
    else
        t=i;
    end
end

Durdurma_Zamani = (t)*Time_step;
Kacinci_Adimda_Durdurdu = t;

for q = 1:t
    xTint(q) = SimOut.xT(q);
    yTint(q) = SimOut.yT(q);
    zTint(q) = SimOut.zT(q);
    xMint(q) = SimOut.xM(q);
    yMint(q) = SimOut.yM(q);
    zMint(q) = SimOut.zM(q);
    Vm(q) = SimOut.Vm(q);
    yaw_ivme(q) = SimOut.a_ym(q); % Yandönme Ekseni İvme Emri
    pitch_ivme(q) = SimOut.a_pm(q); % Yunuslama Ekseni İvme Emri

    yaw_c(q) = SimOut.a_ym_c(q); % Yandönme Ekseni Gerçekleşen İvme
    pitch_c(q) = SimOut.a_pm_c(q); % Yunuslama Ekseni Gerçekleşen
ivme

    gama_om(q) = SimOut.gama_om(q);
    fi_om(q) = SimOut.fi_om(q);
    gama_ot(q) = SimOut.gama_ot(q);
    fi_ot(q) = SimOut.fi_ot(q);
    time(q) = q*Time_step;
end

ortalama_z_ivme = mean(abs(yaw_c))/9.81;
ortalama_y_ivme = mean(abs(pitch_c))/9.81;
maksimum_z_ivme = max(yaw_c)/9.81;
maksimum_y_ivme = max(pitch_c)/9.81;
minimum_z_ivme = min(yaw_c)/9.81;

```

```

minimum_y_ivme = min(pitch_c)/9.81;

%%Grafiklerin Çizdirilmesi
figure(1)
plot3(xTint,yTint,zTint,'k',xMint,yMint,zMint,'b',xMint(t),yMint(t),
zMint(t),'.','MarkerSize',20,'MarkerEdgeColor','r');
grid on;
xlabel('X');ylabel('Y');zlabel('Z');legend('Hedef','Mühimmat');
xp = [xMint(1) xTint(t)];
yp = [yMint(1) yTint(t)];
zp = [zMint(1) zTint(t)];
line(xp,yp,zp,'Color','green','LineStyle','--');
for dd = 1:10
    xx = [xTint(t-(10*4*dd)) xMint(t-(10*4*dd))];
    yy = [yTint(t-(10*4*dd)) yMint(t-(10*4*dd))];
    zz = [zMint(t-(10*4*dd)) zMint(t-(10*4*dd))];
    line(xx,yy,zz,'Color','red','LineStyle',':')
end

figure(2)
subplot(2,1,1),plot(time,yaw_ivme/9.81);grid on;hold on;
plot(time,yaw_c/9.81,'LineStyle','--');legend('emir','gerçekleşen');
title('Yandönme Eksenini
İvmesi (g)');ylabel('g');xlabel('Zaman(sn)');grid on
subplot(2,1,2),plot(time,pitch_ivme/9.81);grid on;hold on;
plot(time,pitch_c/9.81,'LineStyle','--
');legend('emir','gerçekleşen');
title('Yunuslama Eksenini
İvmesi (g)');ylabel('g');xlabel('Zaman(sn)');grid on
figure(3)
subplot(2,1,1),plot(time,rad2deg(fi_ot));grid on;hold on;
plot(time,rad2deg(fi_om),'LineStyle','--
');legend('\phi_O_T','\phi_O_M');
title('Yandönme Eksenini Açılırları({\circ})');ylabel('Derece
({\circ})');xlabel('Zaman(sn)')
subplot(2,1,2),plot(time,rad2deg(gama_ot));grid on;hold on;
plot(time,rad2deg(gama_om),'LineStyle','--
');legend('\gamma_O_T','\gamma_O_M');
title('Yunuslama Eksenini
Açılırları({\circ})');ylabel('Derece({\circ})');xlabel('Zaman(sn)')

fprintf('** SONUÇLAR: \n')
fprintf('Toplam Adım Sayısı : %d\n',Adim_sayisi)
fprintf('Kacinci Adımda Durdurdu :
%d\n',Kacinci_Adımda_Durdurdu)
fprintf('Toplam Simülasyon Süresi (s) : %d\n',sim_time)
fprintf('Durdurma Zamanı (s) :
%3.3f\n',Durdurma_Zamanı)
fprintf('Eksik Mesafe (m) : %3.3f\n',min(MD))
fprintf('Yunuslama eksenini ortalama ivme (g) :
%3.3f\n',ortalama_y_ivme)
fprintf('Yandönme eksenini ortalama ivme (g) :
%3.3f\n',ortalama_z_ivme)
fprintf('Yunuslama eksenini maksimum ivme (g) :
%3.3f\n',maksimum_y_ivme)
fprintf('Yandönme eksenini maksimum ivme (g) :
%3.3f\n',maksimum_z_ivme)
fprintf('Yunuslama eksenini minimum ivme (g) :
%3.3f\n',minimum_y_ivme)
fprintf('Yandönme eksenini minimum ivme (g) :
%3.3f\n',minimum_z_ivme)

```