

**GÜDÜMLÜ VE GÜDÜMSÜZ TOPÇU
MÜHİMMATLARININ VURUŞ PERFORMANS
DEĞERLENDİRMESİ**

**HIT PERFORMANCE ASSESSMENT OF CANNON
LAUNCHED GUIDED AND UNGUIDED PROJECTILES**

YUNUS EMRE BALCIOĞLU

DR. ÖĞR. ÜYESİ YAKUP ÖZKAZANÇ

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

ÖZET

GÜDÜMLÜ VE GÜDÜMSÜZ TOPÇU MÜHİMMATLARININ VURUŞ PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ

Yunus Emre BALCIOĞLU

Yüksek Lisans, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Yakup ÖZKAZANÇ

Haziran 2021, 119 sayfa

Bu tez kapsamında güdümlü ve güdümsüz topçu mermilerinin vuruş performansı değerlendirilmiştir. Güdümsüz ve güdümlü mühimmat yörünge modelleri oluşturulmuştur. Topçu sistemlerine etki edebilecek hatalar belirlenmiş ve modellenmiştir. Bu hatalar yörünge modellerinin kullanıldığı atışlara mühimmat parametresi ve atış koşulu olarak eklenmiştir. Monte Carlo benzetimleri ile güdümsüz ve güdümlü modellere etki eden belirsizlikler neticesinde mühimmat dağılımları elde edilmiştir. Güdümlü ve güdümsüz mühimmatların çarpma noktası dağılımları CEP değeri üzerinden değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Topçu Mermisi, Güdümlü Topçu Mermisi, Değiştirilmiş Nokta Kütle Modeli, Güdüm, Oransal Seyir Güdümü, CEP, Monte Carlo Metodu

ABSTRACT

HIT PERFORMANCE ASSESSMENT OF CANNON LAUNCHED GUIDED AND UNGUIDED PROJECTILES

Yunus Emre BALCIOĞLU

Master of Science, Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Yakup ÖZKAZANÇ

June 2021, 119 pages

In this thesis, hit performance assessment of guided and unguided cannon launched projectiles are evaluated. Dynamic trajectory models for guided and unguided projectiles are developed. Error sources of cannon systems are determined and their models are developed. These disturbances are added to launch simulations which are performed by using trajectory models as weapon parameters and launch condition. Impact point distributions are obtained as a result of error sources impacted on unguided and guided models by Monte Carlo simulations. Impact point distributions of guided and unguided projectiles are evaluated based on CEP value.

Keywords: Projectile, Guided Projectile, Modified Point Mass Model, Guidance, Proportional Navigation Guidance, CEP, Monte Carlo Simulation

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimimde kendisinden aldığım derslerden başlayarak tez yazım sürecimin sonuna kadar yapmış olduğu değerli katkılarla bu tezin oluşmasında büyük emeği olan değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Yakup ÖZKAZANÇ'a,

Hayatımın her anında yanımda olan, kararlarımın arkasında duran ve beni her zaman destekleyen canım aileme,

Tez yazım sürecinde yardımlarını esirgemeyen ve desteklerini hep hissettiğim değerleri dostlarım Ahmet Burak AYZ, Mehmet YALÇIN ve Tuğberk GÜNER'e,

Teşekkürlerimi sunarım.

Yunus Emre BALCIOĞLU

Haziran 2021, Ankara

İÇİNDEKİLER

ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	x
SÖZLÜKÇE	xi
1. GİRİŞ	1
2. TOPÇU SİSTEMLERİ TEKNOLOJİSİ	4
2.1. Klasik Topçu Sistemleri	4
2.2. Gdümlü Topçu Mermileri	9
3. TOPÇU MÜHİMMATI YÖRÜNGE MODELİ	13
3.1. Gdümsüz Mühimmat Yörünge Modeli	13
3.1.1. Hareket Denklemleri	13
3.1.2. Değıştirilmiş Nokta Kütle Modeli	18
3.1.3. Gdümsüz Mühimmat Yörünge Modeli Şeması	26
3.2. Gdümlü Mühimmat Yörünge Modeli	31
3.2.1. Gdümlü Birimi ve Oransal Seyir Gdümlü	32
3.2.2. Kontrol Birimi	38
3.2.3. Gdümlü Mühimmat Yörünge Modeli Şeması	46
4. VURUŞ PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ	57
4.1. Hata Kaynakları ve Etkileri	58
4.2. Çarpma Noktası Dağılımlarının Değlendirilmesi	69
4.3. Atış Senaryoları ve Sonuçlar	83
5. SONUÇLAR	101
6. KAYNAKLAR	103

EKLER	106
EK 1 – Standart Atmosfer Modeli	106
EK 2 – Matlab Ortamında Geliştirilen Modeller	110
EK 3 - Tez Çalışması Orjinallik Raporu.....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
ÖZGEÇMİŞ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Örnek Topçu Sistemi [6]	4
Şekil 2.2. Cooperhead Silah Sistemi [16].....	10
Şekil 2.3. ANSR Silah Sistemi.....	11
Şekil 2.4. Rota Düzeltme Tapa Programları.....	12
Şekil 3.1. Mühimmata Etki Eden Kuvvetler [20]	14
Şekil 3.2. Coriolis Etkisi [21].....	15
Şekil 3.3. Magnus Kuvveti [25].....	18
Şekil 3.4. Nütasyon Hareketi [26].....	22
Şekil 3.5. Gdümsüz Mühimmat Yörünge Modeli Şeması.....	27
Şekil 3.6. Çizelge 3.2 ile Giriş Koşulları Belirlenen Gdümsüz Mühimmat Yörüngesi.....	30
Şekil 3.7. Çizelge 3.2 ile Giriş Koşulları Belirlenen Gdümsüz Mühimmat Yörüngesi (İrtifa ve Menzil Eksenleri).....	31
Şekil 3.8. Bakış Hattı [27].....	33
Şekil 3.9. Oransal Seyir Gdümü Geometrisi [28]	34
Şekil 3.10. Sıfır Çaba Iskalama Mesafesi [28].....	35
Şekil 3.11. Gdüm ve Kontrol Blok Diyagramı.....	42
Şekil 3.12. Kanat Pozisyon Değişikliğinin Kaldırma ve Sürüklenme Kuvvetlerine Etkisi [31]	43
Şekil 3.13. L/D Oranının Mühimmatın Mach Değerine Göre Değişimi.....	45
Şekil 3.14. Gdümlü Mühimmat Yörünge Modeli Şeması.....	47
Şekil 3.15. Gdümsüz Safha Şeması	48
Şekil 3.16. Gdümlü Safha Şeması	50
Şekil 3.17. Çizelge 3.3 ile Giriş Koşulları Belirlenen Gdümlü Mühimmat Yörüngesi	53
Şekil 3.18. Çizelge 3.3 ile Giriş Koşulları Belirlenen Gdümlü Mühimmat Yörüngesi (İrtifa ve Menzil Eksenleri).....	54
Şekil 3.19. Çizelge 3.4 ile Giriş Koşulları Belirlenen Gdümlü Mühimmat Yörüngesi	55
Şekil 3.20. Çizelge 3.4 ile Giriş Koşulları Belirlenen Gdümlü Mühimmat Yörüngesi (İrtifa ve Menzil Eksenleri).....	56
Şekil 4.1. Namlu Çıkış Hızı Normal Dağılımı.....	60
Şekil 4.2. Mühimmat Kütlesi Normal Dağılımı.....	61
Şekil 4.3. Mühimmat Eylemsizlik Momenti Normal Dağılımı.....	62
Şekil 4.4. Namlu Yükseliş Açısı Normal Dağılımı.....	63
Şekil 4.5. Namlu Azimut Açısı Normal Dağılımı	64
Şekil 4.6. Gdümsüz Mühimmat Çarpma Noktası Dağılımı	66
Şekil 4.7. Gdümlü Mühimmat Çarpma Noktası Dağılımı.....	67
Şekil 4.8. Gdümsüz ve Gdümlü Mühimmatların Çarpma Noktası Dağılımı	68
Şekil 4.9. Gdümsüz Mühimmat Çarpma Noktası Dağılımı	70

Şekil 4.10. GÜDÜMLÜ MÜHİMMAT ÇARPMA NOKTASI DAĞILIMI.....	70
Şekil 4.11. GÜDÜMSÜZ MÜHİMMAT DAĞILIMLARININ MENZİL YÖNÜNDE İSKALAMA MESAFESİ DEĞİŞKENİ İÇİN Normalleştirilmiş Histogram Grafiği.....	73
Şekil 4.12. GÜDÜMSÜZ MÜHİMMAT DAĞILIMLARININ ÇAPRAZ MENZİL YÖNÜNDE İSKALAMA MESAFESİ DEĞİŞKENİ İÇİN NORMALLEŞTİRİLMİŞ HISTOGRAM GRAFİĞİ.....	73
Şekil 4.13. GÜDÜMLÜ MÜHİMMAT DAĞILIMLARININ MENZİL YÖNÜNDE İSKALAMA MESAFESİ DEĞİŞKENİ İÇİN Normalleştirilmiş Histogram Grafiği.....	74
Şekil 4.14. GÜDÜMLÜ MÜHİMMAT DAĞILIMLARININ ÇAPRAZ MENZİL YÖNÜNDE İSKALAMA MESAFESİ DEĞİŞKENİ İÇİN NORMALLEŞTİRİLMİŞ HISTOGRAM GRAFİĞİ.....	75
Şekil 4.15. GÜDÜMSÜZ MÜHİMMAT ÇARPMA NOKTASI DAĞILIMI İÇİN REP GÖSTERİMİ.....	77
Şekil 4.16. GÜDÜMSÜZ MÜHİMMAT ÇARPMA NOKTASI DAĞILIMI İÇİN DEP GÖSTERİMİ.....	78
Şekil 4.17. GÜDÜMSÜZ MÜHİMMAT ÇARPMA NOKTASI DAĞILIMI İÇİN CEP GÖSTERİMİ.....	79
Şekil 4.18. GÜDÜMSÜZ MÜHİMMAT ÇARPMA NOKTASI DAĞILIMI İÇİN HATA ELİPSİ GÖSTERİMİ.....	82
Şekil 4.19. DÜŞÜK NAMLU ÇIKIŞ HIZI VE DÜŞÜK YÜKSELİŞ AÇISI İÇİN GÜDÜMSÜZ MÜHİMMAT ÇARPMA NOKTASI DAĞILIMI.....	84
Şekil 4.20. DÜŞÜK NAMLU ÇIKIŞ HIZI VE DÜŞÜK YÜKSELİŞ AÇISI İÇİN GÜDÜMLÜ MÜHİMMAT ÇARPMA NOKTASI DAĞILIMI.....	85
Şekil 4.21. DÜŞÜK NAMLU ÇIKIŞ HIZI VE DÜŞÜK YÜKSELİŞ AÇISI İÇİN GÜDÜMSÜZ VE GÜDÜMLÜ MÜHİMMATLARIN ÇARPMA NOKTASI DAĞILIMI.....	85
Şekil 4.22. DÜŞÜK NAMLU ÇIKIŞ HIZI VE DÜŞÜK YÜKSELİŞ AÇISI İÇİN GÜDÜMSÜZ VE GÜDÜMLÜ MÜHİMMATLARIN ÇARPMA NOKTASI DAĞILIMI (25*25 YAKINLAŞTIRILMIŞ GÖRSEL).....	86
Şekil 4.23. DÜŞÜK NAMLU ÇIKIŞ HIZI VE ORTA YÜKSELİŞ AÇISI İÇİN GÜDÜMSÜZ MÜHİMMAT ÇARPMA NOKTASI DAĞILIMI.....	87
Şekil 4.24. DÜŞÜK NAMLU ÇIKIŞ HIZI VE ORTA YÜKSELİŞ AÇISI İÇİN GÜDÜMLÜ MÜHİMMAT ÇARPMA NOKTASI DAĞILIMI.....	87
Şekil 4.25. DÜŞÜK NAMLU ÇIKIŞ HIZI VE ORTA YÜKSELİŞ AÇISI İÇİN GÜDÜMSÜZ VE GÜDÜMLÜ MÜHİMMATLARIN ÇARPMA NOKTASI DAĞILIMI.....	88
Şekil 4.26. DÜŞÜK NAMLU ÇIKIŞ HIZI VE ORTA YÜKSELİŞ AÇISI İÇİN GÜDÜMSÜZ VE GÜDÜMLÜ MÜHİMMATLARIN ÇARPMA NOKTASI DAĞILIMI (30*30 YAKINLAŞTIRILMIŞ GÖRSEL).....	88
Şekil 4.27. DÜŞÜK NAMLU ÇIKIŞ HIZI VE YÜKSEK YÜKSELİŞ AÇISI İÇİN GÜDÜMSÜZ MÜHİMMAT ÇARPMA NOKTASI DAĞILIMI.....	89
Şekil 4.28. DÜŞÜK NAMLU ÇIKIŞ HIZI VE YÜKSEK YÜKSELİŞ AÇISI İÇİN GÜDÜMLÜ MÜHİMMAT ÇARPMA NOKTASI DAĞILIMI.....	90
Şekil 4.29. DÜŞÜK NAMLU ÇIKIŞ HIZI VE YÜKSEK YÜKSELİŞ AÇISI İÇİN GÜDÜMSÜZ VE GÜDÜMLÜ MÜHİMMATLARIN ÇARPMA NOKTASI DAĞILIMI.....	90
Şekil 4.30. DÜŞÜK NAMLU ÇIKIŞ HIZI VE YÜKSEK YÜKSELİŞ AÇISI İÇİN GÜDÜMSÜZ VE GÜDÜMLÜ MÜHİMMATLARIN ÇARPMA NOKTASI DAĞILIMI (25*25 YAKINLAŞTIRILMIŞ GÖRSEL).....	91
Şekil 4.31. YÜKSEK NAMLU ÇIKIŞ HIZI VE DÜŞÜK YÜKSELİŞ AÇISI İÇİN GÜDÜMSÜZ MÜHİMMAT ÇARPMA NOKTASI DAĞILIMI.....	92

Şekil 4.32. Yüksek Namlu Çıkış Hızı ve Düşük Yükseliş Açısı için GÜDÜMLÜ Mühimmat Çarpma Noktası Dağılımı.....	92
Şekil 4.33. Yüksek Namlu Çıkış Hızı ve Düşük Yükseliş Açısı için GÜDÜMSÜZ ve GÜDÜMLÜ Mühimmatların Çarpma Noktası Dağılımı.....	93
Şekil 4.34. Yüksek Namlu Çıkış Hızı ve Düşük Yükseliş Açısı için GÜDÜMSÜZ ve GÜDÜMLÜ Mühimmatların Çarpma Noktası Dağılımı (50*50 yakınlaştırılmış görsel).....	93
Şekil 4.35. Yüksek Namlu Çıkış Hızı ve Orta Yükseliş Açısı için GÜDÜMSÜZ Mühimmat Çarpma Noktası Dağılımı.....	94
Şekil 4.36. Yüksek Namlu Çıkış Hızı ve Orta Yükseliş Açısı için GÜDÜMLÜ Mühimmat Çarpma Noktası Dağılımı.....	95
Şekil 4.37. Yüksek Namlu Çıkış Hızı ve Orta Yükseliş Açısı için GÜDÜMSÜZ ve GÜDÜMLÜ Mühimmatların Çarpma Noktası Dağılımı.....	95
Şekil 4.38. Yüksek Namlu Çıkış Hızı ve Orta Yükseliş Açısı için GÜDÜMSÜZ ve GÜDÜMLÜ Mühimmatların Çarpma Noktası Dağılımı (85*85 yakınlaştırılmış görsel).....	96
Şekil 4.39. Yüksek Namlu Çıkış Hızı ve Yüksek Yükseliş Açısı için GÜDÜMSÜZ Mühimmat Çarpma Noktası Dağılımı.....	97
Şekil 4.40. Yüksek Namlu Çıkış Hızı ve Yüksek Yükseliş Açısı için GÜDÜMLÜ Mühimmat Çarpma Noktası Dağılımı.....	97
Şekil 4.41. Yüksek Namlu Çıkış Hızı ve Yüksek Yükseliş Açısı için GÜDÜMSÜZ ve GÜDÜMLÜ Mühimmatların Çarpma Noktası Dağılımı.....	98
Şekil 4.42. Yüksek Namlu Çıkış Hızı ve Yüksek Yükseliş Açısı için GÜDÜMSÜZ ve GÜDÜMLÜ Mühimmatların Çarpma Noktası Dağılımı (75*75 yakınlaştırılmış görsel).....	98

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Topçu Atış Tabloları.....	5
Çizelge 3.1. 155 mm Topçu Mermisinin Aerodinamik Katsayıları [4]	25
Çizelge 3.2. 155 mm Topçu Mühimmatı Örnek Giriş Koşulları	29
Çizelge 3.3. 155 mm Gdümlü Topçu Mühimmatı Giriş Koşulları (Uzak Menzil).....	52
Çizelge 3.4. 155 mm Gdümlü Topçu Mühimmatı Giriş Koşulları (Düşük Hız).....	54
Çizelge 4.1. Hata Kaynakları.....	59
Çizelge 4.2. Çarpma Noktası Dağılımları İçin Seçilen Giriş Koşulları	65
Çizelge 4.3. Gdümsüz 155 mm Topçu Mühimmatı Atışları Dağılım İncelemesi	71
Çizelge 4.4. Gdümlü 155 mm Topçu Mühimmatı Atışları Dağılım İncelemesi	71
Çizelge 4.5. Gerçek ve Teorik REP, DEP Değerleri.....	80
Çizelge 4.6. Düşük Hız Düşük Yükseliş Açısı Senaryosu.....	83
Çizelge 4.7. Gdümsüz ve Gdümlü Mühimmatların Performans Değerlendirmesi.....	99

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

C_{D0}	Sıfır Sapma Sürüklenme Kuvveti Katsayısı
C_{Da2}	Karesel Sürüklenme Kuvveti Katsayısı
C_{La}	Doğrusal Kaldırma Kuvveti Katsayısı
C_{La3}	Kübik Kaldırma Kuvveti Sayısı
C_{Ypa}	Magnus Kuvveti Katsayısı
C_{lp}	Dönme Sönümlenme Momenti Katsayısı
C_{Ma}	Devrilme Momenti Katsayısı
C_{Ma3}	Kübik Devrilme Momenti Katsayısı
Ω	Dünyanın Açısız Dönüş Hızı (rad/s)

Kısaltmalar

ANSR	Autonomous Naval Support Round
CEP	Circular Error Probable
REP	Range Error Probable
DEP	Deflection Error Probable

SÖZLÜKÇE

Bakış Hattı	Line of Sight
Bükülme	Twist
Değiştirilmiş Nokta Kütle Modeli	Modified Point Mass Model
Denge Sapması	Yaw of Respose
Devrilme Momenti Katsayısı	Overturning Moment Coefficient
Doğrudan Atış	Direct Fire
Dolaylı Atış	Indirect Fire
Dönerek Kararlılığa Ulaşmış	Spin Stabilized
Düzeltilmemiş Atış	Unadjusted Fire
Düzeltilmiş Atış	Adjusted Fire
Hesaplamaalı Atış	Predicted Fire
İleri Entegre Sonlanma Durumu	Forward Integration of Terminal States
Kaldırma Kuvveti	Lift Force
Kısa Yaylar	Short Arc
Kübik Devrilme Momenti Katsayısı	Cubic Overturning Moment Coefficient
Mekanik Topçuluk	Mechanical Artillery
Nokta Kütle Modeli	Point Mass Model
Paralel	Lattitude
Sapma	Yaw
Ses Hızı	Speed of Sound
Sıfır Çaba Iskalama Mesafesi	Zero Effort Miss
Sürükleme Kuvveti	Drag Force
Yaklaşma Hızı	Closing Velocity

Yanal Hasar

Collateral Damage

Yörünge

Trajectory

Yunuslama

Pitch

Yuvarlanma

Roll

1. GİRİŞ

Barut öncesi top teknolojisi cisimleri fırlatmak üzerine kuruluydu ve buna mekanik topçuluk (mechanical artillery) deniliyordu. Barutun icadıyla ilk topçu sistemleri de gelişmeye başladı. Topçu sistemleri 16. yüzyıl ile muharebeler için belirleyici bir güç haline geldi. Birinci Dünya Savaşı ile birlikte doğrudan atış (direct fire) tekniğinin yetersiz olduğu ve uzak mesafelere dolaylı atışlar yapılması gerektiği anlaşıldı [1]. Böylece ilk atış tabloları geliştirilmeye başlandı. 1917 yılında Kısa Yaylar (Short Arc) tekniği Hook ve Aberdeen tarafından yörünge (trajectory) hesaplama yöntemine uygulandı. 1918 yılında yörünge problemleri hassas bir şekilde çözüldü ve atış tabloları oluşturulmaya başlandı [2]. 1943 yılında John W. Mauchly ve ekibi tarafından bilinen bilgisayarlardan 1000 kat daha hızlı hesaplama yapabilen ENIAC adı verilen bir bilgisayar geliştirildi. Bu bilgisayarın amacı Amerikan Ordusu'na İkinci Dünya Savaşı'nda kullanılacak silahlar için atış tabloları üretme konusunda yardımcı olmaktı [3]. Böylece topçu mermileri için yörünge hesaplayan yazılımların geliştirilmesinin önü açılmış oldu.

Atış tablolarıyla birlikte konumu bilinen ancak bakış hattı dışında kalan hedeflerin imhası atış koşullarının hesaplanmasıyla mümkün hale geldi. Bu durum mühimmatın uçuş rotasının yani yörüngesinin hassas bir şekilde hesaplanmasını gerektirdi. Mühimmatın yörüngesinin hesaplanması işlemi için birçok yörünge modeli geliştirildi. Bilinen ilk balistik model Nokta Kütle Modeli (Point Mass Model) olarak adlandırılmıştır. 1711 yılında Johann Bernoulli tarafından tanımlanmıştır. Nokta Kütle Modeli hava yoğunluğunu ve sürüklenme kuvvetini sabit kabul ettiği için geliştirilmeye ihtiyaç duyuyordu. Daha hassas yörünge hesapları yapılabilmesi için İngiliz balistikçiler Fowler, Gallop, Lock ve Richmond tarafından 1920 yılında ilk 6 Serbestlik Dereceli Model geliştirilmiştir. 6 Serbestlik Dereceli Model çok kapsamlı olmasına rağmen; bilgisayarların hesaplama güçlerinin yetersizliği nedeniyle balistik yörüngelerin hesaplanması çok uzun sürüyordu. Bu nedenle belirli durumlar için basitleştirilmiş başka yörünge modelleri de geliştirildi. Lieske ve Reither 1966 yılında dönerek kararlılığa ulaşan mühimmatlar için Değiştirilmiş Nokta Kütle Modeli'ni, Celens 1993 yılında

uzunlamasına simetrik mühimmatlar için 5 Serbestlik Dereceli Yörünge Modeli' ni önerdi [4]. Değiştirilmiş Nokta Kütle Modeli ve 5 Serbestlik Dereceli Yörünge Modeli NATO tarafında standardize edilmiş olan, üye ülkelerin atış hesapları için kullandığı modellerdir.

Bakış hattı dışında kalan uzak mesafedeki hedeflere yapılan güdümsüz topçu mermisi atışları için hesaplamalı atış tekniği kullanılır. Atış tabloları aracılığıyla elde edilen balistik çözümlere göre atışlar icra edilir, ancak çeşitli hata kaynakları sebebiyle hedefi ilk atışta vurmak küçük bir ihtimalle gerçekleşebilecek bir olaydır. Bu nedenle hedefi imha etmek için yapılan güdümsüz topçu mermisi atış sayısı artacaktır. İlk atışta hedefin vurulamaması hedefin imha edilme olasılığının düşmesine ve görev maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır. Bu nedenlerle güdümlü topçu mermilerine yönelik talep ivmelenererek artmaktadır.

Güdümlü mühimmat çalışmaları Birinci Dünya Savaşı ile başlamıştır. Geçen yıllar içerisinde birçok güdümlü füze ve bomba tasarımı yapılmıştır ancak, geliştirilen güdümlü ve kontrol teknolojisi topçu mermilerine uygulanamamıştır. Bunun nedeni topçu sistemlerinin mermileri patlayan kimyasallar yardımıyla yüksek basınç altında namludan dışarı doğru itmesidir. Topçu mermileri namlu çıkışı sırasında şok yüklerine ve aşırı ıvme maruz kalmaktadır. Bu fiziksel koşullar altında çalışabilecek sağlam ve güvenilir elektronik ekipmanların bulunamayışı, topçu mermilerinin güdümlü hale getirilmesini engellemiştir. 1970'lerle birlikte çeşitli güdümlü mermi tasarımları yapılmaya başlanmıştır, ancak günümüzde güdümlü topçu mermisi sayısı hava yer güdümlü bombalara göre çok azdır.

Bu tez kapsamında güdümlü ve güdümsüz topçu mühimmatı modelleri geliştirilmiştir. Bu modeller mühimmat parametreleri ve atış koşullarına bağlı olarak mühimmatların uçuş yörüngelerini hesaplayıp, mühimmatın çarpma noktasını belirlemektedir. Mühimmat atışı sırasında oluşabilecek hatalar belirlenip, bu hatalar modellenmiştir. Monte Carlo benzetimleri ile hatalar sonucunda güdümlü ve güdümsüz mühimmat vuruş dağılımları belirlenip sonuçlar karşılaştırılmıştır. Amaç, bütün zorluklarına rağmen,

güdümlü topçu mermilerinin güdümsüz mermilere göre sağlayacağı performansın güdümlü mühimmat geliştirme çalışmaları için bir motivasyon oluşturup oluşturmayacağını görmektedir.

Tez çalışmasını ikinci bölümde topçu sistemleri teknolojisi özetlenmiştir. Klasik topçu sistemlerinin kullanılış biçimleri, atış teknikleri ve atış teknikleri için ihtiyaç duyulan atış tabloları incelenmiştir. Güdümlü topçu mermilerinin gelişimi, bu gelişimin örnekler üzerinden incelenmesi ve güdümlü mermilerin kullandığı güdüm teknikleri konuları da ele alınmıştır.

Üçüncü bölümde güdümlü ve güdümsüz mühimmatların performans değerlendirmesinde kullanılacak yörünge modellerinden bahsedilmiştir. Güdümsüz ve güdümlü olarak geliştirilen iki ayrı dinamik model çalışılmıştır. Güdümsüz ve güdümlü modeller kullanılarak yapılan atışlar sonucunda mühimmatların izlediği yörüngeler grafikler ile gösterilmiştir.

Dördüncü bölümde topçu atışları sırasında sisteme etki edebilecek hata kaynakları belirlenmiş ve bu hatalar modellenmiştir. Bu hatalar neticesinde oluşan güdümsüz mühimmat dağılımları ve güdümlü mühimmat dağılımları elde edilmiş ve bu dağılımlar performans açısından değerlendirilmiştir.

2. TOPÇU SİSTEMLERİ TEKNOLOJİSİ

2.1. Klasik Topçu Sistemleri

Topçu sınıfı muharebe alanında orduya sürekli ateş desteği sağlamak amacıyla düşman unsurları baskı altında tutan, etkisiz hale getiren, tahrip eden veya imha eden askeri birliktir. Topçu sınıfı 105, 155, 175 ve 203 mm çaplarında top sistemleri kullanır [5]. Top sistemleri belirli çaplardaki top mermilerini patlayıcı kimyasallarla iterek, mermilerin balistik bir yörünge dahilinde hedefe yönelmesini sağlayan büyük kalibreli silah sistemleridir. Top sistemlerin atış kontrolünde temel olarak iki parametre kullanılır. Bunlar topçu sisteminin hedefi vurması için yöneltmesi gereken azimut açısı ve top sisteminin menzildir. Topçu sınıfı bu iki parametreyi ayarladıktan sonra topçu sistemlerini ateşleyerek görevini yapar. Şekil 2.1. ile örnek bir topçu sistemi gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Örnek Topçu Sistemi [6]

Karadan karaya silah sistemleri için iki tip atış yöntemi vardır. Bunlar doğrudan atış ve dolaylı atış (indirect fire) yöntemidir. Doğrudan atış yönteminde, hedef atıcının görsel menzili içerisinde ve atıcı silah sisteminin hedefleme mekanizmasını kullanarak hedefe atış yapar. Doğrudan atış yöntemi kullanan silah sistemlerine piyade tüfekleri ve tanklar örnek verilebilir. Dolaylı atış yöntemi ise hedefin atıcının bakış hattı dışında kaldığı, yüksek yükseliş açıları kullanılarak uzak mesafelere yapılan atışlar için kullanılan yöntemdir. Topçu sistemleri, obüsler, çoklu roket sistemleri ve havan topları dolaylı atış yöntemini kullanan silah sistemleridir. Dolaylı atış yönteminde kullanılan teknikler iki

başlık altında toplanır. Bunlar düzeltilmiş atış (adjusted fire) tekniği ve düzeltilmemiş atış (unadjusted fire) tekniğidir. Düzeltilmemiş atış tekniği hesaplamalı atış (predicted fire) tekniği olarak da bilinmektedir. Hesaplamalı atış tekniğinde atış çözümü hava durumu, hız bilgisi, silah sisteminin konumu ve hedefin konumu gibi bilgiler kullanılarak bir atış algoritması ile hesaplanır. Düzeltilmiş atış tekniği ise hedef noktası etrafında bulunan bir gözlemci tarafından yapılan atışlardaki hataların düzeltilmesi için gönderilen bilgiler dahilinde atış parametrelerinin güncellenmesiyle daha başarılı atışlar yapmak üzerine kurulu bir tekniktir. En başarılı yöntem olmasına karşın çeşitli lojistik problemler nedeniyle genellikle hesaplamalı atış tekniği kullanılır. Hesaplamalı atış tekniği kullanılırken atış çevrimi içerisinde bir gözlemci olmadığı için yüksek hassasiyetle atış çözümünün hesaplanması mecburiyeti vardır [7].

Topçu sınıfı hesaplamalı atış tekniğini uygularken bulması gereken atış çözümüne atış tablolarını kullanarak ulaşır. Operasyonel kullanıma açılan her silah sistemi için atış tabloları geliştirilir. Atış tabloları top mermisinin izleyeceği standart ve standart olmayan yörüngeler hakkında bilgiler içerir. Atış çözümüne ulaşmak için ihtiyaç duyulan en temel bilgi menzildir. Atış tabloları 13 alt tablodan oluşur. Bu tablolar Çizelge 2.1 ile verilmiştir.

Çizelge 2.1. Topçu Atış Tabloları

Tablo A	Satır Numarası
Tablo B	Tamamlayıcı Menzil ve Satır Numarası
Tablo C	Rüzgar Bileşenleri
Tablo D	Hava Sıcaklığı ve Yoğunluğu Düzeltmeleri
Tablo E	Sevk Barutu Sıcaklığı
Tablo F	Yer Bilgisi ve Düzeltici Faktörler
Tablo G	Destekleyici Bilgi
Tablo H	Dönüş (Menzil Düzeltmesi)
Tablo I	Dönüş (Azimut Düzeltmesi)
Tablo J	Tapa Ayarları

Tablo K	Menzil ve Yükseklikteki Değişim (Açıya Bağlı)
Tablo L	Menzil ve Yükseklikteki Değişim (Zamana Bağlı)
Tablo M	Tapa Ayarları

Çizelge 2.1 ile atış tabloları içerisindeki 13 tablo belirtilmiştir. Tablo A ile hava durumu mesajlarına ait satır numaraları yükseliş açısının bir fonksiyonu olarak listelenir. Tablo B ile yükseliş açısındaki değişimlerin menzile olan etkileri, menzilin ve hedef irtifasının birer fonksiyonu olarak belirtilir. Tablo C rüzgarın karşı rüzgar ve yanal rüzgar olarak bileşenlerine ayrılabilmesi için kullanılır. Tablo D hava durumu mesajlarıyla edinilen hava sıcaklığı ve yoğunluğu bilgilerinin bulunulan konuma göre güncellenmesi için kullanılır. Tablo E namlu çıkış hızının sevk barutunun sıcaklığına göre düzeltilmesi amacıyla kullanılır. Tablo F ile hedefi vurmak için gerekli olan menzil değerini sağlayacak yükseliş açısı bilgisine, bu değere karşılık gelen mühimmat uçuş süresine ve menzil, açı gibi değerler üzerinde ince ayar yapmak için gerekli olan düzeltme faktörleri bilgilerine ulaşılr. Tablo G atış için hesaplanan hata olasılığını menzilin bir fonksiyonu olarak ifade etmek için kullanılır. Tablo H dünyanın dönüşü nedeniyle yapılması gereken menzil düzeltme işlemlerinin azimut açısı ve hedefe bağlı menzil cinsinden yapılmasını sağlar. Tablo I dünyanın dönüşü nedeniyle yapılması gereken azimut açısı düzeltme işlemlerinin azimut açısı ve hedefe bağlı menzil cinsinden yapılmasını sağlar. Tablo J tapa ayarlarıyla ilgili bilgileri sağlar. Tablo K yükseliş açısındaki 10 milyem'lik değişimin menzil ve yüksekliği ne kadar değiştirdiğini söyler. Tablo L mühimmatın uçuş süresindeki 1 sn'lik değişimin menzil ve yüksekliği ne kadar değiştirdiğini söyler. Tablo M mühimmata eklenmiş alternatif bir tapa sistemi varsa bu sisteme ait bilgileri içerir [8].

Atış tabloları ile verilen bilgiler arasında mühimmat yörünge hesapları ve menzili açısından en temel bilgiler Tablo F ile belirtilmektedir. Bu temel bilgiler geçmişte elle hesaplanıyorken, bilgisayarların gelişimiyle birlikte hesaplama işlemi için bilgisayarlar kullanılmaktadır [9]. Bilgisayarlar mühimmatlara özel geliştirilen atış modellerini kullanarak atış tabloları için gerekli bilgileri üretmektedir. Yani atış tabloları atış modelleri üzerine kuruludur. Genel olarak kullanılan atış modelleri Nokta Kütle Modeli,

Değiştirilmiş Nokta Kütle Modeli, 5 Serbestlik Dereceli Yörünge Modeli ve 6 Serbestlik Dereceli Yörünge Modeli'dir.

Aerodinamik kuvvetlerin ve momentlerin modellenmesinin zorluğu sebebiyle atmosfer içerisinde hareket eden bir cismin yörüngesinin hesaplanması karmaşık bir problemdir. Bu problemin çözümü için çeşitli yaklaşımlar geliştirerek modeller üretilmiştir. Bu modellerin ayrımı modellenmesi oldukça güç olan aerodinamik kuvvetleri ve momentleri ele alış biçimleridir. Aerodinamik kuvvetler ve momentler Nokta Kütle Modeli'nden başlayarak 6 Serbestlik Dereceli Yörünge Modeli'ne kadar giderek karmaşıklaşan bir şekilde ele alınmaktadır.

Nokta Kütle Modeli mühimmatların kütesinin bir noktada toplandığını ve bu noktanın da mühimmatın kütle merkezi olduğunu kabul eden modeldir. Bu kabul sayesinde mühimmatın rotasyonel hareketleri ihmal edilebilir olur. Mühimmatın rotasyonel hareketinin ihmal edilmesiyle sürüklenme kuvveti dışındaki aerodinamik kuvvetler ve momentler de ihmal edilebilir olacaktır. Sonuç olarak Nokta Kütle Modeli hareket eden bir cismin üzerine etki edecek yerçekimi ivmesi, Coriolis ivmesi ve sürüklenme kuvvetini dikkate alarak cismin izleyeceği yörüngeyi hesaplamaya çalışır. Rotasyonel hareketler ihmal edildiği için hareketler 3 serbestlik derecesinde tanımlanır [10].

Değiştirilmiş Nokta Kütle Modeli (Modified Point Mass Model) 4 serbestlik dereceli model olarak da bilinir. Bu model dinamik olarak kararlı, klasik mühimmatların uçuşunu modellemek için geliştirilmiştir. Nokta Kütle Modeli'nde olduğu gibi mühimmatların kütesinin tek bir noktada toplandığını kabul eder. Nokta Kütle Modeli'ndeki 3 eksenli harekete ek olarak sapma (yaw) eksenindeki rotasyonel hareketi denge sapması (yaw of repose) olarak modeller. Denge sapması değerinin hesaplanmasıyla sapma eksenindeki hareket de incelenmeye başlanmış olur ve Değiştirilmiş Nokta Kütle Modeli mühimmatların hareketini 4 eksenle inceler. Denge sapması değerinin dikkate alınmasıyla birlikte sapma ekseninde meydana gelen hareket sonucunda ortaya çıkan sürüklenme, kaldırma ve Magnus kuvvetleri de hesaplanabilir hale gelir. Sonuç olarak Değiştirilmiş Nokta Kütle Modeli yerçekimi ivmesi, Coriolis ivmesi, sürüklenme kuvveti,

kaldırma kuvveti ve Magnus kuvvetlerini dikkate alarak cismin izleyeceği yörüngeyi hesaplamaya çalışır [11].

5 Serbestlik Dereceli Yörünge Modeli 3 boyutlu uzaydaki öteleme hareketi ile birlikte yunuslama (pitch) ve sapma eksenlerindeki hareketi inceler. Yuvarlanma (roll) eksenindeki hareketin mühimmata etki edecek kuvvetler veya momentlerle ilişkisi olmadığı için, simetrik mühimmatlar için 6 Serbestlik Dereceli Model ile aynı sonuçları verecektir [12]. 5 Serbestlik Dereceli Yörünge Modeli mühimmat yörüngesini hesaplarken yerçekimi ivmesi, Coriolis ivmesi, sürüklenme kuvveti, kaldırma kuvveti, Magnus kuvveti ve yunuslama sönümlenme kuvvetlerini dikkate alır. Mühimmat üzerine etki edecek olan açısız momenti ise devrilme momenti, yunuslama sönümlenme momenti, Magnus momenti ve dönme sönümlenme momentini dikkate alarak hesaplar.

6 Serbestlik Dereceli Yörünge Modeli 3 boyutlu uzaydaki bütün öteleme ve rotasyonel hareketleri hesaba katan, en kompleks yörünge modellerinden bir tanesidir. Eksenel olarak simetrik bir mühimmatın benzetimi için kullanılıyorsa 5 Serbestlik Dereceli Yörünge Modeli ile aynı sonuçları üretecektir. Yuvarlanma eksenindeki hareketlerin mühimmata etki edecek kuvvet ve momentleri etkilediği asimetrik bir mühimmatın benzetimi için kullanılacaksa, 6 Serbestlik Dereceli Model'e ihtiyaç olacaktır. 6 Serbestlik Dereceli Model aerodinamik asimetrileri, ataletsel asimetrileri ve itkili mühimmatlar için itki sistemindeki hizalama problemlerinin incelenmesi için kullanılabilir [12].

NATO kendisine bağlı deniz ve kara kuvvetlerinde kullanılan dış balistik yörünge benzetimleri için kullanılan yöntemleri standartlaştırmak için STANAG 4355' i yayınlamıştır. Bu STANAG'a göre katılımcı ülkeler dönerek kararlılığı ulaşan top mermileri için Değiştirilmiş Nokta Kütle Modeli'ni, kanatçıkları ile stabil hale getirilmiş roketler için 5 Serbestlik Dereceli Yörünge Modelini kullanmak üzerine anlaşmıştır [13].

2.2. Güdümlü Topçu Mermileri

Klasik top sistemleri topçu sınıfına kabul edilebilir bir hata dahilinde hedefi vurma Őansısı tanır. Topçu sınıfı ilk atıŐında hedefi vuramadığını tespit ederse; atış tablolarını veya çeşitli yazılımları kullanarak atış hesaplarını tekrarlar ve yeni atışlar yapar. İlk atışta hedefin vurulamaması hedefin karşı taarruza geçmesi veya pozisyonunu değiştirmesi risklerini barındırır [14]. Her ne kadar top sistemleri duran hedeflere karşı rüŐtünü ispatlasa da hareket eden hedefler için başarılı sistemler değildir. Ayrıca hassasiyet alanı çok düşük olan sert hedeflere karşı da top sistemleri yetersizdir. Sert hedeflerin imhası için hedefin nokta atışı ile vurulması gerekir. Aksi durumda hedefe zarar verilemez. Bu nedenlerle, hareketli hedefler ve sert hedefler top sistemlerinin yapması gereken atış sayısını artırırlar [15]. Bu atışlar sonucunda hedef imhası ihtimali düŐerken, görev maliyetleri yükselecektir. Topçu sistemlerinin yanal hasarının (collateral damage) yüksek olması da bu sistemlerin meskun mahal içerisinde kullanılamamasına neden olmaktadır. Bütün bu nedenlerle topçu birlikleri vuruş hassasiyeti yüksek, daha az sayıda atış ile hedefe ulaŐabilecek, verimliliği yüksek top sistemlerine ihtiyaç duymaktadır. Bu ihtiyaç neticesinde birçok güdümlü top mermisi programı baŐlatılmıŐtır.

Güdümlü mühimmat alıŐmaları Birinci Dünya Savaşı ile hız kazanmıŐtır. Geçmişte radyo sinyalleri ile kontrol edilen, lazer sistemleriyle güdülen birçok çeŐit ve sınıfta mühimmat sistemleri geliştirilmiştir. Güdümlü mühimmat teknolojisi hızla geliŐirken, topçu sınıfının kullandığı mühimmatlar bu teknolojinin gerisinde kalmıŐtır. Mevcut top sistemlerinin mühimmatları bir patlayıcı ile itmeleri ve top mermilerinin yüksek ivmelere maruz kalması; hassas cihazların bu sistemlerin içerisine girmesini engellemiştir. Dayanıklı, sağlam, güvenilir ve kararlı tasarımlar yapılamamıŐtır.

İlk başarılı güdümlü topçu mermisi alıŐmaları ABD'de Cooperhead isimli sistemle 1970'li yıllarda başlamıştır. Cooperhead mermisi yarı aktif lazer kullanan evleme güdümü ile çalışan bir güdümlü topçu mermisidir. Hareketli hedeflere karşı baŐarımını artırabilmek için güdüm yöntemi olarak takip güdümü yerine oransal seyir güdümü yöntemi tercih edilmiştir. Oransal seyir güdümü merminin arayıcı baŐlıĐının ürettiği açısal değişim bilgisi kullanılarak uygulanmıŐtır. Kontrol yöntemi olarak kontrol yüzeylerinin kullanıldığı aerodinamik kontrol tercih edilmiştir. Kontrol yüzeyi olarak

kuyruk kontrolü tercih edilmiştir. Bu sayede yuvarlanma eksenindeki kontrolün basitleştirilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca kuyruk kontrolü sayesinde sistemin kararlılığı sağlanmıştır. Sert hedefleri imha gereksinimi nedeniyle zırh delici başlık kullanımında da kontrol yüzeylerinin arkada olması avantaj sağlamıştır. Sistem içerisinde güdüm otopilotu ve yuvarlanma otopilotu kullanılmıştır. Güdüm otopilotu yunuslama ve sapma yönlerinde hareket etmek için kuyruk kanatlarını hareket ettirir [15]. Şekil 2.2. ile Cooperhead Silah Sistemi gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Cooperhead Silah Sistemi [16]

Topçu sistemleri için yapılan diğer bir güdümlü mühimmat çalışması ABD menşeli ANSR sistemidir. ANSR (Autonomous Naval Support Round) kelimesinin açılımı Otonom Donanma Destek Mermisi'dir. ANSR 5 inç (127 mm) topçu sistemlerinden fırlatılan, yuvarlanma eksenini etrafında dönerek hareket eden, roket motoru destekli, güdümlü bir silah sistemidir. ANSR sistemi sensör olarak Küresel Konumlama Sistemi (KKS) ve Ataletsel Navigasyon Sistemi (ANS) kullanır, ancak içerisinde entegre bir ANS/KKS sistemi yoktur. Mühimmat tasarımında kullanılan ANS sistemi sadece ivme ölçme fonksiyonu olan bir sensördür. ANSR mühimmatı durağan hedefler için geliştirilmiştir. Mühimmatın kararlılığını sağlamak için tasarlanmış kuyruk kanatçıklarının yanında kontrolü sağlamak için burun kısmında da kanatçıklara sahiptir. Roket motoru mühimmatın menzilini artırmak için eklenmiştir. ANSR sistemi tek eksenle çalışan açık

döngü bir kontrol sistemi kullanır. Bu nedenle mühimmatın sürekli olarak yuvarlanma eksenini etrafında dönmesi gerekir çünkü ancak bu şekilde istenilen yönde kontrol kuvveti üretilebilecektir. ANSR sistemi içerisinde 3 serbestlik dereceli balistik yörünge hesaplayan bir algoritma çalışır. Bu algoritma sayesinde mühimmatın nereye çarpacağı ve çarpma süresi o anki uçuş koşullarına göre sürekli olarak hesaplanır. Hedefle mühimmat çarpma noktası arasındaki fark hata olarak değerlendirilerek, bu hata değeri ve çarpma süresinin dahil edildiği bir formülle yapı itibariyle oransal seyir güdümüne benzeyen, ancak yöntem olarak oransal seyir güdümünden farklı bir teknik kullanılarak güdüm ivmesi hesaplanır. Bu tekniğe İleri Entegre Sonlanma Durumu (Forward Integration of Terminal States) denir [17]. Şekil 2.3. ile ANSR Silah Sistemi gösterilmiştir.



Şekil 2.3. ANSR Silah Sistemi

Topçu sistemleriyle ilgili yapılan başka bir çalışma da mevcut güdümsüz sistemler üzerinedir. Klasik topçu mermilerinin vuruş hassasiyetinin artırılması ve ihtiyaç duyulan atış sayılarının düşürülmesi gelecek sistemler için hedeflenmektedir. Bu noktada mevcut kullanıcıların envanterlerinde bolca bulunan klasik topçu mermilerinin güncellenmesi mantıklı ve ucuz bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. Bu güncelleme için geliştirilen konsept rota düzeltme tapalarıdır. Mevcut sistemlerin kullandığı klasik tapalar rota düzeltme tapalarıyla değiştirilerek hem mühimmatların vuruş hassasiyetinin artırılması hem de klasik topçu mermilerinin standartlara uygunluğunun korunması hedeflenmektedir. Bu konuda birçok ülke birçok çalışma başlatmıştır. Fransız SPACIDO, Alman TCF, İngiliz STAR ve Amerika LCCM programları bunlardan bazılarıdır. Şekil 2.4. ile rota düzeltme tapaları için örnekler gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Rota Düzeltme Tapa Programları

Sürüklenme freni, dönme freni veya hareketli burun kanatçıkları rota düzeltme tapası konsepti için kullanılan bazı tekniklerdir. Sürüklenme freni menzil yönündeki hatalar için, dönme freni çapraz menzil yönündeki hatalar için çözüm sunmaktadır. Hareketli kanatçıklar ise her iki yöndeki hatayı gidermek için kullanılmaktadır. Rota düzeltme tapaları için kullanılan güdüm tekniği yörünge takibidir. Balistik yörünge programları aracılığıyla mühimmatın güdümsüz bir uçuşta hedefi vurmak için izleyeceği ideal yörünge hesaplanır. Bu yörünge rota düzeltme tapaları içerisinde bulunan bilgisayara yüklenir. Bu sayede mühimmatlar fırlatıldıktan sonra izlemeleri gereken ideal yörüngedeki pozisyon ile mevcut pozisyonunu karşılaştırarak aradaki hatayı tespit edebilirler. Rota düzeltme tapaları için çalışılan güdüm yöntemi ise bu hata bilgisini kullanarak mühimmatın ideal rotasını takip etmesini sağlayacak güdüm komutlarının üreten tekniktir [18].

3. TOPÇU MÜHİMMATI YÖRÜNGE MODELİ

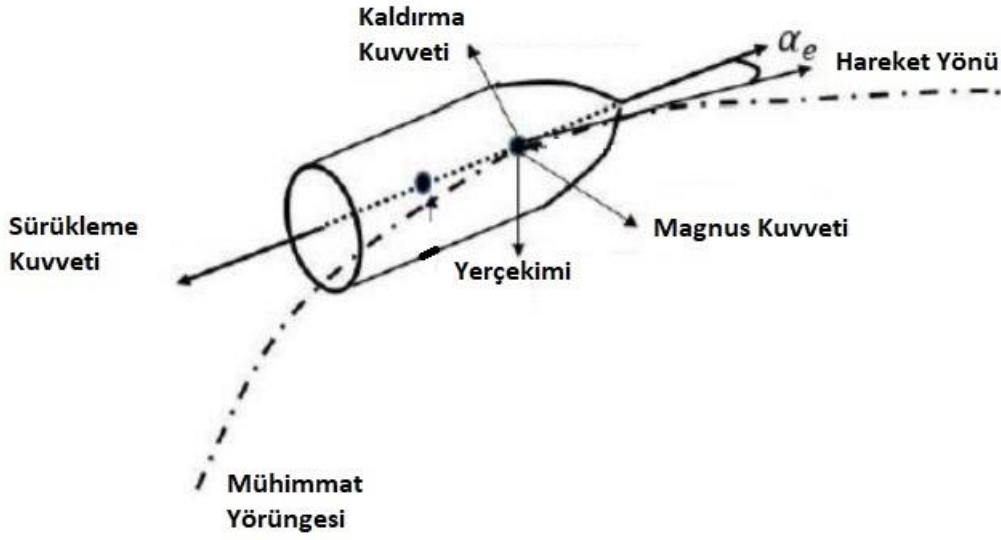
Güdümlü ve güdümsüz topçu mermilerinin performans değerlendirmesinin yapılabilmesi için mühimmat yörünge modelleri oluşturulmuştur. Yörünge modelleri mühimmatların izleyeceği yolu hesaplamakta ve nihai olarak karadan karaya fırlatılan topçu mermilerinin düşeceği noktayı tespit etmektedir. Temel amaç mühimmat dağılımları üzerinden vuruş performans değerlendirmesinin yapılabilmesidir. Yörünge modelleri güdümsüz mühimmat yörünge modeli ve güdümlü mühimmat yörünge modeli olarak iki ana başlıkta incelenecektir.

3.1. Güdümsüz Mühimmat Yörünge Modeli

Güdümsüz mühimmat yörünge modeli karadan fırlatılan bir topçu mermisinin konum, hız ve fırlatma açısı gibi başlangıç değerlerini ve topçu mermisinin izleyeceği yol boyunca üzerine etki edecek kuvvetleri kullanarak mühimmat yörüngesini ve mühimmatın çarpma noktasını hesaplayan modeldir. Yörünge modeli oluşturulurken bir NATO standardı olan STANAG 4355 temel alınmıştır [19]. STANAG 4355 NATO tarafından topçu mermilerinin dış balistiğini hesaplamak için Değiştirilmiş Nokta Kütle Modeli'nin standartlaştırılması amacıyla oluşturulmuştur. STANAG 4355 geleneksel, dönerek kararlılığa ulaşmış (spin stabilized) topçu mermilerinin uçuş hareketini modelleyen denklemler sunar. Bu denklemler dönerek kararlılığa ulaşmış mühimmatların uçuşu sırasında karşılaşılabilecek kuvvetlerin ve üzerine etki edecek ivmelerin en önemlileridir ve 4 serbestlik derecesinde bir nokta kütle hareketini modeller.

3.1.1. Hareket Denklemleri

STANAG 4355'te sunulan, 4 serbestlik derecesinde hareketi modelleyen denklem seti yerçekimi, Coriolis etkisi, sürüklenme kuvveti, kaldırma kuvveti ve Magnus kuvvetini içermektedir. Bu etki ve kuvvetler sonucunda cisim ivmelenecek ve oluşan ivme cismin hareketini değiştirecektir. Şekil 3.1. ile klasik topçu mermisine yörüngesi boyunca etki edecek kuvvetler gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Mühimmata Etki Eden Kuvvetler [20]

3.1.1.1. Yerçekimi Kuvveti

Yerçekimi kütlelerin birbirine uyguladığı kuvvettir. Dünya üzerindeki ve çevresindeki cisimlere bu çekim kuvvetini uygular. Yerçekimi kuvveti çeşitli yaklaşımlarla bulunabilir. STANAG 4355'te [19] sunulan yerçekimi yaklaşımı Eşitlik (1) ile verilmiştir.

$$\vec{g} = g_0 (R^2/r^3) \vec{r} \quad (1)$$

Eşitlik (1)' de belirtilen g_0 yerçekiminin ortalama deniz seviyesindeki büyüklüğüdür ve formülü Eşitlik (2) ile verilmiştir.

$$g_0 = 9.80665(1 - 0.0026 \cos(2\text{paralel})) \quad (2)$$

Eşitlik (2)' de kullanılan paralel değeri için atış yapacak olan topçu sisteminin dünya üzerinde bulunduğu paralelin (lattitude) derece cinsinden değeri kullanılır ve mühimmatın uçuşu sırasında bu değer değiştirilmez. Bu durumun sebebi uzak mesafe topçu mermilerinin dahi iki paralel arası mesafeyi geçebilecek kadar uzun menzile sahip olmayışıdır.

Eşitlik (1)' de belirtilen R dünya küresinin yüzeyden merkeze olan konum vektörünün büyüklüğüdür. \vec{r} ise topçu mermisinin dünyanın merkezine göre konumunu belirten vektördür. \vec{R} ve \vec{r} vektörleri sırasıyla Eşitlik (3) ve (4)' te tanımlanmıştır.

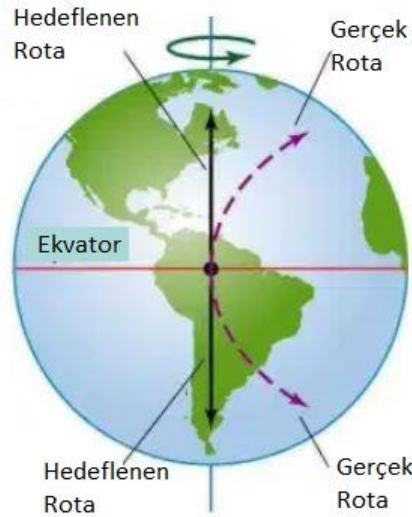
$$\vec{R} = \begin{bmatrix} 0 \\ -R \\ 0 \end{bmatrix}, R=6.356766 \cdot 10^6 \text{ metre} \quad (3)$$

$$\vec{r} = \vec{x} - \vec{R} \quad (4)$$

Eşitlik (4)' te belirtilen \vec{x} ise topçu mermisinin dünyanın yüzeyine göre konumunu belirten vektördür.

3.1.1.2 Coriolis Etkisi

Coriolis etkisi dünyanın açısal hızının ekvatorдан kutuplara doğru azalması sonucu dünya üzerinde hareket eden bir cisme, hareketi sonucunda etki eden ivmedir. Uzun mesafeler kat eden topçu mühimmatları da bu etkiye maruz kalırlar. Şekil 3.2. ile Coriolis etkisi gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Coriolis Etkisi [21]

STANAG 4355' te [19] sunulan Coriolis Etkisi Eşitlik (5) ile verilmiştir.

$$\vec{C} = -2(\vec{\omega} \times \vec{v}) \quad (5)$$

Eşitlik (5)'te belirtilen \vec{w} dünyanın dönüş vektörüdür ve formülü Eşitlik (6) ile verilmiştir.

$$\vec{w} = \begin{bmatrix} \Omega \cos(\text{paralel}) \cos(\text{azimut}) \\ \Omega \sin(\text{paralel}) \\ \Omega \cos(\text{paralel}) \sin(\text{azimut}) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Eşitlik (6)' da kullanılan paralel değeri için atış yapacak olan topçu sisteminin dünya üzerinde bulunduğu paralelin derece cinsinden değeri kullanılır. Azimut açısı ise topçu mermisinin hız vektörü ile kuzey kutbunu gösteren doğru arasında kalan açıdır. Ω sembolü dünyanın açısal dönüş hızını ifade eder ve değeri Eşitlik (7) ile verilmiştir.

$$\Omega = 7.292115 \cdot 10^{-5} \text{ rad/s} \quad (7)$$

Eşitlik (5)' te belirtilen \vec{v} topçu mermisinin dünyaya göre 3 boyutlu hız vektörüdür. \vec{w} ve \vec{v} vektörleri arasındaki "×" sembolü iki vektörün vektörel çarpımını ifade eder.

3.1.1.3 Sürüklenme Kuvveti

Akışkan içerisinde hareket eden bir cisme akışkan tarafından uygulanan direnç sebebiyle cismin hareketine zıt yönde oluşan kuvvete sürüklenme kuvveti (drag force) denir. İncelenen durumda, fırlatıldıktan sonra hava içerisinde hareket eden topçu mermisine hava tarafından bir direnç etki eder. Bu direnç bahsedilen sürüklenme kuvvetidir. Aerodinamik sürüklenme kuvvetinin çeşitli bileşenleri vardır. Ön gövde sürüklenme kuvveti, temel sürüklenme kuvveti ve yüzey sürüklenme kuvveti bu bileşenlerden bazılarıdır [22]. Bu bileşenler nedeniyle sürüklenme kuvvetinin modellenmesi zor ve karmaşık bir iştir. STANAG 4355'te [19] sunulan Sürüklenme Kuvveti Eşitlik (8) ile verilmiştir.

$$\overline{DF} = - \left(\frac{\pi \rho h o D^2}{8} \right) (C_{D0} + (C_{Da2} \|a_e\|^2)) \| \vec{v} \| \vec{v}_{hava} \quad (8)$$

Eşitlik (8)'de belirtilen \overline{DF} sürüklenme kuvvetidir. ρ parametresi hava yoğunluğunu ifade etmektedir ve birimi kg/m^3 tür. D sembolü topçu mermisinin referans yarıçapıdır ve birimi metre olarak alınmıştır. C_{D0} ve C_{Da2} sürüklenme katsayılarıdır ve sırasıyla sıfır sapma sürüklenme kuvveti katsayısı ile karesel sürüklenme kuvveti katsayısı olarak adlandırılırlar. a_e ifadesi denge sapması olarak adlandırılır. Dönerek dengeye ulaşan cisimlerin dönme hareketi sonucunda sapma ekseninde meydana gelen açı değişikliğini ifade eder. STANAG 4355'te belirtilen kuvvetler sunulduktan sonra denge sapması

fenomeni de ayrıca sunulacaktır. \vec{v} ve \vec{v}_{hava} ifadeleri topçu mermisinin hız vektörleridir. \vec{v} dünyaya göre hız belirtirken \vec{v}_{hava} topçu mermisinin havaya göre hızını belirtir. \vec{v}_{hava} içerisinde rüzgar etkisini de barındırmaktadır. $\|.\|$ sembolü içerisinde yazılan vektörün büyüklüğünü ifade eden operatördür.

3.1.1.4 Kaldırma Kuvveti

Akışkan tarafından içerisinde hareket eden cisimlere uygulanan diğer bir aerodinamik kuvvet kaldırma kuvvetidir (lift force). Kaldırma kuvveti hareket eden cismin yörüngesine dik olarak etki eder ve cismin irtifa olarak yükselmesini sağlar [23]. STANAG 4355'te [19] sunulan Kaldırma Kuvveti Eşitlik (9) ile verilmiştir.

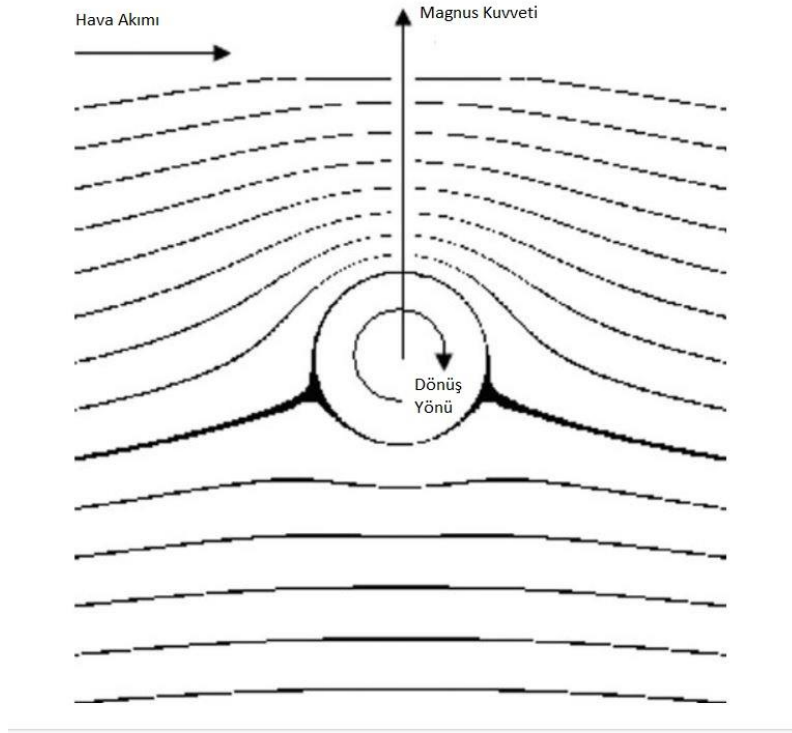
$$\vec{LF} = \left(\frac{\pi \rho D^2}{8} \right) (C_{La} + (C_{La3} \|a_e\|^2)) \|\vec{v}\|^2 \vec{v}_{hava} \quad (9)$$

Eşitlik (9)'de belirtilen \vec{LF} kaldırma kuvvetidir. C_{La} ve C_{La3} kaldırma kuvveti katsayılarıdır ve sırasıyla doğrusal kaldırma kuvveti katsayısı ile kübik kaldırma kuvveti katsayısı olarak adlandırılırlar.

3.1.1.5 Magnus Kuvveti

Hava içerisinde dönerek hareket eden cisimler ilave bir kaldırma kuvveti oluştururlar. Bu kuvvete Magnus kuvveti denir. Dönen cisim hava akımıyla karşılaştığında, cismin bir yüzeyinde hava partiküllerinin birikmesi sonucu yüksek basınç oluşurken, diğer yüzeyde ise tam tersi sebeple alçak basınç oluşacaktır. Basınç farkı ise Magnus kuvvetini oluşturacaktır.

Topçu mermileri için, Magnus kuvvetini oluşturacak çapraz akışlar mermi sapma açısına sahipse oluşacaktır. Bu nedenle mermiler için hesaplanan bir denge sapması değeri olduğu sürece Magnus Kuvveti de oluşacaktır [24]. Şekil 3.3. ile Magnus kuvveti gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Magnus Kuvveti [25]

STANAG 4355'te [19] sunulan Magnus kuvveti Eşitlik (10) ile verilmiştir.

$$\overline{MF} = - \left(\frac{\pi \rho D^3}{8} \right) \text{Dönme } C_{Ypa} (\vec{a}_e \times \vec{v}_{hava}) \quad (10)$$

Eşitlik (10)'de belirtilen \overline{MF} Magnus kuvvetidir. C_{Ypa} Magnus kuvveti katsayısıdır. Dönme topçu mermisinin eksenindeki dönüş hızıdır ve birimi rad/s'dir. Dönme değerinin nasıl hesaplanacağı ayrıca sunulacaktır.

3.1.2. Değiştirilmiş Nokta Kütle Modeli

Değiştirilmiş Nokta Kütle Modeli cismin bütün kütlelerinin tek bir noktada toplandığını kabul eden ve hareketi bu nokta üzerinden tanımlayan yörünge modelidir. Nokta cisimlerin hareketini 4 serbestlik derecesinde inceler. Bunu 3 eksenli harekete ek olarak, sapma eksenindeki açı değişimlerini "denge sapması" üzerinden hesaplayarak yapar. Denge sapması dönerek kararlılığa ulaşan cisimlerin sapma ekseninde yapacakları hareketi modeller. Nokta Kütle Modeli ile 3 eksenli hareket incelendiği için, sapma ekseninde oluşacak açı değişimleri hesaplanamamaktadır. Bu nedenle de Kaldırma

Kuvveti, Magnus kuvveti gibi cisim yörüngesini etkileyecek kuvvetler ihmal edilmektedir. Bu ihmaller sonucu oluşacak problemlerin giderilmesi için Değiştirilmiş Nokta Kütle Modeli kullanılmaktadır. Değiştirilmiş Nokta Kütle Modeli NATO tarafından geliştirilmiş yazılımlar da dahil olmak üzere oldukça sık kullanılan bir modeldir [4].

Değiştirilmiş Nokta Kütle Modeli daha önce hareket denklemleri başlığında tanımlanmış olan kuvvetler ve etkiler üzerinden nokta kütle üzerine etki edecek olan bileşke kuvveti bulmayı amaçlar. Bileşke kuvvet üzerinden cisme etki edecek olan ivme bulunabilecektir. Bu ivmeye bileşke ivme denir. Bileşke ivme cismin hareketine etki edecek ve bu hareketi değiştirecektir. Bileşke ivme sonucunda cismin mevcut bulunduğu konum ve sahip olduğu hız değerleri değişecektir. Cisim başka bir konuma doğru yer değiştirecek ve yeni bir hız değerine sahip olacaktır. Bileşke ivme değerini hesaplayacak olan formül Eşitlik (11) ile verilmiştir.

$$\vec{a} = \frac{\overline{DF} + \overline{LF} + \overline{MF}}{m} + \vec{g} + \vec{C} \quad (11)$$

Eşitlik (11) ile mühimmata etki eden bileşke ivme Yerçekimi ve Coriolis ivmeleri ile Sürüklenme, Kaldırma ve Magnus gibi aerodinamik kuvvetler kullanılarak hesaplanabilir. Eşitlik (11) de üretilen bileşke ivme, \vec{a} , 3 boyutlu bir vektördür. 3 eksendeki ivme değerini m/s^2 cinsinden belirtir. Eşitlik (11)' de belirtilen m cismin kütlesidir. Kütle birimi olarak STANAG 4355'te kg kullanılmaktadır.

Eşitlik (11) ile hesaplanan 3 boyutlu ivme vektörü kullanılarak, belirli bir pozisyonda olan ve belirli bir hızı olan bir cismin belirli bir zaman sonraki konumu ve hızı hesaplanabilir. İlgili hesaplar Eşitlik (12) ve Eşitlik (13) ile verilmiştir.

$$\vec{v}_n = \vec{v}_{n-1} + \vec{a}_n \Delta T \quad (12)$$

$$\vec{x}_n = \vec{x}_{n-1} + \vec{v}_n \Delta T \quad (13)$$

Eşitlik (12) ve (13) kullanılarak konumu ve hızı bilinen bir cismin üzerine etki edecek olan bileşke kuvvet sonucunda belirli bir ΔT sonra ulaşacağı hız ve konum gösterilmiştir. Eşitlik (12) ve (13) ile üretilen konum ve hız değerleri de bileşke ivme gibi 3 boyutlu vektörlerdir ve sırasıyla birimleri metre ve m/s ' dir. Konum ve hız hesaplamak için seçilen ΔT zaman değeri ne kadar küçük olursa hesabın hassasiyeti de o derece iyi

olacaktır. Bunun nedeni her konum ve hız değeri için hesaplanacak olan bileşke kuvvet ve sonucunda oluşacak olan bileşke ivme değerinin değişecek olmasıdır.

Hareket denklemleri ile sunulan fiziksel etkiler hesaplarken kullanılan değişkenler konum ve hız değerlerine bağlıdır. Konum ve hız değerlerindeki değişim sonucunda nokta kütle üzerindeki bileşke kuvvet ve sonucunda bileşke ivme değişecektir. Mühimmat yörüngesinin hesaplanabilmesi için konuma ve hıza bağlı bu değişkenlerin incelenmesi gerekmektedir. Bu sayede mühimmat yörüngesindeki her bir nokta için bileşke ivme hesaplanarak mühimmatın izleyeceği yörünge oluşturulabilecektir.

3.1.2.1. Dönme

Nokta kütle olarak modellenen topçu mühimmatının uzun eksenini etrafındaki dönüşünün ifadesidir. Birimi rad/s 'dir. Değiştirilmiş Nokta Kütle Modeli'nde Magnus kuvveti ve denge sapması değerlerinin bulunabilmesi için kullanılır. STANAG 4355'de dönme ivmesinin nasıl hesaplanması gerektiği belirtilmiş, dönme değerinin ise dönme ivmesine ve başlangıçtaki dönme değerine göre hesaplanması önerilmiştir. Topçu mermileri için başlangıç dönme değeri Eşitlik (14)' te belirtildiği gibi bulunmaktadır.

$$Dönme_0 = \frac{2 \pi V_{Namlu}}{D bükülme} \quad (14)$$

Eşitlik (14)' te belirtilen $Dönme_0$ topçu mermisinin namludan çıkış anındaki dönme hızıdır. V_{Namlu} topçu mermisinin namludan çıkış hızıdır. Skalar bir değerdir ve birimi m/s' dir. Topçu mermisinin hız vektörünün ilk değeri de yine bu V_{Namlu} değerine göre hesaplanmaktadır. D topçu mermisinin çapıdır ve birimi metre' dir. $bükülme$ (twist) topçu sisteminin namlusunun topçu mermisine uyguladığı bükülme etkisidir. Birimi kalibre/devir' dir. Kalibre değeri 0.01 inç olan uzunluk birimidir.

Eşitlik (14) ile belirtilen topçu sistemi ve topçu mühimmatına bağlı dönme ilk değeri $Dönme_0$ bulunduktan sonra dönme ivmesi kullanılarak mühimmatın her bir zaman aralığında ulaşacağı dönme değeri hesaplanabilecektir. STANAG 4355' te [19] sunulan dönme ivmesi Eşitlik (15) ile verilmiştir.

$$dönme\ ivmesi = \frac{\pi \rho D^4}{16 I_x} Dönme_{n-1} C_{lp} \|\vec{v}_n\| \quad (15)$$

Eşitlik (15) ile belirtilen I_x mühimmatın uzunluk eksenini etrafındaki eylemsizlik momentidir. Birimi $kg.m^2$ ' dir. C_{lp} mühimmatın dönme sönümlenme momenti katsayısıdır ve birimsizdir. $\|\vec{v}_n\|$ dönme ivmesinin bulunacağı zamanda mühimmatın hız değerinin büyüklüğünü ifade eder.

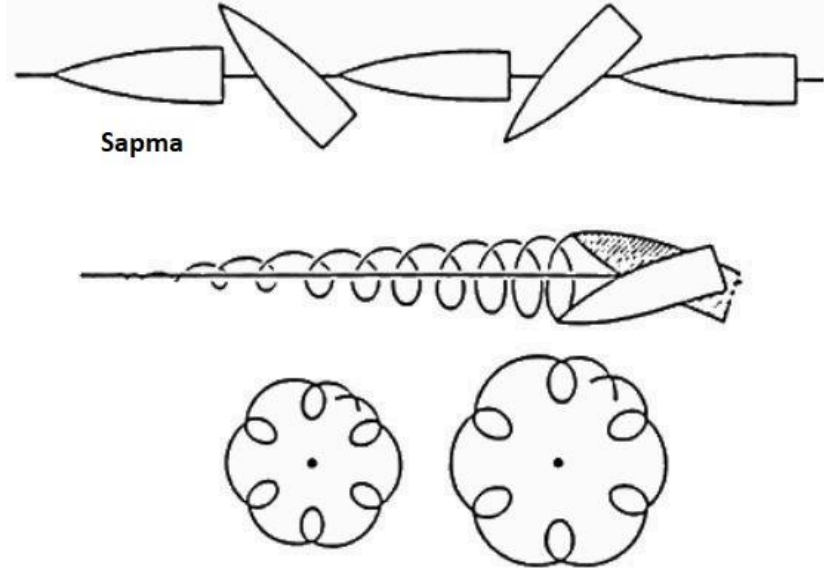
Dönme ilk değeri ve dönme ivmesi kullanılarak mühimmatın izleyeceği yörünge boyunca sahip olacağı dönme değerleri bulunabilecektir. Dönme değerinin nasıl bulunacağı Eşitlik (16) ile belirtilmiştir.

$$Dönme_n = Dönme_{n-1} + dönme\ ivmesi \Delta T \quad (16)$$

Eşitlik (14), (15) ve (16) ile gösterildiği üzere mühimmatın dönme değeri mühimmatın izlediği yörünge boyunca sahip olacağı hız değerlerine göre değişecektir.

3.1.2.2. Denge Sapması

Değiştirilmiş Nokta Kütle Modeli dönerek kararlılığa ulaşan mühimmatlar için kullanılır. Dönerek kararlı olan mühimmatlar hareketleri boyunca dönme eksenlerini sabit tutabildikleri için bu mühimmatların yunuslama ve yuvarlanma eksenlerinde yaptıkları hareketler ihmal edilebilir kabul edilir. Bu ihmal sonucunda mühimmatın hareketi nokta modeli üzerinden tanımlanabilir ancak, mühimmatları kararlılığa ulaştıran bu dönme hareketi aynı zamanda mühimmatların sapma ekseninde hareket etmelerine neden olacaktır. Şekil 3.4 ile dönerek kararlılığa ulaşan bir cismin yaptığı nütasyon hareketi ve izlediği yol boyunca sapma eksenindeki hareketi gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Nütasyon Hareketi [26]

3 eksendeki harekete ek olarak sapma eksenindeki hareketin modellenmesi ve Magnus kuvveti, Kaldırma Kuvveti gibi etkilerin bileşke kuvvete dahil edilmesiyle birlikte 4 serbestlik dereceli bir model elde edilir. Sapma eksenindeki hareket denge sapması (yaw of repose) ile modellenir. Denge sapması sapma ekseninde oluşacak açı değişimlerinin yaklaşık olarak hesaplanmasını sağlar. STANAG 4355' te [19] sunulan denge sapması Eşitlik (17) ile verilmiştir.

$$\vec{a}_e = - \frac{8 I_x \text{Dönme} (\vec{v}_{hava} \times \vec{a})}{\pi \rho D^3 (C_{Ma} + (C_{Ma3} \|\vec{a}_e\|^2)) \|\vec{v}_{hava}\|^4} \quad (17)$$

Eşitlik (17) ile sapma eksenindeki açı değişiklikleri yaklaşık olarak hesaplanabilmektedir. Denge sapması mühimmatın havaya göre hız vektörü ve ivme vektörünün vektörel çarpımlarına zıt yönünde 3 boyutlu bir vektördür. Birimi radyandır. Eşitlik (17)' de belirtilen C_{Ma} ve C_{Ma3} sembolleri sırasıyla devrilme momenti katsayısı (overturning moment coefficient) ve kübik devrilme momenti katsayısı (cubic overturning moment coefficient) olarak ifade edilmektedir. Birimsiz büyüklüklerdir. Denge sapmasının başlangıç değeri sıfır alınmaktadır.

3.1.2.3 Rüzgar Etkisi

Hareket denklemlerinde, dönme, denge sapması gibi formüllerde cismin yere göre ve havaya göre hızları kullanılmaktadır. Cismin havaya göre hızı \vec{v}_{hava} ile ifade edilmektedir. \vec{v}_{hava} vektörünün nasıl bulunduğu Eşitlik (18) ile ifade edilmiştir.

$$\vec{v}_{hava} = \vec{v} - \vec{v}_{rüzgar} \quad (18)$$

Eşitlik (18) ile belirtilen $\vec{v}_{rüzgar}$ 3 boyutlu rüzgar vektörüdür. Bu vektör sayesinde 3 ekseninde de oluşabilecek rüzgar etkisi modellenmiştir. \vec{v} vektörü cismin yere göre hızını göstermektedir. Hareket denklemleri içerisinde hem yere hem de havaya göre hız değerleri kullanılarak rüzgar etkisi yörünge hesabına dahil edilmiştir.

Güdümsüz Mühimmat Yörünge Modeli içerisinde sabit rüzgar kullanılmaktadır. İlkendirme sırasında verilen rüzgar değeri bütün yörünge boyunca aynı kabul edilmektedir.

3.1.2.4 Standart Atmosfer Modeli

Standart Atmosfer Modeli atmosferin yoğunluk, sıcaklık, basınç ve ses hızı gibi değerlerini yüksekliğe bağlı olarak ifade eden modeldir. 1975 yılında Uluslararası Standart Organizasyonu tarafından yayınlamıştır. Güdümsüz Mühimmat Yörünge Modeli ve Güdümlü Mühimmat Yörünge Modeli içerisinde havanın yoğunluğunu ve ses hızını tespit etmek için kullanılacaktır. Hareket modellerine Standart Atmosfer Modeli bir tablo olarak eklenmiştir. Eklenen tablo Ek-1 ile verilmiştir.

Ek-1' de belirtildiği üzere Standart Atmosfer Modeli'nde her bir yükseklik değeri için tanımlı sıcaklık, basınç, hava yoğunluğu ve ses hızı değerleri vardır. İhtiyaç duyulan değer yüksekliğe göre tablo kullanılarak tespit edilir.

Hareket denklemlerinde belirtilen rho ifadesi hava yoğunluğunu temsil eder. Hareket denklemleri için ihtiyaç duyulan bu değer mühimmatın yüksekliği kullanılarak doğrusal ara değerlendirme hesabı yöntemi ile bulunur. Tabloda belirtilen ses hızı parametresi ise mühimmatın mach hızının bulunması için kullanılır. Hava yoğunluğunda olduğu gibi her

bir irtifa değerine göre doğrusal ara değerlendirme hesabı ile ilgili irtifa değeri için ses hızı bulunmaktadır. Hava yoğunluğu ve ses hızını bulmak için yapılan doğrusal ara değerlendirme hesabı Eşitlik (19) ve Eşitlik (20) ile belirtilmiştir.

$$\rho = \rho_n - \left(\frac{h_n - h_{mühimmat}}{h_n - h_{n-1}} \right) \rho_{n-1} \quad (19)$$

$$SS_{mühimmat} = SS_n - \left(\frac{h_n - h_{mühimmat}}{h_n - h_{n-1}} \right) SS_{n-1} \quad (20)$$

Eşitlik (19) ve (20) de belirtilen h ifadesi yüksekliği temsil etmektedir. h_n ve h_{n-1} mühimmatın bulunduğu irtifa değeri $h_{mühimmat}$ 'ın tabloda bulunabilecek bir üst ve alt değerleridir. ρ tabloda bulunan ilgili yüksekliğe karşılık gelen hava yoğunluğu parametresini ifade ederken, SS de ses hızını (speed of sound) belirtmektedir.

3.1.2.5 Aerodinamik Katsayılar

Değiştirilmiş Nokta Kütle Modeli cisimlerin kütlelerinin tek bir noktada toplandığını kabul eder ve cismin hareketini bu nokta üzerinden tanımlar. Cisimlerin hareketi üzerinde etkili olan kuvvetler ve momentler ise cismin geometrisine bağlıdır. Aynı kütle ve hacme sahip bir cisme etki edecek olan aerodinamik kuvvetler farklı olabilir. Bu nedenle aerodinamik kuvvetlerin ve momentlerin hesaplanabilmesi için cisimlerin şeklinin karakterize edilmesi gerekmektedir. Cisimler çeşitli benzetim programları aracılığıyla veya rüzgar tüneli testleri ile aerodinamik olarak karakterize edilebilir. Değiştirilmiş Nokta Kütle Modeli'nin nokta olarak kabul ettiği cisme etki edecek kuvvetlerin de hesaplanabilmesi için ilgili cismin karakterize edilmesine ihtiyaç vardır. Karakterize edilen cisimler aerodinamik katsayılar aracılığıyla tanımlanır. Hareket denklemlerinde de belirtilen bu katsayılar her bir cisim için farklıdır ve ilgili aerodinamik etkinin farklılık göstermesini sağlar. Bu çalışma kapsamında [4] numaralı kaynakta belirtilen, PRODAS benzetim programı tarafından karakterize edilmiş dönerek kararlılığa ulaşan 155 mm topçu mermisinin aerodinamik katsayıları kullanılacaktır. Bu katsayılar ile 155 mm topçu mühimmatının güdümsüz ve güdümlü yörünge hesapları yapılacaktır.

C_{D0} , C_{Da2} , C_{La} , C_{La3} , C_{Ypa} , C_{lp} , C_{Ma} ve C_{Ma3} katsayıları STANAG 4355 tarafından sunulan hareket denklemleri içerisinde bulunan katsayılardır. Çizelge 3.1 ile bu katsayılar mach değerine bağlı olarak sunulmaktadır.

Çizelge 3.1. 155 mm Topçu Mermisinin Aerodinamik Katsayıları [4]

Mach	C_{D0}	C_{Da2}	C_{La}	C_{La3}	C_{Ma}	C_{Ma3}	C_{lp}	C_{ypa}
0,010	0,1414	1,78	1,889	0	3,342	0	-0,02768	-0,71
0,400	0,1416	1,78	1,890	0	3,339	0	-0,02794	-0,71
0,600	0,1428	1,79	1,901	0	3,369	0	-0,02782	-0,71
0,700	0,1436	1,96	1,909	0	3,391	0	-0,02769	-0,72
0,750	0,1449	2,07	1,916	0	3,430	0	-0,02750	-0,72
0,800	0,1485	2,18	1,933	0	3,497	0	-0,02747	-0,74
0,850	0,1496	2,36	1,941	0	3,600	0	-0,02751	-0,76
0,875	0,1596	2,48	1,977	0	3,673	0	-0,02735	-0,77
0,900	0,1754	2,57	2,033	0	3,741	0	-0,02706	-0,79
0,925	0,1950	2,74	2,112	0	3,819	0	-0,02652	-0,89
0,950	0,2288	2,90	2,194	0	3,826	0	-0,02618	-1,01
0,975	0,2733	3,08	2,269	0	3,756	0	-0,02620	-0,90
1,000	0,3237	3,27	2,328	0	3,622	0	-0,02638	-0,83
1,025	0,3573	3,46	2,385	0	3,523	0	-0,02596	-0,80
1,050	0,3795	3,69	2,425	0	3,457	0	-0,02566	-0,76
1,100	0,3835	4,19	2,445	0	3,416	0	-0,02530	-0,71
1,200	0,3812	4,69	2,476	0	3,408	0	-0,02504	-0,65
1,350	0,3626	4,21	2,533	0	3,377	0	-0,02448	-0,58
1,500	0,3462	3,72	2,621	0	3,270	0	-0,02362	-0,56
1,750	0,3215	3,25	2,724	0	3,141	0	-0,02274	-0,54
2,000	0,2972	2,74	2,812	0	3,059	0	-0,02204	-0,51
2,250	0,2764	2,45	2,866	0	2,975	0	-0,02120	-0,50
2,500	0,2607	2,18	2,865	0	2,928	0	-0,02028	-0,50
3,000	0,2329	1,73	2,821	0	2,874	0	-0,01905	-0,50

Çizelge 3.1’de aerodinamik katsayılar mühimmatın mach hızına bağlı olarak sunulmuştur. Bu mühimmat üzerinde etki edecek aerodinamik kuvvet ve momentlerin mühimmatın mach sayısına bağlı olarak değişeceği anlamına gelmektedir. Mach sayısı birimsiz bir büyüklüktür ve Eşitlik (21) ile ifade edilmektedir.

$$mach = \frac{\|\vec{v}_{hava}\|}{SS} \quad (21)$$

Eşitlik (21)’ de belirtilen SS ses hızını ifade etmektedir. Ses hızı irtifaya bağlı olarak değişmektedir ve birimi m/s’ dir. Mühimmat için Standart Atmosfer Model kullanılarak mühimmatın irtifa değerine göre hesaplanır. $\|\vec{v}_{hava}\|$ ifadesi mühimmatın havaya göre hızının skalar büyüklüğüdür ve birimi m/s’ dir.

Mühimmatın hızı ve irtifasına bağlı mach değeri bulunduktan sonra, mühimmatın bu mach değerine karşılık gelen aerodinamik katsayıları doğrusal ara değer hesabı ile Eşitlik (22)' de belirtildiği gibi tespit edilir.

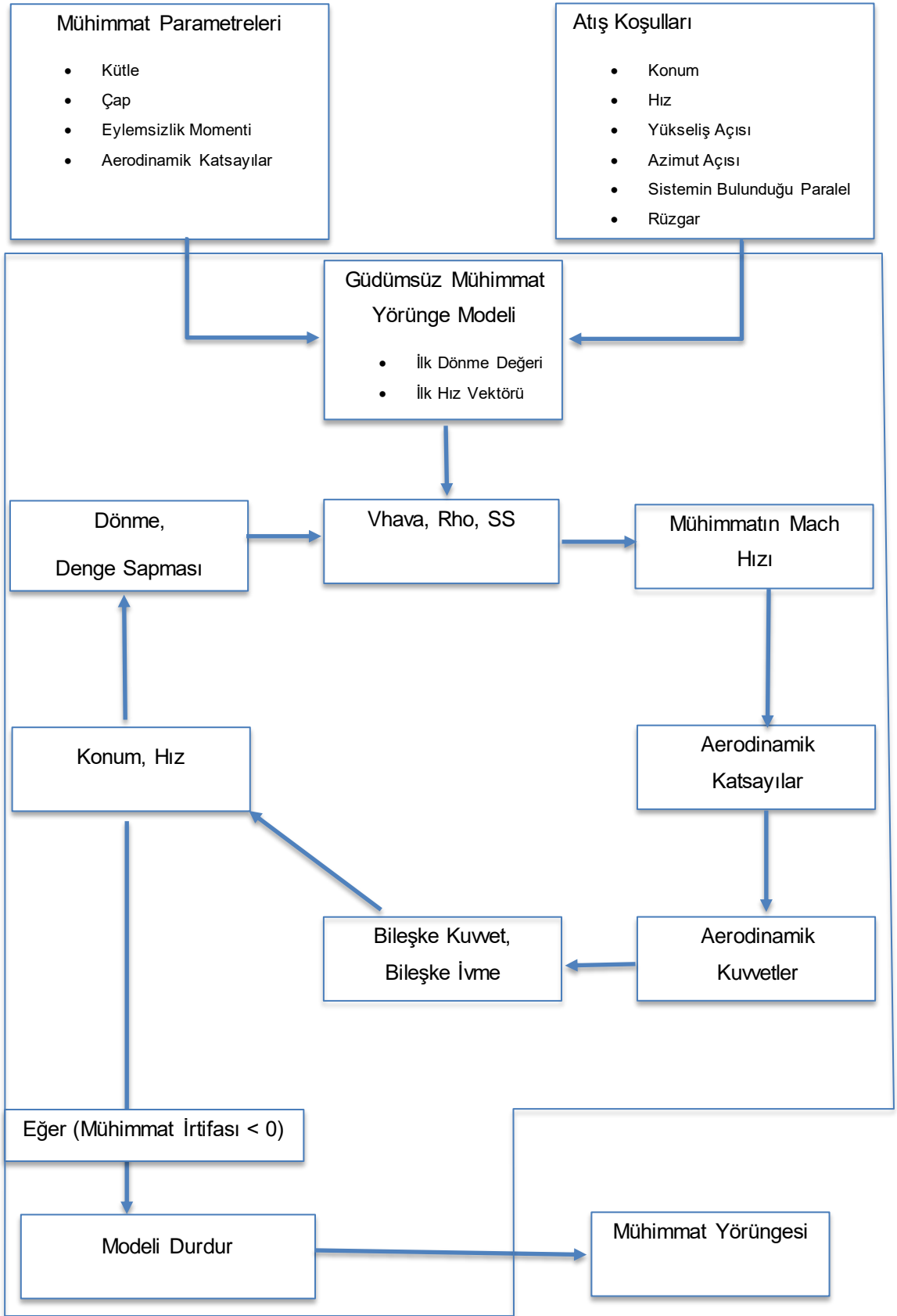
$$C_{mühimmat} = C_n - \left(\frac{mach_n - mach_{mühimmat}}{mach_n - mach_{n-1}} \right) C_{n-1} \quad (22)$$

Eşitlik (22) de belirtilen C ifadesi ilgilenilen aerodinamik katsayıyı temsil etmektedir. $mach_n$ ve $mach_{n-1}$ ifadeleri mühimmatın mach değeri $mach_{mühimmat}$ 'ın tabloda bulunabilecek bir üst ve alt değerleridir.

Mühimmatın hız ve irtifa değerlerine göre Eşitlik (21) kullanılarak mach değeri bulur. Bu mach değerine göre de Çizelge 3.1 ve Eşitlik (22) kullanılarak mühimmatın mach değeri için aerodinamik katsayıları hesaplanır. Bu katsayılar göre STANAG 4355'te sunulan denklemler kullanılarak mühimmata etki edecek aerodinamik kuvvetler bulunur.

3.1.3. Güdümsüz Mühimmat Yörünge Modeli Şeması

Güdümsüz Mühimmat Yörünge Modeli'nin nasıl çalıştığını anlatan şema Şekil 3.5. ile verilmiştir.



Şekil 3.5. Güdümsüz Mühimmat Yörünge Modeli Şeması

Şekil 3.5. ile Güdümsüz Mühimmat Yörünge Modeli görsel olarak betimlenmiştir. Güdümsüz Mühimmat Yörünge Modeli giriş bilgisi olarak mühimmat parametreleri ve atış koşullarını alır. Bu bilgilere göre mühimmatın izleyeceği yörüngeyi adım adım hesaplayarak mühimmatın düşeceği noktayı bulur. Böylece yörünge modeli çıkış tarafında seçilmiş mühimmatın seçilmiş atış koşulları için izleyeceği yörüngeyi üretmiş olur.

Mühimmat parametreleri atışı yapılacak olan mühimmata özgü değerlerdir. Seçilen mühimmat için aerodinamik hesaplarda kullanılmak üzere kütle, çap, eylemsizlik momenti ve mühimmatın aerodinamik davranışını tanımlayan aerodinamik katsayıları giriş bilgisi olarak modele sağlanır.

Atış koşulları mühimmatın hangi şartlarda atılacağını ve mühimmatın sahip olacağı ilk uçuş değerlerini belirleyen giriş bilgisi setidir. Konum mühimmatın başlangıçta bulunduğu yeri belirtir. Mühimmatın ilk hız değerı namlu çıkış hızı, topçu sisteminin yükseliş ve azimut açılarına göre belirlenir. Rüzgar bilgisi mühimmatın uçuş süresi boyunca üzerine etki edecek rüzgarı belirler. Topçu sisteminin bulunduğu paralel değerı (enlem açısı) mühimmat üzerine etki edecek yerçekimi, Coriolis gibi etkileri belirlemede kullanılır.

Mevcut giriş bilgileri dahilinde Güdümsüz Mühimmat Yörünge Modeli çalışmaya başlar. İlk olarak giriş bilgilerine göre mühimmatın namludan çıkış anındaki Dönme değerı ve hız vektörü tespit edilir. Böylece mühimmat yörüngesi için ilk konum ve hız vektörleri belirlenmiş olur. Rüzgar bilgisi kullanılarak mühimmatın havaya göre hız vektörü \vec{v}_{hava} üretilir. Konum bilgisi kullanılarak mühimmatın bulunduğu ykseklilik için Standart Atmosfer Modelinin söylediği hava yoğunluğu (ρ) ve ses hızı (SS) değerleri tespit edilir. \vec{v}_{hava} hız değerı ve SS kullanılarak mühimmatın mach değerı hesaplanır. Hesaplanan mach değerine göre aerodinamik tablolardan ilgili mach değerı için mühimmatın aerodinamik katsayıları alınır. STANAG 4355'te sunulan Değiştirilmiş Nokta Kütle Modeline göre mühimmata etki edecek aerodinamik kuvvetler hesaplanır. Bu kuvvetler sonucunda mühimmata etkileyen bileşke kuvvet ve bileşke ivme değerı tespit edilir. Bileşke ivmeye göre bir zaman aralığı sonra mühimmatın sahip olacağı hız vektörü

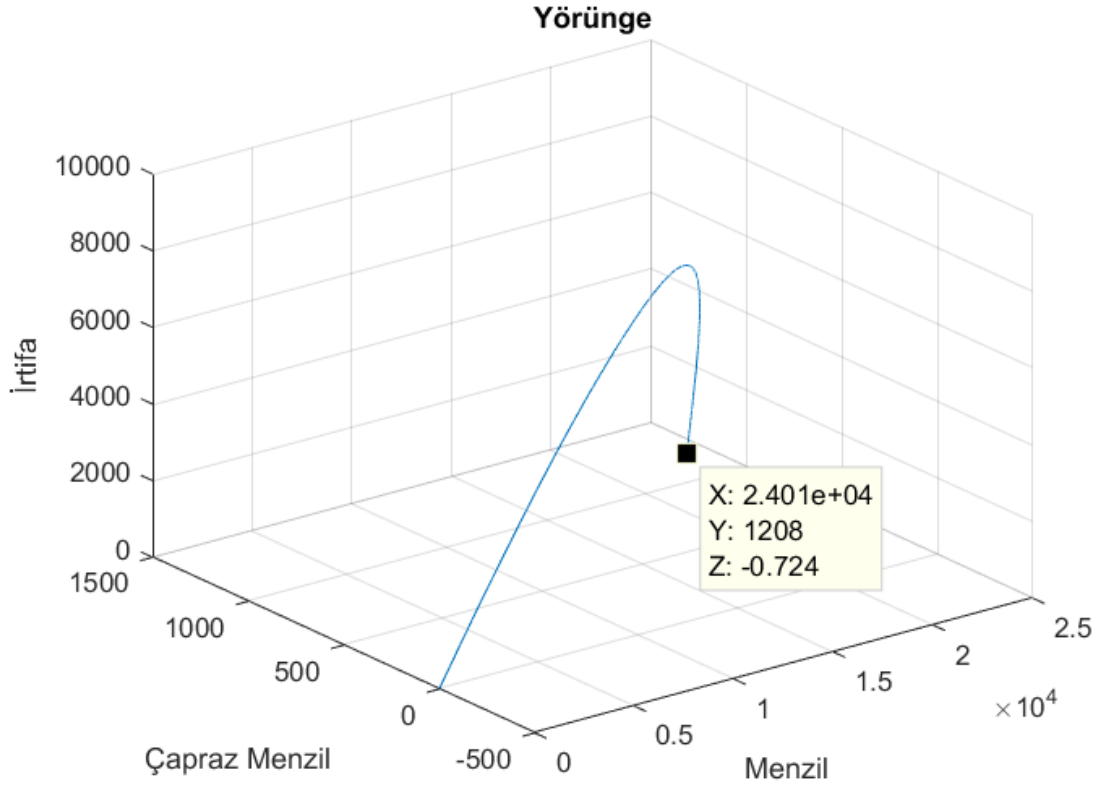
ve bu vektöre göre mühimmatın bulunacağı yeni konum değeri hesaplanır. Böylece mühimmatın hız vektörü mühimmata etki edecek bileşke ivmeye göre seçilen zaman aralığı değeri de hesaba katılarak güncellenmiş olur. Bu işlemi güncel hız değerine göre konum değerinin de güncellenmesi takip eder. Yeni konum ve hız vektörlerine göre bu hareket sırasında mühimmatın Dönme ve Denge Sapması değerlerindeki değişim hesaplanır. Böylece mühimmat aerodinamik etkiler sonucunda yeni bir duruma geçmiştir. İlgili tüm parametreler bu doğrultuda değişecektir. Mühimmatın \vec{v}_{hava} değerinden başlayarak üzerine etki edecek bileşke ivmenin bulunmasına kadar bütün işlemler tekrarlanacaktır. Yeni bileşke ivmeyle birlikte mühimmatın hız ve konum vektörleri tekrar güncellenecektir. Bu işlemlerin yani kurulan döngünün tekrarlayan bir şekilde çalışması sonucunda mühimmatın konumunun güncellenmesiyle birlikte mühimmat yörüngesi oluşacaktır. Kurulan döngü mühimmat yükseklik değerinin sıfır olmasıyla sonlanacaktır. Yüksekliğin sıfır olması mühimmatın yere çarptığı anlamına gelmektedir. Döngünün sonlanmasıyla birlikte model benzetimi durdurulur ve mühimmat konum vektörlerinin depolandığı yörünge vektörü Gudsüz Mühimmat Yörünge Modeli'nin çıktısı olarak üretilir. Yörünge vektörünün son elemanı mühimmatın çarptığı noktadır.

Gudsüz Mühimmat Yörünge Modeli örnek olarak 155 mm topçu mühimmatı için Çizelge 3.2 ile belirtilen giriş koşullarında çalıştırılmış ve mühimmatın izlediği yörünge ile çarpma noktası Şekil 3.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. 155 mm Topçu Mühimmatı Örnek Giriş Koşulları

Mühimmat Parametreleri	
Kütle	43.096 kg
Çap	0.155 m
Eylemsizlik Momenti	0.1426 kg.m ²
Aerodinamik Katsayılar	Çizelge 3.1 ile belirtilen 155 mm topçu mermisi katsayıları
Atış Koşulları	
Konum	Orijin (0,0,0)

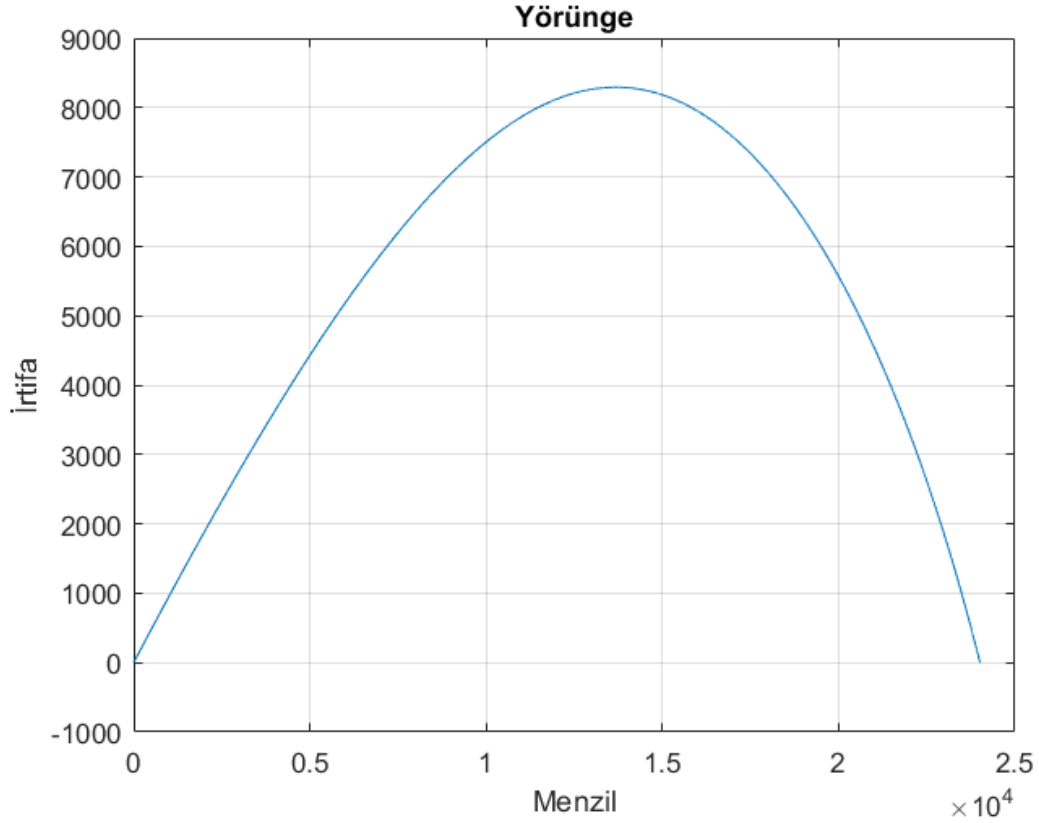
Namlu Çıkış Hızı	900 m/s
Yükseliş Açısı	44 derece
Azimet Açısı	0 derece
Topçu Sisteminin Bulunduğu Paralel	39 derece
Rüzgar	Sıfır Rüzgar



Şekil 3.6. Çizelge 3.2 ile Giriş Koşulları Belirlenen Güdüksüz Mühimmat Yörüngesi

Çizelge 3.2 ile belirtilen giriş koşullarında atışı yapılan 155 mm topçu mermisinin Güdüksüz Mühimmat Yörünge Modeline göre izlediği yol 3 boyutlu olarak Şekil 3.6 ile belirtilmiştir. Topçu mermisi menzilde 24012 metre, çapraz menzilde 1208 metre mesafe kat etmiştir. Menzil mühimmat atışının yapıldığı 0 azimet yönüdür. Çapraz menzil ise menzil eksenine dik olan eksendir.

Şekil 3.7 ile mühimmat yörüngesi iki boyutta irtifa ve menzil eksenleri kullanılarak gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Çizelge 3.2 ile Giriş Koşulları Belirlenen Gdümsüz Mühimmat Yörüngesi (İrtifa ve Menzil Eksenleri)

3.2. Gdümlü Mühimmat Yörünge Modeli

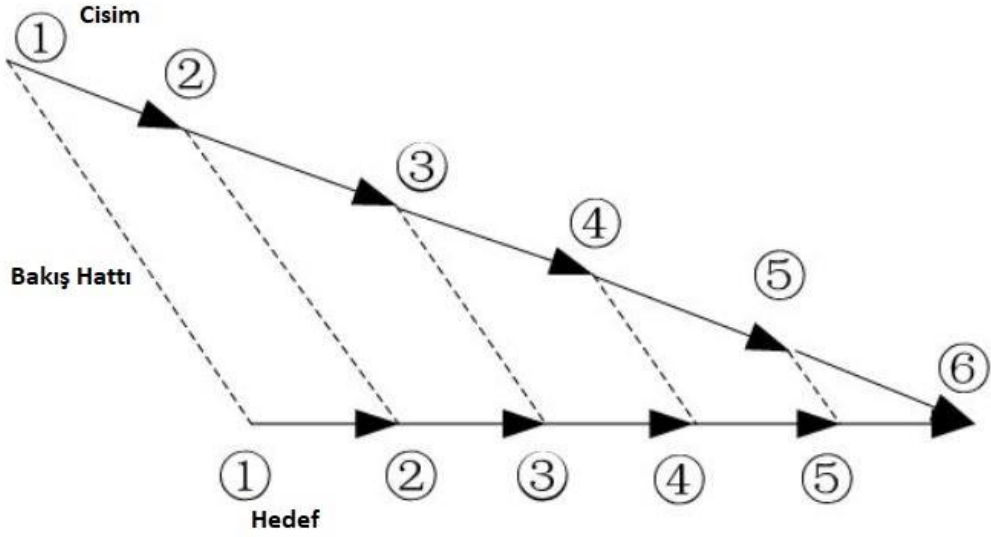
Gdümlü mühimmatlar sensörleri, güdüm ve kontrol birimleri bulunan, atılmak istenilen hedefe yönlenebilen akıllı cisimlerdir. Sensörleri aracılığıyla dünya üzerindeki konumlarını veya hedefe göre konumlarını bilirler. Güdüm ve kontrol birimlerini kullanarak ise hedefe yönelirler. Gdümsüz mühimmatların aksine mühimmat parametreleri ve atış koşulları ile belirlenen tek bir balistik çözümleri yoktur. Güdüm ve kontrol birimlerinin el verdiği ölçüde hedeflerine ulaşabilirler. Gdümlü mühimmatların bu davranışlarını inceleyebilmek için bir güdümlü mühimmat benzetimi olan Gdümlü Mühimmat Yörünge Modeli oluşturulmuştur.

Güdümlü Mühimmat Yörünge Modeli ile benzetimi yapılacak olan mühimmatın sensör olarak Ataletsel Navigasyon Sistemi ve Küresel Konumlama Sistemi kullanacağı kabul edilmektedir. Bu iki sistem aracılığıyla model sürekli olarak mühimmatın konum, hız ve ivme bilgilerine sahip olacaktır. Atılmak istenen hedef konum bilgisi ve mühimmat konum bilgisi aracılığıyla model mühimmatın hedefe göre durumunu takip edebilecektir. Model içerisinde güdüm birimi bulunacaktır. Güdüm birimi mühimmatın konum ve hız bilgileri ile hedefin konum ve hız bilgilerini kullanarak hedefe ulaşmak için gerekli olan ivme bilgisini üretecektir. Model içerisinde bulunan kontrol birimi ise güdüm biriminden gelen gerekli ivme değerini üretmeye çalışacaktır. Bu yapılar dahilinde çalışan Güdümlü Mühimmat Yörünge Modeli hedef, mühimmat parametreleri ve atış koşulları gibi bilgileri kullanarak mühimmat yörüngesini oluşturacak ve çarpma noktasını belirleyecektir.

3.2.1. Güdüm Birimi ve Oransal Seyir Güdümü

Güdüm birimi mühimmatın konum ve hız bilgisi ile hedefin konum ve hız bilgisini kullanarak mühimmatın hedefe ulaşması için gerekli yönlendirmeyi yapan, mühimmata yapması gereken hareketi tanımlayan birimdir. Güdüm birimi içerisinde Oransal Seyir Güdümü algoritması çalıştırılacaktır. Oransal Seyir Güdümü algoritmasının ürettiği çıktılar güdüm biriminin çıktısı olarak değerlendirilecektir.

Oransal Seyir Güdümü bir cismin bir noktaya veya takip ettiği başka bir cisme ulaşabilmesi için cismin mevcut hareketine uygulaması gereken ivme değerlerini hesaplayan bir güdüm yasasıdır. Oransal Seyir Güdümü'nün temel mantığı güdüm uygulanacak cisim ve hedef arasındaki bakış hattını sabit tutabilmektir. Bakış hattı sabit olduğu sürece cismin bir noktada hedefi yakalayacağını söyler. Bu nedenle cisim ve hedef arasındaki bakış hattının değişimini izler ve buna göre güdülen cismi yönlendirir. Şekil 3.8 ile bakış hattını sabit tutulması durumu gösterilmiştir.

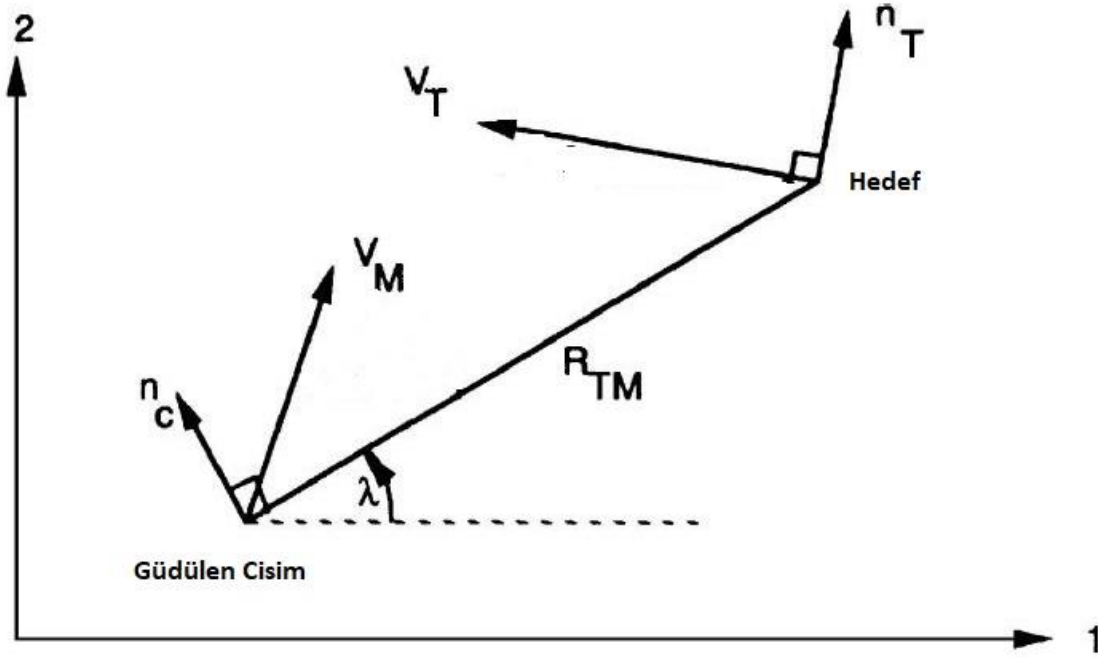


Şekil 3.8. Bakış Hattı [27]

Teorik olarak Oransal Seyir Güdümü cisim ile hedef arasındaki bakış hattının değişimine ve yaklaşma hızına orantılı olarak cisim ve hedef arasındaki bakış hattına dik ivme üreten bir güdüm yasasıdır. Bu yasanın matematiksel olarak ifade edilmiş şekli Eşitlik (23) ile verilmiştir.

$$n_c = NV_c \dot{\lambda} \quad (23)$$

Eşitlik (23)' te belirtilen n_c Oransal Seyir Güdümü tarafından üretilen ivme değeridir. Bu değer eşitlikte de belirtildiği gibi N , V_c ve $\dot{\lambda}$ ' a bağlıdır. N güdüm kazanç sabitidir. Genellikle 3 ile 5 arasında seçilir. V_c güdülen cisim ile hedef arasındaki yaklaşma hızını (closing velocity) temsil eder. $\dot{\lambda}$ cisim ile hedef arasındaki bakış hattının (line of sight) değişimini ifade eder. Şekil 3.9 ile Oransal Seyir Güdümü geometrisi gösterilmiştir [28].

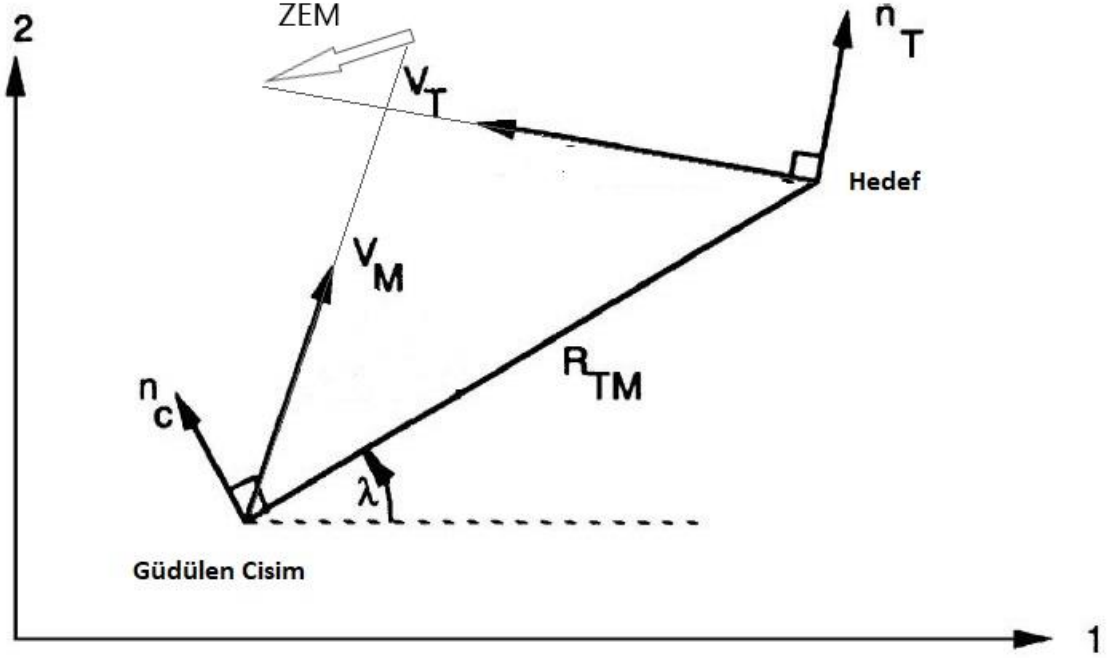


Şekil 3.9. Oransal Seyir Güdümü Geometrisi [28]

Şekil 3.9' de gösterilen R_{TM} güdülen cisim ile hedef arasındaki mesafedir. Bu mesafenin zamana göre değişimi yaklaşma hızını (V_C) verecektir.

Eşitlik (23) ile matematiksel olarak ifade edilen, Şekil 3.9 ile geometrisi gösterilen Oransal Seyir Güdümü 2 boyutta hareket için tanımlanmıştır. Bu çalışma kapsamında benzetimi yapılacak olan güdümlü mühimmatın hareketi 3 boyutta incelenecektir. Bu nedenle güdüm birimi için 3 boyutta çalışan bir Oransal Seyir Güdüm algoritması çalışılmıştır. 3 boyutlu Oransal Seyir Güdüm algoritması kaynak [28]'de belirtilen Oransal Seyir Güdümü algoritması temel alınarak oluşturulmuştur.

3 boyutlu Oransal Seyir Güdümü algoritması Sıfır Çaba Iskalama Mesafesi (Zero Effort Miss, ZEM) üzerine tanımlıdır. Sıfır Çaba Iskalama Mesafesi hedefin ve güdülen cismin manevra yapmadan mevcut hareketlerine devam etmeleri sonucunda cisim ve hedef arasında oluşacak mesafedir. Sıfır Çaba Iskalama Mesafesi (ZEM) vektörü Şekil 3.10 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Sıfır Çaba Iskalama Mesafesi [28]

Oransal Seyir Güdümü Sıfır Çaba Iskalama Mesafesi'ni ürettiği ivme komutları ile sıfırlayarak hedefe ulaşmayı amaçlar. Sıfır Çaba Iskala Mesafesi'nin hesaplanması için gerekli olan denklemler Eşitlik (24) - (28) ile verilmiştir.

$$\vec{R}_{TM} = \vec{X}_T - \vec{x} \quad (24)$$

$$\vec{V}_{TM} = \vec{V}_T - \vec{v} \quad (25)$$

$$V_C = -\text{dot}(\vec{R}_{TM}, \vec{V}_{TM}) / \|\vec{R}_{TM}\| \quad (26)$$

$$t_{go} = \|\vec{R}_{TM}\| / V_C \quad (27)$$

$$\vec{ZEM} = \vec{R}_{TM} + \vec{V}_{TM} t_{go} \quad (28)$$

Eşitlik (24) ile belirtilen \vec{R}_{TM} hedeften güdülen cisme olan konum vektörüdür. \vec{X}_T hedefin konum vektörünü, \vec{x} güdülen cismin konum vektörünü ifade etmektedir. \vec{R}_{TM} vektörü hedefin 3 boyutlu konum vektöründen güdülen cismin 3 boyutlu konum vektörünün çıkarılması ile bulunur.

Eşitlik (25) ile belirtilen \vec{V}_{TM} hedefin güdülen cisme göre hız vektörüdür. \vec{V}_T hedefin hız vektörünü, \vec{v} güdülen cismin hız vektörünü ifade etmektedir. \vec{V}_{TM} vektörü hedefin 3 boyutlu hız vektöründen güdülen cismin 3 boyutlu hız vektörünün çıkarılması ile bulunur.

Eşitlik (26) ile hedef ile güdülen cisim arasındaki yaklaşma hızı V_C ifade edilmiştir. V_C 'nin bulunabilmesi için \vec{R}_{TM} ve \vec{V}_{TM} vektörlerinin iç çarpımlarının alınması gerekmektedir. Eşitlik (26)'da belirtilen $\text{dot}(\vec{R}_{TM}, \vec{V}_{TM})$ ifadesi \vec{R}_{TM} ve \vec{V}_{TM} vektörlerinin iç çarpımlarını ifade eder. Eşitlik (26)'da belirtilen $\|\vec{R}_{TM}\|$ ifadesi \vec{R}_{TM} konum vektörünün büyüklüğüdür. İki vektörün iç çarpımının birinci vektörün büyüklüğüne bölünmesiyle ikinci vektörün birinci vektör üzerindeki iz düşümü elde edilmiş olur. Eşitlik (26) ile de bu yönde bir işlem yapılmıştır. \vec{R}_{TM} ve \vec{V}_{TM} vektörlerinin iç çarpımlarının \vec{R}_{TM} vektörünün büyüklüğüne bölünmesi \vec{V}_{TM} vektörünün \vec{R}_{TM} vektörü üzerindeki iz düşümünü vermektedir. Basit bir ifadeyle \vec{V}_{TM} vektörünün \vec{R}_{TM} vektörü yönündeki bileşeninin büyüklüğü elde edilmiştir. \vec{R}_{TM} ve \vec{V}_{TM} vektörlerinin doğası gereği iki vektörün iç çarpımı negatif bir sonuç üreteceği için bu sonuç eksi ile çarpılarak pozitif bir yaklaşma hızı V_C elde edilmiştir. V_C skalar bir büyüklüktür.

Eşitlik (27)'de güdülen cisim ile hedefin buluşmasına kalan zaman t_{go} ifade edilmiştir. t_{go} güdülen cisim ile hedef arasındaki hız vektörü \vec{V}_{TM} 'nin \vec{R}_{TM} yönündeki bileşeninin \vec{R}_{TM} vektörünün büyüklüğündeki bir mesafeyi ne kadar sürede kat edeceğini ifade eder. t_{go} skalar bir büyüklüktür ve birimi saniyedir. t_{go} \vec{R}_{TM} vektörün büyüklüğünün yaklaşma hızı V_C 'ye bölünmesi ile elde edilir.

Eşitlik (28) ile Sıfır Çaba Iskalama Mesafesi vektörü \overline{ZEM} ifade edilmiştir. \overline{ZEM} vektörü \vec{V}_{TM} vektörünün t_{go} skalar büyüklüğü ile çarpılmasıyla elde edilen vektörün \vec{R}_{TM} vektörüyle toplanması sonucunda elde edilir. Amaç güdülen cisim ile hedefin hareketlerini aynı şekilde t_{go} süresi boyunca devam ettirmek ve sonucunda güdülen cisim ile hedef arasındaki kalan mesafeyi bulmaktır. Bu mesafe Sıfır Çaba Iskalama Mesafesi olarak tanımlanır ve \overline{ZEM} ile vektörel olarak ifade edilecektir. Bu sayede Oransal Seyir

Güdümlü \overline{ZEM} vektör bilgisini kullanarak üretilmesi gereken ivme miktarını hesaplayabilecektir.

Oransal Seyir Güdümü \overline{ZEM} vektörünün bakış hattına dik olan kısmı ile doğru orantılıdır. Bu nedenle Oransal Seyir ivmesinin hesaplanabilmesi için \overline{ZEM} vektörünün güdülen cisim ile hedef arasındaki bakış hattına dik olan bileşeni hesaplanmalıdır. Bu vektörün hesaplanması için öncelikle \overline{ZEM} vektörünün bakış hattına paralel olan kısmı tespit edilecektir. \overline{ZEM} vektörünün bakış hattına paralel parçası Eşitlik (29) ve (30) ile ifade edilecektir.

$$ZEMtoRTM = \text{dot}(\overline{ZEM}, \vec{R}_{TM}) / \|\vec{R}_{TM}\| \quad (29)$$

$$\overline{ZEM}_{\parallel} = ZEMtoRTM * \vec{R}_{TM} / \|\vec{R}_{TM}\| \quad (30)$$

Eşitlik (29) ile \overline{ZEM} vektörünün \vec{R}_{TM} üzerine iz düşümü tespit edilmiştir. \overline{ZEM} ve \vec{R}_{TM} vektörlerinin iç çarpımları alınarak, bu değer \vec{R}_{TM} vektörünün büyüklüğüne bölünmüştür. Bu işlemle birlikte \overline{ZEM} vektörünün \vec{R}_{TM} vektörü yönündeki bileşeninin büyüklüğü $ZEMtoRTM$ değeri bulunmuştur.

Eşitlik (30) ile \overline{ZEM} vektörünün bakış hattına paralel bileşeni tespit edilmiştir. Öncelikle \vec{R}_{TM} vektörü \vec{R}_{TM} vektörünün büyüklüğüne bölünerek, \vec{R}_{TM} 'nin birim vektörü tespit edilmiştir. \overline{ZEM} vektörünün \vec{R}_{TM} vektörü yönündeki parçasının büyüklüğü $ZEMtoRTM$ ile \vec{R}_{TM} 'nin birim vektörü çarpılarak \overline{ZEM} vektörünün bakış hattına paralel parçası $\overline{ZEM}_{\parallel}$ elde edilmiştir.

\overline{ZEM} vektörünün bakış hattına dik olan kısmı basit bir vektör işlemi yapılarak hesaplanacaktır. \overline{ZEM} vektörünün bakış hattına paralel parçası $\overline{ZEM}_{\parallel}$ vektörü \overline{ZEM} vektöründen çıkarılarak bakış hattına dik \overline{ZEM}_{\perp} vektörü elde edilecektir. İlgili işlem Eşitlik (31) ile gösterilmiştir.

$$\overline{ZEM}_{\perp} = \overline{ZEM} - \overline{ZEM}_{\parallel} \quad (31)$$

Eşitlik (27) ve (31) ile birlikte 3 boyutlu Oransal Seyir Güdümü komuta ivmesinin hesaplanması için gerekli olan bütün bileşenler ifade edilmiştir. 3 boyutlu Oransal Seyir Güdümü komuta ivmesi Eşitlik (32) ile verilmiştir.

$$\vec{a}_{OSG} = N \overline{ZEM}_{\perp} / t_{go}^2 \quad (32)$$

Eşitlik (32)' de belirtilen \vec{a}_{OSG} Oransal Seyir Güdümü algoritmasının ürettiği 3 boyutlu komuta ivmesidir. N sembolü denklemin kazanç sabitidir. Oransal Seyir Güdümü için 3 ile 5 arasında bir değer seçilir. Bu değer tasarımcı tarafından belirlenir. Bu çalışma kapsamında N kazanç sabiti 3 seçilmiştir. \overline{ZEM}_{\perp} vektörü Sıfır Çaba Iskalama Mesafesinin bakış hattına dik olan bileşenidir. t_{go} güdülen cisim ve hedefin manevra yapmadan hareketlerini devam ettirmeleri durumunda buluşacakları süredir.

Oransal Seyir Güdümü algoritması Gülümlü Mühimmat Modeli içinde güdüm birimi kısmında kullanılacaktır. Bu senaryo içerisinde Oransal Seyir Güdümü için güdülen cisim benzetimi yapılacak olan güdümlü mühimattır. Hedef ise konumu atış öncesinde mühimmata yüklenen ve mühimmatın vurmaya çalıştığı dünya üzerindeki sabit bir noktadır. Bu nedenle güdüm algoritması içerisindeki \vec{R}_{TM} vektörü sabit bir hedef noktasından mühimmata olan konum vektörüdür. Hedefle güdülen cisim arasındaki göreceli hız vektörü \vec{V}_{TM} vektörü ise mühimmatın hız vektörünün tersidir çünkü hedef noktasının hızı sıfırdır. Bu senaryo dahilinde çalıştırılan Oransal Seyir Güdümü algoritmasının ürettiği komuta ivmesi \vec{a}_{OSG} güdüm birimi tarafından kontrol birimine iletilecektir. Gülümlü Mühimmat Yörünge Modeli içerisindeki kontrol birimi \vec{a}_{OSG} ivme vektörünün mühimmata etki etmesine aracı olacaktır.

3.2.2. Kontrol Birimi

Gülümlü topçu mühimmatları klasik mühimmatlara sensörler, güdüm ve kontrol birimleri eklenerek geliştirilmiş silah sistemleridir. Sensörlerden gelen bilgilere göre güdüm birimi tarafından üretilen komuta ivmesi kontrol birimi tarafından mühimmata

uygulanmaya çalışılır. Kontrol birimi bu ivmeyi mühimmat üzerinde bulunan kontrol yüzeylerini hareket ettirerek yapar. Güdüm birimi tarafından hesaplanan komuta ivmesinin mühimmat üzerine etki eden bileşke ivme olabilmesi için gerekli olan ivmeyi üretmek adına kontrol birimi kontrol yüzeylerini hareket ettiren motorları sürer. Bu hareket sonucunda kontrol yüzeylerinin pozisyon değişikliği aerodinamik kuvvetler oluşturur. Oluşan kuvvet neticesinden mühimmat üzerine etki eden ve mühimmatı hareket ettiren bileşke ivmenin güdüm biriminden gelen komuta ivmesine eşit olması amaçlanır. Pratikte bu işlem ivme otopilotu tarafından gerçekleştirilir. Güdüm biriminden gelen ivme referans ivmesi olarak alınır. İvme otopilotu mühimmat üzerinde bulunan ivme ölçerlerden gelen ivmeyi referans ivme ile karşılaştırarak farkı yani hatayı sıfırlamaya çalışır. Böylece güdümlü mühimmat hedefe ulaşır.

Güdümlü Mühimmat Yörünge Modeli içerisinde bulunan kontrol birimi ivme otopilotu mantığıyla çalışmaktadır. Güdüm biriminden gelen komuta ivmesini referans ivme olarak alıp mühimmata etki edecek bileşke ivmeyi bu ivmeye eşitlemeye çalışır. Bu işlemin yapılabilmesi için öncelikle mühimmat üzerine etki edecek ivmenin tespit edilmesi gerekir. Pratikte sensörler aracılığıyla ölçülen bu ivme Güdümlü Mühimmat Yörünge Modeli benzetimi dahilinde kontrol birimi içerisinde hesaplanacaktır. Mühimmat üzerine etki eden ivme hareket denklemleri içerisinde de açıklanan aerodinamik kuvvetler sonucu oluşan bileşke ivmedir. Mühimmatın hareketi sonucunda Güdümsüz Mühimmat Yörünge Modeli içerisinde de yapıldığı gibi mühimmat üzerine etki edecek yerçekimi, Coriolis ve sürüklenme kuvveti gibi etkiler hesaplanabilirler. Eşitlik (1), (5), (8), (9) ve (10) ile sırasıyla yerçekimi, Coriolis, sürüklenme, kaldırma ve Magnus kuvvetlerinin denklemleri ifade edilmiştir. Bu eşitlikleri kullanarak kontrol birimi içerisinde kontrol yüzeyleri çalıştırılmadan mühimmat üzerine etki edecek kuvvetler bulunacaktır.

Magnus kuvveti mühimmatın dönmesiyle ilintili bir aerodinamik kuvvettir. Fırlatılan klasik topçu mermileri dönerek namludan çıkarlar ve dönme hareketleri uçuş süresince devam eder. Güdümlü Mühimmat Yörünge Modeli ile benzetimi yapılacak olan güdümlü topçu mühimmatı fırlatıldıktan belirli bir süre sonra güdüm-kontrol birimini çalıştırmaya başlayacaktır ve bu andan itibaren kanatçıkları ile hareket edecektir. Kanatçıklar mühimmatın dönmesine izin vermeyecektir. Bu nedenle kontrolün başladığı andan

itibaren mühimmatın Dönme değeri sıfır olacaktır. Bu durumda güdümlü safhada mühimmat üzerine etki edecek Magnus kuvveti de sıfır olacaktır.

Dönme değerinin sıfır olması mühimmatın dönüşü sonucunda oluşan Denge Sapması değerini de sıfır yapacaktır. Bu nedenle sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerinin Denge Sapması'na bağlı bileşenleri de sıfır olacaktır ancak, bu kuvvetler varlıklarını sürdürecektir.

Güdümlü safhada kontrol yüzeylerinin oluşturduğu kuvvetler dışında mühimmat üzerine etki edecek kuvvetlerin oluşturduğu bileşke ivme Eşitlik (33) ile tanımlanmıştır.

$$\vec{a}_{aero} = \frac{(\overline{DF} + \overline{LF})}{m} + \vec{g} + \vec{C} \quad (33)$$

Eşitlik (33) ile kontrol yüzeyleri haricinde mühimmata etki edecek olan ivme \vec{a}_{aero} ile ifade edilmiştir. \vec{a}_{aero} 3 boyutlu bir ivme vektörüdür. \vec{a}_{aero} bileşke ivmesi yerçekimi ve Coriolis etkilerinin oluşturduğu ivmeler ile sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerinin oluşturduğu ivmelerin toplamına eşittir. Sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerinin oluşturduğu ivmeler bu kuvvetlerinin mühimmatın kütesine bölünmesiyle bulunmuştur. Mühimmatın kütlesi Eşitlik (33) içerisinde m ile ifade edilmiştir.

İvme ölçerler tarafından kontrol birimine gelmesi gereken ivme bilgisi Güdümlü Mühimmat Yörünge Modeli benzetimi kapsamında Eşitlik (33) ile hesaplanmıştır. Kontrol birimi kontrol yüzeylerini hareket ettirerek mühimmata hali hazırda etki eden mevcut ivmeyi güdüm biriminden gelen \vec{a}_{OSG} ivmesine eşitlemeye çalışacaktır. Bu nedenle referans ivme \vec{a}_{OSG} 'nin yakalanabilmesi için ne kadar ivme üretilmesine ihtiyaç duyulduğu Eşitlik (34) ile tespit edilecektir.

$$\vec{a}_{Gereken} = \vec{a}_{OSG} - \vec{a}_{aero} \quad (34)$$

Eşitlik (34) ile kontrol yüzeylerinin üretmesi gereken ivme değeri $\vec{a}_{Gereken}$ hesaplanmıştır. $\vec{a}_{Gereken}$ değeri güdüm birimi tarafından üretilen Oransal Seyir Güdümü

algoritmasının çıktısı olan komuta ivmesi \vec{a}_{OSG} ile aerodinamik etkiler sonucu oluşan \vec{a}_{aero} arasındaki farka eşittir.

Güdümlü Mühimmat Yörünge Modeli benzetimi içerisinde kontrol birimi tarafından üretilen ivme mühimmatın hız vektörüne dik olarak mühimmata etki ettirilecektir. Benzetimi yapılacak olan mühimmat itkisiz bir güdümlü topçu mermisi olduğu için hız vektörü doğrultusunda ivme üretmek doğru değildir. Bu nedenle $\vec{a}_{Gereken}$ ivmesinin mühimmata uygulanabilmesi için ivmenin hız vektörüne dik olması gerekmektedir. $\vec{a}_{Gereken}$ güdüm birimi tarafından hesaplanan ve hedefe ulaşmak için gerekli olan \vec{a}_{OSG} ivmesinden aerodinamik etkiler sonucunda oluşan \vec{a}_{aero} ivmesinin arındırılmasıyla elde edildiği için \vec{a}_{aero} içerisinde bulunan ve mühimmatın hız vektörüyle aynı doğrultuda olan veya aynı doğrultuda bileşenleri bulunan sürüklenme kuvveti, yerçekimi ivmesi gibi etkileri barındırmaktadır. Bu nedenle kontrol birimi tarafından $\vec{a}_{Gereken}$ ivmesinin mühimmatın hız vektörüne dik olan bileşeni tespit edilmeli ve bu ivme mühimmata uygulanmalıdır. $\vec{a}_{Gereken}$ ivmesinin mühimmata dik bileşenini bulmak için daha öncede uygulanmış olan hız vektörüne paralel bileşenini tespit ederek bu bileşen üzerinden dik bileşeni hesaplama yöntemi uygulanacaktır. Eşitlik (35) ve (36) ile $\vec{a}_{Gereken}$ ivmesinin mühimmatın hız vektörüne paralel bileşeni tespit edilmiştir.

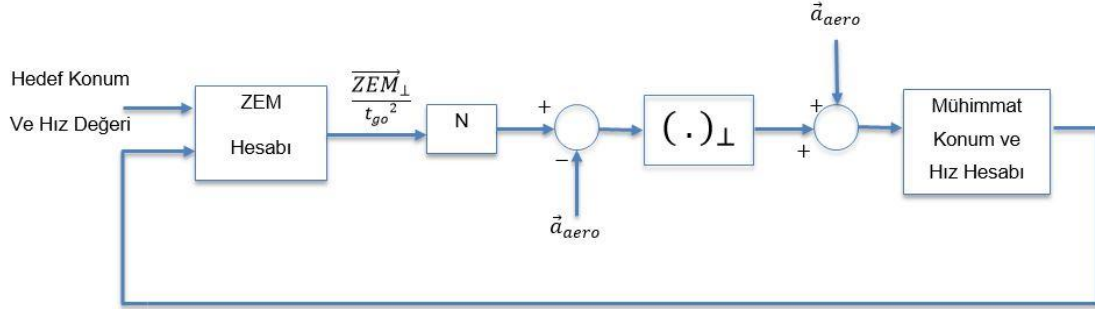
$$\vec{u}_{hız} = \vec{v} / \|\vec{v}\| \quad (35)$$

$$\vec{a}_{Gereken,\parallel} = \frac{\text{dot}(\vec{a}_{Gereken}, \vec{v})}{\|\vec{v}\|} \vec{u}_{hız} \quad (36)$$

Eşitlik (35) ile hız vektörünün birim vektörü $\vec{u}_{hız}$ hesaplanmıştır. Eşitlik (36) ile $\vec{a}_{Gereken}$ vektörü ile \vec{v} vektörünün iç çarpımları \vec{v} vektörünün büyüklüğüne bölünmüştür. Bu sayede $\vec{a}_{Gereken}$ vektörünün \vec{v} vektörü yönündeki bileşenin büyüklüğü elde edilmiştir. $\vec{a}_{Gereken}$ vektörünün hız vektörü yönündeki bileşeninin büyüklüğü $\vec{u}_{hız}$ birim vektörü ile çarpılarak $\vec{a}_{Gereken}$ vektörünün \vec{v} vektörüne paralel bileşeni $\vec{a}_{Gereken,\parallel}$ hesaplanmıştır. $\vec{a}_{Gereken}$ vektörünün mühimmatın hız vektörüne dik bileşeni $\vec{a}_{Gereken}$ vektörünün \vec{v} vektörüne paralel bileşeni $\vec{a}_{Gereken,\parallel}$ elimine edilerek bulunacaktır. İlgili işlem Eşitlik (37) ile ifade edilmiştir.

$$\vec{a}_{Gereken,\perp} = \vec{a}_{Gereken} - \vec{a}_{Gereken,\parallel} \quad (37)$$

Eşitlik (37) ile elde edilen $\vec{a}_{Gereken,\perp}$ ivmesinin nasıl hesaplandığını açıklayan güdüm ve kontrol blok diyagramı Şekil 3.11. ile verilmiştir.



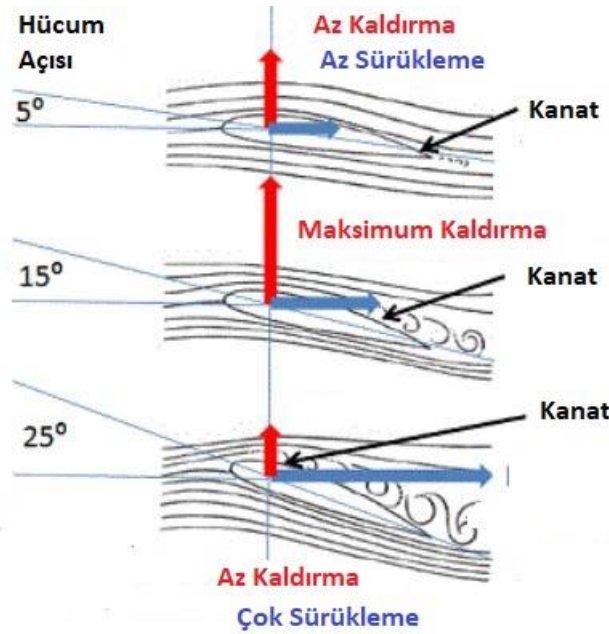
Şekil 3.11. Güdüm ve Kontrol Blok Diyagramı

Güdüm birimi tarafından hesaplanan komuta ivmesi \vec{a}_{OSG} kontrol birimi tarafından referans alınarak, bu ivmenin mühimmata sağlanabilmesi için $\vec{a}_{Gereken,\perp}$ ivmesi mühimmatın hız vektörüne dik olarak uygulanacaktır.

Kontrol birimi $\vec{a}_{Gereken,\perp}$ ivmesini kontrol yüzeylerini hareket ettirerek sağlayacaktır. Kontrol yüzeylerinin pozisyonlarını değiştirmesi sonucunda mühimmat üzerinde oluşan hava akışı değişecek ve bu değişim sonucunda mühimmat üzerinde oluşacak aerodinamik kuvvetler $\vec{a}_{Gereken,\perp}$ ivmesinin mühimmata etki etmesini sağlayacaklardır. Kontrol yüzeylerinin hareketi sonucu hava akışının değişmesi mühimmatı güden ivmeyi oluştururken mühimmatın aerodinamik karakteristiğini de değiştirecektir. Kontrol yüzeylerinin pozisyon değişikliği mühimmata etkiyecek ekstra bir sürükleme kuvvetinin oluşmasına neden olacaktır. Bu ekstra kuvvet mühimmatın üzerine etkiyecek bileşke ivmeyi değiştireceği için mühimmat yörüngesini de değiştirecektir. Bu nedenle bu etkinin de modellenmesi gerekmektedir. Kanatçık pozisyon değişikliği sonucunda oluşacak olan ekstra sürükleme kuvveti kaldırma sürükleme oranı kullanılarak modellenecektir.

Aerodinamik olarak kaldırma kuvveti üretmenin bir bedeli vardır. Bu bedel katlanılması gereken sürükleme kuvvetidir. Bu durum ‘‘Drag due to Lift’’ olarak adlandırılır. ‘‘Drag due to Lift’’ çok geniş bir kavramdır ve içerisinde kaldırma kuvvetinin değişmesiyle

oluşan bütün sürüklenme kuvveti etkilerini barındırır [29]. Sürüklenme kuvveti iki temel fenomene bağlıdır. Bunların birincisi viskozite ve yüzey sürtünmesi gibi sebeplerle oluşan sürüklenme kuvvetidir, ikincisiyse kaldırma kuvveti sebebiyle oluşan ekstra sürüklenme kuvvetidir [30]. Bu bağlamda mühimmata etki edecek Eşitlik (8) ile hesaplanan sürüklenme kuvveti $\vec{D}\vec{F}$ 'nin yanında, mühimmata etki ettirilecek ekstra kaldırma kuvveti sonucunda da mühimmata sürüklenme kuvveti etki edecektir. Mühimmata etki edecek kaldırma kuvveti kontrol yüzeyleri sonucunda oluşacak hız vektörüne dik $\vec{a}_{Gereken,\perp}$ ivmesini oluşturan kaldırma kuvvetidir. Bu kuvvet mühimmatın irtifasını yükseltmeye çalışıyorsa bu durumun ekstra bir sürüklenme etkisi olması gerekir. Bu etki kaldırma sürüklenme oranına göre belirlenecektir. Mühimmat üstüne etki edecek olan ekstra kaldırma kuvveti kaldırma sürüklenme oranına göre belirlenecek seviyede bir sürüklenme kuvveti oluşturacaktır. Şekil 3.12 ile hücum açısı yani kanat pozisyon değişikliğinin oluşturduğu kaldırma ve sürüklenme etkileri gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Kanat Pozisyon Değişikliğinin Kaldırma ve Sürüklenme Kuvvetlerine Etkisi [31]

Güdümlü Mühimmat Yörünge Modeli dahilinde benzetimi yapılacak olan güdümlü mühimmatın şekli ve kanatçık hareketleri simetrik kabul edilmiştir. Bu şartlar altında kanatçıklar tarafından oluşturulan hareketin kaldırma kuvveti, yerçekimi, pozitif sapma

veya negatif sapma eksenlerinden bağımsız olarak mühimmat üzerinde ekstra bir sürüklenme kuvveti oluşturacağı kabul edilmektedir. Bu kabul doğrultusunda kanatçıklar tarafından oluşturulacak olan $\vec{a}_{Gereken,\perp}$ ivmesi kaldırma kuvveti sonucunda oluşacak ivme olarak modellenecektir. Kanatçık hareketi sonucunda oluşacak $\vec{a}_{Gereken,\perp}$ ivmesinin mühimmat üzerinde oluşturacağı ekstra sürüklenme kuvveti Eşitlik (38) ile tanımlanmıştır.

$$\overline{D\vec{F}}_{L/D} = (m\vec{a}_{Gereken,\perp})/(L/D) \quad (38)$$

Eşitlik (38) ile belirtilen L/D kaldırma sürüklenme oranıdır. $\vec{a}_{Gereken,\perp}$ ivmesinin mühimmat kütlesi ile çarpılmasıyla elde edilen kuvvet kaldırma kuvveti olarak modellenen kuvvettir. Kanatçıklar tarafından oluşturulan ekstra kuvvetin L/D 'ye bölünmesiyle "Drag due to Lift" sürüklenme kuvveti $\overline{D\vec{F}}_{L/D}$ hesaplanmıştır.

L/D kaldırma sürüklenme oranı davranışı mühimmatın mach değerine göre değişiklik göstermektedir. Gülümlü Mühimmat Yörünge Modeli kapsamında mühimmatın mach değeri 1' in altındayken, yani mühimmat ses altı hızlarda hareket ederken L/D kaldırma sürüklenme oranı Eşitlik (39)' da belirtildiği gibi hesaplanacaktır.

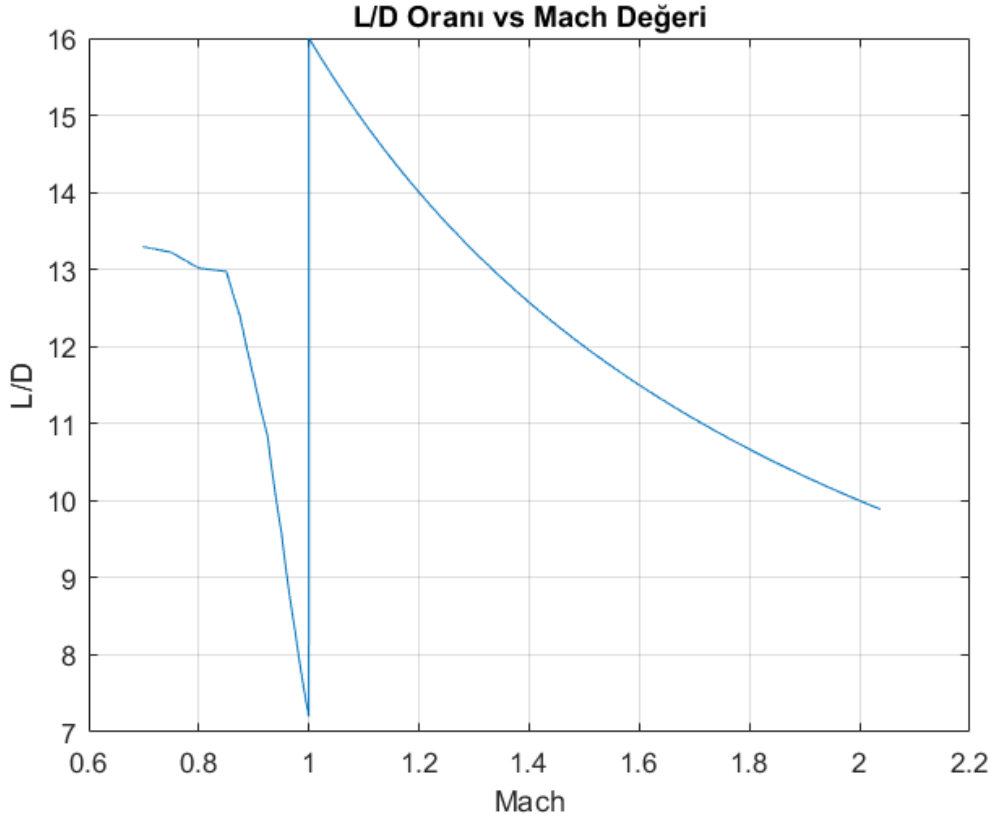
$$L/D = C_{La}/C_{D0} \quad (39)$$

Eşitlik (39)' da belirtilen C_{La} ve C_{D0} değerleri mühimmatın aerodinamik karakteristiğini sembolize eden katsayılarıdır. Bu katsayılar sırasıyla doğrusal kaldırma kuvveti katsayısı ve sıfır sapma sürüklenme kuvveti katsayısı olarak adlandırılırlar. C_{La} değerinin C_{D0} değerine oranı ise kaldırma sürüklenme oranı L/D ' yi verecektir.

L/D kaldırma sürüklenme oranının ses üstü hızlarda davranışıyla Dietrich Küchemann tarafından geliştirilen ampirik modele göre belirlenecektir. Ses üstü hızlardaki L/D Eşitlik (40) ile verilmiştir.

$$L/D = 4(mach + 3)/mach \quad (40)$$

Ses altı ve üstü hızlarda davranışı değişen L/D kaldırma sürüklenme oranının mühimmatın mach değerine göre bir uçuş sırasında ulaşacağı hızlar gözetilerek oluşturmuş grafiği Şekil 3.13 ile verilmiştir. Grafikten de gözlenebileceği üzere ses altı ve üstü hızlarda L/D oranının davranışının değişmesiyle grafikte bir sıçrama meydana gelmiştir.



Şekil 3.13. L/D Oranının Mühimmatın Mach Değerine Göre Değişimi

Kontrol yüzeyleri tarafından uygulanan kuvvetin kaldırma kuvveti olarak modellenmesiyle, mühimmatın mach değerine göre belirlenen L/D değeri için $\overline{DF}_{L/D}$ ‘‘Drag due to Lift’’ kuvveti ekstra sürüklenme kuvveti olarak mühimmata etki ettirilmelidir. Bu nedenle Güdümlü Mühimmat Yörünge Modeli için güdümlü uçuş safhasında mühimmatın üzerine etki edecek toplam sürüklenme kuvveti Eşitlik (41) ile verilmiştir.

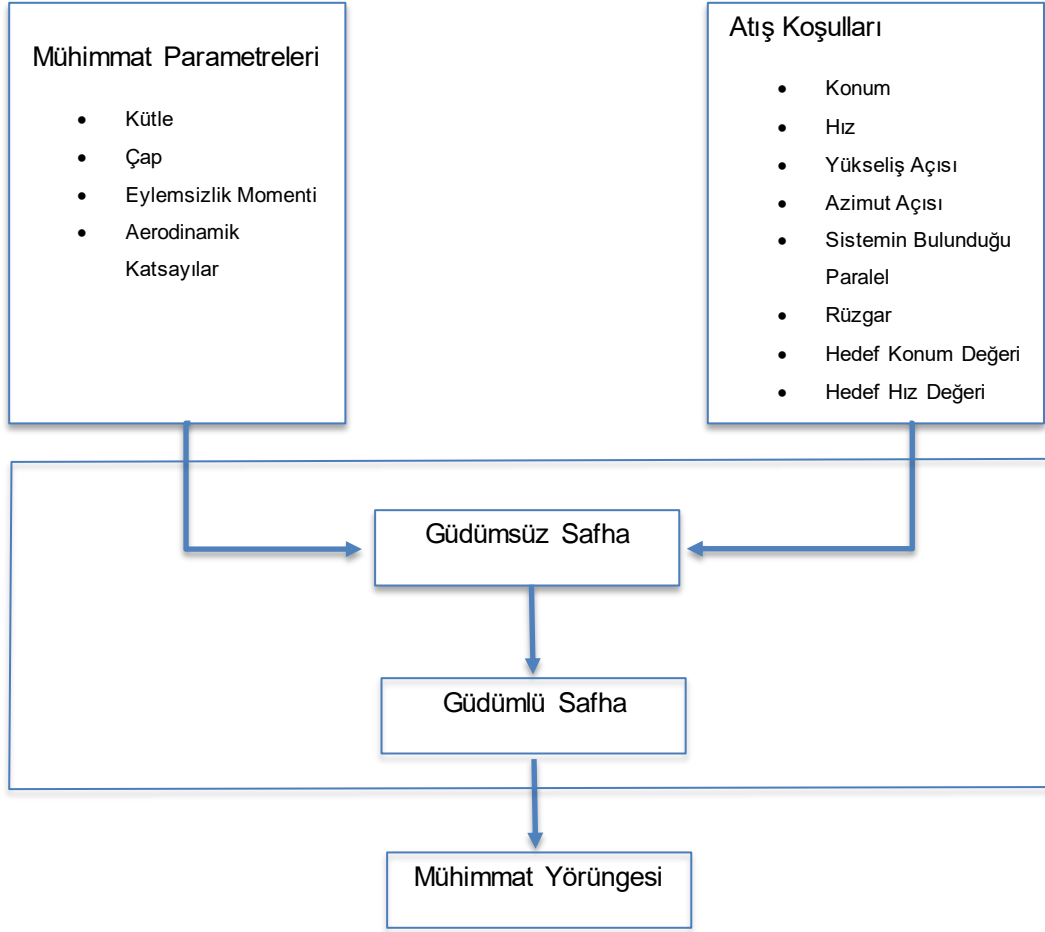
$$\overline{DF}_{Toplam} = \overline{DF} + \overline{DF}_{L/D} \quad (41)$$

Eşitlik (41) ile belirtilen güdümlü uçuş safhasında mühimmata etki edecek olan toplam sürüklenme kuvveti Eşitlik (8) ile hesaplanan sürüklenme kuvveti \overline{DF} ile kaldırma kuvveti olarak modellenen kontrol yüzeylerinin hareketi sonucu oluşan $\overline{DF}_{L/D}$ ' nin toplamına eşittir.

Toplam sürüklenme kuvvetinin de belirlenmesiyle birlikte kontrol biriminin işlevi ve çalışma mekanizması tam olarak işlenmiştir. Güdüm birimi tarafından hedefe ulaşmak için üretilen \vec{a}_{OSG} komuta ivmesinin mühimmata sağlanabilmesi amacıyla, kontrol birimi mühimmatın hız vektörüne dik $\vec{a}_{Gereken,\perp}$ ivmesini üretmektedir. Bu ivme üretilirken ekstra olarak $\overline{DF}_{L/D}$ sürüklenme kuvveti oluşmaktadır. Mühimmata kanatçık hareketi dışında etki eden ivme \vec{a}_{aero} , kontrol yüzeyleri tarafından oluşturulan $\vec{a}_{Gereken,\perp}$ ivmeleri ve $\overline{DF}_{L/D}$ kuvveti ile birlikte güdümlü mühimmat yörüngesi oluşturulacaktır.

3.2.3. Güdümlü Mühimmat Yörünge Modeli Şeması

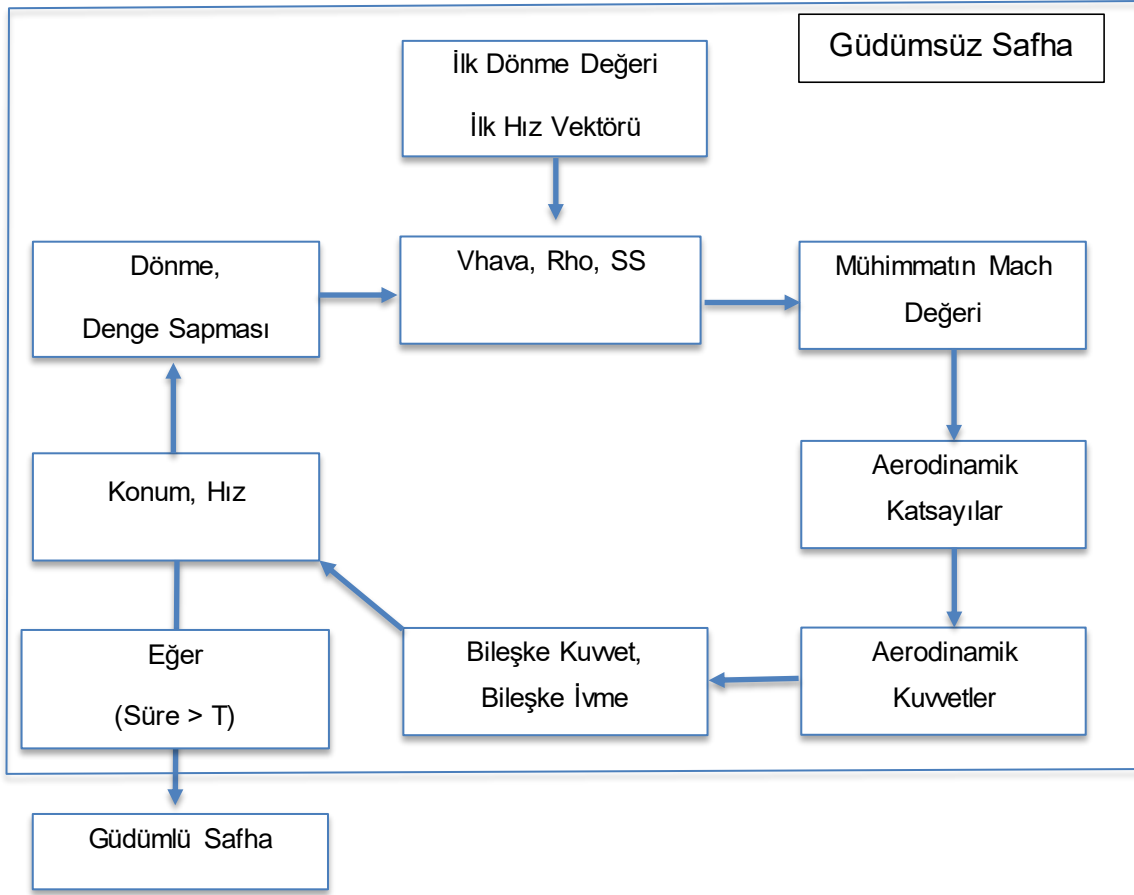
Güdümlü Mühimmat Yörünge Modeli'nin nasıl çalıştığını anlatan şema Şekil 3.14. ile verilmiştir.



Şekil 3.14. GÜDÜMLÜ MÜHİMMAT YÖRÜNGE MODELİ ŞEMASI

Güdümlü Mühimmat Yörünge Modeli Şekil 3.14. ile de belirtildiği gibi mühimmat parametreleri ve atış koşulları giriş değerlerini alarak çalışmaya başlar. Güdümlü Mühimmat Yörünge Modeli iki safhada çalışmaktadır. Bunlardan birincisi güdümsüz safhadır. Bu safha mühimmatın namlu ucundan çıkışından başlayarak güdüm ve kontrol birimlerinin aktif olduğu ana kadar devam etmektedir. Bu safhada mühimmat Güdümsüz Mühimmat Yörünge Modeli'nde olduğu gibi dönerek kararlılığa ulaşır ve aerodinamik kuvvetlerin etkisinde hareket eder. Bu safhanın süresi Güdümlü Mühimmat Yörünge Modeli benzetimi kapsamında T olarak belirlenmiştir. T süre sonra güdüm ve kontrol birimleri çalışmaya başlar ve güdümsüz safha son bulur. İkinci safha belirtildiği gibi güdümlü safhadır. Bu safhada kanatçıklar mühimmatın dönüşünü durdurur ve hareket ederek mühimmatı hedefe yönlendirir. Güdüm komutları doğrultusunda kontrol birimi tarafından üretilen ivmeler sonucunda mühimmat hedefi vurmaya çalışır. Mühimmatın

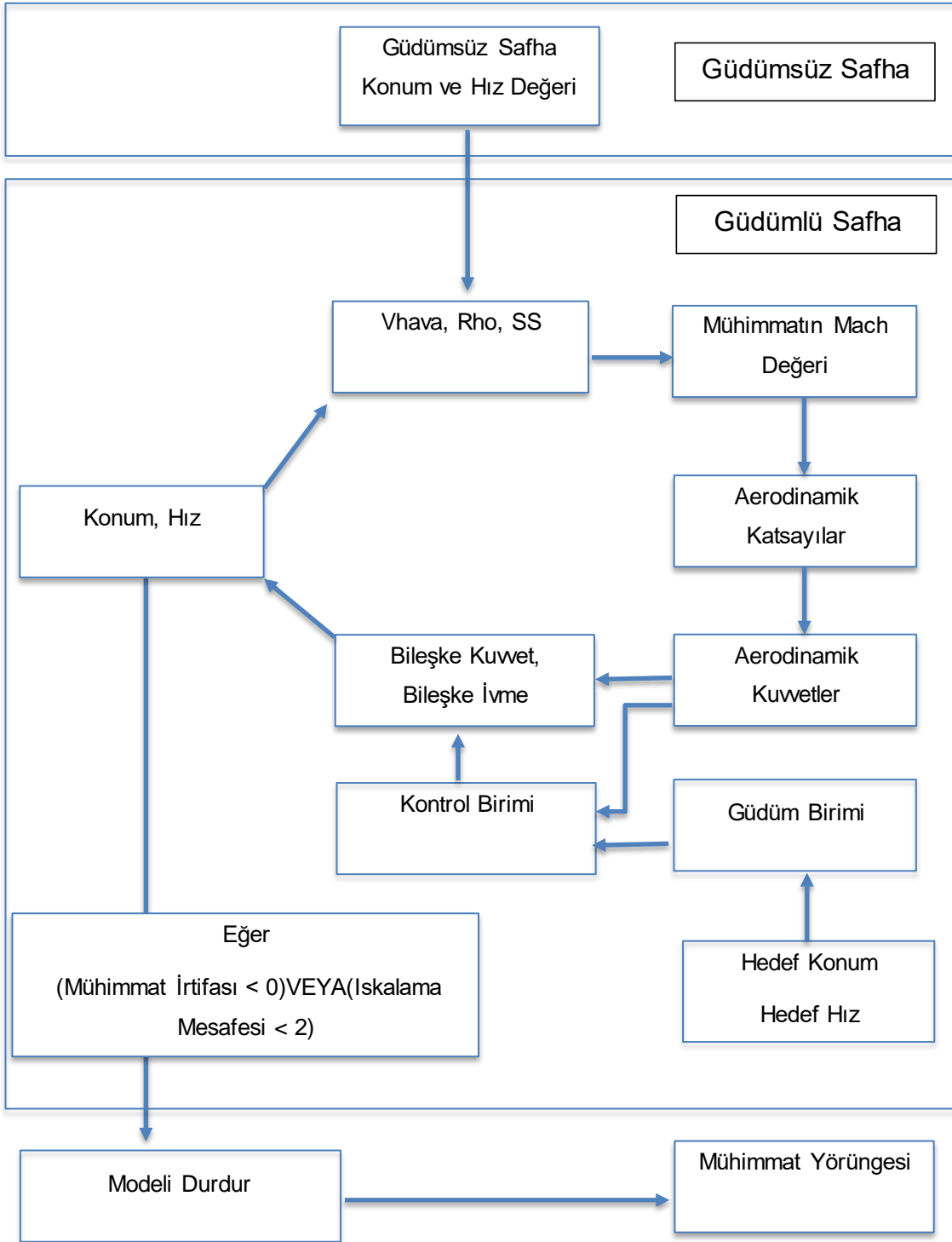
yüksekliği sıfır olduğunda bu safha son bulur ve benzetim tamamlanır. Şekil 3.15. ile güdümsüz safha görsel olarak açıklanmıştır.



Şekil 3.15. Güdümsüz Safha Şeması

Şekil 3.15. ile Güdümlü Mühimmat Yörünge Modeli benzetimi içerisinde mühimmatın güdümsüz olarak uçtuğu güdümsüz safha görsel olarak açıklanmıştır. Güdümsüz safha içerisinde ilk olarak giriş bilgilerine göre mühimmatın namludan çıkış anı için Dönme değeri ve ilk hız vektörü tespit edilir. Böylece mühimmat yörüngesi için ilk konum ve hız vektörleri belirlenmiş olur. Rüzgar bilgisi kullanılarak mühimmatın havaya göre hız vektörü \vec{v}_{hava} üretilir. Konum bilgisi kullanılarak mühimmatın bulunduğu yükseklik için Standart Atmosfer Modelinin söylediği hava yoğunluğu (ρ) ve ses hızı (SS) değerleri tespit edilir. \vec{v}_{hava} hız değeri ve SS kullanılarak mühimmatın mach hızı hesaplanır. Hesaplanan mach değerine göre aerodinamik tablolardan ilgili mach değeri için mühimmatın aerodinamik katsayıları alınır. Değiştirilmiş Nokta Kütle Modeline göre mühimmata etki edecek aerodinamik kuvvetler hesaplanır. Bu kuvvetler sonucunda mühimmata etkiyen anlık bileşke kuvvet ve bileşke ivme değeri tespit edilir. Bileşke

ivmeye göre bir zaman aralığı sonra mühimmatın sahip olacağı hız vektörü ve bu vektöre göre mühimmatın bulunacağı yeni konum değeri hesaplanır. Yeni konum ve hız vektörlerine göre bu hareket sırasında mühimmatın Dönme ve Denge Sapması değerlerindeki değişim hesaplanır. Böylece mühimmat aerodinamik etkiler sonucunda yeni bir duruma geçmiştir. İlgili tüm parametreler bu doğrultuda güncellenir. Aynı işlemler tekrarlanarak döngü devam ettirilir. T süre boyunca her bir zaman aralığı için yeni bir konum ve hız değeri hesaplanır. T süre sonra güdümlü safha başlayacaktır. Mühimmatın konum ve hız değeri güdümlü safha içerisinde güdüm ve kontrol birimlerinin çalışma prensipleri doğrultusunda güncellenmeye devam ettirilecektir. Şekil 3.16. ile güdümlü safha görsel olarak açıklanmıştır.



Şekil 3.16. Güdümlü Safha Şeması

Şekil 3.16. ile Güdümlü Mühimmat Yörünge Modeli benzetimi içerisinde mühimmatın güdümlü olarak hareket ettiği güdümlü safha görsel olarak betimlenmiştir. Güdümlü safha mühimmatın güdümsüz safha içerisinde son bulunduğu konum ve hız değerinde başlar. Güdümün başlamasıyla birlikte kanatçıklar hareket etmeye başladığı için

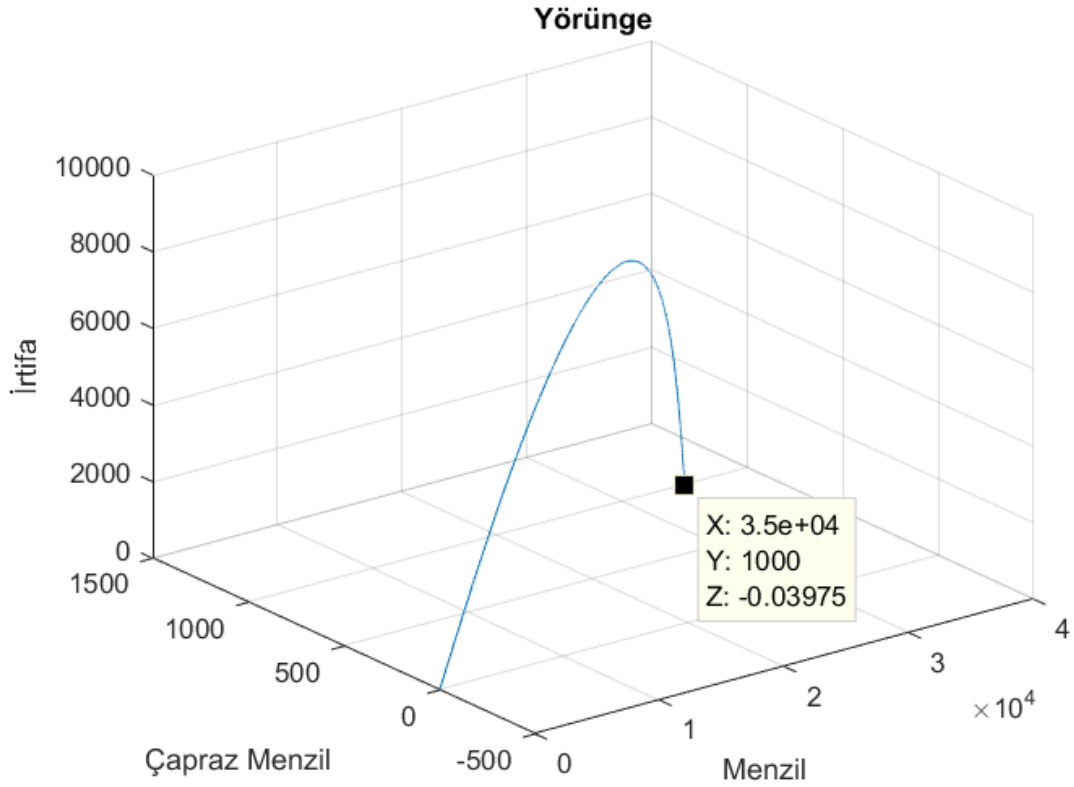
kanatçıklar mühimmatın dönmesini engeller. Buna bağlı olarak mühimmatın Dönme ve Denge Sapması değeri sıfır olur. Mühimmatın hız değeri ve rüzgar bilgisi kullanılarak mühimmatın havaya göre hızı \vec{v}_{hava} vektörünün üretilmesiyle döngü başlar. Güdümsüz safhada olduğu gibi hava yoğunluğu (ρ), ses hızı (SS), mühimmatın mach değeri, mühimmatın aerodinamik katsayıları ve Değiştirilmiş Nokta Kütle Modeline göre mühimmata etki eden aerodinamik kuvvetler hesaplanır. Denge Sapması sıfır olduğu için güdümsüz safhadan farklı olarak Magnus kuvveti sıfır olacaktır. Kaldırma ve Sürüklenme Kuvvetleri içerisindeki Denge Sapmasına bağlı bileşenler de sıfırlanacaktır. Aerodinamik kuvvetler hesaplandıktan sonra bunlar sonucunda oluşacak olan ivme \vec{a}_{aero} kontrol birimi içerisinde üretilir. Güdüm birimi hedef konum ve hız değerleri ile mühimmat konum ve hız değerlerini kullanarak hedefe ulaşmak için gerekli olan \vec{a}_{OSG} komuta ivmesini üretir ve bunu kontrol birimine gönderir. Kontrol birimi \vec{a}_{OSG} ivmesini referans ivme olarak alır ve referans ivmeyi yakalayabilmek için kanatçıklar hareket etmese dahi mühimmata etki edecek olan \vec{a}_{aero} ivmesini kullanarak $\vec{a}_{Gereken,\perp}$ ivmesini mühimmatın hız vektörüne dik olarak uygular. Bu ivmenin uygulanmasıyla birlikte mühimmata ekstra sürüklenme kuvveti $\overline{DF}_{L/D}$ etki edecektir. \vec{a}_{aero} , $\vec{a}_{Gereken,\perp}$ ivmeleri ve $\overline{DF}_{L/D}$ kuvveti sonucunda mühimmata etki edecek bileşke ivme vektörü hesaplanır. Bu bileşke ivme vektörüne göre mühimmatın hız vektörü, hız vektörüne göre de konum vektörü güncellenir. Güncellenen konum ve hız vektörlerine göre döngü tekrar ettirilerek benzetim koşuturulur. Kurulan döngünün tekrarlayan bir şekilde çalışması sonucunda mühimmatın konumunun güncellenmesiyle birlikte mühimmat yörüngesi oluşacaktır. Güdümlü safha mühimmat irtifa değeri sıfır olunca veya mühimmat ile hedef arasındaki ıskalama mesafesi 2 metreden az olunca son bulacaktır. Bu noktada Güdümlü Mühimmat Yörünge Modeli benzetimi sonlandırılır ve mühimmat konum bilgilerinin depolandığı yörünge vektörü Güdümlü Mühimmat Yörünge Modeli'nin çıktısı olarak üretilir. Yörünge vektörünün son elemanı mühimmatın yeryüzünde vurduğu noktadır.

Çizelge 3.2 ile giriş koşulları belirtilen güdümsüz mühimmat atışı sonucunda mühimmatın izlediği yörünge Şekil 3.6 ile gösterilmiştir. Giriş koşulları sabit tutularak aynı fiziksel özelliklere sahip güdümlü 155 mm topçu mermisi güdümsüz merminin balistik olarak düştüğü noktadan başka bir hedef seçilerek fırlatılacak ve izlediği yörünge incelenecektir. Güdümsüz topçu mermisi menzilde 24012 metre, çapraz menzilde 1208 metre mesafe kat etmiştir. Güdümlü mermi için menzilde 35000 metre ve çapraz

menzilde 1000 metre hedef olarak seçilmiştir. Çizelge 3.3 ile güdümlü mühimmat giriş koşulları belirtilen atışın yörüngesi Şekil 3.17 ile gösterilecektir.

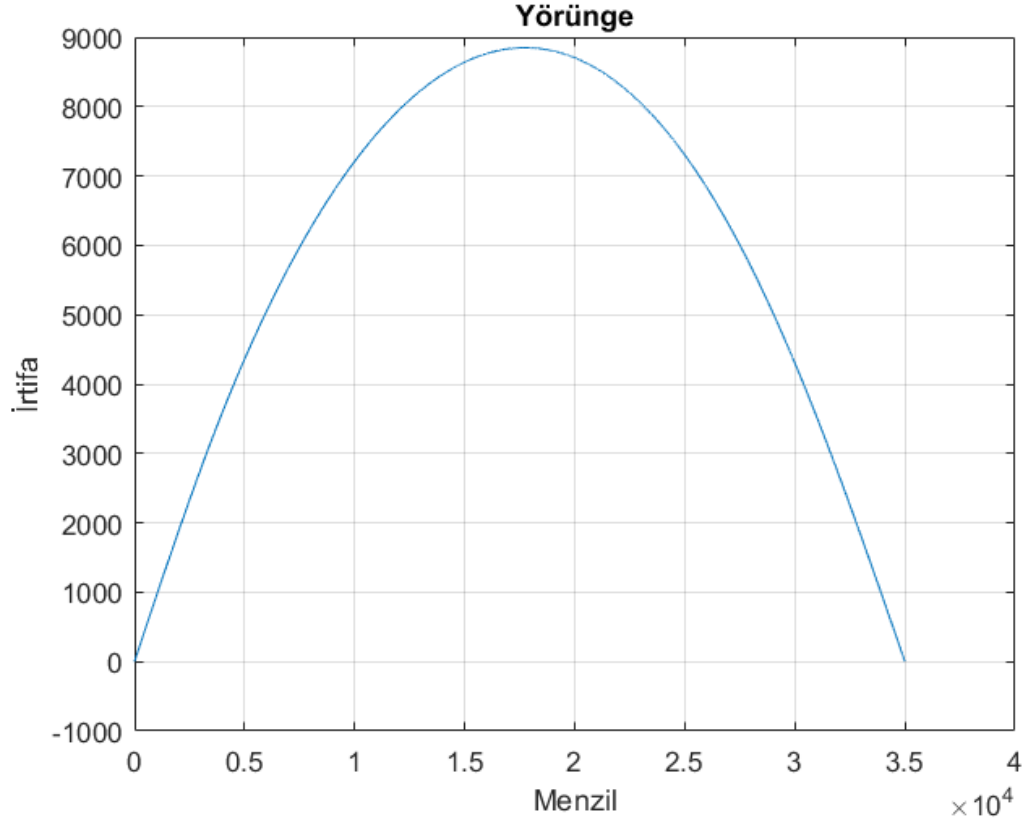
Çizelge 3.3. 155 mm Güdümlü Topçu Mühimmatı Giriş Koşulları (Uzak Menzil)

Mühimmat Parametreleri	
Kütle	43.096 kg
Çap	0.155 m
Eylemsizlik Momenti	0.1426 kg.m ²
Aerodinamik Katsayılar	Çizelge 3.1 ile belirtilen 155 mm topçu mermisi katsayıları
Atış Koşulları	
Konum	Orijin (0,0,0)
Namlu Çıkış Hızı	900 m/s
Yükseliş Açısı	44 derece
Azimet Açısı	0 derece
Topçu Sisteminin Bulunduğu Paralel	39 derece
Rüzgar	Sıfır Rüzgar
Hedef Konum Değeri	Menzil: 35000 metre Çapraz Menzil: 1000 metre
Hedef Hız Değeri	0 (Sabit Hedef)



Şekil 3.17. Çizelge 3.3 ile Giriş Koşulları Belirlenen Gdümlü Mühimmat Yörüngesi

Çizelge 3.3 ile giriş koşulları belirlenen güdümlü topçu mermisi atışı için menzilde 35000 metre ve çapraz menzilde 1000 metre uzaklıkta bulunan bir hedef belirlenmiştir. Aynı giriş koşulları altında güdümsüz topçu mermisi menzilde 24012 metre, çapraz menzilde 1208 metre mesafe kat ederken, güdümlü mermi belirlenen hedefi 0.06 metre ıskalama mesafesi ile vurmuştur. Gdümlü Mühimmat Yörünge Modeli kullanılarak oluşturulan yörünge Şekil 3.17 ile gösterilmiştir. Şekil 3.18 ile yörünge irtifa ve menzil eksenleri kullanılarak 2 boyutta gösterilmiştir.



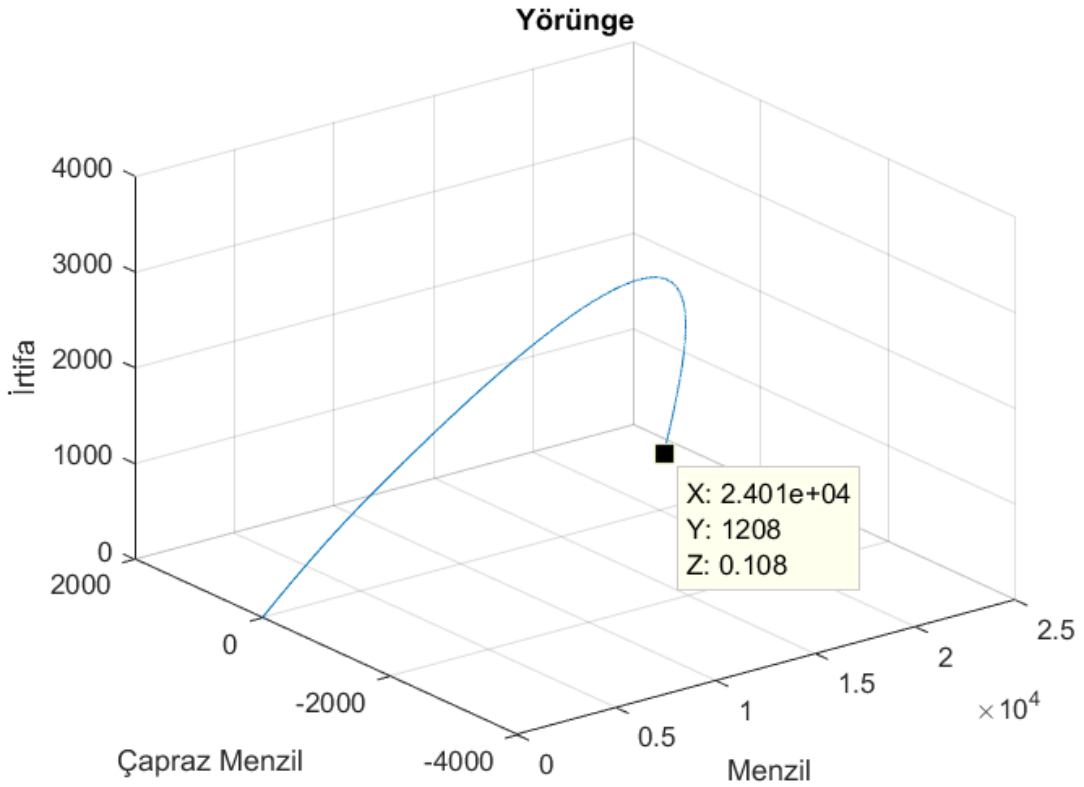
Şekil 3.18. Çizelge 3.3 ile Giriş Koşulları Belirlenen Gdümlü Mühimmat Yörüngesi (İrtifa ve Menzil Eksenleri)

Çizelge 3.2 ile giriş koşulları belirlenen güdümsüz merminin düştüğü noktanın hedef olarak belirlendiği ancak farklı atış koşulları kullanılan bir güdümlü mermi atışı incelenecektir. Çizelge 3.4 ile giriş koşulları belirlenen güdümlü mermi atışının Güdümlü Mühimmat Yörünge Modeli ile oluşturulmuş yörüngesi Şekil 3.19 ile gösterilecektir.

Çizelge 3.4. 155 mm Güdümlü Topçu Mühimmatı Giriş Koşulları (Düşük Hız)

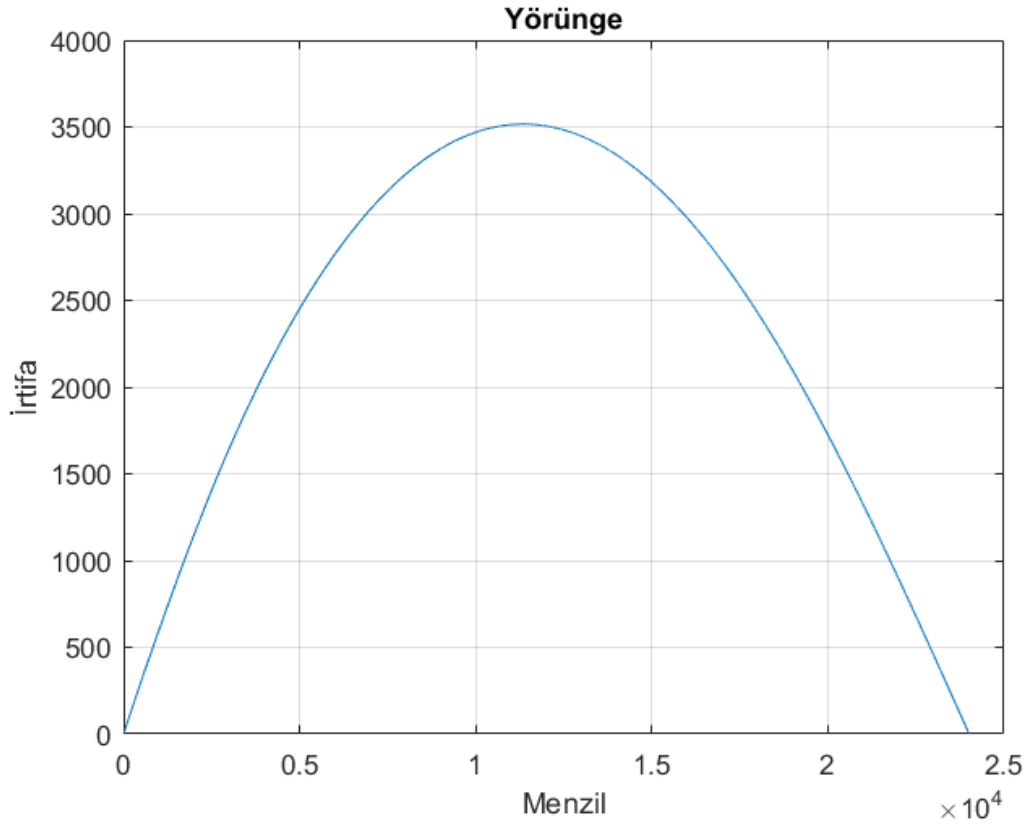
Mühimmat Parametreleri	
Kütle	43.096 kg
Çap	0.155 m
Eylemsizlik Momenti	0.1426 kg.m ²

Aerodinamik Katsayılar	Çizelge 3.1 ile belirtilen 155 mm topçu mermisi katsayıları
Atış Koşulları	
Konum	Orijin (0,0,0)
Namlu Çıkış Hızı	650 m/s
Yükseliş Açısı	30 derece
Azimut Açısı	-20 derece
Topçu Sisteminin Bulunduğu Paralel	39 derece
Rüzgar	Sıfır Rüzgar
Hedef Konum Değeri	Menzil: 24012 metre Çapraz Menzil: 1208 metre
Hedef Hız Değeri	0 (Sabit Hedef)



Şekil 3.19. Çizelge 3.4 ile Giriş Koşulları Belirlenen Gdümlü Mühimmat Yörüngesi

Çizelge 3.4 ile giriş koşulları belirlenen güdümlü topçu mermisi atışı için menzilde 24012 metre ve çapraz menzilde 1208 metre uzaklıkta bulunan bir hedef belirlenmiştir. Farklı giriş koşulları altında güdümsüz topçu mermisinin çarptığı nokta olan menzilde 24012 metre, çapraz menzilde 1208 metre mesafeyi hedef alan güdümlü mermi belirlenen hedefi 0.28 metre ıskalama mesafesi ile vurmuştur. Güdümlü Mühimmat Yörünge Modeli kullanılarak oluşturulan yörünge Şekil 3.19 ile gösterilmiştir. Şekil 3.20 ile yörünge irtifa ve menzil eksenleri kullanılarak 2 boyutta gösterilmiştir.



Şekil 3.20. Çizelge 3.4 ile Giriş Koşulları Belirlenen Güdümlü Mühimmat Yörüngesi (İrtifa ve Menzil Eksenleri)

Bu benzetimler mühimmata güdüm-kontrol döngüsü eklemenin net bir biçimde menzil artırıcı bir yan etkisi olduğunu da göstermektedir. Ayrıca giriş koşulları ile de vurgulandığı üzere, geliştirilen güdümlü/güdümsüz topçu mühimmatı modelleri kütle, eylemsizlik momenti ve aerodinamik parametreleri tanımlı herhangi bir topçu mühimmatı için de kullanılabilir niteliktedir.

4. VURUŞ PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Hedefe atılacak bir mühimmatın vuruş hassasiyetinin hesaplanması hedefin imhası açısından kritik bir rol oynamaktadır. Metropolitan yerleşime alanına atılacak olan nükleer başlıklı bir silah sisteminin vuruş hassasiyetinin kilometreler mertebesinde olması yeterli olacakken, zırhlı bir aracın imha edilebilmesi için zırh delici bir mühimmatın hedefe tam olarak isabet etmesi gerekmektedir [32]. Bu nedenle hedefin imha edilebilmesi için belirlenen hedefe atılmak üzere seçilen silah sisteminin vuruş hassasiyetinin bilinmesi gerekmektedir. Vuruş hassasiyeti silah sisteminin hedefe ulaşma kabiliyetinin nicel ölçüsü olarak tanımlanabilir. Vuruş hassasiyeti mühimmat atışları sırasında ortaya çıkan hataların istatistiki olarak incelenmesi ile ifade edilir [33]. Bahsedilen hatalar hedef ile mühimmat çarpma noktası arasındaki ıskalama mesafesidir. Atışlar sırasında oluşan ıskalama mesafesinin kaynağı atış hesaplarında kullanılan parametrelerde bulunan nominal değerle gerçek değer arasındaki farklardır. Güdüksüz mühimmat atışları sırasında yapılan balistik hesap tek çözümlü bir problem olduğu için mühimmat parametreleri veya atış parametrelerinin beklenilenden farklı olması balistik çözümün farklı bir noktada oluşmasına ve hedef ile mühimmat çarpma noktası arasında ıskalama mesafesi bulunmasına neden olur. 50 kg olduğu düşünülen ve bu kütle değerine göre atış hesapları yapılan bir mühimmat üretim hataları sebebiyle 49.8 kg olarak üretilmişse, hesaplanan noktaya çarpmayacaktır ve hedefi vuramayacaktır. Gülümlü mühimmatlar bu tarz hataları güdüm ve kontrol mekanizmaları sayesinde tolere edebilseler dahi onların izledikleri yörünge de mühimmat parametrelerine ve atış koşullarına bağlıdır. Vuruş hassasiyetinin belirlenebilmesi için silah sistemlerinin içerdiği hataların ve bu hataları tolere edebilme kabiliyetlerinin incelenmesi gerekmektedir. Bu inceleme benzetim ortamlarında yapılır. Ortaya çıkan sonuçlar gerçek atış testleriyle doğrulandıktan sonra mühimmatların gerçekçi vuruş hassasiyetleri belirlenmiş olur.

Bu çalışma kapsamında üretilen Gülümsüz ve Gülümlü Mühimmat Yörünge Modelleri kullanılarak mühimmat vuruş hassasiyetleri incelenecektir. Silah sistemlerine etki edecek hatalar belirlenecek ve bu hatalar benzetim modellerine dahil edilecektir. Sonrasında yapılacak olan Monte Carlo Benzetimleri ile mühimmat çarpma noktalarının dağılımları elde edilecek ve bu dağılımlar incelenecektir. İncelemeler güdümsüz ve güdümlü

mühimmatlar için farklı koşullarda tekrar edilecek ve mühimmat performansları tespit edilecektir.

4.1. Hata Kaynakları ve Etkileri

Mühimmat yörüngeleri kütle, çap ve aerodinamik karakteristik gibi mühimmat parametreleri ile hız, atış açısı, ve silah sisteminin pozisyonu gibi atış parametrelerine bağlıdır. Bu parametrelerdeki değişiklikler mühimmat çarpma noktasını değiştirebilirler. Güdüksüz mühimmatlar tek bir balistik çözümü olan atış hesapları yapılarak hedefe gönderildikleri için bu parametrelerdeki en ufak değişikliğe duyarlıdırlar. Parametrelerin değişmesi doğrudan çarpma noktasının değişeceği anlamına gelmektedir. Güdümlü mühimmat yörüngeleri mühimmat ve atış parametrelerine bağlı olarak değişirken, mühimmatlar güdüm ve kontrol sistemleri sayesinde mühimmat parametreleri ve atış koşullarındaki farkları tolere edebilir ve değişiklikleri bir noktaya kadar mühimmat çarpma noktasına yansıtmazlar. Belirli seviyedeki değişikliklerse güdüm ve kontrol sisteminin sağladığı kabiliyetlerle tolere edilebilir noktaları aşar ve mühimmatın hedefi vurmasının önüne geçer. Bu nedenle mühimmat parametreleri ve atış koşullarındaki hatalar mühimmat çarpma noktasında hata oluşumuna neden olmaktadır. Bu bölümde bu hatalar ve mühimmat çarpma noktalarına etkileri incelenecektir.

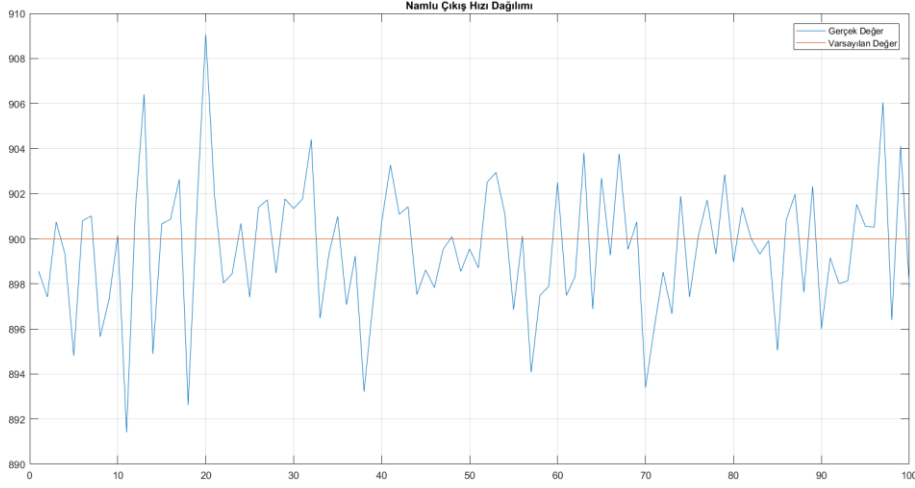
Güdüksüz ve Güdümlü Yörünge Modelleri'nde tanımlandığı gibi modeller hedef konum ve hedef hız değerleri dışında aynı giriş koşullarını kullanmaktadır. Modeller içerisinde kullanılan giriş koşullarının örnekleri Çizelge 3.2 ve 3.3 ile belirtilmiştir. Mühimmat yörüngeleri oluşturulurken kütle, çap, eylemsizlik momenti, aerodinamik katsayılar, silah sisteminin konumu, namlu çıkış hızı, namlu yükseliş açısı, namlu azimut açısı, silah sisteminin bulunduğu paralel ve rüzgar gibi parametreler kullanılmaktadır. Bu parametrelerin giriş değeri olarak yanlış seçilmesi mühimmatın çarpma noktasını etkilemektedir. Bu etkinin incelenmesi ve vuruş hassasiyet analizlerinin yapılabilmesi için hata kaynakları ve etkileri incelenecektir. Bu çalışma kapsamında örnek olarak namlu çıkış hızı, mühimmatın kütlesi, mühimmatın eylemsizlik momenti, namlu yükseliş açısı ve namlu azimut açısı olmak üzere beş parametrede oluşabilecek hatalar ve bu hataların çarpma noktalarına etkisi incelenmiştir.

Hata kaynakları olarak incelenecek parametreler için hata modeli üretilirken normal dağılım kullanılacaktır. Seçilen örneklem seti içerisinde her bir parametrenin hata modelinin dağılımı yörünge giriş koşulları ile belirlenen değeri ortalama değer olarak alan, seçilen parametre için özel olarak belirlenmiş hata payı çerçevesinde standart sapması olan bir normal dağılım olarak belirlenmiştir. Çizelge 4.1 hata kaynaklarını, hata kaynağının normal dağılım ortalama değerini, hata payını ve standart sapmasını göstermektedir.

Çizelge 4.1. Hata Kaynakları

Hata Kaynağı	Ortalama Değer	Hata Payı	Standart Sapma	Birim
Namlu Çıkış Hızı	Giriş Koşulu	0.01	$(\text{Giriş Koşulu} \cdot 0.01) / 3$	m/s
Kütle	Giriş Koşulu	0.01	$(\text{Giriş Koşulu} \cdot 0.01) / 3$	kg
Eylemsizlik Momenti	Giriş Koşulu	0.001	$(\text{Giriş Koşulu} \cdot 0.001) / 3$	kg.m ²
Yükseliş Açısı	Giriş Koşulu	0.0005	$(\text{Giriş Koşulu} \cdot 0.0005) / 3$	derece (°)
Azimet Açısı	Giriş Koşulu	0.001	$(45 \cdot 0.001) / 3$	derece (°)

Çizelge 4.1 ile belirtilen hata kaynakları seçilen giriş değerleri kullanılarak görsel olarak ifade edilecektir. Her grafikte dağılımın anlaşılır olarak gösterilebilmesi için 100 örnekli setler kullanılmıştır.

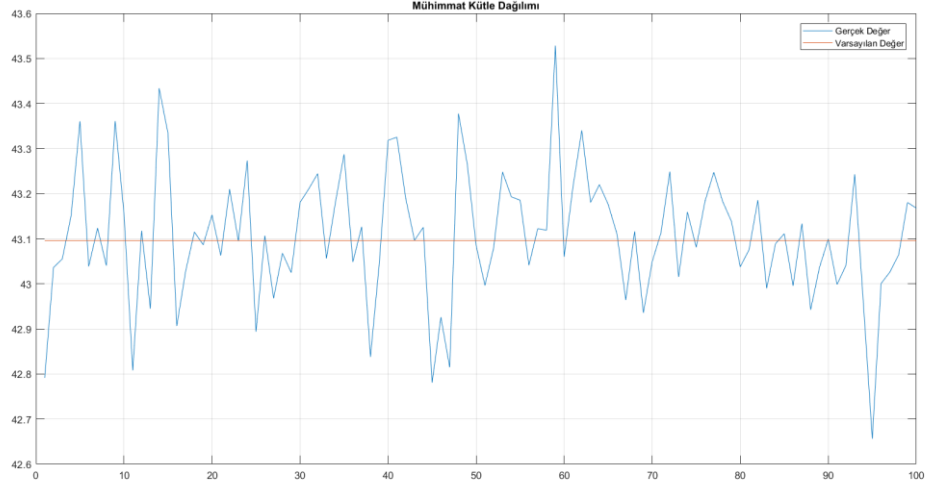


Şekil 4.1. Namlu Çıkış Hızı Normal Dağılımı

Şekil 4.1 ile 100 örnek için Namlu Çıkış Hızı Normal Dağılım grafiği gösterilmiştir. Seçilen namlu çıkış hızı 900 m/s' dir. Normal dağılım Eşitlik (42) ile belirtildiği gibi yapılan 100 atışın sonucunda oluşturulmuştur.

$$V_{Namlu} = V_{Namlu0} + V_{Namlu0} * \frac{0.01}{3} * randn(1) \quad (42)$$

Eşitlik (42) ile belirtilen V_{Namlu} rastgele yapılan bir atış sonucunda mühimmatın namludan çıkış hızını ifade etmektedir. V_{Namlu0} yapılan bir atış sırasında mühimmatın namludan çıkacağı varsayılan hızdır. Bu dağılım için seçilen değer 900 m/s' dir. Çizelge 4.1 ile belirtildiği gibi hata payı varsayılan değerlerin % 1' i olarak belirlenmiştir. $randn(1)$ ifadesi ise standart normal dağılım içerisinde ortalaması 0, varyansı 1 olan rastgele sayılar üreten bir fonksiyondur. Bu sayede topçu mermisin namludan çıkış hızını belirleyen barut miktarının her zaman aynı miktarda kullanılamaması sebebiyle oluşan hatalar normal dağılım ile modellenmiş olur.

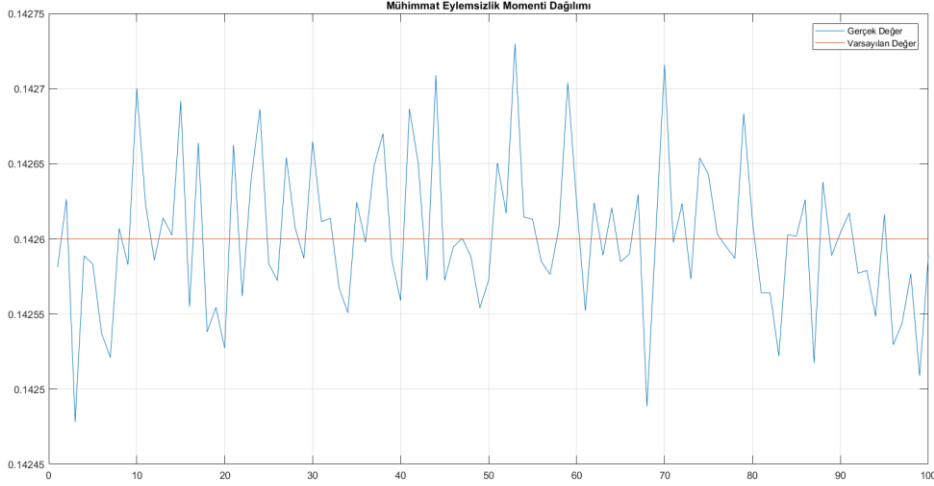


Şekil 4.2. Mühimmat Kütlesi Normal Dağılımı

Şekil 4.2 ile 100 örnek için Mühimmat Kütlesi Normal Dağılım grafiği gösterilmiştir. Seçilen kütle değeri 43.096 kg' dir. Normal dağılım Eşitlik (43) ile belirtildiği gibi yapılan 100 atış benzetimi için oluşturulmuştur.

$$m = m_0 + m_0 * \frac{0.01}{3} * randn(1) \quad (43)$$

Eşitlik (43) ile belirtilen m rastgele yapılan bir atış için mühimmat kütlesini ifade etmektedir. m_0 yapılan bir atış için mühimmatın kütlesinin nominal değeridir. Bu dağılım için seçilen değer 43.096 kg' dir. Çizelge 4.1 ile belirtildiği gibi hata payı varsayılan değerlerin % 1' i olarak belirlenmiştir. $randn(1)$ ifadesi ise standart normal dağılım içerisinde ortalaması 0, varyansı 1 olan rastgele sayılar üreten bir fonksiyondur. Bu sayede topçu mermisin üretimi sırasında oluşan hatalar normal dağılım ile modellenmiş olur.

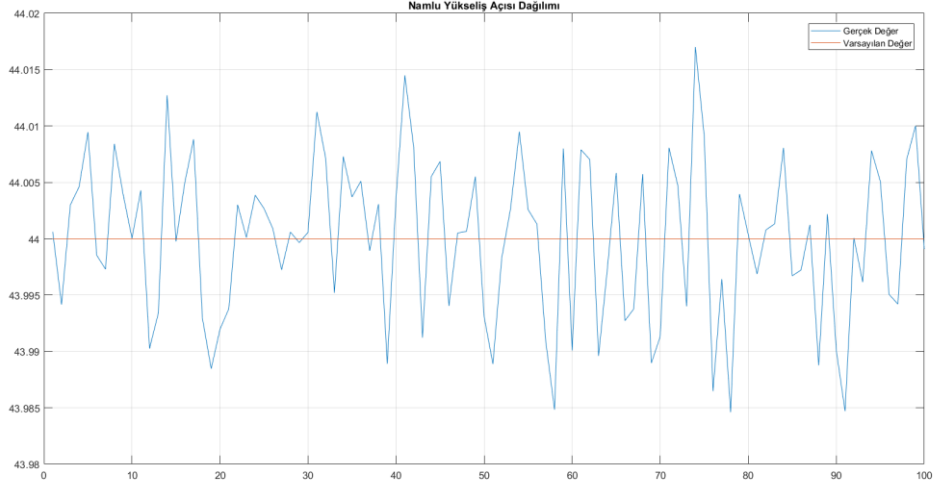


Şekil 4.3. Mühimmat Eylemsizlik Momenti Normal Dağılımı

Şekil 4.3 ile 100 örnek için Mühimmat Eylemsizlik Momenti Normal Dağılım grafiği gösterilmiştir. Seçilen eylemsizlik momenti değeri 0.1426 kg.m²' dir. Normal dağılım Eşitlik (44) ile belirtildiği gibi yapılan 100 atış için oluşturulmuştur.

$$I_x = I_{x0} + I_{x0} * \frac{0.001}{3} * randn(1) \quad (44)$$

Eşitlik (44) ile belirtilen I_x rastgele yapılan bir atış için mühimmat eylemsizlik momentini ifade etmektedir. I_{x0} yapılan bir atış için mühimmatın eylemsizlik momentinin varsayılan değeridir. Bu dağılım için seçilen değer 0.1496 kg.m² dir. Çizelge 4.1 ile belirtildiği gibi hata payı varsayılan değer % 0.1' i olarak belirlenmiştir. $randn(1)$ ifadesi ise standart normal dağılım içerisinde ortalaması 0, varyansı 1 olan rastgele sayılar üreten bir fonksiyondur. Bu sayede topçu mermisin üretimi sırasında oluşan hatalar normal dağılım ile modellenmiş olur.

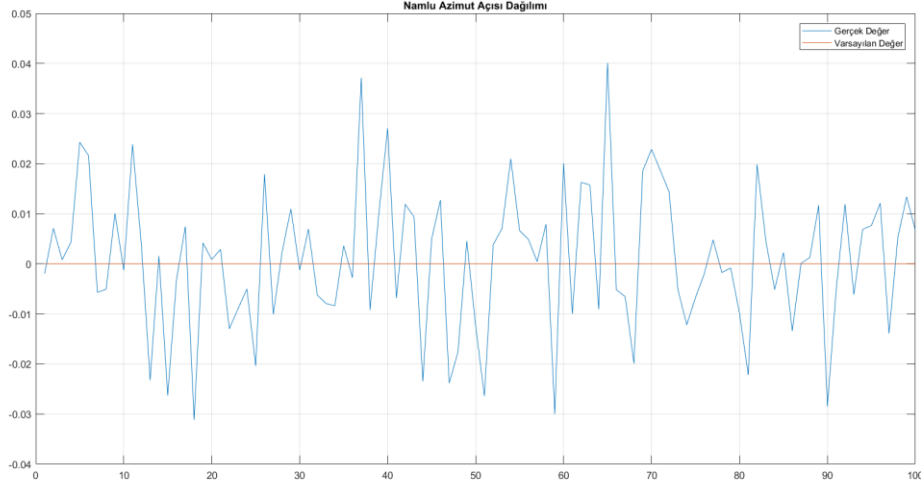


Şekil 4.4. Namlu Yükseliş Açısı Normal Dağılımı

Şekil 4.4 ile 100 örnek için topçu sisteminin namlusunun Namlu Yükseliş Açısı Normal Dağılım grafiği gösterilmiştir. Seçilen namlu yükseliş açısı değeri 44° dir. Normal dağılım Eşitlik (45) ile belirtildiği gibi yapılan 100 atış sonucunda oluşturulmuştur.

$$elev = elev_0 + elev_0 * \frac{0.0005}{3} * randn(1) \quad (45)$$

Eşitlik (45) ile belirtilen $elev$ rastgele yapılan bir atış için topçu sisteminin namlu yükseliş açısını ifade etmektedir. $elev_0$ yapılan bir atış için topçu sisteminin namlu yükseliş açısının varsayılan değeridir. Bu dağılım için seçilen nominal değer 44° dir. Çizelge 4.1 ile belirtildiği gibi hata payı varsayılan değer % 0.05' i olarak belirlenmiştir. $randn(1)$ ifadesi ise standart normal dağılım içerisinde ortalaması 0, varyansı 1 olan rastgele sayılar üreten bir fonksiyondur. Bu sayede topçu sisteminin yükseliş açısı ayarlanırken yapılan ölçüm hataları normal dağılım ile modellenmiş olur.



Şekil 4.5. Namlu Azimut Açısı Normal Dağılımı

Şekil 4.5 ile 100 örnek için topçu sisteminin namlusunun Namlu Azimut Açısı Normal Dağılım grafiği gösterilmiştir. Seçilen namlu azimut açısı değeri 0° dir. Normal dağılım Eşitlik (46) ile belirtildiği gibi yapılan 100 atış için oluşturulmuştur.

$$azimut = azimut_0 + 45 * \frac{0.001}{3} * randn(1) \quad (46)$$

Eşitlik (46) ile belirtilen *azimut* rastgele yapılan bir atış için topçu sisteminin namlu azimut açısını ifade etmektedir. $azimut_0$ yapılan bir atış için topçu sisteminin namlu azimut açısının varsayılan değeridir. Bu dağılım için seçilen nominal değer 0° dir. Çizelge 4.1 ile belirtildiği gibi hata payı 45° nin % 0.1' i olarak belirlenmiştir. $randn(1)$ ifadesi ise standart normal dağılım içerisinde ortalaması 0, varyansı 1 olan rastgele sayılar üreten bir fonksiyondur. Bu sayede topçu sisteminin azimut açısı ayarlanırken yapılan ölçüm hataları normal dağılım ile modellenmiş olur.

Topçu sistemleri için hata kaynakları olarak belirlenen namlu çıkış hızı, mühimmat kütlesi, mühimmat eylemsizlik momenti, topçu sistemi yükseliş açısı ve topçu sistemi azimut açısı parametreleri normal dağılım olarak modellenmiş ve 100 elemandan oluşan setler halinde Şekil 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 ve 4.5 ile gösterilmiştir. Her bir parametre güdümsüz

ve güdümlü mühimmatlar için hazırlanmış yörünge modellerinin model giriş setinin birer elemanı olduğu için parametrelerin varsayılan değerden farklı olması mühimmatların izleyeceği yörüngeyi etkileyecektir. Yörünge değişikliği sonucunda mühimmat çarpma noktalarında değişiklikler olacaktır.

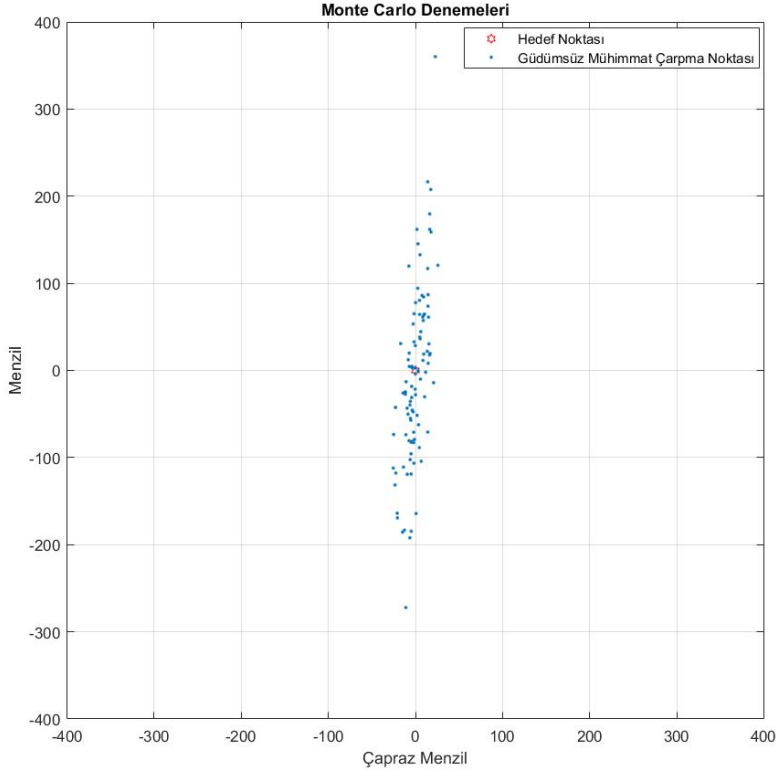
Seçilmiş hata kaynaklarının mühimmat atışlarına etkisini ve oluşan çarpma noktası dağılımlarını görmek için güdümsüz ve güdümlü yörünge modelleri hata modellerini içeren giriş setleri kullanılarak çalıştırılacaktır. Giriş parametreleri olarak Çizelge 4.2 ile seçilen küme belirlenmiştir. Öncelikle bu küme içerisindeki değerlere göre bir güdümsüz mühimmat atışı yapılarak mühimmatın düştüğü nokta hedef noktası olarak belirlenecektir çünkü giriş tarafındaki parametrelere herhangi bir hata beslenmediği için mühimmatın izleyeceği yörünge mühimmatın nominal yörüngesi olacaktır. Sonrasında Çizelge 4.2’ de belirtilen giriş bilgilerine seçilen 5 parametre için belirlenmiş hata modelleri enjekte edilerek Monte Carlo Benzetimleri yapılacak ve Güdümsüz Mühimmat Yörünge Modeli ile Güdümlü Mühimmat Yörünge Modeli 100’er defa çalıştırılarak mühimmat çarpma noktası dağılımları elde edilecektir. Hata beslenen atışlar için elde edilen çarpma noktalarının konum değerinden hedef noktanın konum değeri çıkarılarak dağılımların orijin etrafında incelenmesi sağlanacaktır. Seçilen hata modelleri için güdümsüz ve güdümlü mühimmat dağılımları ayrı ayrı ve toplu grafiklerle sunulacaktır.

Çizelge 4.2. Çarpma Noktası Dağılımları İçin Seçilen Giriş Koşulları

Mühimmat Parametreleri	
Kütle	43.096 kg
Çap	0.155 m
Eylemsizlik Momenti	0.1426 kg.m ²
Aerodinamik Katsayılar	Çizelge 3.1 ile belirtilen 155 mm topçu mermisi katsayıları
Atış Koşulları	
Konum	Orijin (0,0,0)

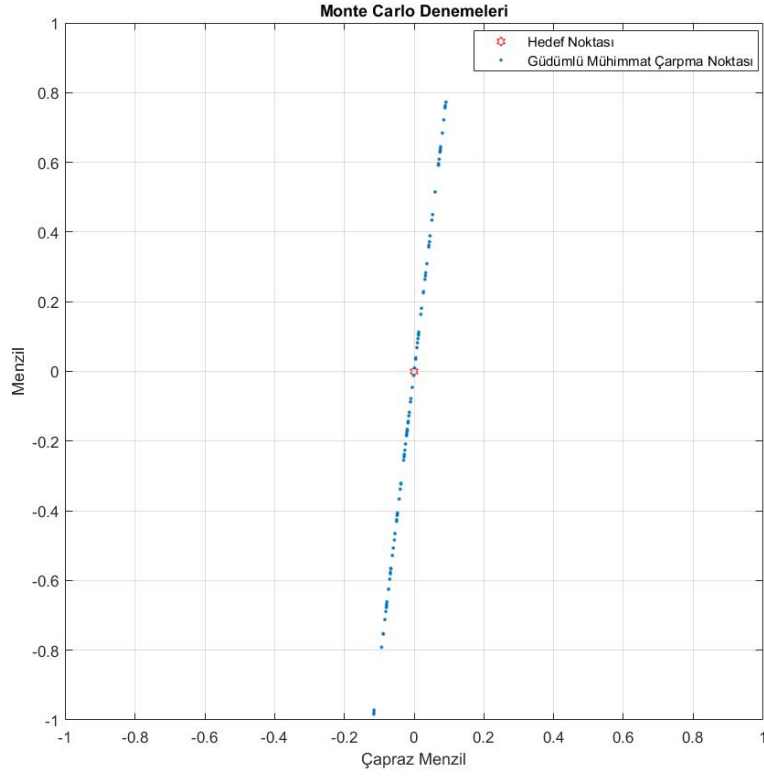
Namlu Çıkış Hızı	900 m/s
Yükseliş Açısı	44 derece
Azimet Açısı	0 derece
Topçu Sisteminin Bulunduğu Paralel	39 derece
Rüzgar	Sfır Rüzgar

Çizelge 4.2 de belirtilen giriş parametreleri ile yapılan güdümsüz mühimmat atışı sonucunda mühimmat menzil yönünde 24012 ve çapraz menzil yönünde 1208 noktasına düşmüştür. Hedef noktası menzil ve çapraz menzil için (24012,1208) noktasıdır. Yapılacak Monte Carlo Benzetimleri için bu nokta etrafındaki dağılım incelenecektir.



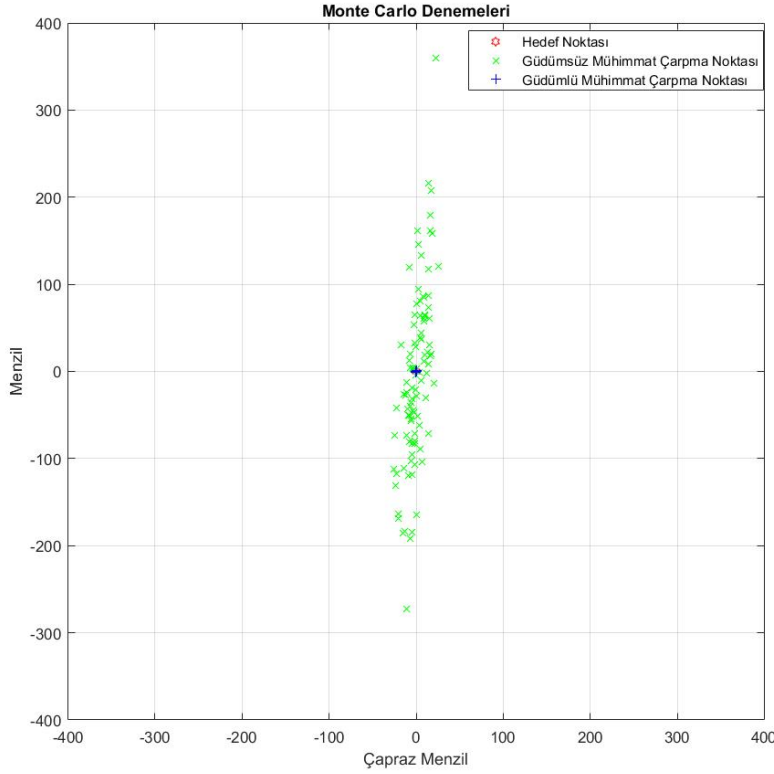
Şekil 4.6. Güdümsüz Mühimmat Çarpma Noktası Dağılımı

Şekil 4.6 ile yapılan 100 atış sonucunda güdümsüz mühimmatların çarpma noktalarının hedef noktası etrafındaki dağılımları gösterilmektedir.



Şekil 4.7. Güdümlü Mühimmat Çarpma Noktası Dağılımı

Şekil 4.7 ile yapılan 100 atış sonucunda güdümlü mühimmatların çarpma noktalarının hedef noktası etrafındaki dağılımları gösterilmektedir. Dağılım güdümsüz mühimmatlara göre daha nizami bir şekilde oluşmuştur. Bütün mühimmatların hedef üzerinden geçen bir doğruyu oluşturacak şekilde düşmüş olmaları güdüm ve kontrol sisteminin giriş parametreleri ile silah sistemine etki ettirilen hataları giderdiği ve hedefe aynı yönlü bir hız vektörüyle çarptığını göstermektedir.



Şekil 4.8. Güdümsüz ve Güdümlü Mühimmatların Çarpma Noktası Dağılımı

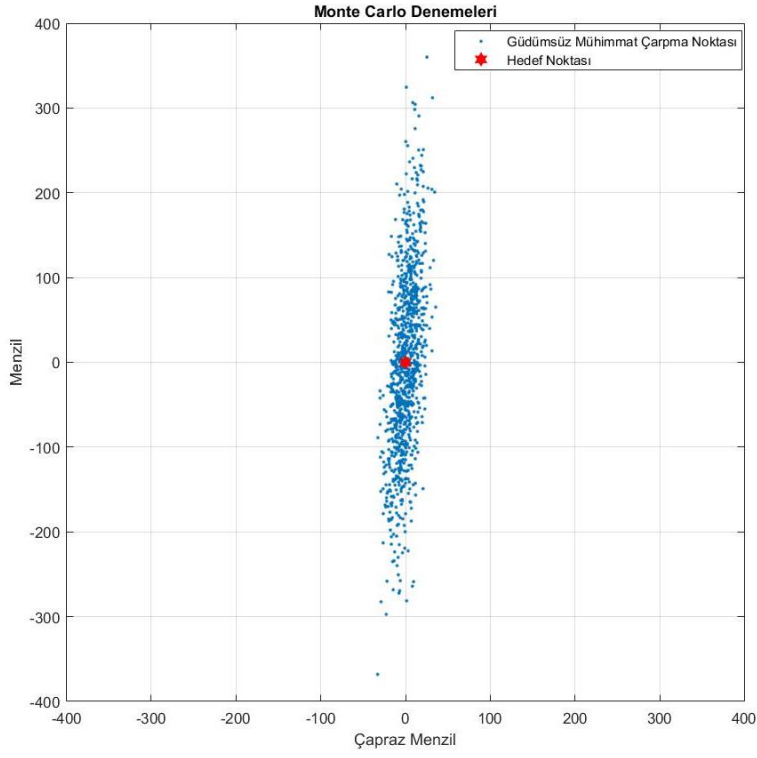
Şekil 4.8 ile güdümsüz ve güdümlü mühimmatlar için ayrı ayrı yapılan 100 atış sonucunda mühimmatların çarpma noktalarının hedef noktası etrafındaki dağılımları tek bir grafikte gösterilmektedir. Dağılım menzil yönünde güdümsüz mühimmatlar için 400 metre mertebesine kadar çıkarken, güdümlü mühimmatlar yalnızca 1 metre mertebesinde hatayla hedefe ulaşmayı başarmıştır. Çapraz menzil yönünde hata güdümsüz mühimmatlar için 20 metre mertebesinde oluşurken, bu sayı güdümlü mühimmatlar için 0.1 metre mertebesinde dir.

Çizelge 4.2 ile belirlenen giriş koşullarıyla yapılan bir güdümsüz mühimmat atışının sonucunda mühimmatın düştüğü nokta hedef olarak seçilmiş, giriş parametrelerine hata kaynaklarının eklenmesiyle yapılan atışlar sonucunda güdümsüz ve güdümlü mühimmatların hedef etrafındaki dağılımları Şekil 4.6, 4.7 ve 4.8 ile incelenmiştir.

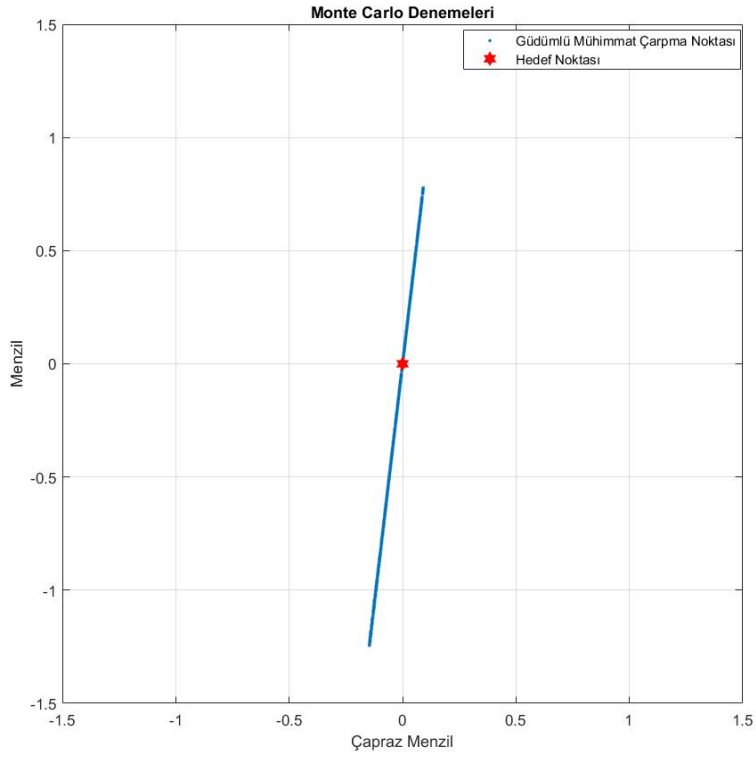
4.2. Çarpma Noktası Dağılımlarının Değerlendirilmesi

Mühimmat yörüngeleri ve dolayısıyla çarpma noktaları mühimmat parametrelerine ve atış koşullarına doğrudan bağlıdır. Hata kaynakları sebebiyle giriş koşulları üzerinde bulunan hatalar sonucunda güdümlü veya güdümsüz fark etmeksizin mühimmat yörüngeleri etkilenmektedir. Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’ de gösterildiği gibi güdümlü ve güdümsüz mühimmatlar için mühimmatların hedef etrafında dağıldıkları alan farklılık gösterse de her bir deneme sonucunda mühimmatlar ayrı noktalara isabet etmektedir. Bu nedenle gerçek bir atış sonucunda belirli bir mühimmatın akıbetini kestirmek mümkün değildir ancak, mühimmat davranışları istatistiksel olarak ifade edilebilir [34]. Bu işlemin yapılabilmesi için öncelikle mühimmat davranışlarıyla ilgili bilgiye ihtiyaç vardır. Silah sistemleriyle ilgili bilgilerin en anlamlısı mühimmat çarpma noktasıdır çünkü silah sistemlerinin nihai amacı hedefi vurmaktır. Hata kaynaklarının silah sistemine olan etkileri çarpma noktaları kullanılarak incelenebilir. Bu nedenle çarpma noktalarının kaydedilmesi sonucunda elde edilecek bilgi, mühimmat davranışlarının istatistiksel olarak incelenebilmesini sağlayacaktır. Ne kadar çok çarpma noktası bilgisi varsa edinilecek istatistiksel sonuç da o kadar güvenilir olacaktır. Mühimmat davranışlarının istatistiksel olarak incelenebilmesi için çok sayıda gerçekleştirilecek Monte Carlo Benzetimleri ile silah sistemleri için çarpma noktası kayıtları alınmalıdır. Bu çalışma kapsamında Monte Carlo Benzetimleri ile güdümlü ve güdümsüz silah sistemleri için hata kaynaklarının da dahil edildiği 1000’er atış yapılacak ve mühimmatların çarpma noktası dağılımları istatistiksel olarak incelenecektir.

Çizelge 4.2’de belirtilen giriş koşulları ile hata kaynaklarının dahil edilmediği bir güdümsüz mühimmat atışı yapılmış ve mühimmatın izlediği nominal yörünge sonucunda elde edilen çarpma noktası hedef nokta olarak alınmıştır. Seçilen hedef noktasına hata kaynaklarının da enjekte edildiği Monte Carlo Benzetimleri ile 1000 güdümsüz mühimmat atışı ve 1000 güdümlü mühimmat atışı yapılarak Şekil 4.9 ve Şekil 4.10 ile belirtilen mühimmat çarpma noktası dağılımları elde edilmiştir. Şekil 4.9 güdümsüz mühimmat çarpma noktası dağılımını, Şekil 4.10 ise güdümlü mühimmat çarpma noktası dağılımını göstermektedir.



Şekil 4.9. Güdümsüz Mühimmat arpma Noktası Dağılımı



Şekil 4.10. Güdümlü Mühimmat arpma Noktası Dağılımı

Şekil 4.9 ve 4.10 ile gösterilen çarpma noktası dağılımları iki eksende incelenmektedir. Bu eksenlerden bir tanesi topçu sistemlerinin fırlatma yönüyle hizalanmış olan menzil yönüdür. Diğer eksense menzil yönüne dik olan çapraz menzil yönüdür. Mühimmat çarpma noktaları hedef noktasına göre menzil ve çapraz menzil yönlerinde ayrı ayrı ıskalama mesafesine sahiptir. Bu nedenle çarpma noktası dağılımları menzil ve çapraz menzil yönlerinde olmak üzere iki değişkenli dağılımlar olarak incelenebilir. Dağılımın iki değişken için ayrı ayrı ortalama, varyans ve standart sapma gibi değerleri hesaplanabilir.

Çizelge 4.3. Güdüksüz 155 mm Topçu Mühimmatı Atışları Dağılım İncelemesi

Menzil yönünde ortalama değeri	-0.9820 m
Menzil yönünde varyans değeri	11246 m ²
Menzil yönünde standart sapma değeri	106.0463 m
Çapraz menzil yönünde ortalama değeri	0.4319 m
Çapraz menzil yönünde varyans değeri	139.1966 m ²
Çapraz Menzil yönünde standart sapma değeri	11.7982 m

Çizelge 4.3 ile yapılan 1000 güdümsüz mühimmat atışıyla elde edilen mühimmat çarpma noktası verilerinin menzil ve çapraz menzil yönlerindeki ıskalama mesafesi değişkenleri için ortalama, varyans ve standart sapma değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. Güdümlü 155 mm Topçu Mühimmatı Atışları Dağılım İncelemesi

Menzil yönünde ortalama değeri	-0.2222 m
Menzil yönünde varyans değeri	0.3176 m ²
Menzil yönünde standart sapma değeri	0.5636 m
Çapraz menzil yönünde ortalama değeri	-0.0262 m
Çapraz menzil yönünde varyans değeri	0.0044 m ²
Çapraz Menzil yönünde standart sapma değeri	0.0664 m

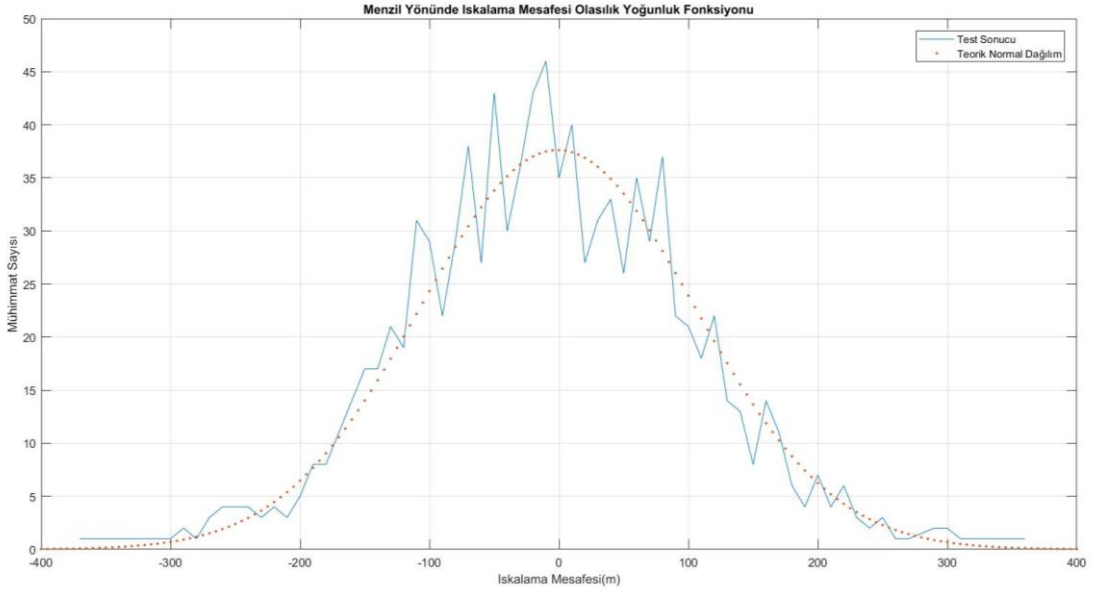
Çizelge 4.4 ile yapılan 1000 güdümsüz mühimmat atışıyla elde edilen mühimmat çarpma noktası verilerinin menzil ve çapraz menzil yönlerindeki ıskalama mesafesi değişkenleri için ortalama, varyans ve standart sapma değerleri gösterilmiştir.

Monte Carlo Benzetimleri sonucunda elde edilen mühimmat çarpma noktalarının hedef noktası etrafındaki dağılımının menzil ve çapraz menzil yönlerinde ıskalama mesafesi cinsinden kayıtları tutulmuştur. Bu kayıtlar sayesinde dağılımların menzil ve çapraz menzil yönlerindeki histogram grafikleri çıkarılarak dağılımın hedeften uzaklığı istatistiksel olarak ifade edilebilir. Ayrıca, hata modelleri normal dağılım kullanılarak oluşturulduğu için, çarpma noktası dağılımları ıskalama mesafesi değişkenine ait ortalama ve standart sapma değerleri kullanılarak normal dağılımlar için oluşacak olasılık yoğunluk fonksiyonu ile ifade edilebilir. Normal dağılımlar için olasılık yoğunluk fonksiyonu Eşitlik (47) ile gösterildiği gibi tanımlanır. Güdümsüz ve güdümlü mühimmatların menzil ve çapraz menzil yönlerinde ıskalama mesafesi değerinin histogram grafikleri, normal dağılım için elde edilecek olasılık yoğunluk fonksiyonu kullanılarak oluşturulan histogram grafiği ile karşılaştırılabilir. Böylece hata etkileri sonucunda oluşan ıskalama mesafesinin normal dağılımdan ne kadar uzaklaştığı da incelenebilir.

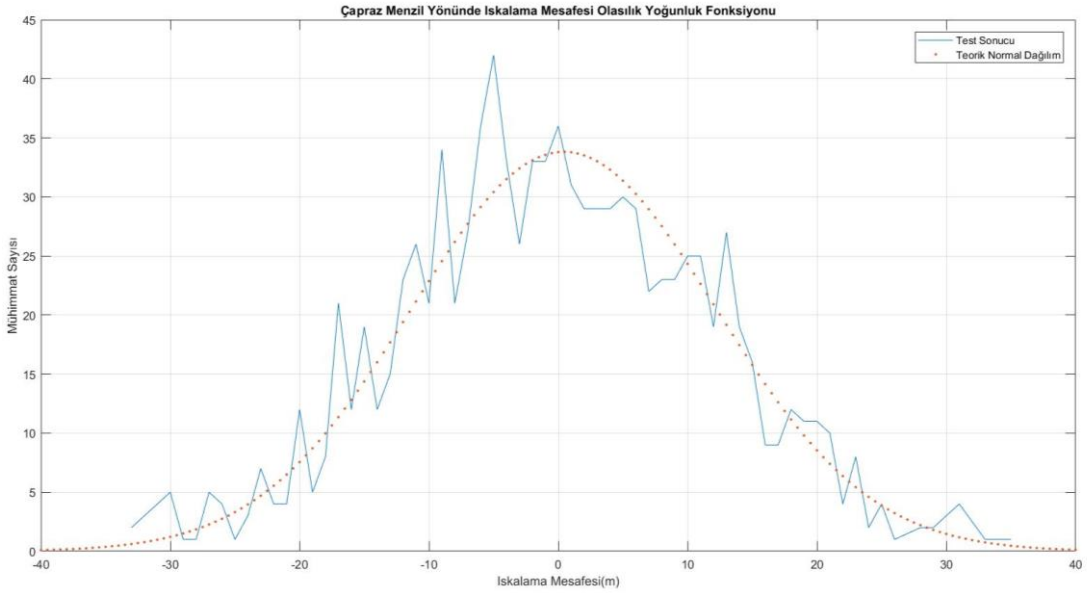
$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (47)$$

Eşitlik (47) ile normal dağılımlar için olasılık yoğunluk fonksiyonu tanımlanmıştır. Eşitlik içerisindeki x ifadesi ıskalama mesafesini, μ ifadesi ıskalama mesafesinin ortalama değerini ve σ ifadesi ise ıskalama mesafesinin standart sapmasını göstermektedir.

Eşitlik (47) ile ifade edilen şekilde normal dağılımlar için olasılık yoğunluk fonksiyonları Çizelge 4.3 ve 4.4 ile belirtilen ortalama ve standart sapma değerleri için oluşturulacak, bu değerler gerçek dağılımlar ile kıyaslanacaktır.



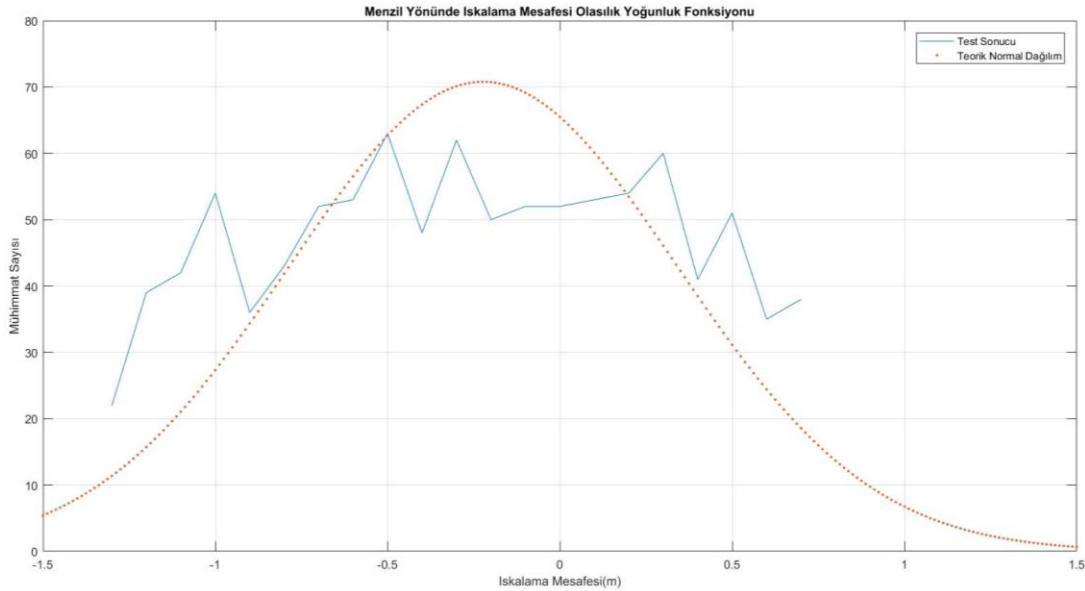
Şekil 4.11. Gdümsüz Mühimmat Dağılımlarının Menzil Yönünde İskalama Mesafesi Değişkeni için Normalleştirilmiş Histogram Grafiği



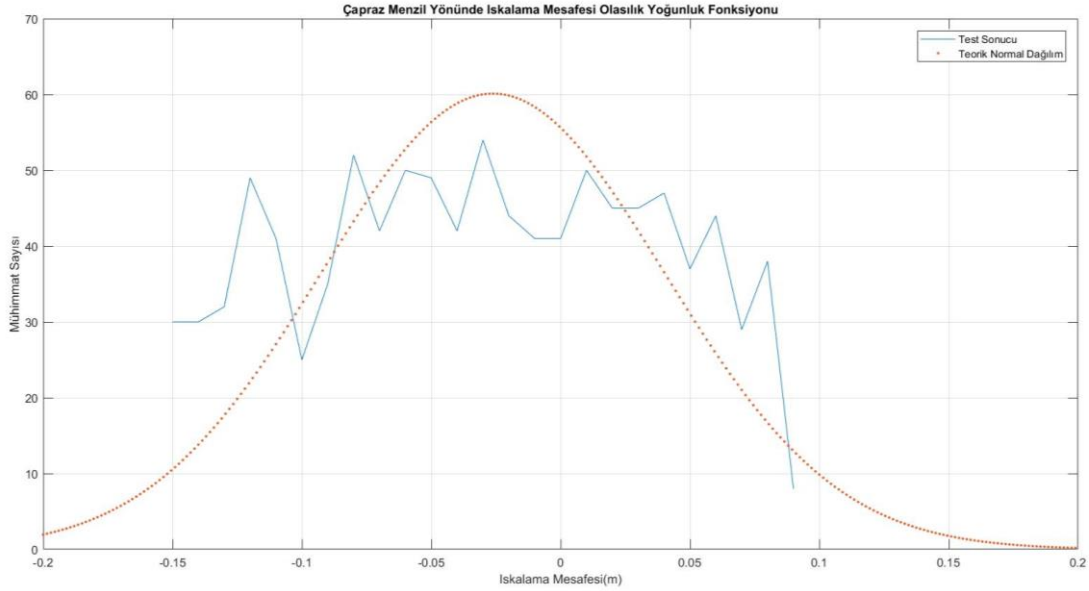
Şekil 4.12. Gdümsüz Mühimmat Dağılımlarının Çapraz Menzil Yönünde İskalama Mesafesi Değişkeni için Normalleştirilmiş Histogram Grafiği

Şekil 4.11 ve 4.12 ile güdümsüz mühimmat atış sonuçları için ıskalama mesafesinin menzil ve çapraz menzil yönlerinde normalleştirilmiş histogram grafikleri gösterilmiştir. Yapılan 1000 güdümsüz mühimmat atışı sonucunda menzil ve çapraz menzil

yönlerindeki mühimmat ıskalama mesafesi bilgileri hedeften uzaklığa göre sıralanmıştır. Her mesafe değerine kaç mühimmat düştüğü hesaplanmış ve bu değer test sonucu olarak belirtilen şekilde grafiklerde gösterilmiştir. Menzil ve çapraz menzil yönlerindeki ıskalama mesafesi değerlerinin ortalama ve standart sapma değerleri kullanılarak Eşitlik (47) ile belirtildiği gibi normal dağılımlar için olasılık yoğunluk fonksiyonu hesaplanmıştır, ancak mühimmat atış benzetimi sayılarının toplamı 1000 olduğu için teorik olarak üretilen fonksiyon 1000 ile çarpılarak normalleştirilmiş histogram grafiği elde edilmiştir. Bu fonksiyon kullanılarak üretilen normalleştirilmiş histogram grafiklerde teorik normal dağılım olarak gösterilmiştir. Şekil 4.11 ve 4.12'den anlaşılacağı üzere hata modelleri normal olduğu için mühimmat çarpma noktalarına ait ıskalama mesafeleri de normal olarak dağılmıştır. Güdüksüz Mühimmat Yörünge Modeli'nin giriş tarafından beslenen hataların normal dağılım karakteristiğini bozmadığı gözlenmiştir.



Şekil 4.13. Güdümlü Mühimmat Dağılımlarının Menzil Yönünde İskalama Mesafesi Değişkeni için Normalleştirilmiş Histogram Grafiği



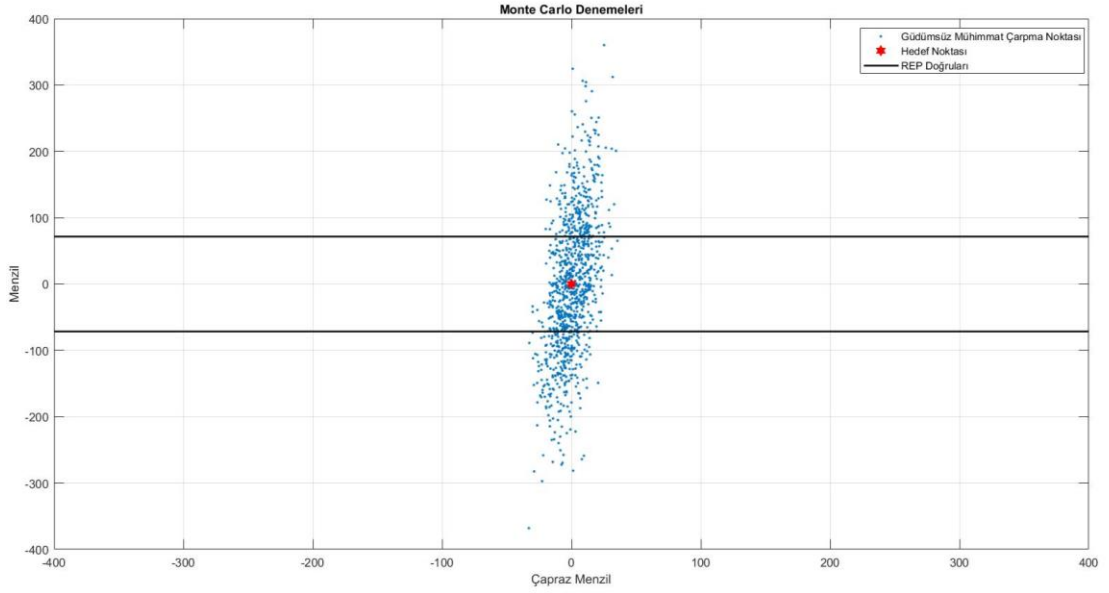
Şekil 4.14. GÜDÜMLÜ MÜHİMMAT DAĞILIMLARININ ÇAPRAZ MENZİL YÖNÜNDE İSKALAMA MESAFESİ DEĞİŞKENİ İÇİN NORMALLEŞTİRİLMİŞ HISTOGRAM GRAFİĞİ

Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 ile güdümlü mühimmat atış sonuçları için ıskalama mesafesinin menzil ve çapraz menzil yönlerinde normalleştirilmiş histogram grafikleri gösterilmiştir. Yapılan 1000 güdümlü mühimmat atışı sonucunda menzil ve çapraz menzil yönlerindeki mühimmat ıskalama mesafesi bilgileri hedeften uzaklığa göre sıralanmıştır. Her mesafe değerine kaç mühimmat düştüğü hesaplanmış ve bu değer test sonucu olarak belirtilen şekilde grafiklerde gösterilmiştir. Menzil ve çapraz menzil yönlerindeki ıskalama mesafesi değerlerinin ortalama ve standart sapma değerleri kullanılarak Eşitlik (47) ile belirtildiği gibi normal dağılımlar için olasılık yoğunluk fonksiyonu hesaplanmıştır, ancak mühimmat sayılarının toplamı 1000 olduğu için teorik olarak üretilen fonksiyon 1000 ile çarpılarak normalleştirilmiş histogram grafiği elde edilmiştir. Bu fonksiyon kullanılarak üretilen normalleştirilmiş histogram grafiklerde teorik normal dağılım olarak gösterilmiştir.

Şekil 4.13 ve 4.14' ten anlaşılacağı üzere hata modelleri normal olmasına rağmen mühimmat çarpma noktalarına ait ıskalama mesafesi güdümsüz senaryonun aksine normal dağılmamıştır. Bu durumun nedeni Güdümlü Mühimmat Yörünge Modeli içerisindeki güdüm ve kontrol birimlerinin hata etkilerini elemine etmesidir. Mühimmat dağılımları güdüm ve kontrol biriminin başarımı üzerinden oluşmaktadır.

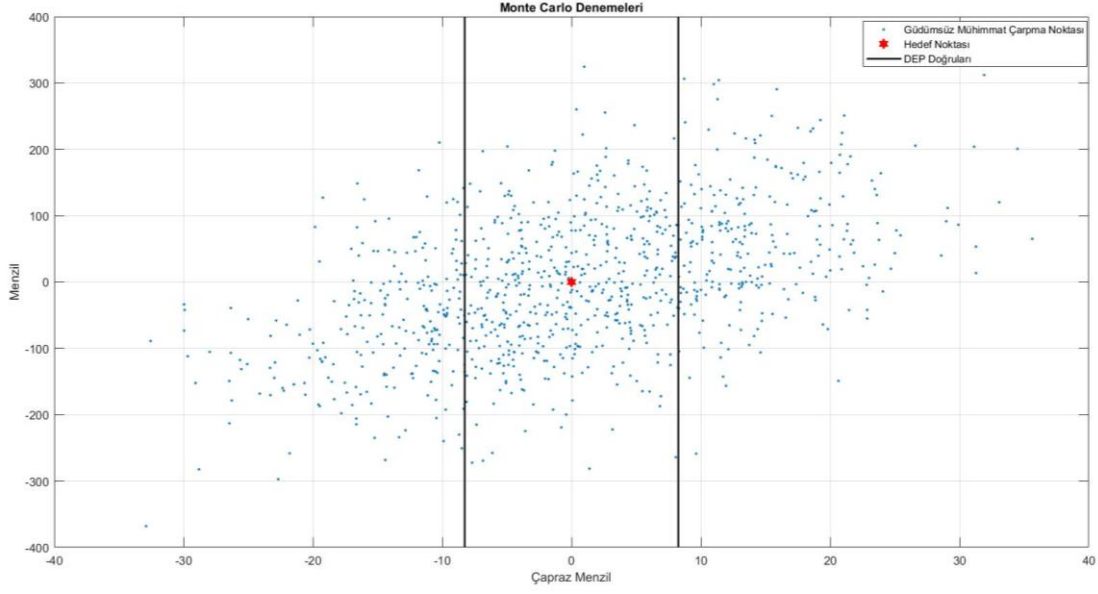
Mühimmat çarpma noktası dağılımının menzil ve çapraz menzil yönlerinde oluşacak ıskalama mesafesi değişkeni ortalama, varyans ve standart sapma değerleri ile ifade edilmiştir. Menzil ve çapraz menzil yönlerinde oluşacak ıskalama mesafesi için çokluk dağılımları hesaplanmış ve bu dağılımlar histogram grafikleri ile ifade edilmiştir. Bu sayede hata kaynakları nedeniyle akıbeti kesin olarak belirlenemeyecek olan mühimmatların çarpma noktaları dağılımları istatistiksel olarak ifade edilmiştir ancak, ortalama, varyans, standart sapma, histogram gibi terimler herkes için kullanışlı değildir. Belirlenen bir hedefin imhası için silah sistemi seçimi işlemini gerçekleştiren silahçı personel bu terimler yerine “range error probable (REP)” ve “deflection error probable (DEP)” terimlerini kullanmayı tercih ederler. REP terimi hedef noktasından eşit uzaklıkta, menzil yönüne dik iki doğrudan biri ile hedef noktası arasındaki mesafedir. REP için oluşturulan bu iki doğrunun hedeften uzaklığı atılan mühimmatların yarısı iki doğru arasında kalacak şekilde belirlenmelidir. Benzer şekilde, DEP terimi hedef noktasından eşit uzaklıkta, çapraz menzil yönüne dik iki doğrudan biri ile hedef noktası arasındaki mesafedir. DEP için oluşturulan bu iki doğrunun hedeften uzaklığı atılan mühimmatların yarısı iki doğru arasında kalacak şekilde belirlenmelidir. REP ve DEP terimleri mühimmat dağılımını menzil ve çapraz menzil yönünde ayrı ayrı ifade etmektedir ancak dağılımları sadece ıskalama mesafesi cinsinden yön belirtmeksizin ifade etmek isteyenler içinse “circular error probable (CEP)” terimi daha kullanışlı olabilir. CEP atılan mühimmatlarının yarısının içine düştüğü hedef noktasını merkez alan çemberin yarıçapıdır [35]. Böylece atılan mühimmatların yarısının içine düşeceği mesafe veya atılan bir mühimmatın %50 ihtimalle düşeceği mesafe ıskalama mesafesi cinsinden yön belirterek veya belirtmeksizin REP, DEP ve CEP terimleri ile ifade edilebilir.

Şekil 4.9 ile belirtilen, yapılan 1000 atış sonucunda oluşturulan güdümsüz mühimmat dağılımları REP, DEP ve CEP terimleriyle birlikte gösterilecektir.



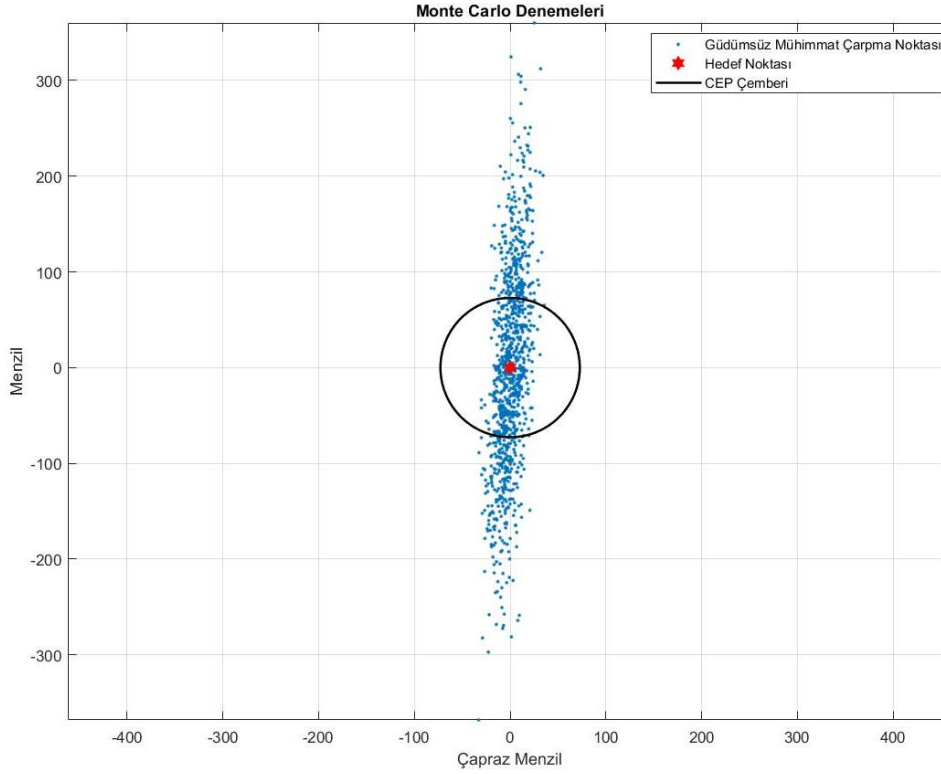
Şekil 4.15. GÜDÜMSÜZ MÜHİMMAT ÇARPMA NOKTASI DAĞILIMI İÇİN REP GÖSTERİMİ

Şekil 4.15 ile 1000 güdümsüz mühimmat atışı sonucunda oluşan çarpma noktası dağılımı REP cinsinden incelenmiştir. Menzil yönünde mühimmatların yarısını kapsayacak iki doğrunun hedeften uzaklığı hesaplanmıştır. Bu uzaklık REP değeridir ve bu örnek set için 71.57 metre olarak oluşmuştur. Her bir REP doğrusu menzil yönünde hedeften 71.57 metre uzaklığı çizilmiştir. Bu gösterimden atılan bir güdümsüz mühimmatın %50 ihtimalle hedeften menzil yönünde en fazla 71.57 metre uzağa düşeceği anlaşılmaktadır.



Şekil 4.16. GÜDÜMSÜZ MÜHİMMAT ÇARPMA NOKTASI DAĞILIMI İÇİN DEP GÖSTERİMİ

Şekil 4.16 ile 1000 güdümsüz mühimmat atışı sonucunda oluşan çarpma noktası dağılımı DEP cinsinden incelenmiştir. Çapraz menzil yönünde mühimmatların yarısını kapsayacak iki doğrunun hedeften uzaklığı hesaplanmıştır. Bu uzaklık DEP değeridir ve bu örnek set için 8.26 metre olarak oluşmuştur. Her bir DEP doğrusu çapraz menzil yönünde hedeften 8.26 metre uzaklığı çizilmiştir. Bu gösterimden atılan bir güdümsüz mühimmatın %50 ihtimalle hedeften çapraz menzil yönünde en fazla 8.26 metre uzağa düşeceği anlaşılmaktadır.



Şekil 4.17. Güdümsüz Mühimmat Çarpma Noktası Dağılımı için CEP Gösterimi

Şekil 4.17 ile 1000 güdümsüz mühimmat atışı sonucunda oluşan çarpma noktası dağılımı CEP cinsinden incelenmiştir. Mühimmatların yarısını kapsayacak çemberin yarıçap uzunluğu hesaplanmıştır. Bu uzunluk CEP değeridir ve bu örnek set için 72.74 metre olarak oluşmuştur. CEP çemberi merkezi hedef ve yarıçapı 72.74 metre olacak şekilde çizilmiştir. Bu gösterimden atılan bir güdümsüz mühimmatın %50 ihtimalle hedeften en fazla 72.74 metre uzağa düşeceği anlaşılmaktadır.

Şekil 4.15, 4.16 ve 4.17 ile gösterilen REP, DEP ve CEP çizimleri, bu terimlerin tanımlarından yola çıkılarak hesaplanan ıskalama mesafelerine göre yapılmıştır. Atılan mühimmatların yarısının içine düşeceği mesafeler REP, DEP ve CEP için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Tanımdan yola çıkarak mühimmatların yarısını içine alacak şekiller çizmenin yanında ilgili terimler teorik olarak da hesaplanabilir. Bu hesaplamalarda standart sapmaya dayanan formüller kullanılır. Mühimmat çarpma noktası dağılımlarının normal olduğu kabul edilir. Normal dağılımlar için örneklerin dağılımı ile standart sapma

arasında doğrudan ilişki vardır. Normal dağılımlar için örneklemelerin %68' i $\pm \sigma$ arasında bulunacaktır. REP, DEP ve CEP terimleri çarpma noktalarının %50' sini kapsadığı için normal dağılımda da dağılımın %50' sini kapsayan standart sapma değeri bulunmalıdır. Bu değer 0.6745 σ değeridir. Normal dağılımlar için dağılımı kapsayan aralık standart sapma ilişkisinden yola çıkarak REP ve DEP değerleri teorik olarak Eşitlik (48) ve (49) ile belirtildiği şekilde hesaplanır.

$$REP_{teorik} = 0.6745 \sigma_{menzil} \quad (48)$$

$$DEP_{teorik} = 0.6745 \sigma_{\text{çapraz menzil}} \quad (49)$$

Eşitlik (48) ile belirtilen σ_{menzil} menzil yönünde mühimmat çarpma noktası dağılımının standart sapmasıdır ve değeri 106.05'tir. Bu değere göre REP_{teorik} değeri 71.53 metre olarak hesaplanmaktadır. Eşitlik (49) ile belirtilen $\sigma_{\text{çapraz menzil}}$ çapraz menzil yönünde mühimmat çarpma noktası dağılımının standart sapmasıdır ve değeri 11.80' dir. Bu değere göre DEP_{teorik} değeri 7.96 metre olarak hesaplanmaktadır. Çizelge 4.5 tanıma göre hesaplanan REP, DEP değerleri ile teorik olarak hesaplanan REP_{teorik} , DEP_{teorik} değerlerini göstermektedir [36].

Çizelge 4.5. Gerçek ve Teorik REP, DEP Değerleri

REP	71.57 m
DEP	8.26 m
REP_{teorik}	71.53 m
DEP_{teorik}	7.96 m

Çizelge 4.5' e göre gerçek REP, DEP değerleri ile teorik olarak hesaplanan değerler büyük ölçüde örtüşmektedir. Bu durumun nedeni Güdümsüz Mühimmat Yörünge Modeli'nin normal dağılım olarak modellenen hata kaynaklarının yapısını bozmaması sonucunda mühimmat çarpma noktası dağılımının normal dağılım olarak oluşmasıdır.

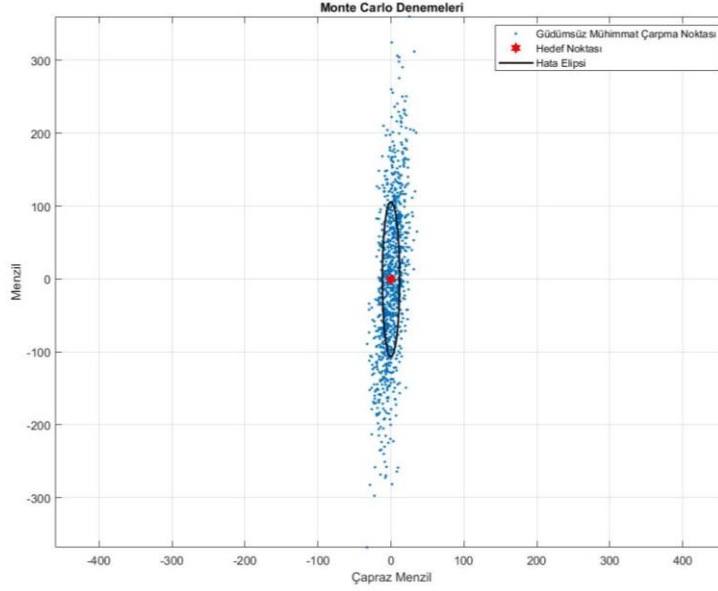
REP ve DEP değerleri gibi CEP de teorik olarak hesaplanabilir. CEP değerinin teorik olarak hesaplanması için birkaç yöntem vardır. Bu yöntemler CEP değeri hesaplanacak

dağılımın karakteristiğine bağlıdır. REP ve DEP değerleri hesaplanırken yapıldığı gibi bir standart sapma değeri üzerinden CEP hesaplamak için dağılımın çembersel normal dağılım olarak kabul edilmesi gerekir. Dağılımın çembersel normal dağılım olabilmesi içinse menzil ve çapraz menzil yönlerindeki standart sapma değerlerinden küçük olanın büyük olana oranının 0.5' ten büyük olması gerekir. Bu nedenle bu örnek için dağılım çembersel olmayan normal dağılım olarak kabul edilecektir. Çembersel olmayan normal dağılımlar için Pitman tarafından geliştirilen ampirik yöntem kullanılarak CEP değeri teorik olarak bulunur [36]. Bu yöntemle göre CEP Eşitlik (50) ile belirtildiği gibi hesaplanır.

$$CEP_{teorik} = 0.562 * \max(\sigma_{menzil}, \sigma_{\text{çapraz menzil}}) + 0.617 * \min(\sigma_{menzil}, \sigma_{\text{çapraz menzil}}) \quad (50)$$

Eşitlik (50)' de belirtilen max ve min ifadeleri sırasıyla menzil ve çapraz menzil yönlerindeki standart sapma değerlerinden büyük olanını ve küçük olanını tespit eden fonksiyonlardır. Bu iki standart sapma değerinden büyük olan 0.562 ile, küçük olan 0.617 ile çarpılarak sonuçlar toplanır ve teorik olarak standart sapma değerine bağlı CEP değeri hesaplanmış olur. Bu örnekte CEP_{teorik} değeri 66.88 olarak hesaplanmıştır. Gerçek CEP değeri ise 72.74 olarak bulunmuştur. Teorik hesap ampirik bir denklem üzerine oturtulduğu için REP ve DEP hesaplarında olduğu kadar hassas bir sonuç üretmemiştir ancak, gerçek CEP ve teorik CEP değerleri birbirine uzak değildir.

Çembersel olmayan dağılımlar için CEP yerine kullanılacak daha verimli yöntemler geliştirilebilir. Bu örnek de menzil yönünde standart sapma çapraz menzil yönündeki standart sapmaya göre çok daha büyüktür. Bu nedenle dağılımı bir elips üzerine oturtmak daha verimli sonuçlar üretecektir. Bu yöntemle hata elipsi yöntemi denilecektir. Elipsin uzun yarıçapı olarak menzil yönündeki standart sapma değeri, kısa yarıçapı olarak çapraz menzil yönündeki standart sapma değeri kullanılabilir. Bu yarıçap değerleri ile çizilen ve dağılım üzerinde oturtulan elips Şekil 4.18 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.18. Güdümsüz Mühimmat Çarpma Noktası Dağılımı için Hata Elipsi Gösterimi

Şekil 4.18 ile çembersel olmayan mühimmat çarpma noktası dağılımı üzerine uzun yarıçapı menzil yönünde standart sapma değerine eşit, kısa yarıçapı çapraz menzil yönünde standart sapma değerine eşit bir elips oturtulmuştur. Elips güdümsüz mühimmat çarpma noktalarından 414 tanesi kapsamaktadır. Yani atılan mühimmatların % 41.4' ü elips içerisine düşecektir. CEP kavramı mühimmatların %50' sini kapsadığı için CEP ve hata elipsi arasındaki verimi ölçmek için şekiller içerisindeki birim alana düşen mühimmat sayısı hesaplanacaktır. Yarıçapı 72.74 metre olan CEP çemberinin alanı 16621 m²'dir ve atılan 1000 güdümsüz mühimmatın 500'ü bu alan içerisine düşmüştür. Sonuç olarak birim alana 0.0301 mühimmat düşmektedir. Uzun yarıçapı 106.05 metre ve kısa yarıçapı 11.80 metre olan elipsin alanı 3930 m²'dir ve atılan 1000 güdümsüz mühimmatın 414'ü bu alan içerisine düşmüştür. Sonuç olarak birim alana 0.1053 mühimmat düşmektedir. Bu örnek için hata elipsi yöntemi CEP yöntemine göre mühimmatların düşeceği alanı yaklaşık olarak 3.5 kat daha verimli ifade etmiştir. Çembersel olmayan dağılımlar için hata elipsi yöntemi mühimmat dağılımlarını CEP yöntemine göre daha küçük alanlar belirterek ifade etmektedir.

Seçilen hedeflerin imhası için hangi silah sisteminin kullanılacağını belirleyen silahçı personel silah sistemlerinin etkinliğini değerlendirmek için mühimmat çarpma

noktalarının ortalama, varyans, standart sapma veya histogram grafiklerini kullanmak yerine REP, DEP, CEP gibi kavramları kullanmayı tercih eder. Eğer menzil veya çapraz menzil yönlerindeki ıskalama mesafesiyle ilgileniyorsa REP ve DEP kavramlarını kullanarak atılan mühimmatın %50 ihtimalle içerisine dseceği maksimum ıskalama mesafesini menzil veya çapraz menzil yönlerinde belirtir. Silahı personel için sadece mühimmat çarpma noktasının hedeften uzaklığı önemli ise CEP kavramını kullanır. Böylece mühimmatın %50 ihtimalle dseceği hedeften maksimum uzaklığı belirtir. Eğer mühimmat çarpma noktalarının daha yoğun olarak bulunduğu alan ile ilgileniyorsa mühimmat çarpma noktası dağılımını hata elipsi ile ifade eder.

4.3. Atış Senaryoları ve Sonuçlar

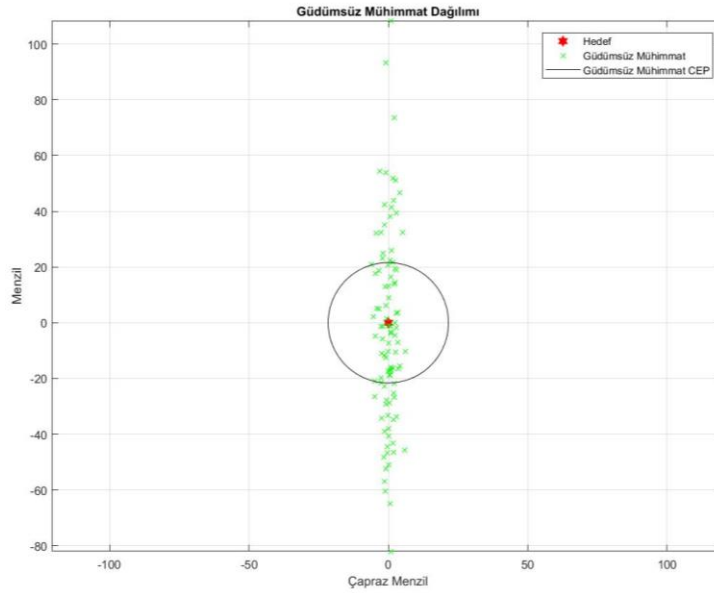
Güdümsüz ve güdümlü mühimmatların performanslarını değerlendirmek için Güdümsüz Mühimmat Yörünge Modeli ve Güdümlü Mühimmat Yörünge Modeli kullanılarak belirli atış senaryolarında mühimmatlar hesaplamalı olarak sınanacaktır. Belirli atış koşulları için nominal bir güdümsüz mühimmat atışı yapılacaktır. Bu atış sırasında giriş koşulları tarafında herhangi bir hata modele etki ettirilmeyecektir. Bu nedenle mühimmat nominal yörüngeyi izleyecektir ve mühimmatın düştüğü nokta hedef noktası olarak belirlenecektir. Sonrasında seçilen atış koşulları için izelge 4.1 ile belirtilen hata kaynakları benzetimlere dahil edilecektir. Monte Carlo Benzetimleri aracılığıyla 100 güdümsüz mühimmat atışı ve 100 güdümlü mühimmat atışı yapılacaktır. Mühimmat arpma noktalarının kayıtları menzil ve çapraz menzil eksenlerinde tutulacaktır. Bu arpma noktalarından hedef noktası çıkarılarak mühimmatların (0,0) noktası etrafındaki dağımları incelenecektir. Güdümsüz ve güdümlü mühimmatlar için ayrı ayrı CEP hesapları yapılacaktır. CEP sonuçlarına göre güdümsüz ve güdümlü mühimmatların atış başarım performansları 6 farklı senaryo için incelenecektir. Bu senaryolar için düşük ve yüksek namlu çıkış hızları için ayrı ayrı düşük, orta ve yüksek yükseliş açısı değerleri kullanılarak oluşturulacaktır.

Çizelge 4.6. Düşük Hız Düşük Yükseliş Açısı Senaryosu

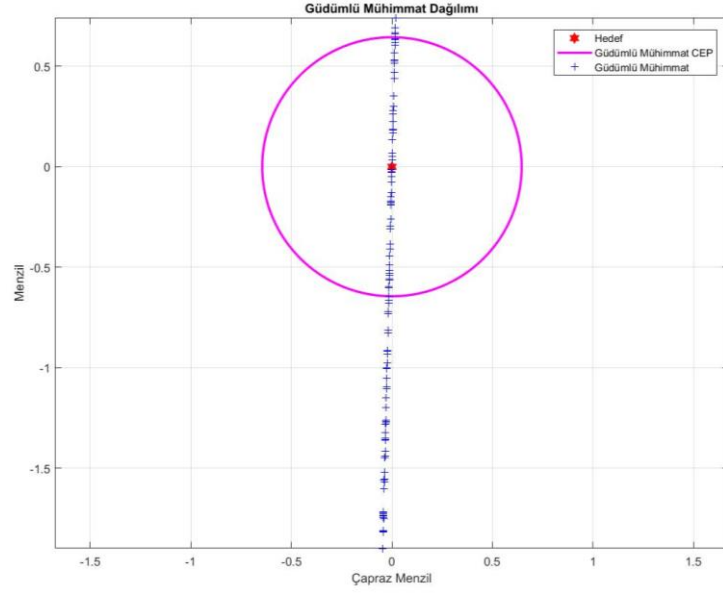
Mühimmat Parametreleri	
Kütle	43.096 kg

Çap	0.155 m
Eylemsizlik Momenti	0.1426 kg.m ²
Aerodinamik Katsayılar	Çizelge 3.1 ile belirtilen 155 mm topçu mermisi katsayıları
Atış Koşulları	
Konum	Orijin (0,0,0)
Namlu Çıkış Hızı	500 m/s
Yükseliş Açısı	20 derece
Azimut Açısı	0 derece
Topçu Sisteminin Bulunduğu Paralel	39 derece
Rüzgar	Sıfır Rüzgar

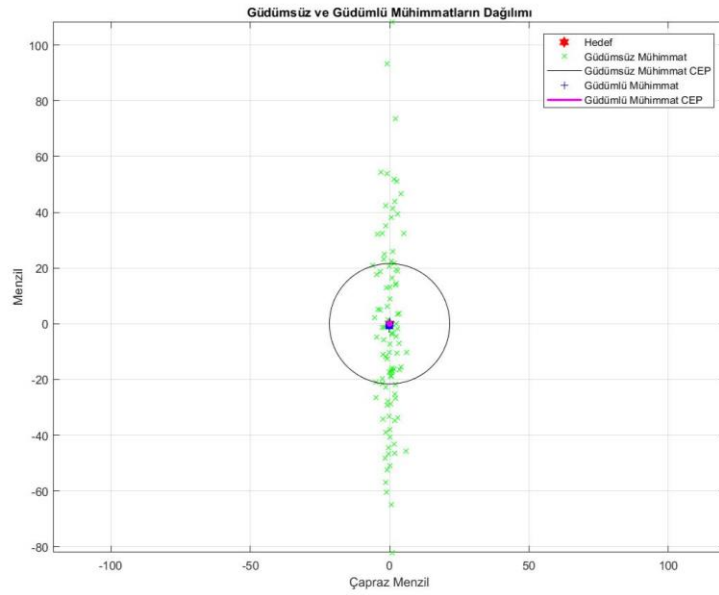
Çizelge 4.6 ile belirtilen giriş koşullarında 100 güdümsüz ve 100 güdümlü mühimmat atışı yapılarak sonuçlar kaydedilmiştir. Bu atışlar sırasında Çizelge 4.1 ile belirtilen hata kaynakları benzetimlere dahil edilmiş ve sonuçlar grafikler üzerinde gösterilmiştir.



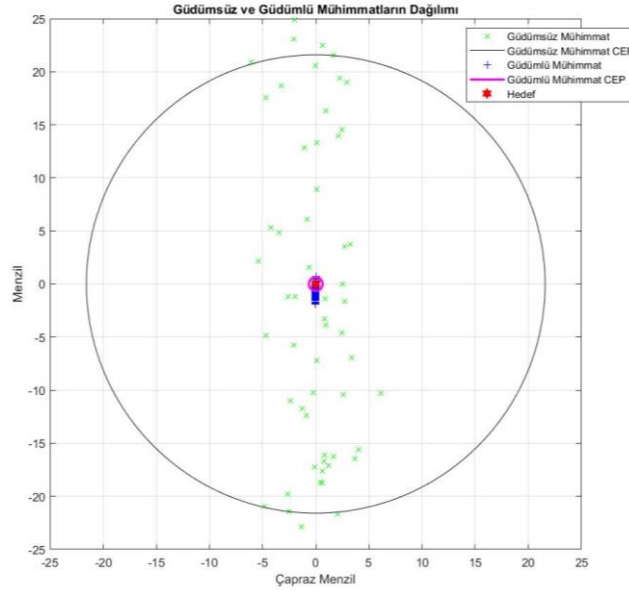
Şekil 4.19. Düşük Namlu Çıkış Hızı ve Düşük Yükseliş Açısı için Güdümsüz Mühimmat Çarpma Noktası Dağılımı



Şekil 4.20. Düşük Namlu Çıkış Hızı ve Düşük Yükseliş Açısı için Güdümlü Mühimmat Çarpma Noktası Dağılımı



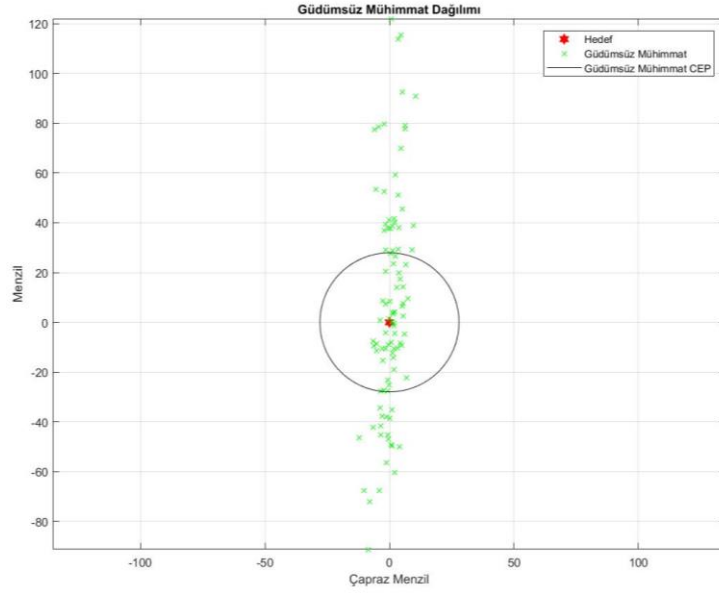
Şekil 4.21. Düşük Namlu Çıkış Hızı ve Düşük Yükseliş Açısı için Güdümsüz ve Güdümlü Mühimmatların Çarpma Noktası Dağılımı



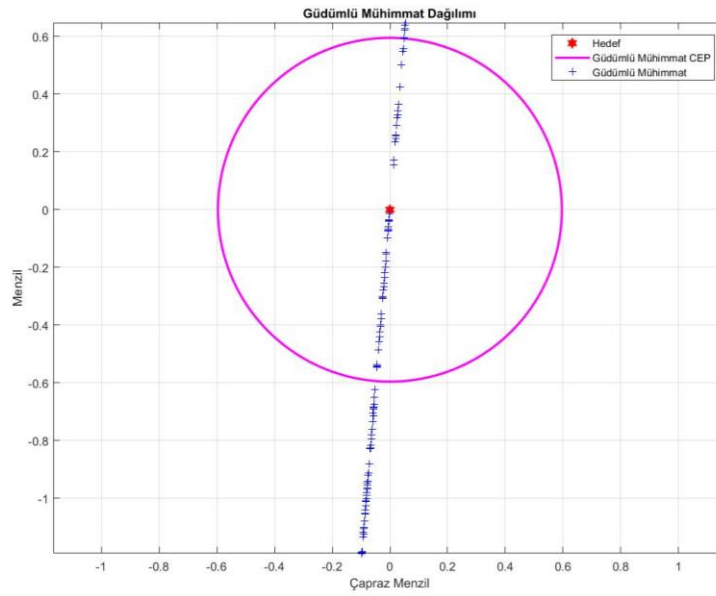
Şekil 4.22. Düşük Namlu Çıkış Hızı ve Düşük Yükseliş Açısı için Gudsmsz ve Gudsml Mühimmatların Çarpma Noktası Dağılımı (25*25 yakınlaştırılmış görsel)

Şekil 4.19, 4.20, 4.21 ve 4.22 ile gudsmsz ve gudsml mühimmatların belirtilen giriş koşulları altında mühimmat çarpma noktası dağılımları ve ilgili CEP çemberleri gösterilmiştir. Şekil 4.22 ile gudsml ve gudsmsz CEP çemberlerinin anlaşılır bir şekilde gösterilmesi için Şekil 4.21 ile verilen grafik yakınlaştırılmıştır. Düşük namlu çıkış hızı (500 m/s) ve düşük yükseliş açısı (20°) şartlarında 9174 metre uzaklıktaki hedef noktasına yapılan atışlar sonucunda gudsmsz mühimmatlar için CEP çemberinin yarıçapı 21.59 metre olarak hesaplanırken, gudsml mühimmatlar için CEP çemberinin yarıçapı 0.65 metre olarak hesaplanmıştır.

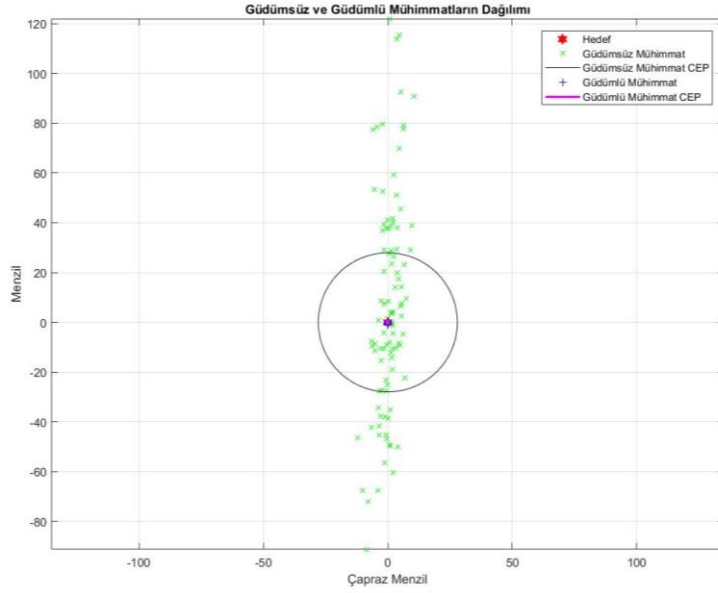
Gudsmsz ve gudsml mühimmatların kıyaslanacağı ikinci senaryo düşük namlu çıkış hızı ve orta yükseliş açısı senaryosudur. Çizelge 4.6 ile belirtilen giriş koşulları yükseliş açısı dışında aynı tutulmuş ve yükseliş açısı 45° olarak güncellenmiştir. Bu şartlar altında 100 gudsmsz ve 100 gudsml mühimmat atışı yapılarak sonuçlar kaydedilmiştir. Bu atışlar sırasında Çizelge 4.1 ile belirtilen hata kaynakları benzetimlere dahil edilmiş ve sonuçlar grafikler üzerinde gösterilmiştir.



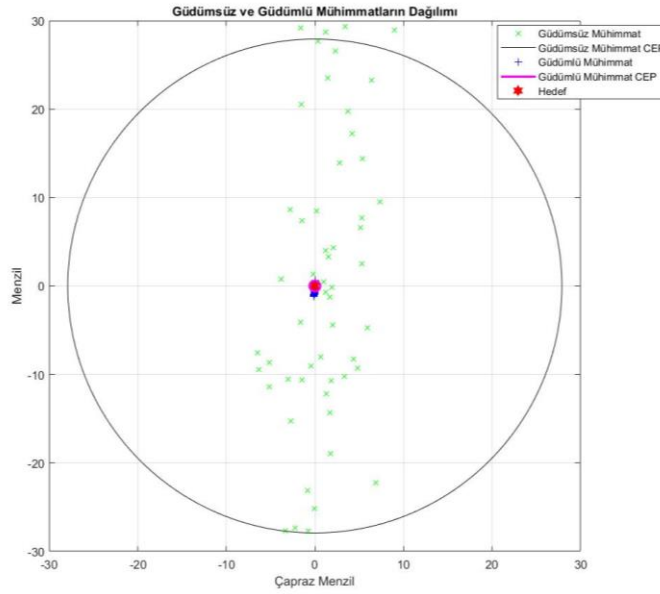
Şekil 4.23. Düşük Namlu Çıkış Hızı ve Orta Yükseliş Açısı için Güdümsüz Mühimmat Çarpma Noktası Dağılımı



Şekil 4.24. Düşük Namlu Çıkış Hızı ve Orta Yükseliş Açısı için Güdümlü Mühimmat Çarpma Noktası Dağılımı



Şekil 4.25. Düşük Namlu Çıkış Hızı ve Orta Yükseliş Açısı için Gudsüz ve Gudsümlü Mühimmatların Çarpma Noktası Dağılımı

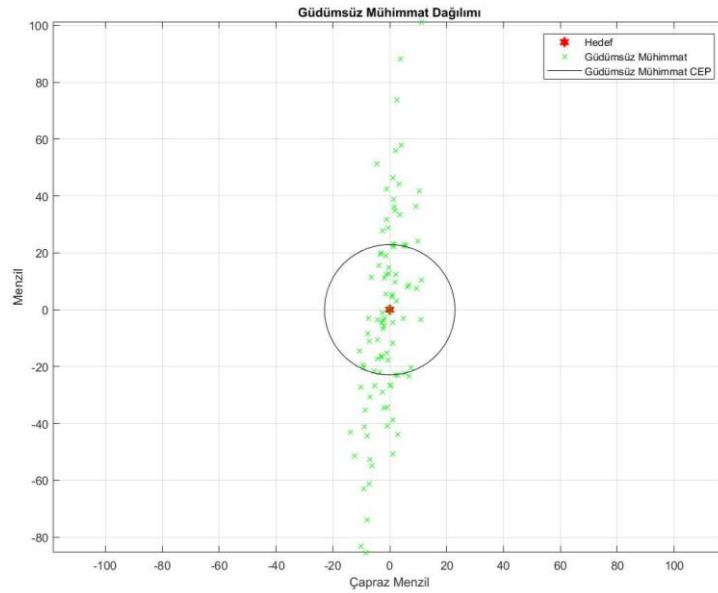


Şekil 4.26. Düşük Namlu Çıkış Hızı ve Orta Yükseliş Açısı için Gudsüz ve Gudsümlü Mühimmatların Çarpma Noktası Dağılımı (30*30 yakınlaştırılmış görsel)

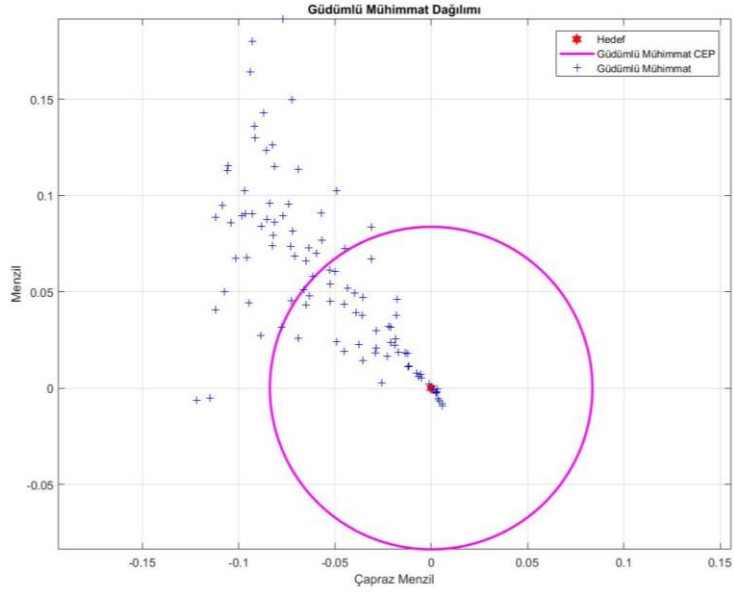
Şekil 4.23, 4.24, 4.25 ve 4.26 ile gudsüz ve gudsümlü mühimmatların belirtilen giriş koşulları altında mühimmat çarpma noktası dağılımları ve ilgili CEP çemberleri

gösterilmiştir. Şekil 4.26 ile güdümlü ve güdümsüz CEP çemberlerinin anlaşılır bir şekilde gösterilmesi için Şekil 4.25 ile verilen grafik yakınlştırılmıştır. Düşük namlu çıkış hızı (500 m/s) ve orta yükseliş açısı (45°) şartlarında 12850 metre uzaklıktaki hedef noktasına yapılan atışlar sonucunda güdümsüz mühimmatlar için CEP çemberinin yarıçapı 27.92 metre olarak hesaplanırken, güdümlü mühimmatlar için CEP çemberinin yarıçapı 0.60 metre olarak hesaplanmıştır.

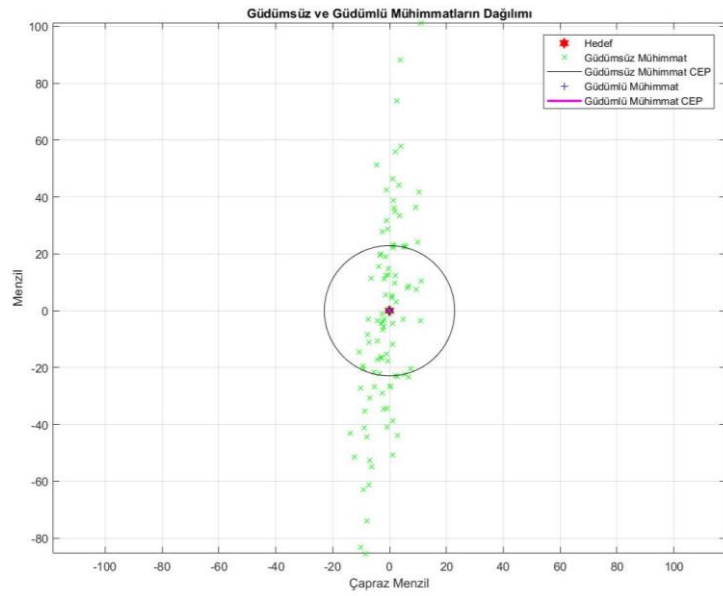
Güdümsüz ve güdümlü mühimmatların kıyaslanacağı üçüncü senaryo düşük namlu çıkış hızı ve yüksek yükseliş açısı senaryosudur. Çizelge 4.6 ile belirtilen giriş koşulları yükseliş açısı dışında aynı tutulmuş ve yükseliş açısı 70° olarak güncellenmiştir. Bu şartlar altında 100 güdümsüz ve 100 güdümlü mühimmat atışı yapılarak sonuçlar kaydedilmiştir. Bu atışlar sırasında Çizelge 4.1 ile belirtilen hata kaynakları benzetimlere dahil edilmiş ve sonuçlar grafikler üzerinde gösterilmiştir.



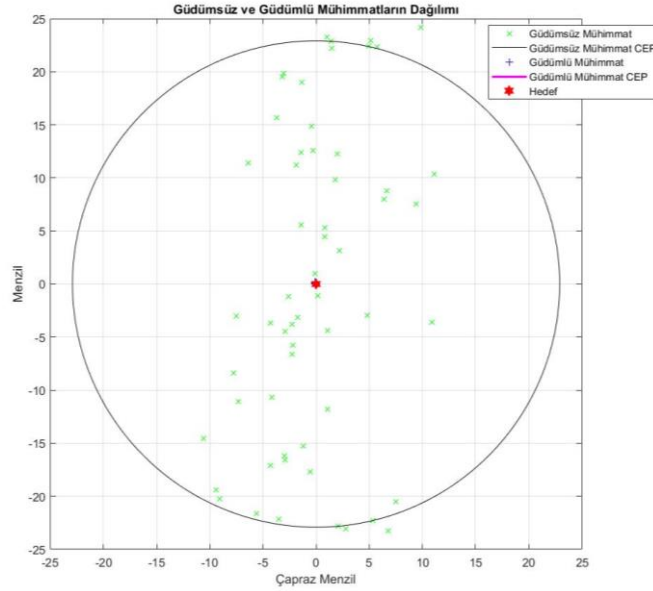
Şekil 4.27. Düşük Namlu Çıkış Hızı ve Yüksek Yükseliş Açısı için Güdümsüz Mühimmat Çarpma Noktası Dağılımı



Şekil 4.28. Düşük Namlu Çıkış Hızı ve Yüksek Yükseliş Açısı için Güdümlü Mühimmat Çarpma Noktası Dağılımları



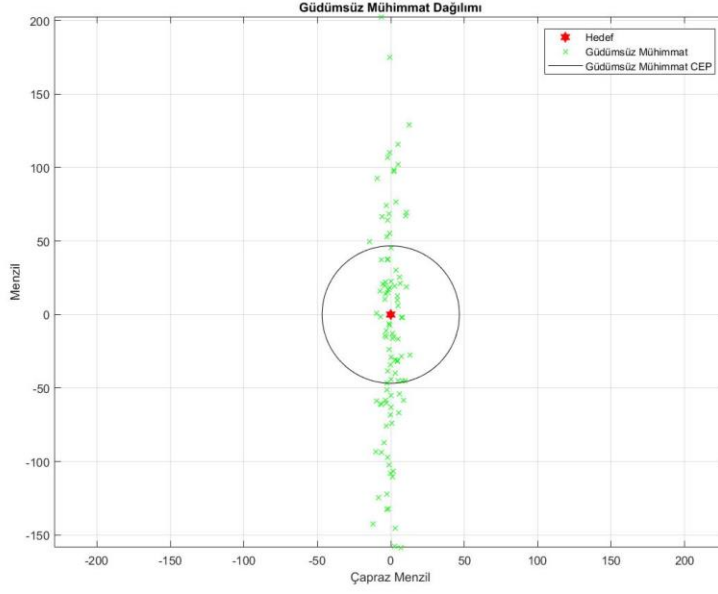
Şekil 4.29. Düşük Namlu Çıkış Hızı ve Yüksek Yükseliş Açısı için Güdümsüz ve Güdümlü Mühimmatların Çarpma Noktası Dağılımları



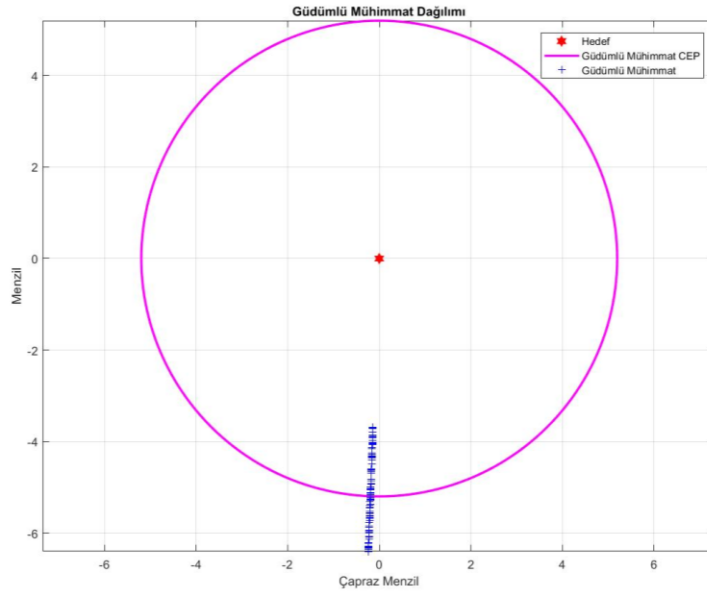
Şekil 4.30. Düşük Namlu Çıkış Hızı ve Yüksek Yükseliş Açısı için Gudsmsüz ve Gudsmlü Mühimmatların Çarpma Noktası Dağılımı (25*25 yakınlaştırılmış görsel)

Şekil 4.27, 4.28, 4.29 ve 4.30 gudsmsüz ve gudsmlü mühimmatların belirtilen giriş koşulları altında mühimmat çarpma noktası dağılımları ve ilgili CEP çemberleri gösterilmiştir. Şekil 4.30 ile gudsmlü ve gudsmsüz CEP çemberlerinin anlaşılır bir şekilde gösterilmesi için Şekil 4.29 ile verilen grafik yakınlaştırılmıştır. Düşük namlu çıkış hızı (500 m/s) ve yüksek yükseliş açısı (70°) şartlarında 8430 metre uzaklıktaki hedef noktasına yapılan atışlar sonucunda gudsmsüz mühimmatlar için CEP çemberinin yarıçapı 22.92 metre olarak hesaplanırken, gudsmlü mühimmatlar için CEP çemberinin yarıçapı 0.08 metre olarak hesaplanmıştır.

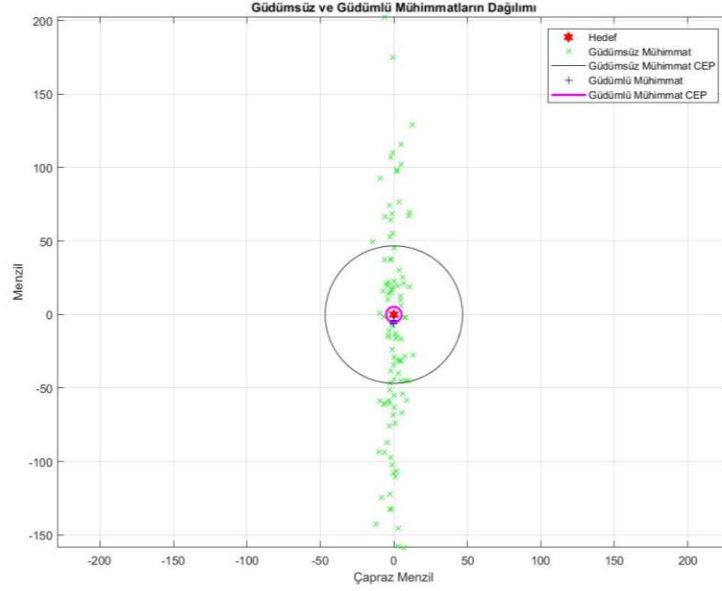
Gudsmsüz ve gudsmlü mühimmatların kıyaslanacağı dördüncü senaryo yüksek namlu çıkış hızı ve düşük yükseliş açısı senaryosudur. Çizelge 4.6 ile belirtilen giriş koşulları namlu çıkış hızı dışında aynı tutulmuş ve namlu çıkış hızı 900 m/s olarak güncellenmiştir. Bu şartlar altında 100 gudsmsüz ve 100 gudsmlü mühimmat atışı yapılarak sonuçlar kaydedilmiştir. Bu atışlar sırasında Çizelge 4.1 ile belirtilen hata kaynakları benzetimlere dahil edilmiş ve sonuçlar grafikler üzerinde gösterilmiştir.



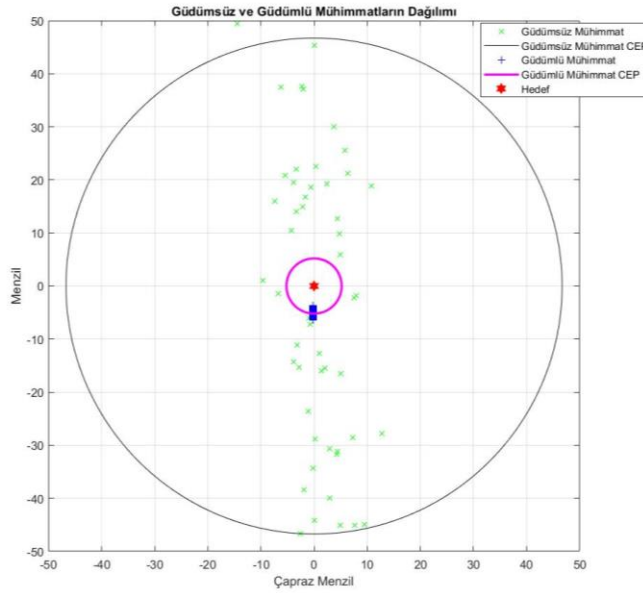
Şekil 4.31. Yüksek Namlu Çıkış Hızı ve Düşük Yükseliş Açısı için Gudsmsz Mühimmat Çarpma Noktası Dağılımı



Şekil 4.32. Yüksek Namlu Çıkış Hızı ve Düşük Yükseliş Açısı için Gudsmlü Mühimmat Çarpma Noktası Dağılımı



Şekil 4.33. Yüksek Namlu Çıkış Hızı ve Düşük Yükseliş Açısı için Gudsüz ve Gudsümlü Mühimmatların Çarpma Noktası Dağılımı

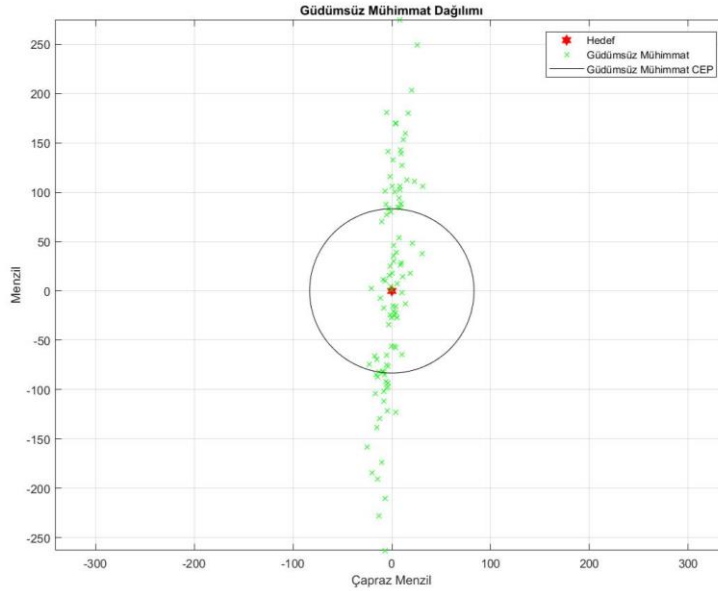


Şekil 4.34. Yüksek Namlu Çıkış Hızı ve Düşük Yükseliş Açısı için Gudsüz ve Gudsümlü Mühimmatların Çarpma Noktası Dağılımı (50*50 yakınlaştırılmış görsel)

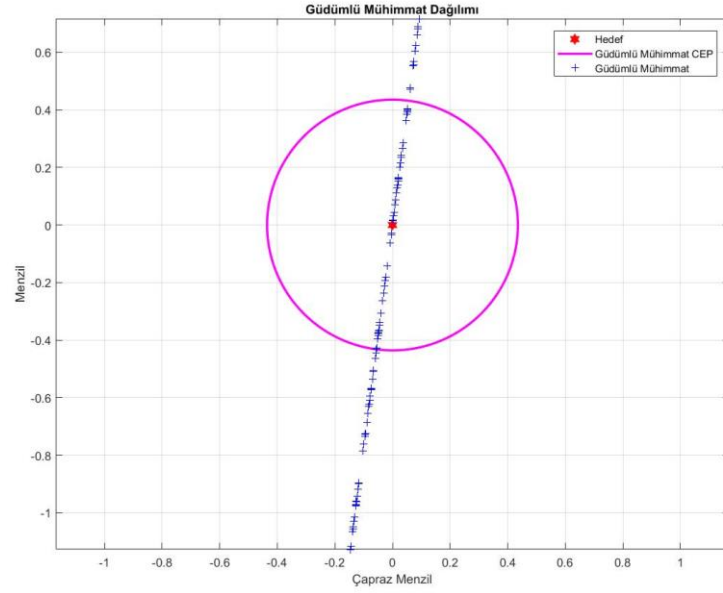
Şekil 4.31, 4.32, 4.33 ve 4.34 gudsüz ve gudsümlü mühimmatların belirtilen giriş koşulları altında mühimmat çarpma noktası dağılımları ve ilgili CEP çemberleri

gösterilmiştir. Şekil 4.34 ile güdümlü ve güdümsüz CEP çemberlerinin anlaşılır bir şekilde gösterilmesi için Şekil 4.33 ile verilen grafik yakınlaştırılmıştır. Yüksek namlu çıkış hızı (900 m/s) ve düşük yükseliş açısı (20°) şartlarında 17955 metre uzaklıktaki hedef noktasına yapılan atışlar sonucunda güdümsüz mühimmatlar için CEP çemberinin yarıçapı 46.73 metre olarak hesaplanırken, güdümlü mühimmatlar için CEP çemberinin yarıçapı 5.20 metre olarak hesaplanmıştır.

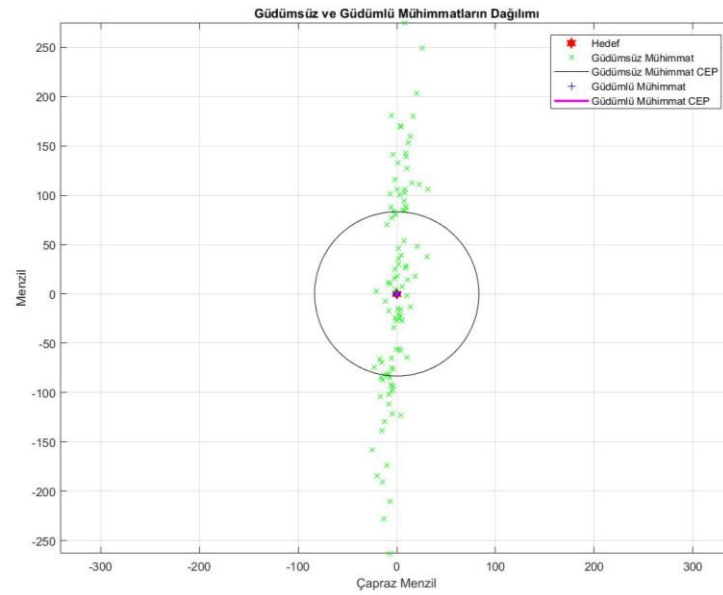
Güdümsüz ve güdümlü mühimmatların kıyaslanacağı beşinci senaryo yüksek namlu çıkış hızı ve orta yükseliş açısı senaryosudur. Çizelge 4.6 ile belirtilen giriş koşulları namlu çıkış hızı ve yükseliş açısı dışında aynı tutulmuştur. Namlu çıkış hızı 900 m/s ve yükseliş açısı 45° olarak güncellenmiştir. Bu şartlar altında 100 güdümsüz ve 100 güdümlü mühimmat atışı yapılarak sonuçlar kaydedilmiştir. Bu atışlar sırasında Çizelge 4.1 ile belirtilen hata kaynakları benzetimlere dahil edilmiş ve sonuçlar grafikler üzerinde gösterilmiştir.



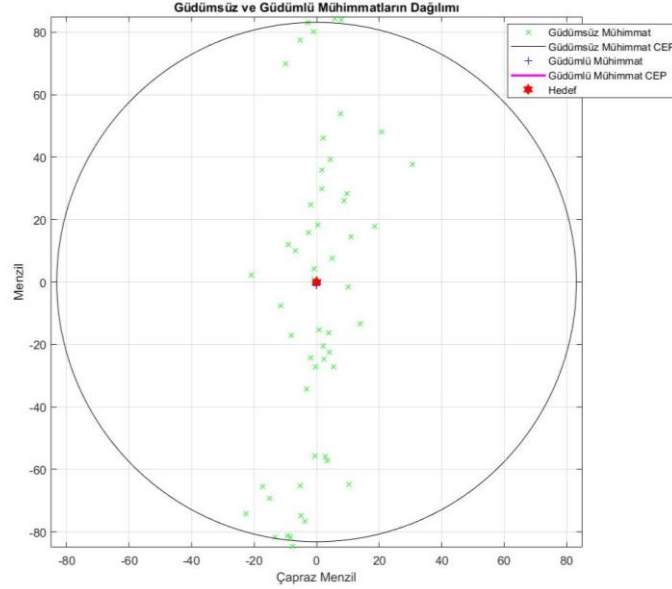
Şekil 4.35. Yüksek Namlu Çıkış Hızı ve Orta Yükseliş Açısı için Güdümsüz Mühimmat Çarpma Noktası Dağılımı



Şekil 4.36. Yüksek Namlu Çıkış Hızı ve Orta Yükseliş Açısı için Güdümlü Mühimmat Çarpma Noktası Dağılımı



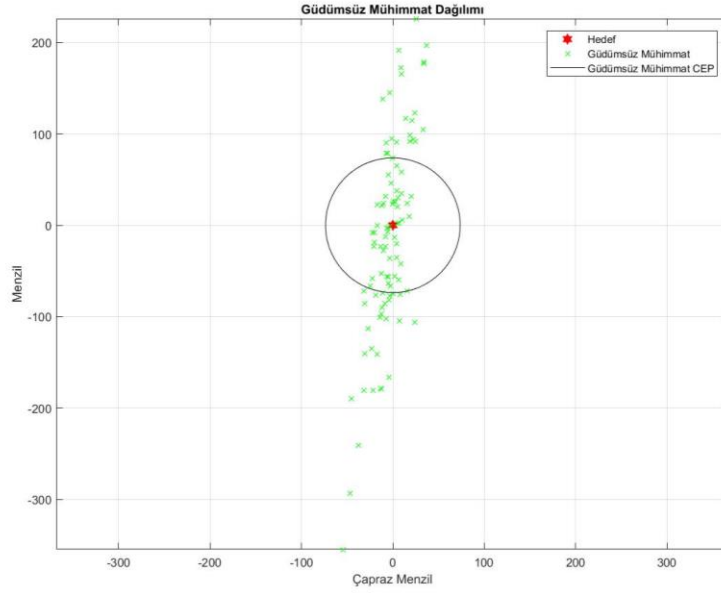
Şekil 4.37. Yüksek Namlu Çıkış Hızı ve Orta Yükseliş Açısı için Güdümsüz ve Güdümlü Mühimmatların Çarpma Noktası Dağılımı



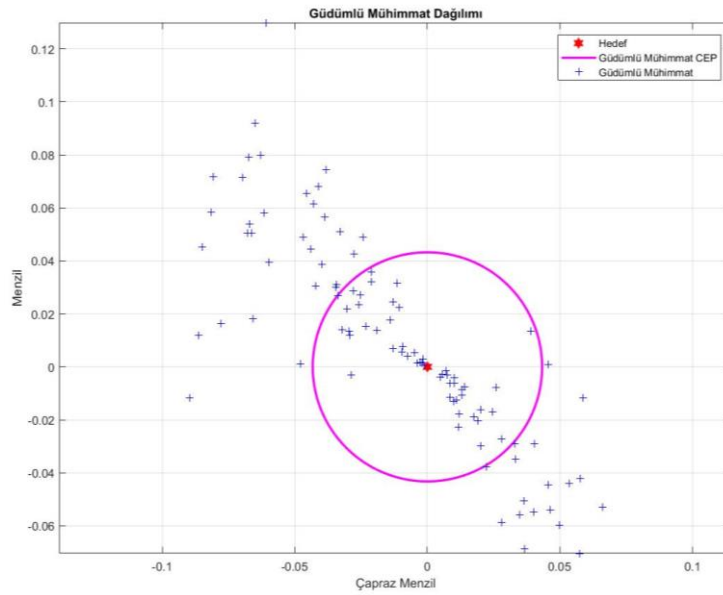
Şekil 4.38. Yüksek Namlu Çıkış Hızı ve Orta Yükseliş Açısı için Güdümsüz ve Güdümlü Mühimmatların Çarpma Noktası Dağılımı (85*85 yakınlaştırılmış görsel)

Şekil 4.35, 4.36, 4.37 ve 4.38 güdümsüz ve güdümlü mühimmatların belirtilen giriş koşulları altında mühimmat çarpma noktası dağılımları ve ilgili CEP çemberleri gösterilmiştir. Şekil 4.38 ile güdümlü ve güdümsüz CEP çemberlerinin anlaşılır bir şekilde gösterilmesi için Şekil 4.37 ile verilen grafik yakınlaştırılmıştır. Yüksek namlu çıkış hızı (900 m/s) ve düşük yükseliş açısı (45°) şartlarında 24116 metre uzaklıktaki hedef noktasına yapılan atışlar sonucunda güdümsüz mühimmatlar için CEP çemberinin yarıçapı 83.19 metre olarak hesaplanırken, güdümlü mühimmatlar için CEP çemberinin yarıçapı 0.44 metre olarak hesaplanmıştır.

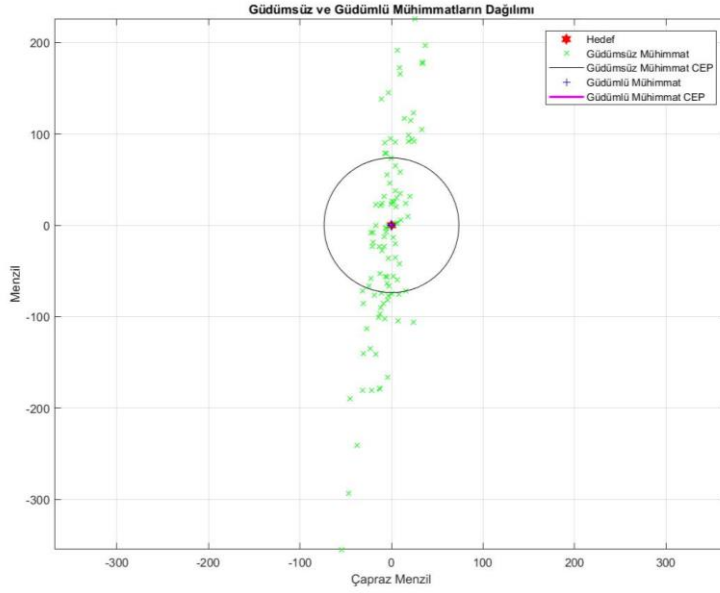
Güdümsüz ve güdümlü mühimmatların kıyaslanacağı son senaryo yüksek namlu çıkış hızı ve yüksek yükseliş açısı senaryosudur. Çizelge 4.6 ile belirtilen giriş koşulları namlu çıkış hızı ve yükseliş açısı dışında aynı tutulmuştur. Namlu çıkış hızı 900 m/s ve yükseliş açısı 70° olarak güncellenmiştir. Bu şartlar altında 100 güdümsüz ve 100 güdümlü mühimmat atışı yapılarak sonuçlar kaydedilmiştir. Bu atışlar sırasında Çizelge 4.1 ile belirtilen hata kaynakları benzetimlere dahil edilmiş ve sonuçlar grafikler üzerinde gösterilmiştir.



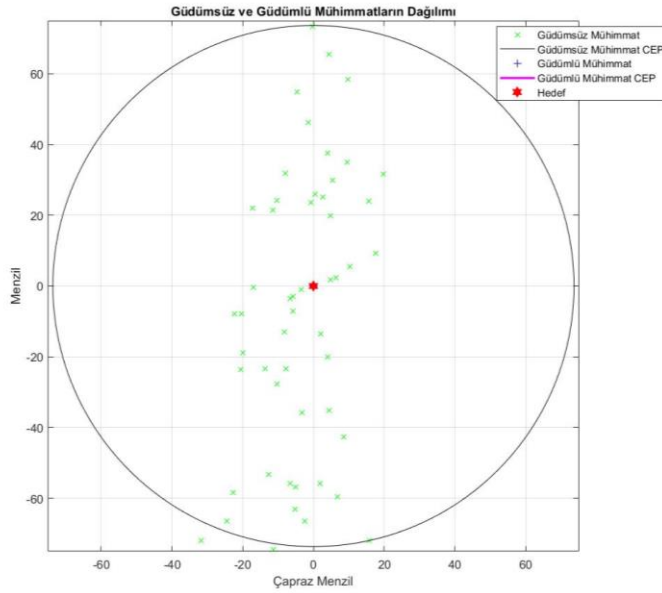
Şekil 4.39. Yüksek Namlu Çıkış Hızı ve Yüksek Yükseliş Açısı için Güdümsüz Mühimmat Çarpma Noktası Dağılımı



Şekil 4.40. Yüksek Namlu Çıkış Hızı ve Yüksek Yükseliş Açısı için Güdümlü Mühimmat Çarpma Noktası Dağılımı



Şekil 4.41. Yüksek Namlu Çıkış Hızı ve Yüksek Yükseliş Açısı için Gudsüz ve Gudsümlü Mühimmatların Çarpma Noktası Dağılımı



Şekil 4.42. Yüksek Namlu Çıkış Hızı ve Yüksek Yükseliş Açısı için Gudsüz ve Gudsümlü Mühimmatların Çarpma Noktası Dağılımı (75*75 yakınlaştırılmış görsel)

Şekil 4.39, 4.40, 4.41 ve 4.42 gudsüz ve gudsümlü mühimmatların belirtilen giriş koşulları altında mühimmat çarpma noktası dağılımları ve ilgili CEP çemberleri

gösterilmiştir. Şekil 4.42 ile güdümlü ve güdümsüz CEP çemberlerinin anlaşılır bir şekilde gösterilmesi için Şekil 4.41 ile verilen grafik yakınlaştırılmıştır. Yüksek namlu çıkış hızı (900 m/s) ve düşük yükseliş açısı (70°) şartlarında 17115 metre uzaklıktaki hedef noktasına yapılan atışlar sonucunda güdümsüz mühimmatlar için CEP çemberinin yarıçapı 73.66 metre olarak hesaplanırken, güdümlü mühimmatlar için CEP çemberinin yarıçapı 0.04 metre olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.7 ile güdümsüz ve güdümlü mühimmatların kıyaslandığı 6 senaryo için hedef mesafe değerleri ve mühimmatların CEP değerleri tablo halinde verilmiştir.

Çizelge 4.7. Güdümsüz ve Güdümlü Mühimmatların Performans Değerlendirmesi

Senaryo	Namlu Çıkış Hızı (m/s)	Yükseliş Açısı (°)	Hedef Mesafesi (m)	Güdümsüz Mühimmat CEP (m)	Güdümlü Mühimmat CEP (m)
1	500	20	9174	21.59	0.65
2	500	45	12850	27.92	0.60
3	500	70	8430	22.92	0.08
4	900	20	17955	46.73	5.20
5	900	45	24116	83.19	0.44
6	900	70	17115	73.66	0.04

Çizelge 4.7 ile belirtildiği üzere hedeflenen mesafe uzadıkça güdümsüz mühimmatların dağılımı ve dolayısıyla CEP değeri artmıştır. Senaryo 1 ve 4 ile namlu çıkış hızının artırılması hedef mesafesini artırdığı için güdümsüz mühimmatlar daha uzun mesafeler kat etmişler ve bunun sonucunda daha geniş bir alanda çarpma noktası dağılımı oluşturmuşlardır. Bu durumun sonucunda CEP değeri artmıştır. Güdümlü mühimmatlar, beklendiği üzere, menzil artışından etkilenmemiş hedef etrafında küçük bir CEP dahilinde toplanmıştır. Senaryo 1 ve 2 ile belirli bir noktaya kadar yükseliş açısı artırma işleminin çarpma noktası dağılımı üzerine etkisi incelenmiştir. Yükseliş açısı arttığı için hedef menzili uzamış ve bunun sonucunda da güdümsüz mühimmatların dağılımı

genişlemiştir. Yükseliş açısının artırılması menzili artırırken güdümsüz mühimmatların CEP değerini de büyütüştür. Gdümlü mühimmatlar menzil artışının üstesinden gelmiş ve hedef etrafında küçük bir CEP değeri ile toplanmıştır. Senaryo 1 ve 3 ile düşük ve yüksek yükseliş açılarının mühimmat dağılımına etkileri incelenmiştir. Mühimmatlar için maksimum menzil diğer atış şartlarına da bağlı olarak 45° etrafında oluşacağı için yükseliş açısını bu değerden sonra artırmak menzili kısaltacaktır ancak, mühimmatların havada kaldığı süre ve kat ettiği mesafe artacaktır. Nitekim güdümsüz mühimmat sonuçları 70° ' lik atışların menzili kısaltırken mühimmat dağılımını artırdığını göstermiştir. Gdümsüz mühimmat CEP değerleri bu senaryolarda artmıştır. Gdümlü mühimmatlarsa güdümsüz mühimmatlara göre çok küçük CEP değerleri içerisinde hedefe ulaşmayı başarmıştır.

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında güdümsüz ve güdümlü topçu mermilerinin performanslarını değerlendirmeye yönelik bir benzetim ortamı geliştirilmiştir. Yapılan çalışmalar Matlab programı ile oluşturulan benzetim ortamı koşulları aracılığıyla gerçekleştirilmiştir.

Güdümsüz ve güdümlü mühimmatların değerlendirilebilmesi için yörünge modelleri geliştirilmiştir. Güdümsüz Mühimmat Yörünge Modeli mühimmat parametreleri ve atış koşulları belirlenen bir mühimmatın izleyeceği yörüngeyi hesaplayan ve bu işlemin sonucunda mühimmatın çarpma noktasını bulan bir modeldir. Güdümsüz Mühimmat Yörünge Modeli Değiştirilmiş Nokta Kütle Modeli kullanılarak geliştirilmiştir. Mühimmat parametreleri tanımlanan herhangi bir mühimmatın atış koşullarına göre izleyeceği yörünge bu model ile bulunabilir. Bu çalışma kapsamında aerodinamik katsayıları literatürden [4] alınmış 155 mm klasik topçu mühimmatı örnek olarak kullanılmıştır.

Güdümlü Mühimmat Yörünge Modeli güdüm ve kontrol birimlerinden oluşmaktadır. Güdüm birimi içerisinde Oransal Seyir Güdümü algoritması çalışmaktadır. Mühimmatın konumu ve hızı ile hedefin konum ve hız bilgisini her bir adımda alan güdüm birimi Oransal Seyir Güdümü algoritmasına göre bir güdüm komutu üretmektedir. Kontrol birimi güdüm biriminden gelen güdüm ivmesini gerçekleştirmeye çalışan birimdir. Mühimmat üzerine etki edecek olan fiziksel kuvvetleri belirleyen, sonrasında güdüm ivmesini sağlamak için gerekli olan ivmeyi bulan ve bu ivmenin hız vektörüne dik olan bileşenini mühimmata uygulan yapıdır. Güdümlü Mühimmat Yörünge Modeli güdüm ve kontrol birimlerinin çıktıları ile mühimmatın izleyeceği yörüngeyi ve çarpma noktasını hesaplar.

Top mermisi atışları sırasında oluşan hataların kaynakları incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda namlu çıkış hızı, mühimmat kütlesi, mühimmat eylemsizlik momenti, namlu yükseliş açısı ve namlu azimut açısı gibi parametrelerin hata kaynağı olarak belirlenmesine karar verilmiştir. Bu hatalar normal dağılım kullanılarak modellenmiştir.

Seçilen her bir hata kaynağı mühimmat parametreleri ve atış koşullarının bir değişkenidir. Bu nedenle bu hata kaynaklarının mühimmat çarpma noktasını değiştireceği yaklaşımı ile hata kaynakları kullanılarak GÜDÜMSÜZ ve GÜDÜMLÜ Mühimmat Yörünge Modelleri Monte Carlo benzetimleri ile çok defa koşturulmuş ve mühimmat çarpma noktaları tespit edilmiştir. Bu benzetimler ile güdümlü ve güdümsüz mühimmat dağılımları tespit edilmiştir. Sonrasında bu dağılımlar REP, DEP, CEP ve hata elipsi yaklaşımları ile değerlendirilmiş ve hata olasılık yaklaşımlarının mühimmat performans ölçümünü nasıl ifade ettiği incelenmiştir. Sonrasında seçilen 6 senaryo için GÜDÜMSÜZ ve GÜDÜMLÜ Mühimmat Yörünge Modelleri koşturulmuş mühimmat dağılımları kaydedilmiştir. Bu dağılımlar CEP yaklaşımı üzerinden incelenmiştir. Her bir senaryo için yapılan 100 güdümsüz mühimmat atışı sonucunda oluşan CEP değeri ve aynı senaryoda yapılan 100 güdümlü mühimmat atışı sonucunda oluşan CEP değeri belirlenmiştir. GÜDÜMLÜ ve güdümsüz mühimmat CEP değerleri senaryo bazlı karşılaştırılmıştır.

Tez çalışmasıyla elde edilen sonuçların güdümlü mühimmatların CEP performanslarının güdümsüz mühimmatların CEP performansı ile karşılaştırılabilmesi açısından fayda sağlayacağı, bu benzetim ortamının güdümlü mühimmat çalışmalarının önünü açabileceği değerlendirilmektedir. Gelecek çalışmalarda kullanılan hata kaynaklarının genişletilerek benzetimlerin geliştirilmesi değerlendirilmektedir. Ayrıca güdüm tekniği olarak Oransal Seyir GÜDÜMÜ ile ANSR sisteminde kullanılan İleri Entegre Sonlanma Durumu'nun karşılaştırılması planlanmaktadır.

6. KAYNAKLAR

- [1] J. Kinard, Artillery: an illustrated history of its impact, ABC-CLIO, Santa Barbara, Kaliforniya, ABD, ISBN 978-1-85109-8, **2007**
- [2] M. Mady, M. Khalil and M. Yehia, Modelling and Production of artillery firing-tables: case-study, In Journal of Physics: Conference Series 1507 082043, IOP Publishing, **2020**
- [3] H. Polachek, Before the ENIAC [weapons firing table calculations], IEEE Annals of the History of Computing, 19(2), 25-30, **1997**
- [4] M. Aldogre, Comparison between trajectory models for firing table application, Doctoral dissertation, North-West University, South Africa, **2019**
- [5] Anonim, Topçu, <https://www.kkk.tsk.tr/topcu.aspx> , (Erişim tarihi: **3 Mayıs 2021**).
- [6] Anonim, Topçu Sistemi, <https://tr.sputniknews.com/foto/201910011040300104-dunyanin-en-guclu-kundagi-motorlu-topcu-sistemleri/> , (Erişim tarihi: **3 Mayıs 2021**).
- [7] C.M. Fann, Development of an Artillery Accuracy Model, Doctoral dissertation, Department of Mechanical and astronautical engineering, Naval Postgraduate School, Monterey, California, **2006**
- [8] E.R. Dickinson, Production of Firing Tables for Cannon Artillery, Report No 1371, US Army Materiel Command, Ballistic research Laboratories, Aberdeen Proving ground, Maryland, **1967**
- [9] P. Chusilp, W. Charubhun, and A. Ridluan, Developing firing table software for artillery projectile using iterative search and 6-DOF trajectory model. In the Second TSME International Conference on Mechanical Engineering, 19-21 October, Krabi pp. 19-21, **2011**
- [10] L. M. Barbosa, A. Blanco, D. P. Dutra, W. Santana and J. Abrunhosa, A critical evaluation of three models of external ballistics, 18th International Congress of Mechanical Engineering, 6-11 November , **2005**
- [11] L. Baranowski, Feasibility analysis of the modified point mass trajectory model for the need of ground artillery fire control systems. Journal Of Theoretical And Applied Mechanics, 51(3), 511-522, **2013**
- [12] A. Altufayl ,Development of a 6-DOF Trajectory Simulation Model for Asymmetric Projectiles, Doctoral dissertation, North-West University, South Africa, **2019**
- [13] STANAG (Standardization Agreement by NATO). The Modified point mass and five degrees of freedom trajectory model ,STANAG 4355, **2009**

- [14] M.D. Ilg, Guidance, navigation, and control for munitions, Doctoral dissertation, Drexel University, Philadelphia, **2008**
- [15] P.H. Morrison and D. S. Amberntson, Guidance and control of a cannon-launched guided projectile, *Journal of Spacecraft and Rockets*, 14(6), 328-334, **1977**
- [16] Anonim, Cooperhead Silah Sistemi, https://en.wikipedia.org/wiki/M712_Copperhead (Erişim tarihi: **3 Mayıs 2021**).
- [17] K. Pamadi, E. Ohlmeyer and T. Pepitone, Assessment of a GPS guided spinning projectile using an accelerometer-only IMU, AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit ,16-19 August 2004, Rhode Island, **2004**
- [18] E. Gagnon and M. Lauzon, Low cost guidance and control solution for in-service unguided 155 mm artillery Shell, Defence Research and Development Canada, Technical Report 2008-333,DRDC, Valcartier,Canada. (**2009**).
- [19] STANAG (Standardization Agreement by NATO). The Modified point mass and five degrees of freedom trajectory model, STANAG 4355, **1997**
- [20] H. I. Kang, G. In Kim, H. Soo Kim., A study on the range & deflection distance observation based on latitude position of artillery gun system, *International Journal of Engineering & Technology*, 7(2): 147-150, **2018**
- [21] Anonim, Coriolis Etkisi, <https://fitz6.wordpress.com/2020/02/23/coriolis-effect/> (Erişim tarihi: **3 Mayıs 2021**).
- [22] M. R. Driels, *Weaponering: Conventional weapon system effectiveness*, Second Edition, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, Reston, Virginia, Chapter 3 pp. 82-83, **2004**
- [23] R. McCoy, *Modern exterior ballistics: The launch and flight dynamics of symmetric projectiles*, 1st ed.,Schiffer Publishing Ltd., China, pp. 34 (**2012**).
- [24] M. R. Driels, *Weaponering: Conventional weapon system effectiveness*, Second Edition, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, Reston, Virginia, Chapter 3 pp. 101, **2004**
- [25] D. Luo, D. Huang and G. Wu, Analytical solution on Magnus wind turbine power performance based on the blade element momentum theory, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 3(3), 033104, **2011**
- [26] Anonim, Nütasyon Hareketi, <https://webpath.med.utah.edu/TUTORIAL/GUNS/GUNBLST.html> (Erişim tarihi: **3 Mayıs 2021**).
- [27] W. Kai , S. Chunzhen and J. Yi , Research on adaptive guidance technology of uav ship landing system based on net recovery, *Procedia Engineering*, Elsevier,v. 99, p. 1027–1034, **2015**

- [28] P. Zarchan, Tactical and strategic missile guidance, American Institute of Aeronautics and Astronautics Education Series, 6.Edition ISBN:978-1-60086-894-8, **2012**
- [29] D. Raymer, Aircraft design: a conceptual approach. American Institute of Aeronautics and Astronautics Education Series , 5. Edition ISBN:978-1-60086-911-2, **2012**
- [30] I. Kroo , Drag due to lift: concepts for prediction and reduction, Annual Review of Fluid Mechanics, 33(1), 587-617, **2001**
- [31] Anonim, Kanat Pozisyon Değişikliğinin Kaldırma ve Sürüklenme Kuvvetlerine Etkisi, https://www.mpoweruk.com/flight_theory.htm (Erişim tarihi: **3 Mayıs 2021**).
- [32] M. R. Driels, Weaponeering: Conventional weapon system effectiveness, Second Edition, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, Reston, Virginia Chapter 1 pp. 21, **2004**
- [33] M. R. Driels, Weaponeering: Conventional weapon system effectiveness, Second Edition, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, Reston, Virginia Chapter 4 pp. 127, **2004**
- [34] M. R. Driels, Weaponeering: Conventional weapon system effectiveness, Second Edition, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, Reston, Virginia Chapter 4 pp. 135, **2004**
- [35] M. R. Driels, Weaponeering: Conventional weapon system effectiveness, Second Edition, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, Reston, Virginia Chapter 4 pp. 136, **2004**
- [36] M. R. Driels, Weaponeering: Conventional weapon system effectiveness, Second Edition, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, Reston, Virginia Chapter 4 pp. 139-140, **2004**
- [37] Anonim, Standart Atmosfer Modeli, https://www.engineeringtoolbox.com/international-standard-atmosphere-d_985.html (Erişim tarihi: **3 Mayıs 2021**).

EKLER

EK 1 – Standart Atmosfer Modeli

Bu ekte, standart atmosfer modeli parametreleri olan sıcaklık, basınç, hava yoğunluğu ve ses hızı yüksekliğe bağlı olarak bir tablo halinde verilmiştir [37].

Yükseklik (m)	Sıcaklık (K)	Basınç (bar)	Hava Yoğunluğu Yoğunluk - ρ	Ses Hızı (m/s)
-2000	301.2	1.2778	1.2067	347.9
-1500	297.9	1.2070	1.1522	346.0
-1000	294.7	1.1393	1.0996	344.1
-500	291.4	1.0748	1.0489	342.2
0	288.15	1.01325	1.0000	340.3
500	284.9	0.9546	0.9529	338.4
1000	281.7	0.8988	0.9075	336.4
1500	278.4	0.8456	0.8638	334.5
2000	275.2	0.7950	0.8217	332.5
2500	271.9	0.7469	0.7812	330.6
3000	268.7	0.7012	0.7423	328.6
3500	265.4	0.6578	0.7048	326.6

4000	262.2	0.6166	0.6689	324.6
4500	258.9	0.5775	0.6343	322.6
5000	255.7	0.5405	0.6012	320.5
5500	252.4	0.5054	0.5694	318.5
6000	249.2	0.4722	0.5389	316.5
6500	245.9	0.4408	0.5096	314.4
7000	242.7	0.4111	0.4817	312.3
7500	239.5	0.3830	0.4549	310.2
8000	236.2	0.3565	0.4292	308.1
8500	233.0	0.3315	0.4047	306.0
9000	229.7	0.3080	0.3813	303.8
9500	226.5	0.2858	0.3589	301.7
10000	223.3	0.2650	0.3376	299.8
10500	220.0	0.2454	0.3172	297.4
11000	216.8	0.2270	0.2978	295.2
11500	216.7	0.2098	0.2755	295.1

12000	216.7	0.1940	0.2546	295.1
12500	216.7	0.1793	0.2354	295.1
13000	216.7	0.1658	0.2176	295.1
13500	216.7	0.1533	0.2012	295.1
14000	216.7	0.1417	0.1860	295.1
14500	216.7	0.1310	0.1720	295.1
15000	216.7	0.1211	0.1590	295.1
15500	216.7	0.1120	0.1470	295.1
16000	216.7	0.1035	0.1359	295.1
16500	216.7	0.09572	0.1256	295.1
17000	216.7	0.08850	0.1162	295.1
17500	216.7	0.08182	0.1074	295.1
18000	216.7	0.07565	0.09930	295.1
18500	216.7	0.06995	0.09182	295.1
19000	216.7	0.06467	0.08489	295.1
19500	216.7	0.05980	0.07850	295.1

20000	216.7	0.05529	0.07258	295.1
22000	218.6	0.04047	0.05266	296.4
24000	220.6	0.02972	0.03832	297.7
26000	222.5	0.02188	0.02797	299.1
28000	224.5	0.01616	0.02047	300.4
30000	226.5	0.01197	0.01503	301.7

EK 2 – Matlab Ortamında Geliştirilen Modeller

Bu ekte Matlab ortamında geliştirilen modeller paylaşılmıştır. Güdümsüz topçu mermilerinin yörüngesini hesaplayan Matlab fonksiyonu aşağıda verilmiştir.

```
function Position =  
trajectory(Vmuzzle,D,m,Ix,lat,Azimuth,elevation,wind,t  
ime_step)  
  
aero_coef=[...  
0.010 0.1414 1.78 0 1.889 3.342 -8.6 0.000 -0.02768 -  
0.71 -1.16 0 0;  
0.400 0.1416 1.78 0 1.89 3.339 -8.7 0.000 -0.02794 -  
0.71 -1.16 0 0;  
0.600 0.1428 1.79 0 1.901 3.369 -8.5 0.000 -0.02782 -  
0.71 -1.16 0 0;  
0.700 0.1436 1.96 0 1.909 3.391 -8.4 0.000 -0.02769 -  
0.72 -1.26 0 0;  
0.750 0.1449 2.07 0 1.916 3.43 -8.5 0.000 -0.0275 -  
0.72 -1.28 0 0;  
0.800 0.1485 2.18 0 1.933 3.497 -8.4 0.000 -0.02747 -  
0.74 -1.23 0 0;  
0.850 0.1496 2.36 0 1.941 3.6 -8.4 0.000 -0.02751 -  
0.76 -1 0 0;  
0.875 0.1596 2.48 0 1.977 3.673 -8.8 0.000 -0.02735 -  
0.77 -0.84 0 0;  
0.900 0.1754 2.57 0 2.033 3.741 -9.3 0.000 -0.02706 -  
0.79 -0.8 0 0;  
0.925 0.195 2.74 0 2.112 3.819 -10 0.000 -0.02652 -  
0.89 -0.71 0 0;  
0.950 0.2288 2.9 0 2.194 3.826 -10.8 0.000 -0.02618 -  
1.01 -0.55 0 0;  
0.975 0.2733 3.08 0 2.269 3.756 -11.1 0.000 -0.0262 -  
0.9 -0.32 0 0;  
1.000 0.3237 3.27 0 2.328 3.622 -11.4 0.000 -0.02638 -  
0.83 -0.16 0 0;  
1.025 0.3573 3.46 0 2.385 3.523 -11.3 0.000 -0.02596 -  
0.8 -0.01 0 0;  
1.050 0.3795 3.69 0 2.425 3.457 -11.3 0.000 -0.02566 -  
0.76 0.05 0 0;  
1.100 0.3835 4.19 0 2.445 3.416 -11.6 0.000 -0.0253 -  
0.71 0.13 0 0;  
1.200 0.3812 4.69 0 2.476 3.408 -12.6 0.000 -0.02504 -  
0.65 0.15 0 0;
```

```

1.350 0.3626 4.21 0 2.533 3.377 -12.9 0.000 -0.02448 -
0.58 0.23 0 0;
1.500 0.3462 3.72 0 2.621 3.27 -13 0.000 -0.02362 -
0.56 0.31 0 0;
1.750 0.3215 3.25 0 2.724 3.141 -13 0.000 -0.02274 -
0.54 0.31 0 0;
2.000 0.2972 2.74 0 2.812 3.059 -12.4 0.000 -0.02204 -
0.51 0.33 0 0;
2.250 0.2764 2.45 0 2.866 2.975 -12 0.000 -0.0212 -0.5
0.32 0 0
2.500 0.2607 2.18 0 2.865 2.928 -12 0.000 -0.02028 -
0.5 0 0 0;
3.000 0.2329 1.73 0 2.821 2.874 -12 0.000 -0.01905 -
0.5 0 0 0;
];

```

```

% inital conditions

```

```

yaw_response=[0;0;0];

```

```

twist=20;

```

```

R=[0;-6.356766*10^6;0];

```

```

EAS=7.292115*10^(-5); % Earth Angular Speed

```

```

spin=2*pi*Vmuzzle/(twist*D);

```

```

position=[0;0;0];

```

```

velocity=Vmuzzle*([cosd(elevation)*cosd(Azimuth);...

```

```

sind(elevation);cosd(elevation)*sind(Azimuth)]);

```

```

acc=[0;0;0];

```

```

Position=[position'];

```

```

for i=1:100000

```

```

vair=velocity-wind;

```

```

[T, SS, P, rho] = atmosisa(position(2,:));

```

```

%Aerodynamic Coefficients

```

```

mach=norm(vair)/SS;

```

```

cdo=interp1(aero_coef(:,1),aero_coef(:,2),mach);

```

```

cda2=interp1(aero_coef(:,1),aero_coef(:,3),mach);
cla=interp1(aero_coef(:,1),aero_coef(:,5),mach);
cla3=interp1(aero_coef(:,1),aero_coef(:,12),mach);
cma=interp1(aero_coef(:,1),aero_coef(:,6),mach);
cma3=interp1(aero_coef(:,1),aero_coef(:,12),mach);
clp=interp1(aero_coef(:,1),aero_coef(:,9),mach);
cypa=interp1(aero_coef(:,1),aero_coef(:,10),mach);
cypa3=interp1(aero_coef(:,1),aero_coef(:,13),mach);

% Stanag 4355 Gravity
r=position-R;
g0=9.80665*(1-0.0026*cosd(2*lat));
g=-g0*(norm(R)^2/norm(r)^3)*r;

% Stanag 4355 Coriolis
w=[EAS*cosd(lat)*cosd(Azimuth);EAS*sind(lat);-
EAS*cosd(lat)*sind(Azimuth)];
C=-2*cross(w,velocity);

% Stanag 4355 Drag
DF=(-
1*pi*rho*(D^2)/8)*(cdo+(cda2*(norm(yaw_response)^2)))*
norm(velocity)*vair;

% Stanag 4355 Magnus
MF=( (-
1)*pi*(D^3)*rho/8)*spin*cypa*cross(yaw_response,vair);

% Stanag 4355 Lift
LF=(pi*(D^2)*rho/8)*(cla+cla3*(norm(yaw_response)^2))*
(norm(velocity)^2)*yaw_response;

% Total Acceleration according to Stanag 4355
acc=C+g+(DF+MF+LF)/m;

velocity=velocity+ acc*time_step;
position=position+ velocity*time_step;

% Stanag 4355 Spin
spin_rate=pi*rho*D^4*spin*clp*norm(velocity)/(16*Ix);
spin=spin+spin_rate*time_step;

% Stanag 4355 Yaw Response
yaw_response=(-
8)*Ix*spin*cross(vair,acc)/(pi*rho*D^3*cma*norm(velocity)^4);

```



```

% Data Record
Position=[Position;position'];

if (position(2,1)<0)
    break
end
end

end

```

Güdümlü topçu mermilerinin yörüngesini hesaplayan Matlab fonksiyonu aşağıda verilmiştir.

```

function Position =
guidance(Vmuzzle,D,m,Ix,lat,Azimuth,elevation,wind,time
e_step,target_position,target_velocity)

aero_coef=[...
0.010 0.1414 1.78 0 1.889 3.342 -8.6 0.000 -0.02768 -
0.71 -1.16 0 0;
0.400 0.1416 1.78 0 1.89 3.339 -8.7 0.000 -0.02794 -
0.71 -1.16 0 0;
0.600 0.1428 1.79 0 1.901 3.369 -8.5 0.000 -0.02782 -
0.71 -1.16 0 0;
0.700 0.1436 1.96 0 1.909 3.391 -8.4 0.000 -0.02769 -
0.72 -1.26 0 0;
0.750 0.1449 2.07 0 1.916 3.43 -8.5 0.000 -0.0275 -
0.72 -1.28 0 0;
0.800 0.1485 2.18 0 1.933 3.497 -8.4 0.000 -0.02747 -
0.74 -1.23 0 0;
0.850 0.1496 2.36 0 1.941 3.6 -8.4 0.000 -0.02751 -
0.76 -1 0 0;
0.875 0.1596 2.48 0 1.977 3.673 -8.8 0.000 -0.02735 -
0.77 -0.84 0 0;
0.900 0.1754 2.57 0 2.033 3.741 -9.3 0.000 -0.02706 -
0.79 -0.8 0 0;
0.925 0.195 2.74 0 2.112 3.819 -10 0.000 -0.02652 -
0.89 -0.71 0 0;
0.950 0.2288 2.9 0 2.194 3.826 -10.8 0.000 -0.02618 -
1.01 -0.55 0 0;
0.975 0.2733 3.08 0 2.269 3.756 -11.1 0.000 -0.0262 -
0.9 -0.32 0 0;
1.000 0.3237 3.27 0 2.328 3.622 -11.4 0.000 -0.02638 -
0.83 -0.16 0 0;

```

```

1.025 0.3573 3.46 0 2.385 3.523 -11.3 0.000 -0.02596 -
0.8 -0.01 0 0;
1.050 0.3795 3.69 0 2.425 3.457 -11.3 0.000 -0.02566 -
0.76 0.05 0 0;
1.100 0.3835 4.19 0 2.445 3.416 -11.6 0.000 -0.0253 -
0.71 0.13 0 0;
1.200 0.3812 4.69 0 2.476 3.408 -12.6 0.000 -0.02504 -
0.65 0.15 0 0;
1.350 0.3626 4.21 0 2.533 3.377 -12.9 0.000 -0.02448 -
0.58 0.23 0 0;
1.500 0.3462 3.72 0 2.621 3.27 -13 0.000 -0.02362 -
0.56 0.31 0 0;
1.750 0.3215 3.25 0 2.724 3.141 -13 0.000 -0.02274 -
0.54 0.31 0 0;
2.000 0.2972 2.74 0 2.812 3.059 -12.4 0.000 -0.02204 -
0.51 0.33 0 0;
2.250 0.2764 2.45 0 2.866 2.975 -12 0.000 -0.0212 -0.5
0.32 0 0
2.500 0.2607 2.18 0 2.865 2.928 -12 0.000 -0.02028 -
0.5 0 0 0;
3.000 0.2329 1.73 0 2.821 2.874 -12 0.000 -0.01905 -
0.5 0 0 0;
];

```

```
gt=500;
```

```
% initial conditions
```

```
yaw_response=[0;0;0];
```

```
twist=20;
```

```
R=[0;-6.356766*10^6;0];
```

```
EAS=7.292115*10^(-5); % Earth Angular Speed
```

```
spin=2*pi*Vmuzzle/(twist*D);
```

```
position=[0;0;0];
```

```
velocity=Vmuzzle*([cosd(elevation)*cosd(Azimuth);...
sind(elevation);cosd(elevation)*sind(Azimuth)]);
```

```
acc=[0;0;0];
```

```
Position=[position'];
```

```
V=[velocity'];
```

```
Mach_Record=[];
```

```
a_Record=[];
```

```
for i=1:100000
```

```

vair=velocity-wind;
[T, SS, P, rho] = atmosisa(position(2,:));

%Aerodynamic Coefficients
mach=norm(vair)/SS;
Mach_Record=[Mach_Record mach];
cdo=interp1(aero_coef(:,1),aero_coef(:,2),mach);
cda2=interp1(aero_coef(:,1),aero_coef(:,3),mach);
cla=interp1(aero_coef(:,1),aero_coef(:,5),mach);
cla3=interp1(aero_coef(:,1),aero_coef(:,12),mach);
cma=interp1(aero_coef(:,1),aero_coef(:,6),mach);
cma3=interp1(aero_coef(:,1),aero_coef(:,12),mach);
clp=interp1(aero_coef(:,1),aero_coef(:,9),mach);
cypa=interp1(aero_coef(:,1),aero_coef(:,10),mach);
cypa3=interp1(aero_coef(:,1),aero_coef(:,13),mach);

% Stanag 4355 Gravity
r=position-R;
g0=9.80665*(1-0.0026*cosd(2*lat));
g=-g0*(norm(R)^2/norm(r)^3)*r;

% Stanag 4355 Coriolis
w=[EAS*cosd(lat)*cosd(Azimuth);EAS*sind(lat);-
EAS*cosd(lat)*sind(Azimuth)];
C=-2*cross(w,velocity);

% Stanag 4355 Drag
DF=(-
1*pi*rho*(D^2)/8)*(cdo+(cda2*(norm(yaw_response)^2)))*
norm(velocity)*vair;

% Stanag 4355 Magnus
MF=(-
1)*pi*(D^3)*rho/8)*spin*cypa*cross(yaw_response,vair);

% Stanag 4355 Lift
LF=(pi*(D^2)*rho/8)*(cla+cla3*(norm(yaw_response)^2))*
(norm(velocity)^2)*yaw_response;

% Total Acceleration according to Stanag 4355
if(i<gt)
acc=C+g+(DF+MF+LF)/m;
else

```

```

    % Proportional Navigation
a_PN =
PN(position,velocity,target_position,target_velocity);
a_CNTRL_wT=a_PN-(C+g+(DF+MF+LF)/m);
control_projection=dot(a_CNTRL_wT,velocity)*velocity/(norm(velocity)^2);
a_CNTRL=a_CNTRL_wT-control_projection;
if(mach>1)
    LD=4*(mach+3)/mach;
else
    LD=cla/cdo;
end
a_drag=norm(a_CNTRL)/LD*(DF/norm(DF));

acc=a_CNTRL+a_drag+C+g+(DF+MF+LF)/m;

a_Record=[a_Record norm(a_CNTRL)];
end
velocity=velocity+ acc*time_step;
position=position+ velocity*time_step;
if(i>gt)
    spin=0;
end
% Stanag 4355 Spin
spin_rate=pi*rho*D^4*spin*clp*norm(velocity)/(16*Ix);
spin=spin+spin_rate*time_step;

% Stanag 4355 Yaw Response
yaw_response=(-
8)*Ix*spin*cross(vair,acc)/(pi*rho*D^3*cma*norm(velocity)^4);

% Data Record
Position=[Position;position'];
V=[V; velocity'];

if (norm(target_position-position)<2)
    norm(target_position-position)
    break
end
if (position(2,1)<0)
    break
end
end
end

end

```

Güdümlü mühimmatların yörüngesini hesaplayan fonksiyon içerisinde çalışan Oransal Seyir Güdümü algoritmasının Matlab fonksiyonu aşağıda verilmiştir.

```
function a_PN =  
PN(position,velocity,target_position,target_velocity)  
  
Rtm=target_position-position;  
Vtm=target_velocity-velocity;  
  
Vc=-  
(Rtm(1,1)*Vtm(1,1)+Rtm(2,1)*Vtm(2,1)+Rtm(3,1)*Vtm(3,1)  
)/norm(Rtm);  
tgo=norm(Rtm)/Vc;  
  
ZEM=Rtm+Vtm*tgo;  
  
ZEMdotRTM=(ZEM(1,1)*Rtm(1,1)+ZEM(2,1)*Rtm(2,1)+ZEM(3,1)  
)*Rtm(3,1)/norm(Rtm);  
  
ZEMpar=ZEMdotRTM/norm(Rtm)*(Rtm);  
  
ZEMper=ZEM-ZEMpar;  
  
a_PN=3*ZEMper/(tgo^2);  
  
end
```