



ÇOK AJANLI HAVA SAVUNMA SİSTEMİ BENZETİMİ

Erhan BÜLBÜL

DOKTORA TEZİ

BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Erhan BÜLBÜL

20/06/2023

ÇOK AJANLI HAVA SAVUNMA SİSTEMİ BENZETİMİ
(Doktora Tezi)

Erhan BÜLBÜL

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2023

ÖZET

Uzun menzilli balistik füzeler düşüş safhasında çok yüksek hızlara ulaşmaktadır. Bu sebeple geleneksel savunma önlemleri özellikle uzun menzilli balistik füzelere karşı etkisiz kalmaktadır. Bu tez çalışması balistik füzelere karşı savunma amacıyla tasarlanmış otonom bir hava savunma sistemi sunmaktadır. Çalışmada savunma probleminin zorlukları ayrı ayrı ele alınmakta ve bunlara algoritmik çözümler önerilmektedir. Savunma sisteminin yanısıra gerçek zamanlı ve yüksek doğruluğa sahip bir balistik füze saldırı benzetim ortamı geliştirilmiş, ve savunma sistemi bu ortamda test edilmiştir. Benzetim ortamındaki çevresel dinamiklerin etkilerinin canlandırılması için, çalışmaya özgün hiyerarşik çok ajanlı bir çevre kontrol modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen özgün mimari kullanılarak otonom çalışabilen radar, komuta merkezi ve karşılama füzesi ajanları modellenmiştir. Güzergah tahmini için bir öngörümlü tahmin yaklaşımı kullanılmış, buradan elde edilen çıkarımlar entegre kontrol sistemine aktarılarak karşılama füzesinin balistik tehdite yönlendirilmesi sağlanmıştır. Geliştirilen savunma sistemi üç boyutlu benzetim ortamında kısa, orta, uzun ve kıtalarası menzile sahip füzelere karşı test edilmiştir. Testlerin gerçekleştiği üç boyutlu benzetim ortamında balistik hareketi etkileyen yerçekimi, hava sürtünmesi, dünyanın dönüş hızı gibi çevresel faktörlerin yanısıra füzeyle ait en, boy, başlık ve yakıt tankı kütlesi, yakıt cinsi ve miktarı, itici motor gücü, fırlatma açısı ve uçuş fazları gibi parametrik tanımlı değişkenler ve bunlara bağlı etkiler tanımlanmış, saldırı ve savunma modelleri belirlenen faktörler etkisi altında test edilmiştir. Büyük ölçekli dünya haritası üzerinde gerçekleştirilen saldırıların güzergâhları ve hedef noktaları, balistik uçuş kinematiğine dayalı oluşturulan otonom öngörülü model ile tespit edilmiştir. Çalışmada donanımsal sınırları temsil etmesi adına performans limitleri eklenmesine rağmen uzun ve kıtalararası saldırıların %86.5'i başarıyla karşılanmıştır. Bazı saldırı senaryolarında bu oran %97'ye kadar yükselmektedir.

Bilim Kodu : 92415
Anahtar Kelimeler : Balistik füze, seyir kontrol sistemi, savunma sistemi, ajan bazlı modelleme, çok ajanlı sistemler
Sayfa Adedi : 90
Danışman : Prof. Dr. Aydın ÇETİN

A MULTI-AGENT AIR DEFENSE SYSTEM SIMULATION

(Phd. Thesis)

Erhan BÜLBÜL

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2023

ABSTRACT

Long-range ballistic missiles reach very high speeds during the descent phase. Therefore, traditional defense measures are particularly ineffective against long-range ballistic missiles. This thesis presents an autonomous air defense system designed for defense against ballistic missiles. The difficulties of the defense problem are discussed separately and algorithmic solutions are proposed. In addition to the defense system, a real-time and highly accurate ballistic missile attack simulation environment has been developed, and the defense system has been tested in this environment. A novel hierarchical multi-agent environmental control model was developed in order to simulate the effects of environmental dynamics in the simulation environment. By using this original architecture, autonomous radar, command center and interceptor agents are modeled. A predictive estimation approach is used for trajectory prediction, and the inferences obtained are transferred to the integrated control system to guide the interceptor missile to the ballistic threat. The defense system developed was tested against short, medium, long and intercontinental range missiles in a three-dimensional simulation environment. The environmental factors such as gravity, air resistance, and the rotation speed of the earth affecting the ballistic motion, as well as parameters such as length, width, head, and fuel tank mass, fuel type and amount, thrust power, launch angle, and flight phases of the missile, and their effects are defined, and attack and defense models are tested under the influence of the factors determined. The routes and target points of the attacks carried out on a large-scale world map were determined based on an autonomous predictive model created based on ballistic flight kinematics. Despite the addition of performance limits to represent hardware limitations, 86.5% of long and intercontinental attacks have been successfully intercepted. In some attack scenarios, this ratio can be as high as 97%.

Science Code : 92415

Key Words : Ballistic missile, cruise control system, defense system, agent-based models, multi-agent systems

Page Number : 90

Supervisor : Prof. Dr. Aydın ÇETİN

TEŐEKKÖR

Bu çalışmanın gerçekleőtirilmesinde, değerli bilgilerini benimle paylaőan, kendisine ne zaman danıősam bana kıymetli zamanını benden esirgemeyen danıőmanım Prof. Dr. Aydın ÇETİN'e ve bu sőrete bana her zaman destek olan aileme teőekkőrő bir borç biliyor ve őőkranlarımı sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	v
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR İNCELEMESİ.....	3
3. YÖNTEM ve ARAÇLAR.....	7
3.1. Balistik Füzelerin Hareket Karakteristiği.....	7
3.2. Ajan Bazlı Benzetim Modelleme	12
4. AJAN BAZLI ÇEVRE KONTROL MİMARİSİ.....	15
4.1. Ajan Yapısı.....	16
4.2. Çevre Kontrol Birimi	17
4.3. Alt Sistemler.....	18
4.4. Etkileşim ve İletişim.....	19
4.5. Veri Paylaşımı	21
4.6. ABÇK Mimarisinin Yeniden Kullanılabilirlik Analizi	22
5. BENZETİM MODELİ	25
5.1. Çevre Kontrol Biriminin Özelleştirilmesi	27

	Sayfa
5.1.1. Yerçekimi	27
5.1.2. Hava sürtünmesi	28
5.1.3. Coriolis etkisi	29
5.1.4. Sinyal gürültüsü	30
5.1.5. Fiziksel etki iterasyonu	31
5.2. Balistik Füze.....	31
5.2.1. İtiş motoru	32
5.2.2. Yakıt tankları.....	32
5.2.3. Savaş başlığı.....	33
5.3. Hava Savunma Sistemi.....	33
5.3.1. Radar	34
5.3.2. Komuta merkezi	35
5.3.3. Karşılama füzesi.....	46
6. TEST ORTAMI VE SENARYOLARI.....	51
7. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	59
7.1. Hedef Güncelleme Mesafesinin Etkisi ve Kalibrasyonu.....	59
7.2. İtiş Motoru Güç Sınırının Etkisi.....	63
7.3. Performans ve Etkinlik Ölçümü.....	65
7.4. Geleneksel Karşılama Yaklaşımları İle Karşılaştırma	69
7.5. Endüstride Mevcut Sistemlerle Karşılaştırma.....	72
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	75
KAYNAKLAR	77
ÖZGEÇMİŞ	89

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Ajanlar arası etkileşim yetenekleri	21
Çizelge 5.1. Saldırı menziline göre balistik füze sınıfları	32
Çizelge 6.1. Testlerde kullanılan balistik füze modelleri ve özellikleri.....	53
Çizelge 6.2. Test Senaryoları	56
Çizelge 7.1. Test Sonuçları	66
Çizelge 7.2. Füze sınıflarına göre karşılama oranları	68
Çizelge 7.3. Geleneksel güdüm yaklaşımlarıyla karşılaştırma	70
Çizelge 7.4. Endüstrideki son teknoloji savunma sistemleri ile karşılaştırma.....	73

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Balistik füze uçuş safhaları.....	7
Şekil 3.2. Şekillere göre hava direnç katsayıları.....	9
Şekil 3.3. Atmosfer katmanları	10
Şekil 3.4. Dünyanın kendi etrafında dönüşü.....	11
Şekil 4.1. Genel ABÇK mimarisi	15
Şekil 4.2. Çok katmanlı ABÇK mimarisi	16
Şekil 4.3. Ajan yapısı.....	17
Şekil 5.1. Benzetim Modeli	26
Şekil 5.2. Fiziksel etki iterasyonu	31
Şekil 5.3. Radar veri çerçevesi.....	35
Şekil 5.4. Radar ajanının güzergâh takip süreci.....	37
Şekil 5.5. Güzergâh hesaplama iterasyonu	38
Şekil 5.6. Karşılama füzesi ateşleme karar akış diyagramı	42
Şekil 5.7. En uygun karşılama noktasının tespiti.....	43
Şekil 5.8. Karşılama füzesinin yörüngeye giriş şeması	44
Şekil 5.9. Kısa hedef güncelleme mesafesinin sebep olduğu sapma hareketleri	46
Şekil 5.10. Kuvvet Kontrolörü Modeli	47
Şekil 5.11. Oransal Seyir Kontrolü ile Hedef Takibi.....	47
Şekil 6.1. ODH içerisinde kalan alanın sınıflandırılması	55
Şekil 7.1. Hedef güncelleme yakınlık mesafesine bağlı uçuş davranışları	60
Şekil 7.2. D_u mesafesinin 100km, 200km ve 500km olduğu karşılama modellerinin farklı saldırı senaryolarındaki güzergâh takip performansları	61
Şekil 7.3. Oransal D_u modelinde $p=10$, $p=20$ ve $p=50$ değerleri için test sonuçları.....	63

Şekil	Sayfa
Şekil 7.4. Farklı itici güç çıkışlarına göre güzergâha olan uzaklığın değişimi	64
Şekil 7.5. KABF saldırılarına karşı oluşan savunma sahası	69

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 5.1. Tespit edilen güzergâhın arayüzde gösterimi.....	39
Resim 6.1. Benzetim düzleminde kullanılan dünya haritası	51
Resim 6.2. Balistik füze modeli	52
Resim 7.1. Yörüngeye girme ve tehdidin karşılanması	68

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

dB

Desibel

Hz

Hertz

kgf

Kilogram-kuvvet

km

Kilometre

m

Metre

Kısaltmalar

Açıklamalar

ABÇK

Ajan bazlı çevre kontrolü

ÇKB

Çevre kontrol birimi

GYB

Genel yönetim birimi

HSS

Hava savunma sistemi

KABF

Kıtalar arası balistik füze

KMBF

Kısa menzilli balistik füze

MIRV

Bağımsız olarak hedeflenebilir çoklu araç

MTK

Model tahminli kontrol

NASA

Ulusal havacılık ve uzay dairesi

ODH

Olası dairesel hata

OMBF

Orta menzilli balistik füze

SOS

Sistemlerden oluşan sistemler

UMBF

Uzun menzilli balistik füze

1. GİRİŞ

Savunma sanayisi her zaman teknolojik gelişmelerin öncüsü endüstrilerden biri olmuştur. Bunun en büyük göstergelerinden biri ise savaş tekniklerinin durmadan dönüşüme uğramasıdır. Sektördeki durmak bilmeyen yenilikler ve gelişmeler daha yakın zamana kadar etkili görülen geleneksel yaklaşımları verimsiz ve sahada uygulanması zor hale getirmektedir. Bu durumun tek istisnası, İkinci Dünya Savaşından beri en büyük tehditlerden biri olan nükleer bombalardır.

İkinci Dünya Savaşının bitmesinde rolü olan nükleer bombalar, Japonya topraklarına bombardıman uçakları ile bırakılmış olsa da, günümüzde gelişen radar teknolojileri ve hava savunma sistemlerinin hava sahasına yaklaşan hava araçlarını önceden tespit ve imha edebilecek yetkinlikte olmasından ötürü bu yöntem uygulanabilirliğini kaybetmiştir. Ancak bu önlemler özellikle uzun menzilli balistik füzeler için yetersiz kalmaktadır.

Balistik füzeler ilk defa Almanlar tarafından İkinci Dünya Savaşında kullanılmıştır. V1 ve V2 füzelerinin isabet hassasiyeti yüksek olmasa da Müttefik Kuvvetleri taktik değiştirmeye zorlayacak kadar etkili olmuşlardır [1]. İlk kullanımından beri menzilleri, hızları ve taşıyabildikleri savaş başlığı kapasiteleri yönünden devamlı gelişen balistik füzeler her dönem taktiksel savaşlarda etkili bir araç olmuştur. Günümüzde dahi, balistik füzeler, özellikle nükleer başlıklı olanlar, bir ulusun karşılaşılabileceği en büyük tehditlerden kabul edilmektedir. Bu silahların olası kullanımını önlemek amacıyla 1968'de birçok ülke tarafından imzalanan Nükleer Silahların Yayılmasını Önleme Anlaşması hala yürürlüktedir [2]. Bu anlaşma nükleer silahsızlanmaya katkı sağlasa da, caydırıcılık etkisine sahip olması sebebiyle nükleer silahlar birçok ülke cephanelerinde yerini korumaktadır [3]. Saldırıya karşılık verme yetkinliğini koruma amacıyla ülkelerin izlediği bu yol karşılıklı yok olma tehlikesi oluşturmakta ve bu hassas denge sebebiyle hiçbir ülke başka bir ülkeye nükleer silah ile saldırma riskini göze almamaktadır [4,5]. Bu fiili durum ülkelerin balistik füzelere karşı etkin bir savunma mekanizmasına sahip olmamasından kaynaklanmaktadır.

Bu tez çalışması balistik füzelere karşı savunma amacıyla tasarlanmış otonom bir Hava Savunma Sistemi (HSS) sunmaktadır. Çalışmada savunma probleminin zorlukları ayrı ayrı ele alınmakta ve bunlara algoritmik çözümler önerilmektedir. Savunma sisteminin yanısıra

gerçek zamanlı ve yüksek doğruluğa sahip bir balistik füze saldırı benzetim ortamı geliştirilmiş, ve savunma sistemi bu ortamda test edilmiştir. Özgün bir ajan bazlı yazılım mimarisi kullanılarak geliştirilen sistem otonom çalışabilen radar, komuta merkezi ve karşılama füzesi öğelerinden oluşturulmuştur. Güzergah tahmini için bir öngörümlü tahmin yaklaşımı kullanılmış, buradan elde edilen çıkarımlar entegre kontrol sistemine aktararak karşılama füzesinin balistik tehdite yönlendirilmesi sağlanmıştır. Geliştirilen savunma sistemi üç boyutlu benzetim ortamında kısa, orta, uzun ve kıtalarası menzile sahip füzelere karşı test edilmiştir. Testlerin gerçekleştiği üç boyutlu benzetim ortamında balistik hareketi etkileyen yerçekimi, hava sürtünmesi, dünyanın dönüş hızı gibi çevresel faktörlerin yanısıra füzeyle ait en, boy, başlık ve yakıt tankı kütlesi, yakıt cinsi ve miktarı, itici motor gücü, fırlatma açısı ve uçuş fazları gibi parametrik tanımlı değişkenler ve bunlara bağlı etkiler tanımlanmış, saldırı ve savunma modelleri belirlenen faktörler etkisi altında test edilmiştir. Büyük ölçekli dünya haritası üzerinde gerçekleştirilen saldırıların güzergâhları ve hedef noktaları, balistik uçuş kinematiğine dayalı oluşturulan otonom öngörülü model ile tespit edilmiştir. Çalışmada donanımsal sınırları temsil etmesi adına performans limitleri eklenmesine rağmen uzun ve kıtalararası saldırıların %86.5'i başarıyla karşılanmıştır. Bazı saldırı senaryolarında bu oran %97'ye kadar yükselmektedir.

2. LİTERATÜR İNCELEMESİ

Mevcut savunma sistemlerinin en büyük zafiyetleri yüksek hızlı tehditlerdir. Tehdidin hızlı hareket etmesi konumunun tespitini zorlaştırmakta ve reaksiyon alınması gereken süreyi kısaltmaktadır. Günümüzde savunma sistemleri için en büyük sınavın balistik füzeler olmasının temel sebebi de bu tehditlerin oldukça yüksek hıza sahip olmalarıdır. Özellikle uzun menzilli balistik füzelerin yüksek hızlara ulaşması onlara doğrudan müdahale edebilen bir savunma sistemi geliştirmenin oldukça zor bir problem olmasının başlıca sebeplerindendir. Uzun menzilli balistik saldırılara karşı koyabilecek bir savunma sistemi geliştirilmesine yönelik büyük çaplı projeler hala yürütülmektedir [6,7].

Yüksek hızlı tehditlerin karşılanmasında ilk adım hedefin hatasız bir şekilde takip edilmesidir. Hava sahasının yabancı unsurlarca işgaline yönelik uyarı ve bilgilendirme sağlayan radar sistemleri soğuk savaş döneminden beri kullanılmaktadır [8]. Gelişen radar teknolojileri sayesinde günümüzde gemileri, uçakları ve uyduları içeren radar ağlarından oluşan erken uyarı sistemleri balistik tehditleri fırlatıldığı andan itibaren tespit ve takip edebilecek yetkinliğe kavuşmuştur [9]. Çeşitli sinyal işleme metotları ile hedefin daha hassas takibinin sağlanması mümkündür. Yoğun gürültüye sahip olan hatta kısmen kopuk sinyaller dahi Kalman filtrelemesi, parçacık filtrelemesi ve istatistiksel doğrusallaştırma gibi yöntemlerle iyileştirilebilmektedir [10-17]. Takip sırasında elde edilen veri, hedefin hareket eğiliminin ve tahminlerinin çıkarımında kullanılabileceği için yüksek öneme sahiptir.

Balistik hareket temel fizik kuramlarına dayanır. Çalışmalar insanların [18], hatta hayvanların [19] dahi içgüdüsel olarak balistik hareket farkındalığına sahip olduğunu göstermektedir. Balistik hareketin bağımlılıkları ve formülizasyonu farklı çalışmalarda ortaya konmuştur [20,21]. Ortaya konan matematiksel modeller kullanılarak balistik hareketin tahmin edilmesi birçok araştırmaya konu olmuştur. Chang, güzergâh tahmini için sadece açısız hareket ölçümünü girdi alarak iteratif bir en küçük kareler yöntemi kullanmıştır [22]. Harlin vd. çalışmasında fırlatma ve çarpma noktalarından muhtemel uçuş güzergâhlarının çıkarımını yapmıştır [23]. Danis ve Benavoli çalışmalarında balistik hareketi izleyerek fırlatma parametrelerinin çıkarımına odaklanmışlardır [24, 25]. Balistik hareketin bir kısmının izlenmesinin yüksek doğruluğa sahip tahminler yapılması için yeterli olduğu da farklı çalışmalarda ortaya konmuştur [26]. Lih vd. çalışmalarında balistik

füzelerin itme aşamasını gözlemleyerek hem fırlatma parametrelerini hesaplayan hem de güzergâhın geri kalanına yönelik tahminler yapan bir yaklaşım sunmuştur [27].

Savunma teknolojilerinin amaç ve fonksiyonellik yönünden hayati öneme sahip olması sebebiyle bu alandaki çalışmaların testleri olabildiğince gerçekçi icra edilmelidir. Balistik füze savunması bu yönüyle ele alındığında balistik füze saldırısının detaylı bir benzetimine ihtiyaç doğmaktadır. Balistik füze saldırısı benzetiminin de göz önünde bulundurulması gereken birçok faktör mevcuttur. Yer çekimi, hava sürtünmesi, dünyanın dönüşü, roketin itme motorunun güç çıkış değerleri, roketin yakıt miktarı, fırlatma açısı ve konumu gibi önemli faktörlerden bazıları savunma tarafından gözlemlenebilirken, bazıları ise bir bilinmeyen olarak ele alınmalı ve bu bilinmeyenlerin öngörülemez etkilere sebep olabileceği değerlendirilmelidir.

Özellikle uzun menzilli balistik füzeler savunma sistemlerinin karşılayıcı füzelerine göre hız avantajına sahiptirler. Bu durum tehditlerin geleneksel güdümlü sistemlerle karşılaşmasını verimsiz hale getirmekte, adaptif bir kontrol mekanizması ihtiyacı doğurmaktadır. Karşılama füzesini kontrol eden model füzeyi belirli bir sinyalden bağımsız yönlendirerek planlanan karşılama stratejisinin gerçekleştirilmesini sağlayabilir. Araçları istenen güzergâh üzerinde tutmaya yönelik kontrol sistemleri üzerine birçok çalışma mevcuttur. Karayolu araçlarına yönelik kontrol sistemi çalışmaları yolda şeridini korumasına [28-30] ve şerit değiştirmelerine [31-32] yönelik iken hava araçlarına yönelik çalışmalar uçuş güzergâhlarını izlemeye [33-35] ve belirli bir uçuş düzenini korumaya [36-41] odaklanmaktadır.

Balistik tehdidin güzergâhının izlenebilmesi için bu güzergâhın önceden tahmin edilmesi gerekmektedir. Tahmine dayalı çıkarımlara yönelik kullanılan en yaygın yaklaşım Model Tahminli Kontroldür (MTK). MTK üç temel öğeden oluşur ve bunlar tahmin modeli, geri besleme ve kontrol fonksiyonudur. Modelin gidişatını değerlendirmeye alarak yönetmeyi sağlayan MTK, her iterasyonda tahmin modeli ile optimizasyonunun çözülmesini gerektirir [42]. İlk döngüde girdiler sağlanır, izleyen iterasyonlarda ise geri beslemeden faydalanılarak tahminlere devam edilir [43]. MTK üretim süreçlerinin optimizasyonu [44], otonom araç kontrolü [45-52] ve güç yönetimini [53-57] içeren yaygın kullanım alanına sahiptir.

Savunma senaryoları iki düşman unsur barındırmaktadır. Düşman unsurlar söz konusu olduğunda taraflar arasındaki bilgi alışverişinin limitlerine yönelik yöntemlerin ele alınma şekli önem kazanmakta ve özel bir odaklanma gerektirmektedir. Balistik füze savunması

senaryosunda düşman unsurlar arasında istihbarat paylaşımının olmadığını varsaymak tutarlı bir yaklaşımdır. Buna ek olarak balistik füze savunma sistemlerinin karmaşık, eşzamanlı çalışan kısmen bağımsız ünitelerden oluştuğu göz önünde bulundurulunca hem üniteler arası iletişimin, hem de modellenen düşman taraflar arasındaki iletişim kopukluğunun gerçeğe uygun bir şekilde modellenmesi ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Problemdaki öğeler arasındaki ilişkinin modellenmesi için en uygun yaklaşım ajan bazlı modelledir. Ajan bazlı modelleme birçok davranışsal benzetimin yanı sıra balistik füze savunma sistemlerinde de hâlihazırda kullanılmıştır [58]. Çalışmalar balistik füze savunma sistemlerinin çok ajanlı modellenmesinin rol paylaşımına [59] ve fonksiyonelliğe [60] katkı sağladığını göstermektedir.

Balistik tehditlere karşı savunma problemi birçok akademik çalışmaya konu olmuştur. Xie vd. balistik füze başlıkları için bir menzil sınıflandırması üzerine çalışmıştır [61]. Vidanovi'c vd. füze kanatçıklarının optimizasyonuna olanak tanıyan bir benzetim ortamı geliştirmiştir [62]. Longyue vd. çok sayıda eşzamanlı balistik tehditlere karşı bir savunma modeli önermiştir [63]. Ann vd. balistik füzelerin karşılanabileceği muhtemel koordinatları hesaplamayı sağlayan matematiksel bir model geliştirmiştir [64]. Wu vd. otopilot performansını test eden bir aerodinamik ortam benzetimi sunmuştur [65]. Katmanlı balistik füze savunma yapıları ve hedef paylaşımı farklı çalışmalarda ele alınmıştır [66, 67]. Ender vd. balistik füze savunma sistemlerinin efektifliğini değerlendiren bir modelleme ve benzetim geliştirmiştir [68]. Horla, döngüsel bir karşılama füzesi kontrol modeli geliştirmiş ve bu modeli farklı senaryolar için bir ve iki boyutlu ortamlarda test etmiştir [69]. Bazı çalışmalar ileri hat öğeleri kullanılarak ateşlenen balistik füzelerin henüz itme fazında iken imhasının uygulanabilirliğini araştırmıştır [70, 71]. Balistik füze savunması probleminin farklı spesifik yönleri çeşitli çalışmalar tarafından ele alınmış olsa da, hem saldırı hem de savunma modellerini bütünlükle ve gerçekçi şekilde ele alan çalışmalar oldukça azdır.

3. YÖNTEM ve ARAÇLAR

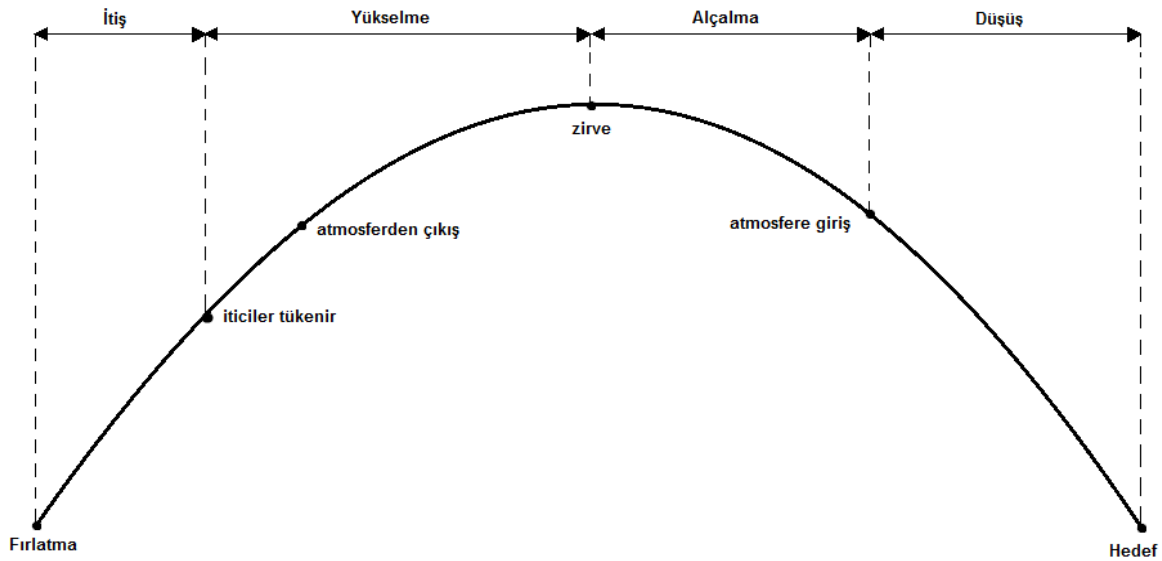
Balistik füzelere karşı bir etkili bir savunma yaklaşımının geliştirilebilmesi için balistik hareket karakteristiğinin ve bu hareket üzerindeki çevresel etkenlerin analiz edilmesi gerekir.

3.1. Balistik Füzelere Hareket Karakteristiği

MTK yaklaşımının başarısı direkt olarak yapılacak tahminlerin isabetine bağlıdır. Tahminlerdeki hata payını düşürebilmek ise hedefin hareket karakteristiğinin detaylı analizinden geçmektedir. Söz konusu problemde ele alınan hedefler balistik füzeler olduğu için ilk olarak balistik hareket karakteristiği incelenmelidir.

Baskın olarak yer çekimi etkisi ile yapılan hareketlere balistik hareket denir. Balistik hareket Newton'un kinematik kanunları ve kütle çekim yasasına uygun şekilde oluşmaktadır. Nesnelere yerçekimi etkisi ile üzerinde bulunduğu gezegenin merkezi etrafında eliptik bir yörüngeye oturma eğilimi göstermekte, bu da balistik hareketleri oluşturmaktadır.

Balistik füzelerin uçuşu dört safhadan oluşur. Bu fazlar itiş, yükselme, alçalma ve düşüş olarak adlandırılmaktadır [72]. Bu aşamalar Şekil 3.1'de görülmektedir.



Şekil 3.1. Balistik füze uçuş safhaları

Füze fırlatılırken iticiler devreye girer. Bu aşamada füzenin yaydığı ısı oldukça yüksektir bu sebeple tespit ve takibi kolay sağlanabilmektedir. Ancak füzeyi bu aşamada karşılamak oldukça zordur çünkü iticiler ile füzenin irtifa kazanması 1 ila 5 dakika sürer [72]. İticilerin yakıtının tükenmesi ile ilk safha sonra erer. Genellikle bu safha içerisinde itici aparatlar füzeden ayrılır. Sonraki yükseliş safhasında çoğu balistik füze atmosfer dışına çıkar. Maksimum irtifayı kazanan füzeler alçalma aşamasına geçer. Yükselme ve alçalma aşamalarında füzenin atmosfer dışında seyir etmesi sebebiyle karşılanarak yok edilmesi zor olsa ideal ilk karşılama noktası kabul edilir [58]. Bunun sebeplerinden ilki ilk karşılamanın başarısız olması durumunda ikinci eylem planını devreye sokmak için zaman ayırmaktır, ikinci sebep ise atmosfer dışında yok edilen füze parçalarının atmosfere girişte yanarak tehdit olmaktan çıkmasıdır [72]. Atmosfere giren füze, uçuşunun son safhası olan düşüş safhasına geçer. Bu aşamadaki füzeyi ilk karşılama planının başarısız olması durumunda ikinci karşılama için çok az bir süre kalmaktadır. Füzenin hedefine ve savunma pozisyonlarına yakın olması hava savunma sistemi açısından bir avantaj sayılabilir ancak düşme safhasındaki füzenin yerçekimi etkisi ile çok yüksek hızlara ulaşıyor olması karşılamayı zorlaştıran etkenlerdendir.

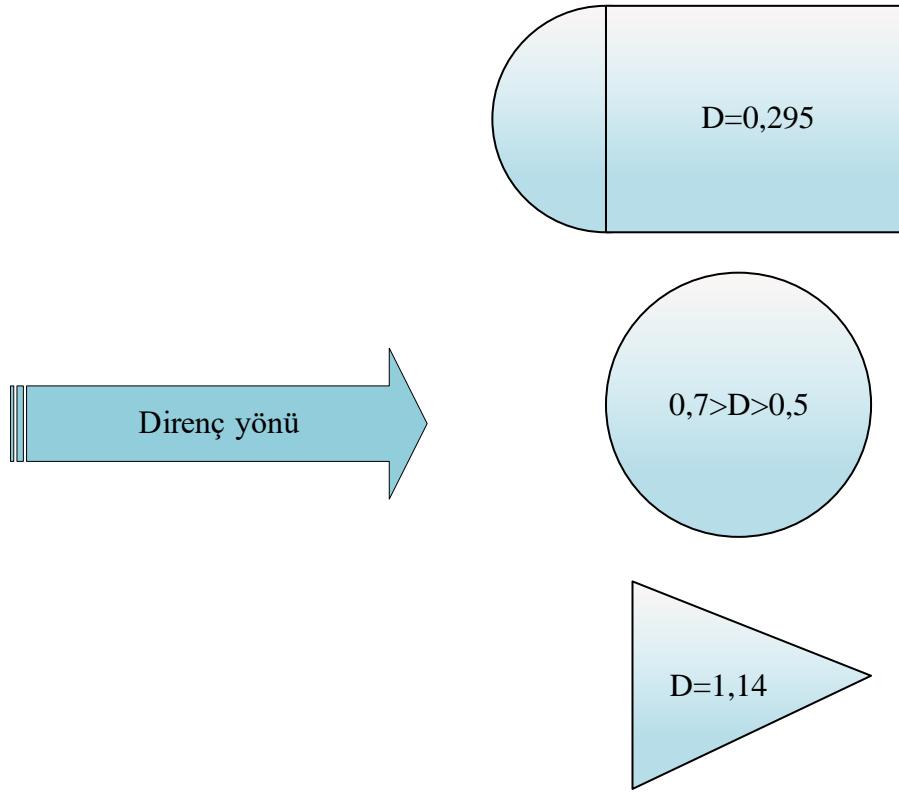
Özellikle uzun menzilli balistik füzeler yakıt tüketimini azaltmak ve menzili arttırmak amacıyla aşamalı uçuş mekanizmaları kullanırlar. Bu özelliğe sahip füzeler birden fazla yakıt ve itici modülüne sahiptir. Boşalan yakıt tankı füzeden ayrılarak füzenin fazla yükten kurtulması, bu sayede momentumun korunması sayesinde hız kazanmasını sağlar.

Balistik füzeler tüm iticilerin devre dışı kalmasından sonraki uçuşunu serbest bir eğrisel güzergâh çizerek tamamlar. Bu safhalarda füze yönlendirici sistemlerini kullanarak hedefe giden hesaplanmış güzergâhta kalmaya çalışır. Zirveden sonra serbest düşüşe geçen füze yerçekimi etkisiyle hızlanarak hedef bölgeye isabet eder.

Yerçekimi haricindeki, balistik uçuşa etki eden çevresel faktörlerin başında hava sürtünmesi gelir. Havada hareket eden her cisme hareket yönünün tersine hava sürtünme kuvveti uygulanır. Bu kuvvetin şiddeti cismin hızına, yüzey alanına ve yüzey doku sürtünmesine bağlıdır.

$$F_S = \frac{D\rho V^2 A}{2} \quad (3.1)$$

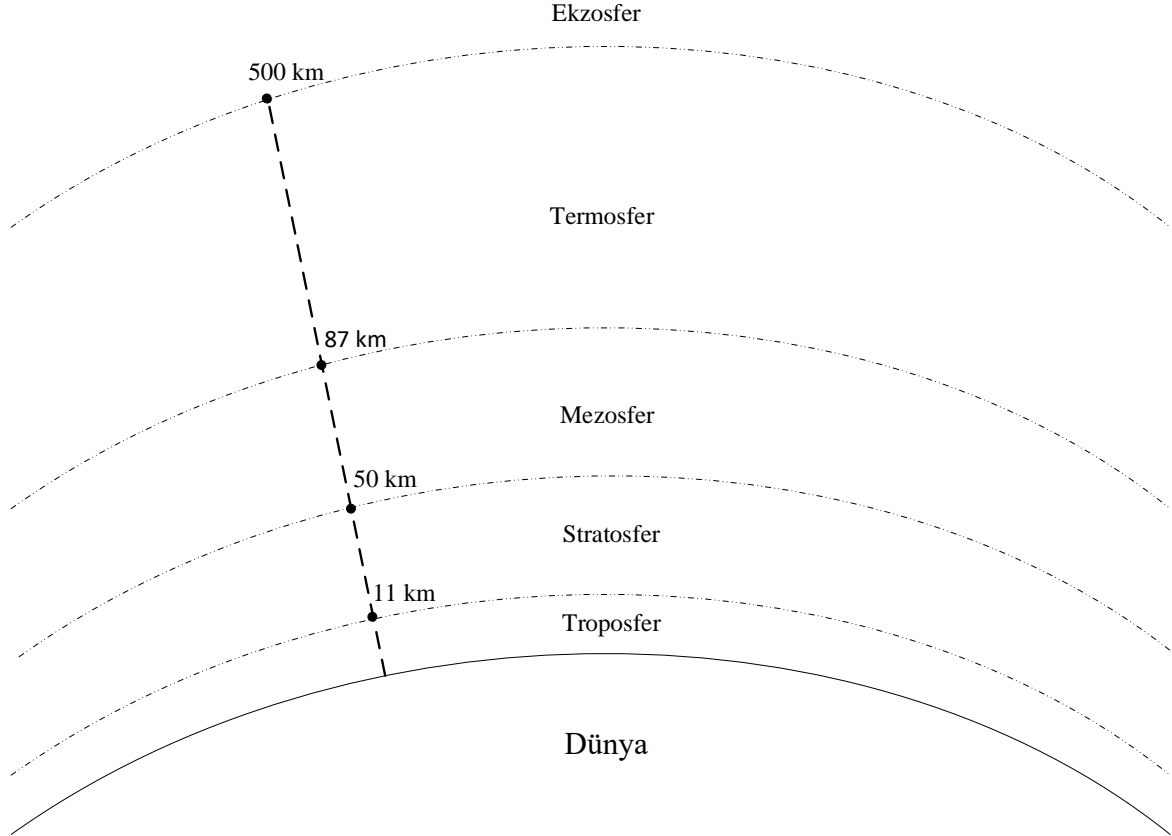
Yukarıdaki denklemde A hareket yönüne dik en geniş yüzey alanını, ρ hava yoğunluğunu, D ise cismin şeklinin direnç katsayısını ifade eder. Direnç katsayısı cismin şeklinin aerodinamik özelliklerine göre 0,1 ile 2 arasında değişmektedir. Direnç katsayısı cismin hava ile ilk temas eden yüzeyinin şekline bağlı olarak belirlenir. Bazı şekillere göre hesaplanan direnç katsayıları Şekil 3.2’de görülmektedir [73]. Balistik füzeler tasarlanırken hava direncinin düşük olması hedeflenerek daha uzun menzil sağlanması amaçlanır.



Şekil 3.2. Şekillere göre hava direnç katsayıları [73]

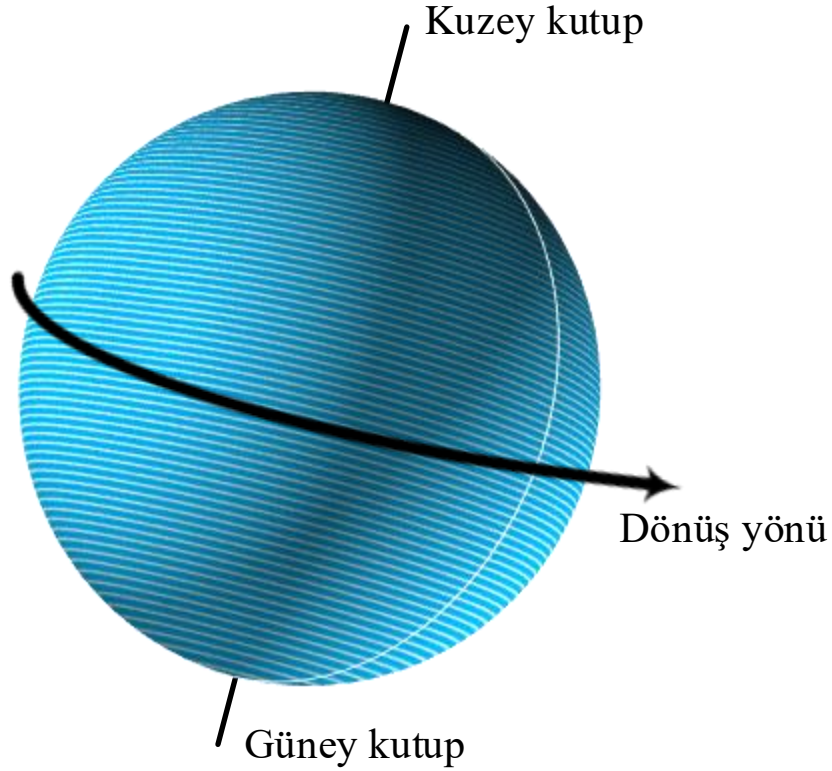
Hava sürtünmesinin bağlı olduğu diğer bir faktör hava yoğunluğudur (ρ). Dünyamızın atmosferi 7 temel katmandan oluşmaktadır. Atmosfer katmanları homojen ve sabit genişlikte bantlar olmasa da yükseklikleri ortalaması yaklaşık olarak Şekil 3.3’te görülmektedir. Tüm katmanlar yeryüzünden 10000 km yüksekliğe kadar uzansa da hava yoğunluğu bu katmanlardan yüzeye en yakın olan troposfer, stratosfer ve mezosfer katmanlarında fark edilir sürtünme sağlayacak seviyede olduğu belirtilmektedir [74]. Dünyamıza düşen meteorlar da bu sebepten dolayı ancak mezosfere ulaştığında sürtünmeden dolayı yanmaya

başlar. Troposfer, stratosfer ve mezosfer katmanlarının toplam yüksekliğinin 100 km'den daha az olduğu bilinmektedir [75]. Standart Atmosfer Modeline [76] göre de hava yoğunluğu deniz seviyesinde 1.225kg/m^3 iken irtifa yükseldikçe 0 değerine yakınsamaktadır. Bu sebeple yüksek irtifada hava sürtünmesinin değeri çok küçüldüğü için göz ardı edilebilir [77].



Şekil 3.3. Atmosfer katmanları [74]

Balistik füzelerin uçuş güzergâhına etki eden diğer bir etken de Dünyanın dönüş hareketidir. Gezegenimiz 23 saat, 56 dakika ve 4 saniyede kendi etrafında batıdan doğuya doğru (yer eksenine göre) bir turu tamamlamaktadır. Dünyanın ekvatorunda çevresinin yaklaşık olarak 40075km olduğu bilinmektedir [78]. Buradan yola çıkarak ekvator üzerindeki bir noktanın 1670km/s hızla hareket ettiği söylenebilir [79]. Bu da dakikada $0,25^\circ$ lik açısal hıza karşılık gelir. Ancak bu dönüş tamamen yatay eksende değildir. Dünya dönüşünü kutup eksenlerine $23,5^\circ$ lik açıyla gerçekleştirir (Bkz. Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Dünyanın kendi etrafında dönüşü

Bu dönüş sebebiyle ortaya çıkan yer değişimi balistik füze hesaplamaları için önem arz etmektedir. Dünyanın dönüşü batıdan doğuya doğru fırlatılan füzelerin menzilini uçuş süresiyle doğru orantılı olarak kısaltırken, doğudan batıya doğru fırlatılan füzelerin menzilini uzatmaktadır. Rotasyonel düzlemde yapılan düz hareketin sabit bir noktadan gözlemlenmesi sonucu gözlemlenen bu etkiye Coriolis etkisi adı verilir.

Balistik füze yörüngeleri çevresel faktörlerden ve füzenin kendi özelliklerinden büyük ölçüde etkilenir. Bu füzelerin hedeflemesi önceden belirlenmiş matematiksel işlemlere dayandığından, hava yoğunluğundaki değişiklikler gibi öngörülemeyen parametreler saldırının isabet oranını etkiler. Çoğu modern uzun menzilli balistik füzenin kendi kendini düzeltme mekanizmalarına sahip olmasına rağmen, bu önlemlerin düzeltme yetenekleri sınırlıdır. Bu nedenle, yörünge ve hedeften sapmalar balistik füzeler için neredeyse kaçınılmazdır. İniş noktasının etrafındaki hata payını çevreleyen alana Olası Dairesel Hata (ODH) denir ve bu değer balistik füzeler için isabet hassasiyeti ölçümü amacıyla kullanılır

[80-81]. Modern balistik füzelerin çoğunun ODH yarıçapı 1 km'den daha küçüktür. Bu sapmalar irtifaya bağlı yerçekimi değişimleri, heterojen atmosfer yapısı, yakıt tüketimi veya itici davranışlarındaki öngörülemeyen küçük düzensizlikler ve Coriolis etkisinden kaynaklanmaktadır.

3.2. Ajan Bazlı Benzetim Modelleme

"Ajan tabanlı yazılım mühendisliği" ve "ajan tabanlı modelleme (ABM)" yeni kavramlar olmasa da hâlâ gelişmekte olan modelleme yaklaşımlarıdır. Bu yaklaşımın popülerliğinin ana nedeni yaklaşımın geniş uygulanabilirliği ve ABM'nin özellikle karmaşık sistemlerin ve büyük ölçekli ortamların yönetiminde etkin olmasıdır [82]. Ajan yazılımlarının ilk kullanımları genellikle işbirlikçi ve rekabetçi davranışların simülasyonu içindir [83]. Ancak zaman içinde, bu paradigma farklı araştırma alanlarında verimli bir şekilde kullanılmaya başlandı. Ajan tabanlı modellemenin bazı uygulama alanları güç yönetimi [84], sosyal davranışların simülasyonları [85, 86], farmakolojik sistemler [87] ve askeri uygulamalardır [88, 89].

ABM'ler, verilen bir ortamda otonom ajanların davranış ve etkileşimlerini simüle etmek için kullanılan bir tür hesaplama modelidir. ABM'nin yapısı, ajanlar, ortam ve etkileşim üzerine kuruludur. Ajanlar birbirleriyle ve ortamlarıyla etkileşim içindedir ve ajanların toplu davranışı, model çalıştırılırken gözlemlenir. ABM'nin amacı, bireysel davranışın makro düzeyde ortaya çıkan desenler ve yapılar nasıl sonuçlandığını anlamaktır. ABM'ler, diğer modelleme yaklaşımlarından, örneğin diferansiyel denklem modelleri ve istatistiksel modellerden farklı olarak, toplu davranışı değil, bireysel aktörler ve onların etkileşimlerini modellemeyi odaklanır. Ajan tabanlı modeller ajanlar, çevre ve aralarındaki ilişki ve etkileşimler olmak üzere üç ana bileşenden oluşur.

Ajanlar ajan bazlı modellerin yapı taşlarıdır. Ajanlar bir dizi kural veya davranışa göre birbirleriyle ve çevreleriyle etkileşime girmesi için programlanmış bireysel, otonom programlardır ve insanlar, hayvanlar, organizasyonlar hatta borsa aktörleri gibi geniş bir varlık yelpazesini temsil edebilirler. Ajanlar ve çevreleri arasındaki etkileşimler, karmaşık sistemleri simüle etmek ve çalışmak için kullanılacak ortaya çıkan davranışlar ve desenler oluşturabilir. Her ajan, kendine özgü bir öznitelik, davranış ve karar verme süreci seti olan bağımsız bir varlıktır.

Çevre, ajanların bulunduğu ve etkileşim içinde olduğu çevre ABM'nin önemli bir unsurudur. Çevre, ajanların çalıştığı ve birbirleriyle etkileşimde bulunduğu harici sistemdir. Bu sistem, fiziksel veya sanal bir alanı, ayrıca ajanların davranışlarını etkileyebilecek diğer nesnelere veya faktörleri içerebilir. Ayrıca, ajanların etkileşimlerini ve davranışlarını yöneten, fiziksel, sosyal ve ekonomik yapıları tanımlayan kurallar ve kısıtlamalar da çevrenin unsurlarıdır. Çevre, ajanlar ve çevreleri arasında bir geri besleme döngüsü oluşturarak zamanla dinamik olabilir ve ajanların eylemlerine ve davranışlarına bağlı olarak değişebilir.

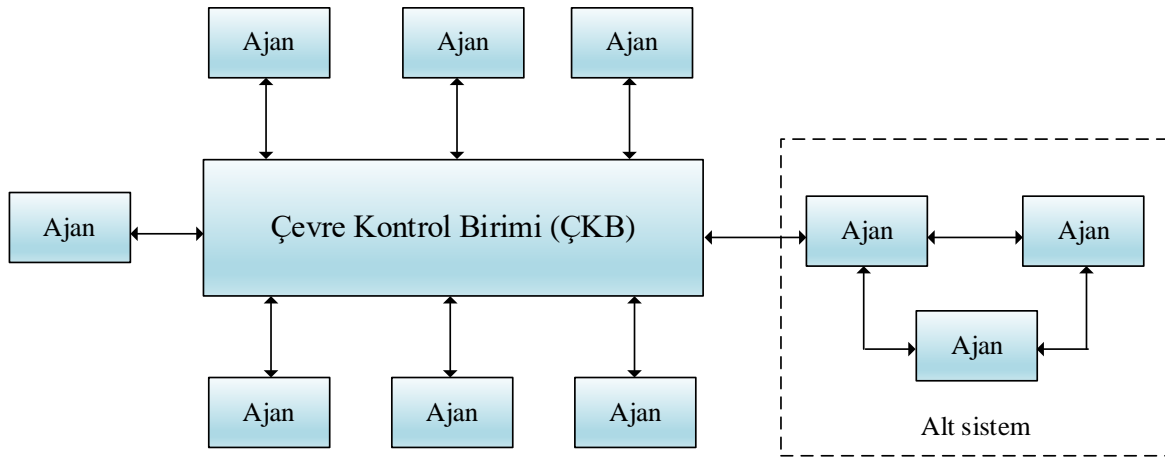
Etkileşimler ajanların birbirlerini ve ortamı nasıl etkilediğini belirler. Etkileşimler, doğrudan veya dolaylı iletişim, işbirliği, rekabet veya diğer davranış biçimlerini içerebilir. Etkileşimler genellikle, ajanların birbirlerine nasıl yanıt verdiklerini ve çevrelerindeki değişikliklere nasıl tepki verdiklerini tanımlayan bir dizi kural veya davranış tarafından yönetilir. Ajanların ve çevrelerinin etkileşimleri, karmaşık sistemlerin benzetimlerini oluşturmak amacıyla kullanılabilir.

Savunma senaryoları da, aralarında herhangi bir işbirliği veya iletişim bulunmayan düşman taraflar içermektedir. Ele alınan savunma senaryosunda yerçekimi, hava direnci gibi çevresel etkiler de önem arz etmektedir. İki taraf arasındaki mahremiyeti, tarafların birbirinden bağımsızlığını ve çevrenin unsurlar üzerindeki etkilerini uygun şekilde gerçekleştirmek amacıyla benzetim bu çalışmaya özgün olarak geliştirilen "Ajan Bazlı Çevre Kontrol Mimarisi" kullanılarak tasarlanmıştır.

4. AJAN BAZLI ÇEVRE KONTROL MİMARİSİ

Ajan Bazlı Çevre Kontrol (ABÇK) mimarisi, ajanlar için ekosistemler oluşturmak ve yönetmek için Çevre Kontrol Birimleri (ÇKB) kullanır. Grupları için farklı ekosistemler sağlamak için birden fazla ÇKB tanımlanabilir. ÇKB, kapsayıcı özelliklere sahip bir ajan olduğu için, ABÇK modeli iç içe geçmiş formlar alır.

ÇKB'ler ABÇK mimarisinin temelini oluşturduğu için, daha yüksek tasarım önceliğine sahiptir. ABÇK'da, tüm etkileşimler ekosistemi yöneten ÇKB aracılığıyla yapılmalıdır. Bu kuralın sadece alt sistemler içindeki etkileşimler haricinde istisnaları vardır. Genel ABÇK mimarisi Şekil 4.1'de verilmiştir.

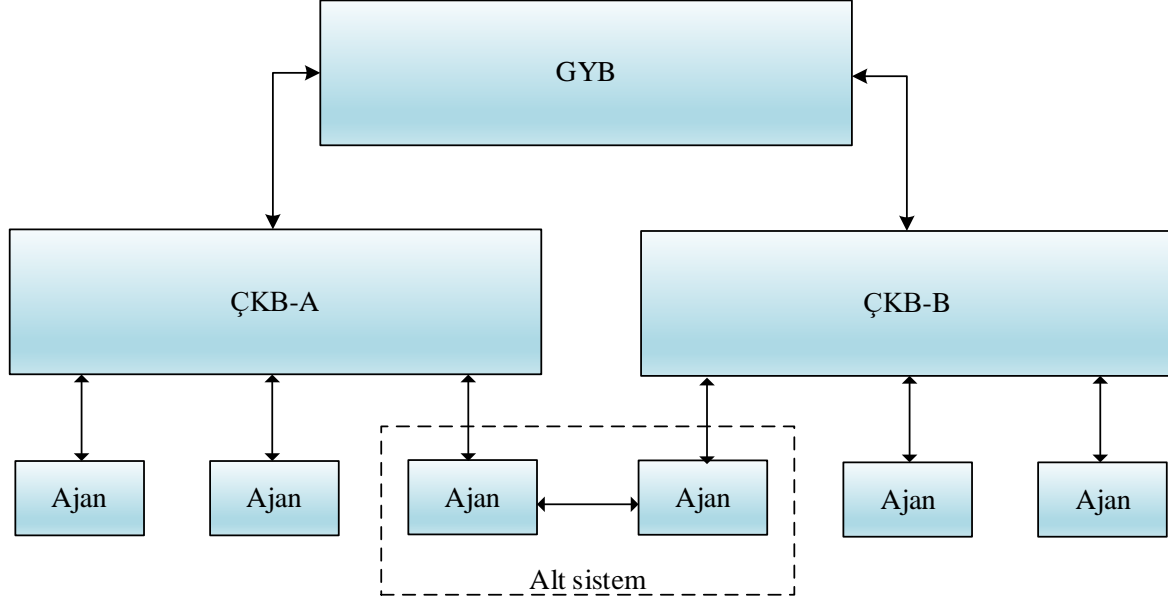


Şekil 4.1. Genel ABÇK mimarisi

Aynı ekosistemde bulunan Ajanlar veya (ÇKB'ler) bir 'toplum' oluştururlar. İç içe geçmiş formda, her kapsülleme model üzerinde yeni bir katman (veya ölçek) oluşturur. Ajan nüfuslarını içeren en iç katman, modelin düşük düzey toplumlarını oluşturur. ÇKB'ler de ajan özelliklerine sahiptir, bu nedenle birbirleriyle etkileşim kurabilir ve yüksek düzey toplumlar oluştururlar. Toplumun düzeyi en iç kattan dış kata doğru artar. Başka bir deyişle, toplumun düzeyi kapsüllemenin ölçeği arttıkça artar. Bir ABÇK modeli birden fazla düşük düzey ve yüksek düzey toplum içerebilir.

Tek ÇKB'den oluşan modellerde ÇKB ajanlara zaman senkronizasyon sinyalleri sağlar. Çok katmanlı ABÇK modellerinde, en yüksek düzey toplumu yöneten ÇKB, Genel Yönetim Birimi (GYB) olarak adlandırılır ve model için zaman senkronizasyon sinyalleri sağlamakla

birlikte, bu ajan, birden fazla seviyede paylaşılan veri yapılarını yönetmek ve sistemin çıktısını toplamak ve düzenlemek gibi önemli görevleri yerine getirir (Bkz. Şekil 4.2). Diğer ÇKB'ler gibi, GYB'nin yetenekleri ve sorumlulukları, modellenen belirli senaryonun ihtiyacına uygun olarak özelleştirilebilir.



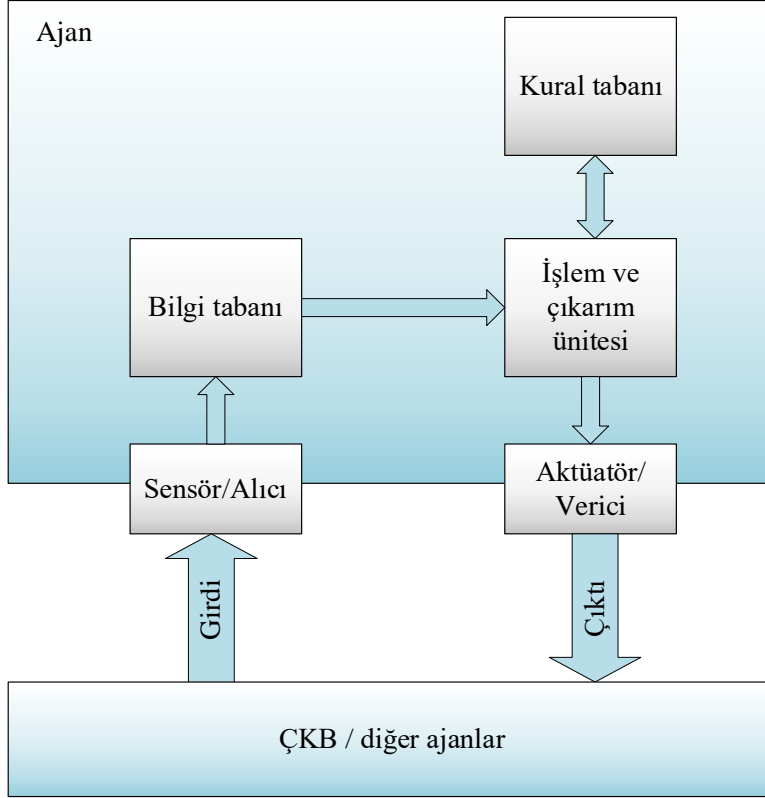
Şekil 4.2. Çok katmanlı ABÇK mimarisi

ABÇK mimarisinde, çevre dahil tüm varlıklar ajanlar olarak tanımlanır, ancak çevreyi temsil eden ÇKB'ler diğer ajanlardan belirli açılardan farklıdır. Aşağıdaki bölümler, ABÇK'daki genel ajan yapısı, ÇKB'lerin fonksiyonallikleri, alt sistemler, senkronizasyon, izin-tabanlı etkileşim modeli ve diğer etkileşim kavramlarına detaylı bir bakış sunar.

4.1. Ajan Yapısı

Ajan tabanlı yazılımların bilimsel araştırmalarda kullanılmaya başlanmasından beri, ajanların genel yapısı çoğunlukla aynı kalmıştır. Bu yapı, ajanların görevlerini yerine getirmesini sağlayacak bileşenlerden oluşur. Ajanların fonksiyonları çoğu zaman etkileşimlere dayanır ve ajanlar çevre ile etkileşim kurmak için sensör ve aktüatör kullanırlar. Genellikle hafıza görevi gören bir bilgi tabanı kullanırlar. Bilgi tabanında ortamdaki ve diğer ajanlardan toplanan bilgiler saklanır. Etkileşimlerden edinilen bilgiler kural tabanına göre bir eyleme dönüştürmek için işlenir. İşleme elemanı görevlerine göre ayrılmış birden fazla modülden oluşabilir. Sonuç olarak, ajan çevreye yanıt verir ve çıktı üretir (Bkz. Şekil 4.3). Donanım tabanlı sistemlerin benzetimi yapılırken, etkileşimler sinyal

gönderme veya ölçüm yapma formları alabilir. Bu senaryolarda, ajanların sensör ve aktüatör modülleri de alıcı ve verici olarak temsil edebilir.



Şekil 4.3. Ajan yapısı

ABÇK mimarisinde ajan tasarımında herhangi bir özel modifikasyona ihtiyaç duyulmamaktadır. Sadece bazı senaryolarda ajanlar bazı belirli özellikleri veya parametreleri ayrı bir veri bloğu olarak saklamaya ihtiyaç duyabilir. Bu özelleşmiş depo alanının bilgi tabanından farkı, içeriğinin ÇKB ile paylaşılması ve ajanın kendisinden ziyade ÇKB tarafından sıklıkla erişilmesi gereken değerlerin saklanmasıdır. ABÇK'daki ajanlar ÇKB etkileşim yönetmeliklerine tabidir ve ayrık zaman benzetimlerinde senkronizasyon amaçları için ajanlar ÇKB tarafından saat sinyallerini alır ve bunlara yanıt verir. Ajanlar sadece tek bir ÇKB'ye bağlanabilir; ancak, birden çok alt sisteme üye olabilirler.

4.2. Çevre Kontrol Birimi

Çevre Kontrol Birimleri (ÇKB), diğer ajanlar için bir çevre görevi görebilen ajanlardır. ÇKB'ler, çevresel işlevsellikler sunabilme ve ajanların isteklerini yönetme yeteneğine sahiptir. Bu birimlerin işlevleri, benzetim senaryosuna göre oluşturulur ve özelleştirilir.

Özelleştirme süreci, çevresel dinamiklerin programlanması ve ajan sürücülerinin yapılandırılmasını içerir. Çevresel dinamikler, koşulları karşılayan ajanlara ayırt etmeksizin uygulanan işlevlerdir. Sürücüler, belirli ajan isteklerini yorumlamaya ve yerine getirmeye yardımcı olmak için kullanılır.

Tıpkı ajanlar gibi, ÇKB'ler de kural kümelerini saklamak için bir kural tabanına sahiptir. ÇKB'lerin işlemci bileşeni, kural kümelerini uygulamak, ajanların isteklerinin/girişimlerinin izin değerlendirmelerini yapmak ve ÇKB'nin bir hedefi varsa, bu doğrultuda kararlar verme görevlerini yerine getirmek için kullanılır. Bilgi tabanı, ajanların davranışlarını ve etkileşimlerini diğer ÇKB'lerle birlikte kaydetmek için kullanılır. Bilgi tabanının yanı sıra, ÇKB'ler, çevresel veri yapılarını ve ajanların çevre ile ilgili özelliklerinin değerlerini organize bir şekilde saklamak için bir veritabanı kullanır. ÇKB'ler de yapısal olarak birer ajan olduğundan, bakım görevlerinin yanı sıra zihinsel yeteneklere ve hedeflere sahip olabilir.

JADE'deki [90] adlandırma hizmetine benzer şekilde, ÇKB'ler ajanlarını kaydetmek ve izlemek için "kayıt defteri" kullanır. Ajanlar (daha yüksek seviyelerde ise ÇKB'ler) kimlik değerlerini (ID, IP, vb.) kayıtlarına eklenmesi suretiyle kaydedilir. Kaydedilen ajanlar ÇKB tarafından sağlanan ekosistemin bir parçası haline gelir ve kurallarına tabi olur. Ek olarak, kayıttaki tanımlayıcı veriler, ajanlar arası etkileşimleri doğru bir şekilde adreslemek için kullanılır.

Tek bir ÇKB'ye sahip ABM modellerinde, ÇKB kayıtlı ajanlarına zaman senkronizasyonu sağlar. Çok katmanlı modellerde, daha yüksek seviyeden alınan zaman senkronizasyon sinyalleri kaydedilen ajanlara dağıtılır.

4.3. Alt Sistemler

Alt-sistemler, ajan tabanlı modelleme ortamında ayrı bir varlık olarak çalışan ajan gruplarıdır. Bu gruplar, bireyler arasındaki ilişkileri modellemek veya birden fazla bileşen içeren kapalı sistemleri temsil etmek için kullanılabilir. Ajan, Grup ve Rol (AGR) modeline benzer şekilde [91, 92], bir alt-sistemdeki ajanlar diğer grup üyeleriyle doğrudan etkileşim kurabilir. Ancak, söz konusu ajan aynı zamanda ekosistemin kontrol biriminin (ÇKB) kayıt defterine kayıtlı değilse alt-sistem dışındaki ajanlarla iletişim veya etkileşim sağlayamaz.

Alt-sistemdeki kaydedilmemiş ajanlar ÇKB tarafından yönetilemez ve gözlenemez. Bir alt sistemdeki ajanlardan ÇKB tarafından kaydedilmiş olanlar "temsilci ajanlar" olarak etiketlenir ve kendilerine atanmış görevlerin yanı sıra, alt-sistem ve ÇKB arasındaki arayüz olarak hizmet etme, ekosistemle senkronizasyon, iletişim ve etkileşim sağlama gibi görevleri ele alır. Bir alt-sistemde en az bir temsilci ajan bulunması gerekir. Bir ajan birden fazla alt-sistemde yer alabilir.

Alt-sistemler ekosistemden izolasyon sağlar, yani alt-sistemdeki etkileşimler dış etkilenmelerden etkilenmez ve ÇKB'nin izin tabanlı etkileşim modeline tabi değildir. alt-sistemler aynı zamanda birden fazla ekosistemden gelen ajanları içerebilir ve bağlayabilir, böylece alt-sistemdeki etkileşimler, bireysel ekosistem sınırlarının ötesine uzanabilir (Bkz. Şekil 4.2). Çok ölçekli modellerde, ÇKB'ler de alt-sistemler kullanılarak gruplanabilir ve bu birimler arasında doğrudan etkileşimler sağlanabilir. Bu, karmaşık sistemler ve ilişkileri modellemede daha fazla esneklik ve kontrol sağlar.

4.4. Etkileşim ve İletişim

Ayrık zamanlı sistemlerde, ajanların zaman senkronizasyonu, ÇKB tarafından sağlanır. BRIC modeline benzer şekilde, senkronizasyon zaman işaret sinyalleri ile çerçevelenen aksiyon döngüleri kullanılarak sağlanır [93]. Her döngü iterasyonu, tek bir zaman adımı (tik) olarak kabul edilir. Bir döngü başlatmak için, ÇKB (veya GYB) "tik-başla" sinyalini yayımlar ve aygıtlara bir sonraki zaman adımının başlangıcını bildirir. Aygıtlar zaman adımı için aksiyonlarını tamamladıktan sonra, ÇKB'ye "tik-bitir" sinyali gönderir ve bir sonraki zaman adımı için senkronizasyon sinyalleri alana kadar "dinle / bekle" durumuna geçer. ÇKB, bir sonraki döngüyü başlatmadan önce ajanları günceller ve bilgilendirir. Birden çok ÇKB olan senaryolarda, ÇKB'ler arasında yukarıdan aşağıya senkronizasyon sağlamak için bir GYB tanımlanması gerekmektedir.

Bir mesaj veya aksiyonun adresi, gönderenin ÇKB'si, ekosistemdeki diğer ajanlar veya veya gönderenin kaydedilmiş ajanlarından bir veya birden çoğu olabilir. İzin tabanlı etkileşim modelinde, bir etkileşimin hedefi ne olursa olsun, göndereni ve alıcısı aynı alt sistem içinde bulunmuyorsa bu etkileşim ÇKB üzerinden yapılmalıdır. Etkileşimleri isabetli yorumlaması için ÇKB bünyesinde sürücü fonksiyonlar geliştirilebilir. Ajanlar çevresel verilere erişemez ve diğer ajanlarla doğrudan etkileşim kuramaz, bu nedenle ajanlar açısından ÇKB dış

dünyanın tek arayüzüdür. Ajanların etkileşimleri ÇKB tarafından verilen izne tabi gerçekleşir. İzin tabanlı etkileşim modelinde, ajanlar çevresel yeteneklerini ÇKB'ye devreder ancak kendi davranış modellerini kontrol etmeye devam ederler. İzin tabanlı etkileşim modeli bu yönüyle "kukla model" tasarımıyla benzerlik gösterir [94]. Bu mekanizmada, ajanlar "eylem talebi" üretir ve ÇKB'ye gönderir. ÇKB ise ekosistem kuralları, veritabanı, ajan özellikleri ve talep edilen aksiyona ait sürücüyü kullanarak, ajanların girişimlerinin sonuçlarını bildirebilir veya özelliklerini güncelleyebilir. İzin tabanlı etkileşim modeli ajanların etkileşimlerinin çevresel denetim seviyesini artırır, çünkü ÇKB ajanların isteklerini yerine getirmeden reddedebilir veya ajanların yeteneklerinin etkilerini filtreleyebilir, sınırlayabilir veya manipüle edebilir. ABÇK etkileşimleri toplama, talep, güncelleme ve bilgilendirme olmak üzere dört genel kategoride özetlenebilir.

Topla etkileşimi kayıtlı bir ajandan verileri toplar. ABÇK yönetmelikleri gereği bu etkileşim türü yalnızca ÇKB tarafından kullanılabilir. Senaryoya göre, gerektiğinde, ÇKB "Topla" etkileşimini kayıtlı ajanların isteklerini yerine getirmek için kullanabilir.

Talep, ajanların temel etkileşim sinyalidir. Alt-sistem içindeki ajanlar arası veya ekosistemlerinin ÇKB ile iletişimi bu etkileşim kullanılarak sağlanır. Üst seviyelerde talepler ayrıca ÇKB arası etkileşimlerin de temelini oluşturur.

Güncelleme etkileşimi kayıtlı bir ajanın bir veya birden çok parametre veya özelliğini değiştirir. Bu aksiyon yalnızca ekosistemin ÇKB tarafından kullanılır.

Bilgilendirme etkileşimi isteklerin yanıtıdır ve ajanların algılamasına izin vermek için kullanılabilir. Bir ajan çevreyi "algılamaya" çalıştığında, kural kümesine göre ajanın bu yeteneğini kullanmasına bir engel yoksa ÇKB'nin ilgili sürücüsü cevaben az bir "Bilgilendir" aksiyonu üretmelidir. Örneğin, ÇKB, ajanın girişiminin sonucunu bu etkileşimle bilgilendirebilir.

ABÇK'daki etkileşimlerde toplumsal seviyeler önemli bir rol oynar. Ajanlar arasındaki ilişki ve seviyelerine bağlı olarak, etkileşimleri kullanma yetenekleri değişebilir. Bir ortamın ÇKB'si, diğer bir ÇKB'nin kayıtlı ajanı da olabilir. Ajanlar arasındaki ilişkinin dinamikleri, mevcut aksiyonlarını belirler. ÇKB'ye özel aksiyonlar sadece ÇKB'nin kayıt altına aldığı ajanlarıyla iletişimde kullanılabilir. Ajan ve ÇKB'lerin etkileşim yetenekleri Çizelge

4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Ajanlar arası etkileşim yetenekleri

Etkileşim Türü	ÇKB'den Ajana	Ajandan ÇKB'ye	Ajanlar arası (alt-sistem içinde)
Tık-başla	Evet	Hayır	Hayır
Dinle/Bekle	Evet	Evet	Evet
Tık bitir	Hayır	Evet	Hayır
Topla	Evet	Hayır	Hayır
Talep/Girişim	Hayır	Evet	Evet
Güncelle	Evet	Hayır	Hayır
Bilgilendir	Evet	Hayır	Evet

4.5. Veri Paylaşımı

ABÇK sistemi, ajanların birbirleriyle ÇKB aracılığıyla iletişim kurmasını sağlar. ÇKB tarafından bir iletişim talebi alındığında, gönderici ve alıcı ajanların çevre kurallarına göre iletişim yapmasına izin verilen bir durumda olup olmadığını kontrol edilir. İletişim izin verilirse, ÇKB, talebi yönlendirmeden önce belirli manipülasyonlar uygulayabilir. Alıcı ajan daha sonra talebi değerlendirir ve bir yanıt oluşturur, bu yanıt aynı şekilde ÇKB tarafından kontrol edilip potansiyel olarak değiştirilen ve göndericiye geri gönderilen aynı süreçten geçer.

ABÇK'daki çevre verisi, senaryo bağlamında sahipliğine göre iki kategoriye ayrılır: çevre yapıları ve çevreyle ilgili ajan özellikleri. Çevre yapıları, çevrenin örgüsünü ve özelliklerini tanımlayan veri koleksiyonlarıdır. Örneğin, bir ekonomi çevre modelinde, hisse senedi fiyatları, döviz kuru oranları çevre veri yapılarıdır. Ajanların çevreyle ilgili özellikleri, senaryo bağlamında ajanlarına ait özelliklerdir (banka hesap bakiyeleri vb.), ancak bazı çevre fonksiyonelliklerini sağlamak için ÇKB tarafından erişilip güncellenmeleri gerekir. Çevre yapıları ÇKB tarafından depolanır. Eğer bir ajan çevre hakkında bilgiye ihtiyaç duyarsa, ÇKB'ye bir istek gönderebilir ve ÇKB isteği değerlendirerek gerekli bilgiyi sağlar. Ajanların çevreyle ilgili özelliklerinin saklanması ve yönetilmesi ise dağıtık, merkezi ve

hibrit olmak üzere üç farklı yaklaşımla sağlanabilir:

Dağıtık veri paylaşım modelinde birçok ajan tabanlı modelde olduğu gibi, ajanların içinde bulunduğu çevreyle ilgili özellikleri ajanların kendi belleklerinde depolanır. Bu verileri barındırmak için, "özellik kayıt deposu" adı verilen ek bir bellek bloğu ayrılır. Bu depolama alanı ajanın kayıt olduğu ÇKB ile paylaşılır. ÇKB gerektiğinde gerekli çevre fonksiyonelliğini sağlamak için bu veriye erişebilir veya ilgili alanları güncelleyebilir. Bu yaklaşım ile ajanlar verileri üzerinde daha fazla kontrol sahibidir çünkü onlara erişmek için izin almaları gerekmez. Bu yaklaşımın bir dezavantajı, ÇKB'nin çevre fonksiyonelliğini sağlamak için daha fazla güncelleme ve toplama işlemi yapması gerekmesidir.

Merkezi veri paylaşım modelinde ÇKB, çevreyle ilgili özellikleri veritabanında depolar. Ajanlara ait kayıtlı kimlik değerleri, veritabanındaki ajan ile ilgili verileri organize etmek ve tanımlamak için kullanılır. ÇKB, herhangi bir etkileşim kullanmadan bu özellikleri okuyabilir ve güncelleyebilir. Bununla birlikte, ajanlar çevre verilerine doğrudan erişemez ancak bu veriye ihtiyaç duydukları zaman ÇKB'den talep edebilir.

Hibrit modelde her özellik hakkında bilgi paylaşma yaklaşımı ona özel olarak belirlenir. Bazı özellikler ÇKB veritabanında, diğerleri ise ajanların özellik kayıt deposunda saklanır.

Bilgi paylaşımıyla ilgili talepler, sürücüler tarafından yönetilir. Ajanların çevreyle ilgili özelliklerinin saklanması için kullanılacak yaklaşım belirlenirken eldeki senaryoda hangi yöntemin daha çok avantaj sağlayacağı değerlendirilmelidir.

4.6. ABÇK'nın Yeniden Kullanılabilirlik Analizi

Modelin tekrar kullanılabilirliği, tasarım verimliliğinin önemli bir göstergesidir. Amdahl Yasası'nın hızlandırma oranı, farklı ajan davranış modellerinin test edilmesi gerektiğinde ABÇK modelinin ne kadar hızlı oluşturabileceğini tanımlayan bir gösterge olarak kullanılabilir [95,96]. Hızlandırma oranı (S) Eş. 4.1'deki gibi hesaplanır.

$$S = \frac{O}{R} \quad (4.1)$$

Eş. 4.1’de O , simülasyonun sıfırdan modellenmesi için gereken zamanı, R ise tekrar kullanılan bileşenler kullanıldığında harcanan zamanı gösterir.

Modelin n adet ÇKB içerdiği varsayıldığında, bir ÇKB ve çevresel etkilerinin geliştirilmesi için gereken zaman e ile ifade edilirse, tüm ÇKB’leri geliştirmek için gereken toplam zaman maliyeti Eş. 4.2’deki gibidir.

$$t_E = \sum_{k=1}^n e_k + nr \quad (4.2)$$

Eş. 4.2’de r , tek bir varlığın (ajan veya ÇKB) kayıt maliyetini ifade eder. Modelin m adet ajanı olduğu varsayıldığında, bir ajanın geliştirilmesi için gereken zaman a ise, tüm ajanların geliştirilmesi için gereken toplam zaman maliyeti Eş. 4.3’te verilmiştir.

$$t_A = \sum_{k=1}^m a_k + mr \quad (4.3)$$

Kayıt işleminin aldığı zaman az ajanlı modeller için görmezden gelinebilir. ÇKB’ler, kayıtlı ajanları için eylem isteklerine karşılık gelen sürücülere ihtiyaç duyarlar. sürücülerin geliştirilmesi için gereken toplam zaman tüketimi (h) Eş. 4.4’teki gibi hesaplanır.

$$h = h_L + h_H \quad (4.4)$$

Eş. 4.4’te h_L ve h_H düşük seviyeli ve yüksek seviyeli sürücü geliştirme maliyetlerini tanımlar. Düşük seviyeli topluluğa bağlı ÇKB sayısı p olduğu varsayılırsa h_L ve h_H sırasıyla Eş. 4.5 ve Eş. 4.6 ile hesaplanır.

$$h_L = \sum_{k=1}^p h_k \quad (4.5)$$

$$h_H = \sum_{k=p+1}^n h_k \quad (4.6)$$

Yeniden kullanılmaya uygun bileşenler farklı bir davranış modelini test etmek için kullanılırsa hızlanma oranı Eş. 4.7'deki gibi hesaplanır:

$$S = \frac{O}{R} = \frac{t_E + t_A + h}{t_A} \quad (4.7)$$

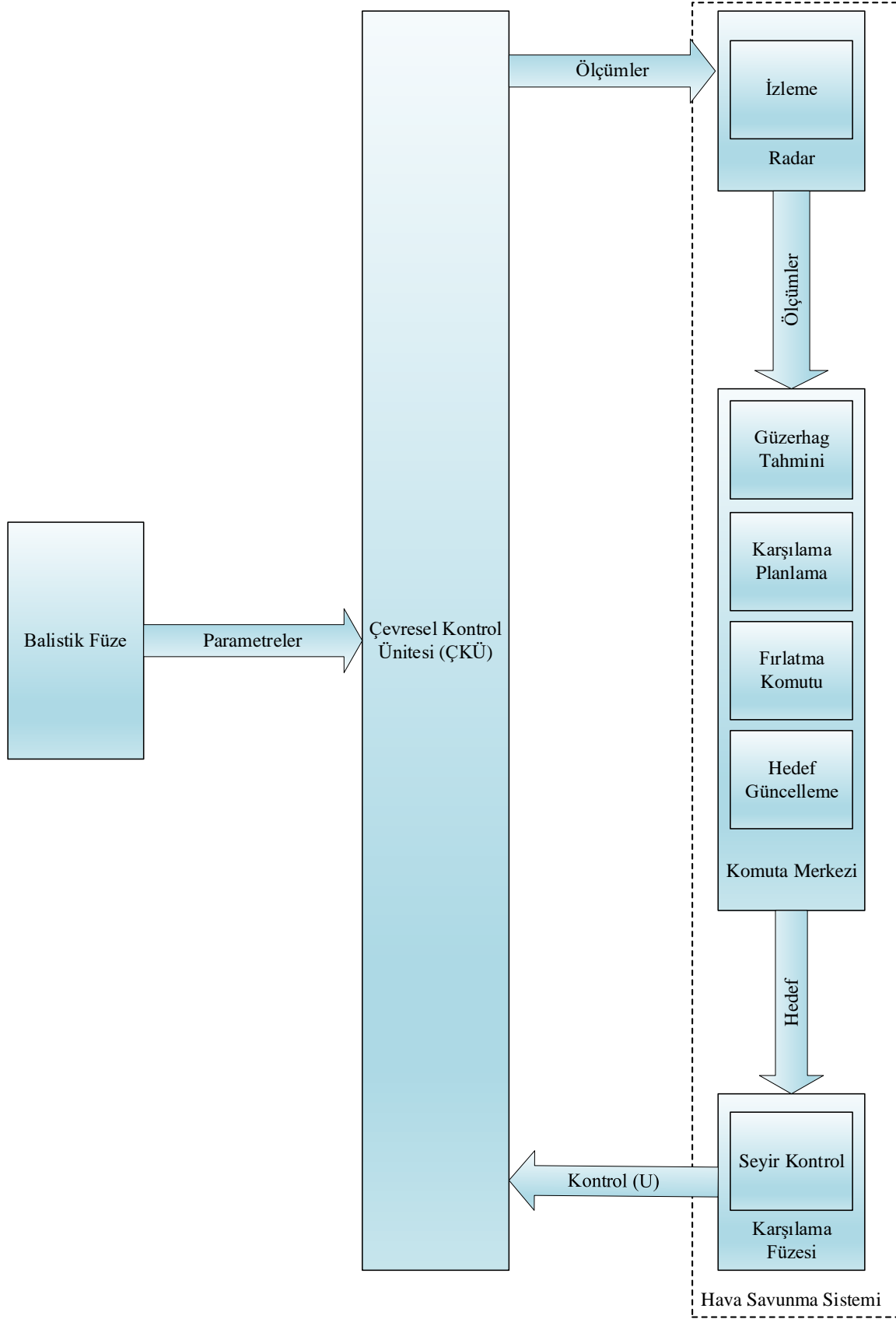
Eğer çevre modeli, başka bir ajan kümesini test etmek için kullanılırsa ve bu ajanlar farklı bir sürücü grubu gerektirirse, yeniden kullanım oranı Eş. 4.8'deki hali alır.

$$S = \frac{O}{R} = \frac{t_E + t_A + h}{t_A + h_L} \quad (4.8)$$

Eş. 4.7 ve 4.8'de görüldüğü üzere, modelde kullanılacak olan ÇKB adedi arttıkça yeniden kullanım oranı artmakta, ajan sayısı arttıkça azalmaktadır.

5. BENZETİM MODELİ

Uygulanan mimaride geleneksel tasarımlardan farklı olarak çevre elemanı da bir Çevre Kontrol Birimi (ÇKB) adı verilen bir ajan olarak tasarlanmış, çevresel etkileri yönetme görevi bu ajana verilmiştir. Tasarımda balistik füze tek bir ajan olarak tasarlanmıştır. Öte yandan HSS unsurları birden fazla ajanla temsil edilmiştir ve bu ajanlar işbirliği içindedir. HSS ve balistik füze arasında doğrudan bir etkileşim veya iletişim yoktur. Saldırı ve savunma tarafları arasındaki tek ortak bağ ikisinin de ÇKB ile etkileşimde olmasıdır. HSS tasarımı radar, komuta merkezi ve karşılama füzesi olmak üzere üç ajandan oluşmaktadır (Bkz. Şekil 5.1).



Şekil 5.1. Benzetim Modeli

5.1. Çevre Kontrol Biriminin Özelleştirilmesi

Benzetim modelinde fizik, çarpışma, yerçekimi ve hava sürtünmesi gibi çevresel etkiler ÇKB tarafından kontrol edilir ve uygulanır. Ajanlara uygulanan toplam kuvvetlerin bileşkesi alınarak ajanların bir sonraki zaman adımındaki yeni konumları da ÇKB tarafından hesaplanmaktadır. Bu özellikleri ile ÇKB saldırı ve savunma elemanlarının tek ortak noktasıdır. Ajanlara ait değişkenler ve özellikler ÇKB tarafından erişilebilir ve bunlardan bazıları (konum, hız vb.) bu bileşen tarafından değiştirilebilir.

Tek bir iterasyonda, her ajanın hesaplamalarını ve etkileşimlerini tamamlaması beklenir. ÇKB tarafından balistik füzeye uygulanan çevresel faktörler yerçekimi, sürüklenme ve Coriolis etkisidir. Öte yandan HSS balistik füzeye yönelik konum tespiti yaparken ölçüm sinyallerine ÇKB tarafından ortam gürültüsü eklenmektedir.

5.1.1. Yerçekimi

Kütle çekim kuvvetinin moleküllerden, gezegenlere, gezegenlerden evrenin en uç noktalarına kadar etkileri görülmektedir. Dünya, kütesinden dolayı çevresindeki bütün cisimleri kendi merkezine doğru çeken bir kuvvetin kaynağıdır. Bu kuvvete yer çekim kuvveti denir.

Newton'un evrensel yerçekimi yasasına göre iki cisim (m_1 ve m_2) arasındaki çekim kuvvetinin büyüklüğü bu iki cismin kütlelerinin çarpımı ile doğru orantılı, iki cismin arasındaki mesafe (r) ile ters orantılıdır [97]. Çekim kuvvetinin denklemi Eş. 5.1'de verilmektedir.

$$F_G = G \frac{m_1 m_2}{r} \quad (5.1)$$

Verilen bağıntıda G , çekim sabitidir. m_1 kütesinin m_2 kütesine uyguladığı kuvvetin oluşturduğu ivme (g), G değişkenine bağlıdır ve Eş. 5.2'deki gibi hesaplanır:

$$g = G \frac{m_1}{r^2} \quad (5.2)$$

Benzetimde ele alınan senaryo dünya üzerinde gerçekleştiği için bu kütlelerden birinin dünya olduğu göz önünde bulundurularak yerçekiminin değeri hesaplanabilir. Hassas hesaplama için denklemdaki üç değişkenin dünya için geçerli değerlerini kullanmak şarttır. Dünya için çekim sabitinin (G) değerinin $6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg}$ olduğu bilinmektedir [98]. Dünyanın kütlesi (M) yaklaşık olarak $5,9722 \times 10^{24} \text{ kg}$, yarıçapı (R) ise ekvatorunda yaklaşık $6378,1366 \text{ km}$ 'dir [99]. Kütleler arasındaki uzaklık hesaplanırken balistik füzenin irtifası (h) da hesaba katılmalıdır. Bu durumda yerçekimi ivmesi Eş. 5.3 kullanılarak dinamik olarak hesaplanabilir:

$$g = G \frac{M}{(R + h)^2} \quad (5.3)$$

Yerçekimi ivmesi atmosfer içerisinde bulunan yüksekliğe bağlı olarak $9,764 \text{ m/s}^2$ ve $9,834 \text{ m/s}^2$ arasında değişmektedir. Balistik füzenin yüksekliği anlık değişeceği için füzeye etki edecek yerçekimi kuvvetinin değeri bir öngörülemezlik faktörü oluşturmaktadır. Yerçekim kuvvetinin yönü devamlı dünyanın merkezine doğrudur. Benzetim ortamında gezegen ve yıldızların kütle çekim etkileri gözardı edilmiştir.

5.1.2. Hava sürtünmesi

Havada hareket eden her cisme hareket yönünün tersine hava sürtünme kuvveti uygulanır. Bu kuvvetin şiddeti cismin hızına, yüzey alanına ve yüzey doku sürtünmesine bağlıdır.

$$F_D = \frac{C_D \times \rho \times V^2 \times A}{2} \quad (5.4)$$

Yukarıdaki denklemden A hareket yönüne dik en geniş yüzey alanını, ρ hava yoğunluğunu, C_D ise cismin şeklinin direnç katsayısını ifade eder. Direnç katsayısı cismin şeklinin aerodinamik özelliklerine göre 0,1 ile 1 arasında değişmektedir. Balistik füze tasarımlarında füzenin aerodinamiği göz önünde bulundurulduğundan bu değer alt sınıra yakın olacaktır.

Benzetimde yüksek doğruluk sağlanması amacıyla NASA tarafından belirlenen 'Dünya Atmosfer Modeli' kullanılmıştır [100]. Bu modelde hava yoğunluğu (ρ) sıcaklık ve hava basıncına bağlı olarak Eş. 5.5'teki gibi hesaplanmaktadır.

$$\rho = \frac{P}{(0,2869 \times (T + 273,1))} \quad (5.5)$$

Sıcaklık (T) ve hava basıncı (P) değerlerine ise atmosferin katmanlarına ve irtifaya (h) göre değişkenlik gösteren bağıntılar ile ulaşılır.

$$h < 11 \text{ km} \quad \rightarrow \quad T = 15,04 - 0,0064 \times h \quad (5.6)$$

$$P = 101,29 \times \left[\frac{T+273,1}{288,08} \right]^{5,256}$$

$$11 \text{ km} < h < 25 \text{ km} \quad \rightarrow \quad T = -56,46 \quad (5.7)$$

$$P = 22,65 \times e^{(1,73 - 0,000157 \times h)}$$

$$h > 25 \text{ km} \quad \rightarrow \quad T = -131,21 + 0,00299 \times h \quad (5.8)$$

$$P = 2,488 \times \left[\frac{T+273,1}{216,6} \right]^{-11,388}$$

Hava direnci katsayısı (C_D) füzenin şekline ve hızına bağlı olarak değişkenlik gösteren kompleks bir değerdir. Benzetimde ÇKB C_D değerini deneysel sonuçlara dayanan bir interpolasyon tablosundan atar [101].

5.1.3. Coriolis etkisi

Coriolis etkisi dönen bir platformun üzerinde düz ilerlemeye çalışan bir cismin, platformun bağlı uzayında ilerlediği yöne dik olarak gerçekleştirdiği harekettir. Öte yandan Coriolis kuvveti, gerçek hayatta var olan bir fenomen değil, dönmeyen bir sistemde Coriolis etkisini taklit etmek için gereken kuvvettir. Benzetim ortamında uzayda daimi bir rotasyonu gerçekleştirmek performans sorunları oluşturacağı için balistik füze üzerine Coriolis etkisi uygulayarak aynı sonuç alınmıştır.

Gezegelimiz 23 saat, 56 dakika ve 4 saniyede kendi etrafında batıdan doğuya doğru (yer eksenine göre) bir turu tamamlamaktadır. Dünyanın dönüşünden kaynaklı coriolis etkisini bir kuvvet ile oluşturmak için dünyanın açısal hızı (Ω) kullanılır. Dünyanın tam turunu 23 saat 56 dk içerisinde tamamladığı göz önünde bulundurulduğunda dünyanın açısal hızı (Ω) Eş. 5.9'daki gibi olur.

$$\Omega = \frac{2\pi}{(23 \times 60 + 56) \times 60} = 7,292 \times 10^{-5} \text{rad/s} \quad (5.9)$$

Bu açısal hızın lokal dik bileşeni (ω) füzenin üzerinde olduğu paralel derecesine (ϕ) bağlıdır.

$$\omega = \Omega \sin \phi \quad (5.10)$$

Balistik füzenin sahip olacağı Coriolis ivmesi (a_c) Coriolis parametresine (f) bağlıdır.

$$a_c = fV_m \quad (5.11)$$

Coriolis parametresi (f) ise Eş. 5.12'deki bağıntı ile hesaplanır [102].

$$f = 2\Omega \sin \theta \quad (5.12)$$

Bu denklemde θ balistik füzenin üzerinde bulunduğu enlemi ifade eder. Bu bağıntıdan yola çıkıldığında Coriolis kuvvetinin büyüklüğü Eş. 5.13'teki gibi hesaplanabilir.

$$F_c = 2m\Omega \sin \theta \quad (5.13)$$

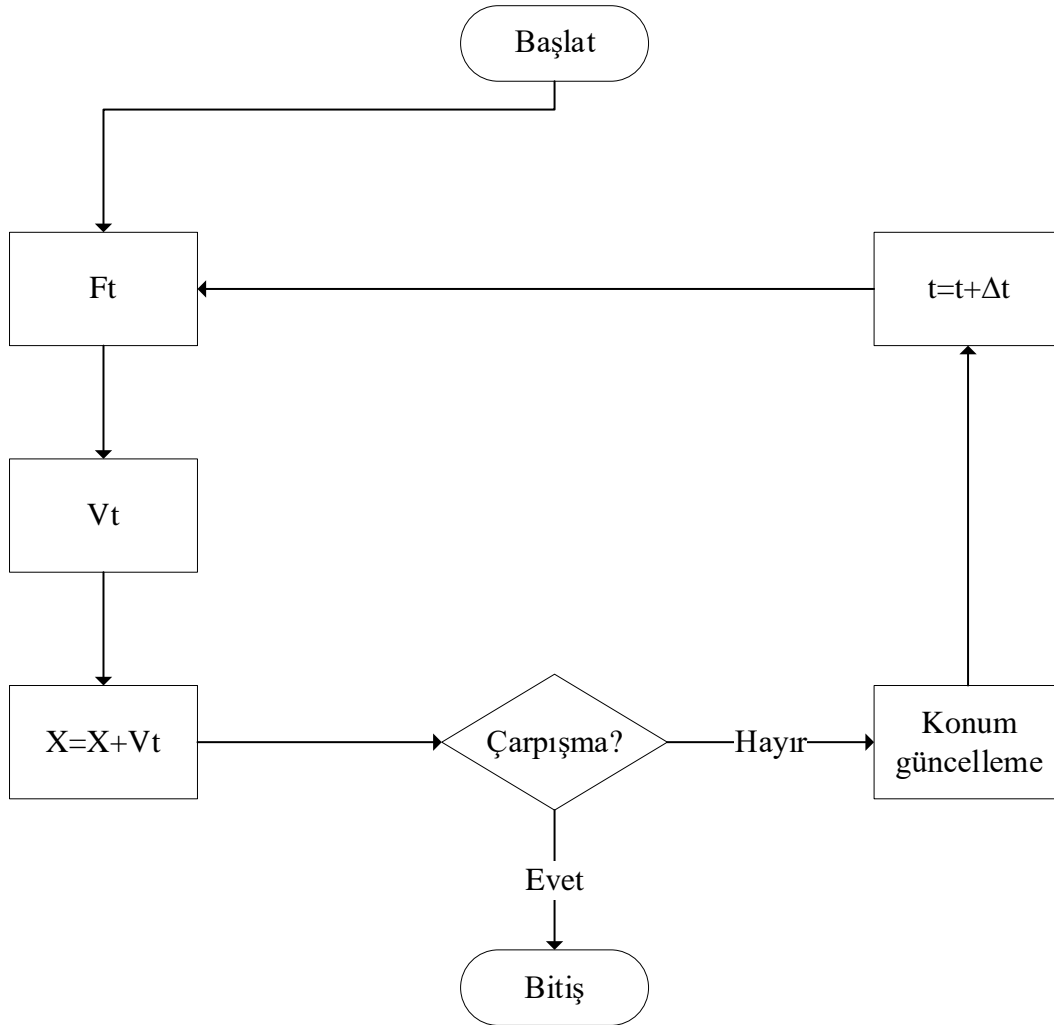
ÇKB, Coriolis kuvvetini balistik füze hedefe çarpana veya imha edilene kadar uygulamaya devam eder.

5.1.4. Sinyal gürültüsü

Ortamdan kaynaklı gürültü sinyal işleme alanındaki en yaygın problemlerden birini oluşturmaktadır. Benzetim senaryosunda da HSS tarafından balistik füzenin konumunu tespit etmek için gönderilen sinyallere ÇKB tarafından gürültü eklenmektedir. Çalışmalar uydu sinyallerinde Sinyal-gürültü oranının 11dB ile 45dB arasında olduğunu göstermektedir [103]. Bu senaryoda da HSS'nin radar modülü bir uydu sistemini temsil ettiğinden bu unsurun gönderdiği ve aldığı sinyallere [11dB – 45dB] aralığında Gauss gürültüsü eklenmektedir. Eklenen gürültü, ölçüm hatasının ve veri iletim sırasında oluşan parazitini toplamını temsil etmektedir.

5.1.5. Fiziksel etkilerin uygulanması

Benzetim ortamının fiziksel etkileri gerçekçi olarak yansıtabilmesi için ÇKB fiziksel etki ve zaman döngülerinden oluşan bir fizik motoru iterasyonu kullanılmaktadır. Bu yapı birim zamanda bir iterasyon tamamlayarak ortamdaki güçleri, füzenin konumlarını ve hızlarını güncellemekte ve çarpışma kontrollerini yapmaktadır (Bkz. Şekil 5.2).



Şekil 5.2. Fiziksel etki iterasyonu

5.2. Balistik füze

Balistik füzelerin özellikleri menzilini belirler. Saldırı senaryolarında ele alınan balistik füzenin menzili ise karşılama stratejisinin belirlenmesinde önemli bir etkidir. Balistik füzeler menzillerine göre 4 sınıfa ayrılır (Bkz. Çizelge-5.1). Benzetimde de saldırı

senaryoları bu sınıflandırmayla tanımlanmaktadır.

Çizelge 5.1. Saldırı menziline göre balistik füze sınıfları

Füze Sınıfı	Menzil (km)
Kısa Menzilli Balistik Füze (KMBF)	300 - 1000
Orta Menzilli Balistik Füze (OMBF)	1000 - 3000
Uzun Menzilli Balistik Füze (UMBF)	3000 - 5500
Kıtalararası Balistik Füze (KABF)	> 5500

Benzetimde balistik füze 3 tür modüle sahiptir. Bunlar yakıt tankları, itiş motoru ve savaş başlığıdır.

5.2.1. İtiş motoru

Balistik füzeler itiş gücünü jet motorlarından almaktadır. Bu motorların itiş gücü füzenin temel hareket gücünü oluşturur. Bu itiş gücü yakıt bitene kadar sürekliliğini korur ve füzeye hız kazandırır. Roket motoru fırlatmayı ve itme süresince hızlanmayı sağlar. Benzetim ortamı kullanıcıya fırlatma koordinatlarını, açısını ve motorun güç üretim kapasitesini belirleme imkânı sunmaktadır. İtme motoru bazı modellerde mevcut olan yakıt püskürtme ve egzoz girişi gibi kontrollerden yoksun olarak tasarlanmıştır, bu sebeple motor itmesi yakıt tükenene kadar kullanıcı tarafından belirlenen miktarda gücü üretir. Motor gücü birimi olarak ölçeklenebilirliği sağlaması amacıyla her kg ağırlığa karşılık üretilen kilogram-kuvvet (kgf) olarak belirlenmiştir. Balistik füzenin motor gücü testlerde 3 kg/kgf olarak kullanılmıştır.

5.2.2. Yakıt tankları

Yakıt miktarı itiş safhasının süresini doğrudan belirler, bu da uçuş güzergâhını ve saldırının menzilini etkileyen başlıca faktörlerden biridir. Yakıt miktarını belirleyen etkenlerden olan yakıt depoları balistik füzelerin tasarımına bağlı olarak bir veya daha fazla olabilir. Özellikle modern balistik füzelerde karşılaşılan çoklu yakıt tankı yapısı çok aşamalı uçuş adı verilen mekanizmanın uygulanmasına olanak sağlar. Bu mekanizma gereği balistik füzeler ayrı iticileri ve yakıt tankları olan birden fazla modüle sahiptir, ve yakıtı tükenen modül ana

gövdeden ayrılarak füzenin gereksiz ağırlıklardan kurtulması ve böylece yakıt kullanımında verimlilik sağlanması amaçlanır [104]. Motor itişisi sabit bir F değeri olarak alınırsa bir aşamadan diğerine geçiş esnasında kütlelerin sırasıyla m_1 ve m_2 olduğu durum için kazanılan ivme (Δa) Eş. 5.14 ile hesaplanabilir.

$$\Delta a = \frac{F(m_1 - m_2)}{m_1 m_2} \quad (5.14)$$

Benzetim ortamı balistik füzenin kaç aşamalı olduğunu, aşamalardaki yakıt miktarlarının ve yakıt tanklarının darılarının belirlenmesine olanak tanımaktadır. Buna ek olarak, her aşamadaki direnç yüzey çapı da ayrıca belirlenebilmekte, böylelikle aşama geçişlerinde hava direncinde meydana gelecek değişikliklerde canlandırılabilir.

5.2.3. Savaş başlığı

Savaş başlığı (yük) balistik füzenin hedefine taşınması amaçlanan modüldür. Başlığın tipi füzenin etki alanı ve bıraktığı hasar türünü belirler. Günümüzde ülkelerin geleneksel (patlayıcı), nükleer veya kimyasal savaş başlıklarını envanterlerinde tuttuğu bilinmektedir. Özellikle uzun ve kıtalararası menzile sahip balistik füzelerde savaş başlığı toplam füzenin kütlesinin ve boyunun küçük bir kısmını oluşturur.

Savaş başlıkları tek veya çok parçalı (MIRV gibi) olarak tasarlanmaktadır. Savunma sistemleri tarafından tehdidin ortadan kaldırılmasını zorlaştırmak amacıyla kullanılan çok parçalı savaş başlıkları atmosfere giriş safhasında küçük modüllere ayrılarak hedef sayısını çoğaltmaktadır [105]. Bu hedeflerden bazıları hasar verme özelliği olmayan sadece savunma sistemini yanıltmayı amaçlayan kukla başlıklarda olabilir.

Bu çalışmada kullanılan savaş başlığı modeli tek başlığa sahip olup ayarlanabilir öz ağırlığa ve boyuta sahiptir.

5.3. Hava Savunma Sistemi

HSS her biri birer ajan olarak tasarlanmış, eşzamanlı faaliyet gösteren 3 unsurdan oluşur. Bunlar radar, komuta merkezi ve karşılama füzesidir. Sistem karşılama metodu olarak özgün bir güzergâh geri izleme yaklaşımı kullanmaktadır.

5.3.1. Radar

Radar ajanının tek amacı ve görevi hedef takibidir. İzleme ÇKB'ye ölçüm istekleri gönderilerek yapılır. Talebi aldıktan sonra, ÇKB ilgili nesnenin pozisyon bilgisini okur, veriye ortam gürültüsü eklenerek çarpar ve bu veriyi radara iletir. Takip isabetini arttırmak için sinyal gürültüsü elimine edilmektedir. Kalman filtreleme Gauss gürültüsünü olumsuz etkilerini büyük oranda ortadan kaldıran etkili bir yöntem olduğu için radar elde ettiği sinyali Kalman filtresinden geçirir [106, 107].

Ölçüm süreci doğrusal, ayrık zamanlı bir gözlem sistemi olarak modellenmiştir ve Eş. 5.15'teki gibi ifade edilebilir.

$$z_k = Hp_k + v_k \quad (5.15)$$

Yukarıdaki denklemde p takip edilen füzenin gerçek pozisyonu z_k , k zaman adımıdaki ölçümdür. H ise üç boyutlu ölçüm matrisini ifade eder ve Eş. 5.16'da görüldüğü gibidir.

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.16)$$

v, R kovaryans matrisine göre dağılım gösteren gürültüyü ifade eder. Radar ajanının ölçümlerindeki gürültü karakteristiğine hakim olması ele alınan senaryoya uygun bir varsayımdır. Buradan yola çıkılarak ölçüm modeli 3 ayrı boyutta ölçülen gürültü arasında korelasyon olmadığı bilgisi ile tasarlanmıştır. Bu durumda kovaryans matrisi (R) Eş. 5.17'deki hali alır.

$$R = \begin{pmatrix} \sigma^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma^2 \end{pmatrix} \quad (5.17)$$

Ölçüm modülü, gürültünün kovaryans matrisini her zaman adımında varyans hesaplamasına son ölçümleri ekleyerek günceller. Filtreleme işleminden sonra, füzenin hız vektörü (\vec{v}) Eş. 5.18'deki gibidir.

$$\vec{v} = (\Delta x, \Delta y, \Delta z) \quad (5.18)$$

Radar ajanı, filtrelenen konum verisini, tanımlama değeri (ajan kimliği) ve zaman damgası ile çerçeveler (Bkz. Şekil 5.3). Ardından çerçevelenen veriler komuta merkezine iletilir. Radar, hem karşılama füzesini hem de balistik füzeyi izlemekten sorumludur.

Ajan Kimliği	Konum	Zaman Damgası
--------------	-------	---------------

Şekil 5.3. Radar Veri Çerçevesi

5.3.2. Komuta merkezi

Komuta merkezi radardan aldığı konum bilgilerini tahmin modeline girdi olarak kullanarak balistik yörüngeyi hesaplar ve elde ettiği tahminsel yörüngeye göre bir karşılama planı oluşturur. Karşılama planı karşılayıcı füzenin ne zaman, hangi doğrultuda ateşleneceğini içerir. Karşılama füzesi ateşlendikten sonra füzenin hedeflerinin güncellenmesi de komuta merkezi tarafından yürütülür.

Balistik yörüngelerin hesaplanması

Fırlatılan balistik füzenin etkisiz hale getirilebilmesi için füzenin güzergâhının önceden tahmin edilebilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada tahminin yapılabilmesi için radar ajanı tarafından toplanan balistik füzenin konumunun ve yönünün algılanabildiği varsayılmaktadır. Konumu (p) bilinen füzenin hızı (V) konumun zamana (t) göre değişimi ile hesaplanmaktadır.

$$V(t) = \frac{\partial p}{\partial t} \quad (5.19)$$

$$a(t) = \frac{\partial V}{\partial t} \quad (5.20)$$

Balistik füzenin ateşleme safhasındaki hareketini belirleyen ana etmenler olan yakıt miktarı ve motor gücünün savunma cephesi tarafından bilinmediği varsayıldığı için ateşleme safhasında tahmin yapılmaz. Fırlatılan füzenin hareketi üzerindeki hâkim güç olan iticiler

devre dışı kaldığında füzenin tam balistik hareketi başlar. İtiş motorlarının devre dışı kalması bu çalışma kapsamında belirlenen senaryoda füzenin iticilerinin yakıtının tükenmesi sonucu meydana gelmektedir. Füze üzerinde etki gösteren bu kuvvetin devreden çıkması, kuvvetin füzenin hareketine etkisinin sonlanması ile tespit edilebilir. İticiler füzeyi hızlandırmakta veya bir hızda sabit şekilde hareket etmesini sağlamaktadır. İticiler devre dışı kaldığında hava sürtünmesi ve yerçekimi gibi dış kuvvetler füze üzerinde hâkim hale gelecek ve füzenin hızını düşürecektir. Bu etki yerçekiminin yönünden dolayı y ekseninde daha belirgin görülecektir ve söz konusu durum Eş. 5.21’de verilen koşulun sağlanması ile gerçekleştirir.

$$|\Delta V_y| < 0 \quad (5.21)$$

Yakıtı biten roketin güzergâhı, roket tam balistik harekete döndüğü için doğrusal bir fonksiyonla ifade edilebilir. Bu aşamada radar devreye girerek füzeye ait değişkenleri ölçer ve güzergâh hesaplamalarını yapar. Balistik füzeye ait ölçümlerden faydalanılarak yer değişimi, buna bağlı olarak füzenin hızı (V) ve ivmesi (a) hesaplanabilir. Yer değişiminin (Δp) meydana geldiği başlangıç ve bitiş zamanları sırasıyla t ve t_0 ile, başlangıç zamanındaki hızı ise v_0 ifade edilirse Δx Eş. 5.22’deki bağıntı ile hesaplanır.

$$\Delta p = \int_{t_0}^t v_0 + at \quad (5.22)$$

yani,

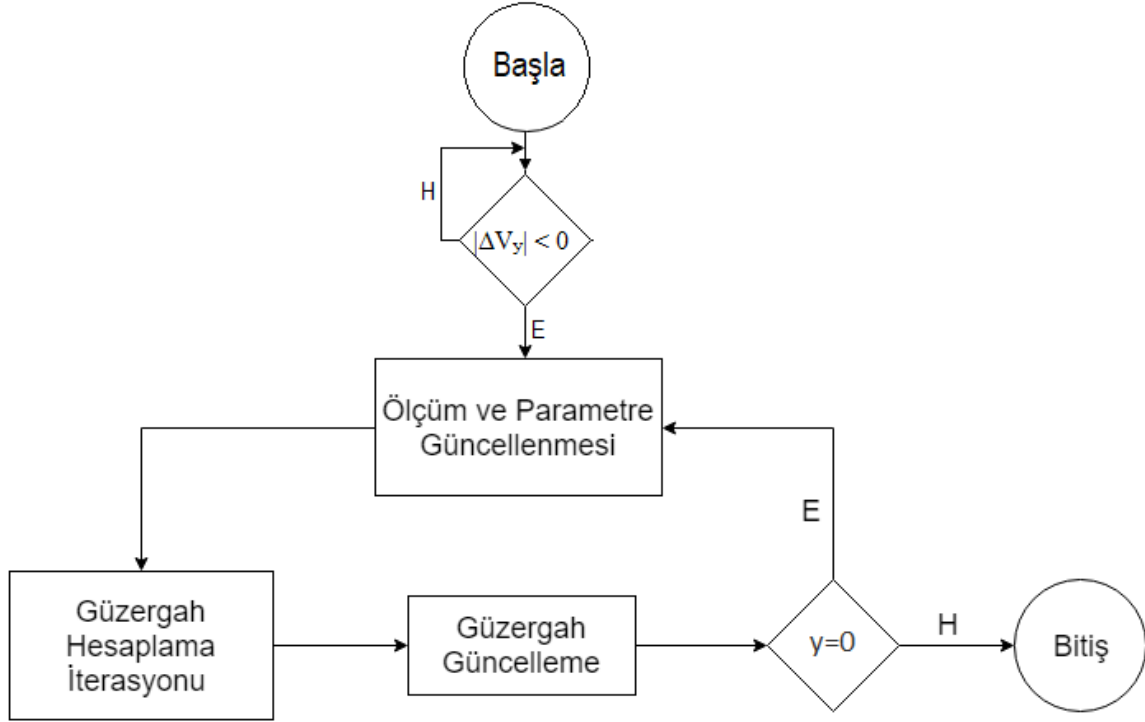
$$\Delta p = v_0(t - t_0) + \frac{a(t-t_0)^2}{2} \quad (5.23)$$

Tahmin süreci bir ayrık zamanlı modeldir. Her iterasyon bir zaman (t) ve o zaman adımında balistik füzenin olacağı tahmin edilen (x,y,z) bileşenlerine sahip bir konum (p) ikilisi üretir. Hesaplanan yer değişiminden yola çıkarak füzenin konumu (p) ve hızı (v) sırasıyla Eş. 5.24 ve 5.25’teki gibi hesaplanır.

$$p = p_0 + \Delta p \quad (5.24)$$

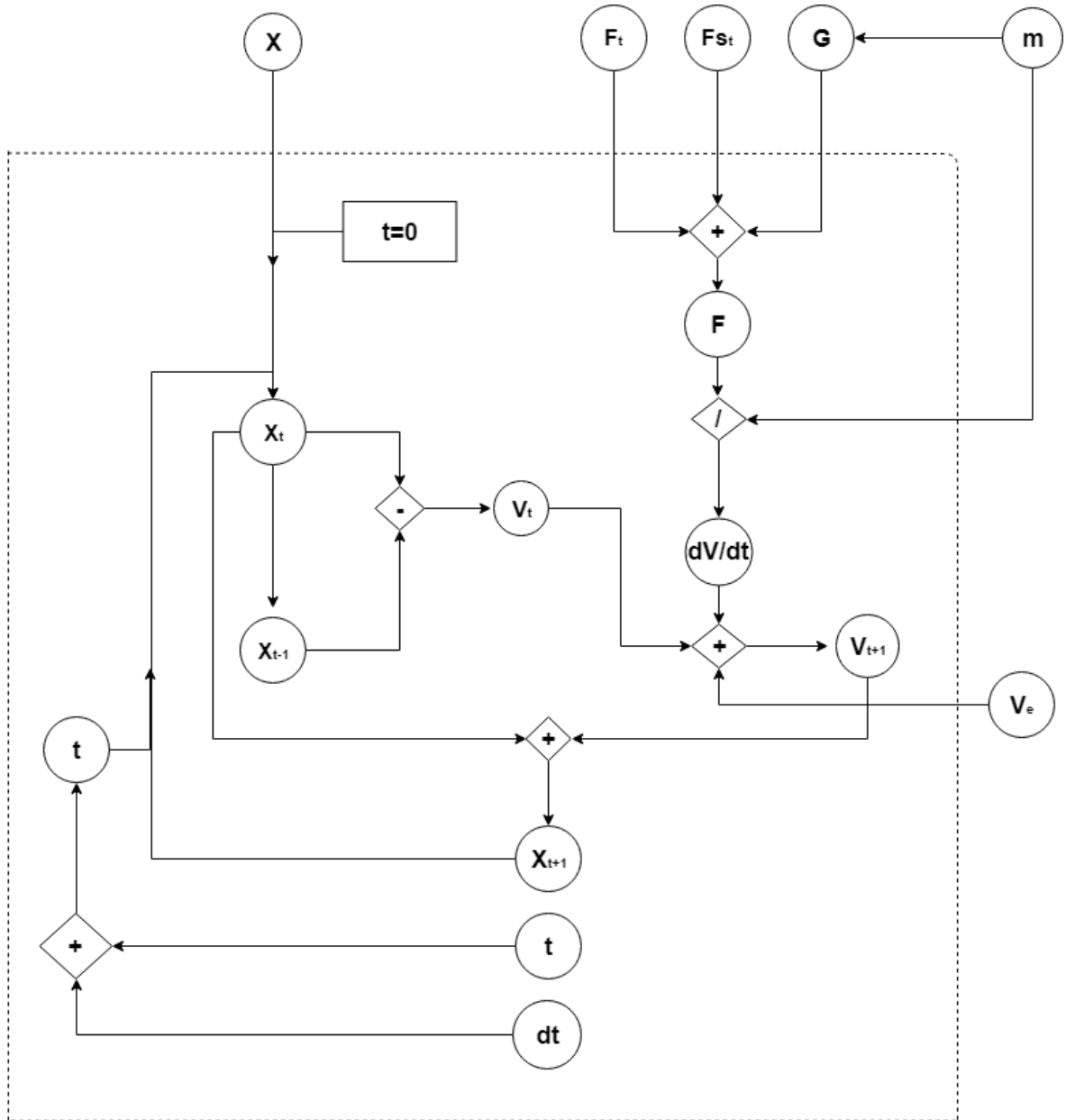
$$v = v_0 + a\Delta t \quad (5.25)$$

Hesaplanan (p,t) değer ikilisi bir sonraki adıma ofset olarak kullanılmak üzere aktarılır. Balistik füze yeryüzüne düşene kadar ölçümler tekrarlanarak güzergâh tespiti güncellenir ($y=0$). Radarın güzergâh takip süreci Şekil 5.4'te genel hatlarıyla verilmiştir.



Şekil 5.4. Radar ögesinin güzergâh takip süreci

Ölçülen parametreler güzergâh hesaplama iterasyonuna sokularak füzenin yeryüzüne ulaşana kadar izleyeceği yol hesaplanır. Füzenin üzerindeki etkilerle beraber mevcut hızı hesaplanarak belli zaman aralıklarındaki yer değiştirmeleri üst üste eklenir ve tahmini bir güzergâh oluşturulur. Güzergâh örnekleme füze zemin hizasına ulaşana kadar ($y = 0$) devam eder. Her çerçeve (frame) çiziminde füzenin konumu güncellenerek tahminler yenilenir. Güzergâh hesaplamaları için Şekil 5.5'te yer alan iterasyon kullanılmıştır.



Şekil 5.5. Güzergâh hesaplama iterasyonu

Güzergâh hesaplanırken zaman adımı (dt) seçimine göre örnekleme sıklığı artırılarak daha hassas ölçüm sağlanır ancak örnekleme sıklığının artırılması işlem yükünü de arttırmaktadır. Örnekleme yapılan koordinatlar birleştirilerek oluşturulan güzergâh arayüzde görüntülenir (Bkz. Resim 5.1).



Resim 5.1. Tespit edilen güzergâhın arayüzde gösterimi

Karşılama stratejisi

Balistik füzelerin güzergâhları belirlendikten sonraki aşama füzelerin karşılanmasıdır. Savunma füzesi başlıkları tehditleri imha şekline göre ikiye ayrılır. Bunlardan ilki tehdide doğrudan çarparak tehdidi etkisiz hale getirirken ikincisi de tehdide yeterince yaklaştıktan sonra infilak ederek patlama etkisi ile tehdidi etkisiz hale getirmektedir. Bu çalışmada ele alınacak karşılama metodu tehdide doğrudan çarpma ile imha etmeyi hedeflemektedir.

Daha önce de belirtildiği gibi uzun menzilli balistik füzelerin en büyük tehditlerden biri olmasının başlıca sebebi atmosferin dışına kadar çıkan füze başlığının dünyaya düşerken çok yüksek hızlara ulaşmasıdır. Düşüş esnasında yerden fırlatılan karşılama füzesinin, balistik tehditin sahip olduğu hıza ulaşması mümkün olmadığı için uçak ve helikopter gibi tehditlere karşı etkili olan doğrudan hedefin kendisine kilitlenerek etkisiz hale getirmeye dayalı geleneksel yöntemin balistik füzeye karşı güvenilir bir sonuç vermeyeceği bilinmektedir.

Yerden tehdite doğru fırlatılan karşılama füzesine göre tehditin bağıl hızı iki füzenin hızları toplamı olacaktır. Bu durum savunma tepki süresini oldukça kısaltacak ve tehdidin hareketini etkileyen öngörülemez değişkenlere (değişken hava yoğunluğu, rüzgâr, füze kanatçık hareketleri vs.) bağlı konum değişikliklerine adaptasyonu zorlaştıracaktır. Bu gibi faktörler karşılama başarısını olumsuz etkileyeceği için çarpışma noktası çıkarımı yapacak öngörülme model uygun bir tercih olmayacaktır.

Karşılama füzelerinin balistik tehditin hedef noktasına yakın olduğu varsayımı ile hareket

edilirse radar ajanı tarafından hesaplanan yörüngeye uygun bir noktadan girip yörüngeden çıkmamak suretiyle tehdiye doğru ilerlemek hata payını indirgemeyi sağlayacak en uygun yaklaşım olmaktadır. Bu sebeple bu çalışmada karşılama metodu olarak özgün bir güzergâh geri izleme yaklaşımı kullanılmaktadır.

Ateşleme

Yakıtı biten roketin güzergâhı, roket tam balistik harekete döndüğü için doğrusal bir fonksiyonla ifade edilebilir. Bu aşamada radar devreye girerek füzeye ait değişkenleri ölçer ve güzergâh hesaplamalarını yapar. Güzergâh hesaplamasının ilk defa tamamlanması üzerine komuta merkezi tarafından roketin yörüngeye girebileceği en uygun koordinatın hesaplanması süreci başlatılır.

Güzergâh üzerinde çok sayıda örneklem nokta olmasına karşın bunlardan birçoğu balistik füzeye oldukça yakın olduğu için karşılamaya uygun değildir. Bu noktaların elenerek sürecin optimize edilebilmesi için bir model öngörümü benzetimi çalıştırılmaktadır. Bu alt benzetim temel olarak karşılama füzesinin ilk ateşleme anında tam güç ile güzergâh üzerindeki noktalara hedeflendiğinde balistik füzeye yetişebileceği en uzak noktayı tespit eder.

Balistik füzenin yörüngesi hesaplandıktan sonra, optimizasyon amacıyla bir önleme planlama süreci başlatılır. Bu süreç, optimum önleme koordinatını hesaplar ve ardından füzenin planlanan müdahalenin gerçekleşeceği yörüngesinin bir parçası olan önleme penceresini belirler. Optimal önleme senaryosu, mümkün olan en erken müdahaledir. Bu senaryo, önleme füzesinin hedef noktadan güvenli bir mesafeden başlayarak yörünge üzerindeki çeşitli önleme noktalarına doğrudan ateşlendiğini varsayan ve balistik füzedeki önceki noktaya ulaşmış ulaşmadığını test eden ileriye dönük bir yaklaşımla hesaplanmaktadır.

Belirtilen benzetim kapsamında güzergâh üzerinde karşılama yapılabilecek savunma menzili içerisinde kalan koordinatlar tespit edilir. Bu adımda örneklenen koordinatlar sırayla ele alınarak fırlatma noktasından (a) fırlatılan karşılayıcı füzenin seçilen hedef noktadan (b) geçmesi için fırlatılması gereken birim vektör \vec{u} hesaplanır.

$$\vec{u} = \frac{\vec{b} - \vec{a}}{|\vec{b} - \vec{a}|} \quad (5.26)$$

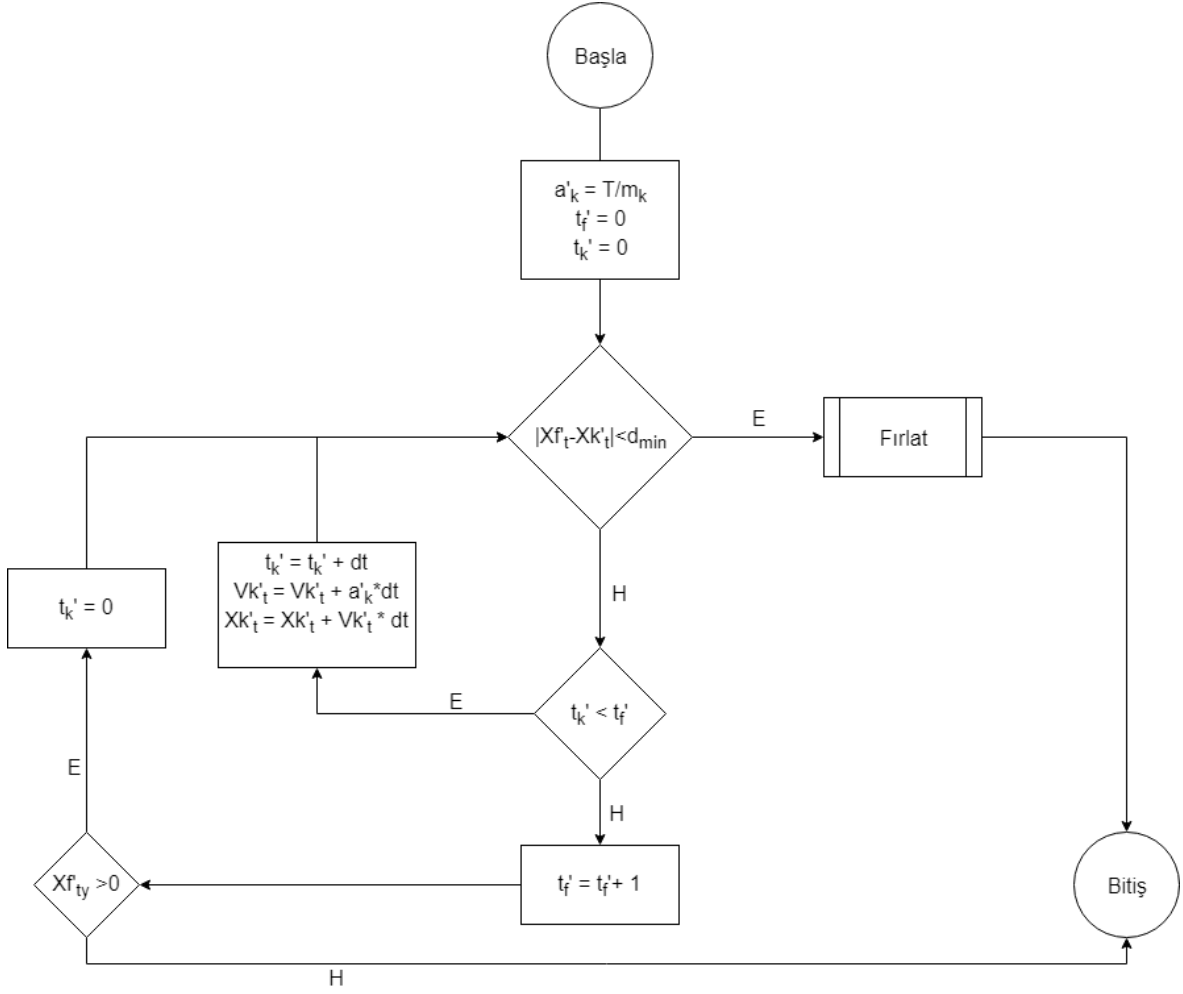
Hesaplanan güzergâha göre tehditin hedefinin savunma sisteminin menzilineki bir koordinat olduğunun tespit edilmesi durumunda savunma sistemi devreye girer. Karşılıyıcı füzenin hedefe fırlatıldığında balistik füzeye yetişip yetişmeyeceğinin tespit edilmesi gerekmektedir. Bu kontrolün sağlanması için karşılıyıcı füzenin tam güç (F_{max}) ile fırlatıldığı varsayımı ile kalkış güç vektörü (\vec{T}) hesaplanır.

$$\vec{T} = (F_{max}) \times \vec{u} \quad (5.27)$$

Söz konusu fırlatma durumunda karşılıyıcının ivmesi (\vec{a}_k), zamana göre muhtemel hızları (V'_k) ve konumları (X'_k) hesaplanır. Bu hesaplama çevresel kuvvetler de dahil edilir.

$$\vec{a}_k = \frac{\vec{T} + \vec{F}_G + \vec{F}_D}{m} \quad (5.28)$$

Karşılıyıcı füze herhangi bir t' anında balistik füzeye belirlenmiş bir tetikleme mesafesinden (d_{min}) daha fazla yaklaşabilecekse ateşleme sağlanır (Bkz. Şekil 5.6). Ateşleme için bu şartları sağlayan herhangi bir nokta tespit edilmesi yeterlidir çünkü bu adımla saldırının sistem menziline karşılanabileceği netleşmiştir.

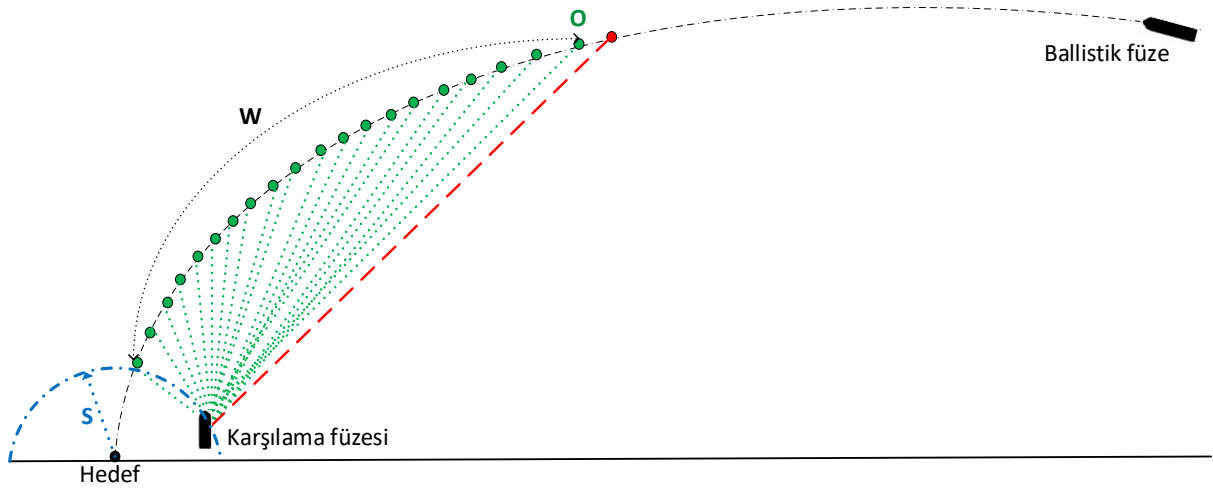


Şekil 5.6. Karşılama füzesi ateşleme karar akış diyagramı

Testi geçen noktalardan balistik füzeyle en yakın nokta en uygun karşılama noktası (O) olarak kabul edilir (Bkz. Şekil 5.7). Bu koordinatın ötesindeki noktalar engelleme penceresinden atılır ve karşılama planında değerlendirmeye alınmaz. En uygun karşılama noktasından güvenlik mesafesi sınırına kadar güzergâh üzerinde örneklenen noktalar karşılama penceresini (W) oluşturur. Karşılama penceresi güzergahın bir alt kümesidir ve O noktası pencereye dahil olan savunma noktasına en uzak karşılama noktasıdır. Aynı zamanda pencereye dahil olan noktalar arasında balistik füzenin en erken ulaşacağı konumdur ve Eş. 5.29'daki gibi ifade edilebilir.

$$O = \{p_i | t_i = \min(W_t)\} \quad (5.29)$$

Çevresel bilinmeyen faktörler ve buna dayalı olarak güzergâhta meydana gelecek güncellemeler ve değişiklikler sebebiyle doğrusal bir fırlatma ile O noktasında karşılama üzerine plan yapmak oldukça risklidir. Bu sebeple ateşleme sonrası fırlatılan karşılama füzesi sabit doğrultuda belirli bir hız ve irtifaya ulaştıktan sonra karşılama füzesini uygun bir şekilde güzergâha sokacak olan kontrol sistemi devreye girer.



Şekil 5.7. En uygun karşılama noktasının tespiti (O: En uygun karşılama noktası, S: Güvenlik mesafesi, W: Karşılama penceresi)

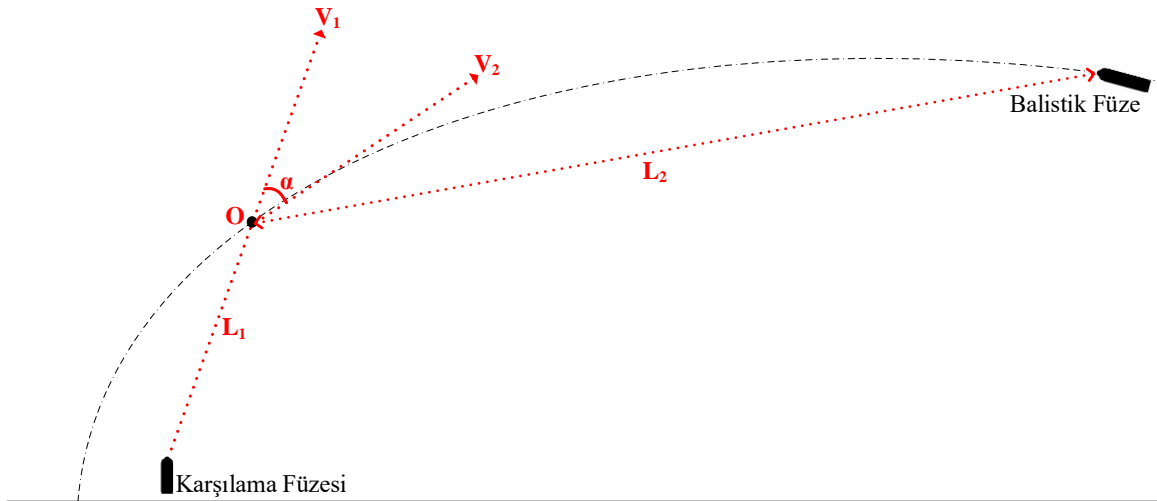
Yörüngeye giriş

Karşılama penceresine dahil edilen noktalar muhtemel yörüngeye giriş noktalarını oluşturur. Yörüngeye giriş noktası belirlenirken penceredeki tüm noktalar belirli kriterler yönünden değerlendirilir. Karşılama noktasının hareketi doğrultusu ile yörüngeye yerel teğeti arasındaki açının küçük olması ve karşılama noktasının karşılama noktasına fırlatılacağı noktaya yakın olması yörüngeye girişi kolaylaştıran etkenlerdir. Her nokta için bu iki değere bağlı yörüngeye giriş katsayısı (Y) hesaplanır ve en düşük değere sahip olan nokta seçilir. Bu katsayı Eş. 5.30 ile hesaplanır.

$$Y_p = \frac{L_1}{L_2} \times (\sin \alpha + c) \quad (5.30)$$

Eş. 5.30'da Y_0 , p noktasının yörüngeye giriş katsayısını, L_1 , savunma füzesi fırlatma noktası ile ele alınan yörüngeye giriş noktasının arasındaki mesafeyi, L_2 yörüngeye giriş noktası ile saldırı füzesinin uzaklığını, α ise yörüngeye giriş noktasına fırlatma doğrultu vektörü ile yörünge giriş noktasının lokal eğim vektörü arasında kalan açığı belirtir (Bkz. Şekil 5.8). Denklemdeki c sabiti α açısının 0 değeri aldığı noktalarda mutlak seçim olarak seçilmesini engellemek için kullanılan küçük bir değerdir. En küçük Y değerine sahip nokta yörüngeye giriş noktası (E) olarak belirlenir ve kontrol sistemi karşılama füzesini bu noktaya yönlendirir.

$$E = \{p | Y_p = \min(Y), p \in W\} \quad (5.31)$$



Şekil 5.8. Karşılama füzesinin yörüngeye giriş şeması

Hedef güncelleme

Füzeler yapıları itibari ile keskin ve çevik manevralar gerçekleştiremezler. Bir karşılama füzesinin dairesel bir yörüngeyi başarılı ve sürekli bir şekilde izlemesi için bir geribesleme değerinden faydalanan seyir düzeltme mekanizmaları kullanması şarttır. Balistik füzenin tahmini güzergâhını takip edebilmesi için fırlatılan karşılama füzesi yörünge giriş noktasına belli bir mesafe yaklaştıktan sonra kilitlenen hedef güzergâh üzerinde balistik tehdite doğru ilerleyerek güncellenir. Bu mesafe hedef güncelleme mesafesi (D_u) olarak ifade edilebilir.

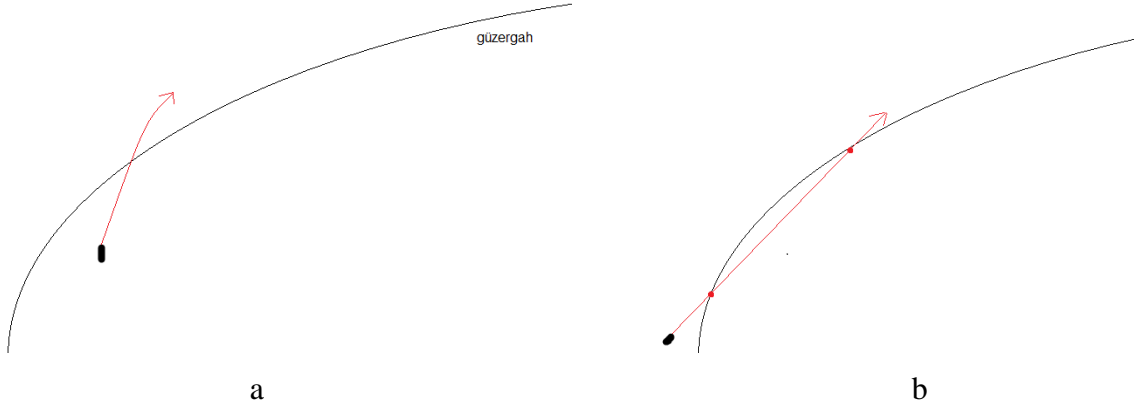
Karşılama füzesinin seyir kontrol sistemi füzeyi atanan hedeflere yönlendirme görevini üstlenmektedir. Hedef koordinata henüz ulaşmadan bir sonraki hedefin atanması, kontrol sistemine seyir düzeltme ve hız kalibrasyonu için daha geniş bir pencere oluşturmaktadır. Bu güncelleme mekanizması aynı zamanda güzergâh tahminlerinde yapılan değişikliklere de adaptasyonu sağlar.

Karşılama füzesi hedef koordinata D_u mesafesinden daha yakınsa karşılama penceresindeki (W) bir sonraki koordinat (p_n) yeni hedef olarak atanır. Balistik füze ile karşılayıcı arasındaki mesafe (d), D_u dan daha kısa olduğu durumda çarpışmayı sağlamak için balistik füzenin konumu (p_b) hedef olarak seçilir.

$$T = \begin{cases} p_n, & D_u < d \\ p_b, & D_u \geq d \end{cases} \quad (5.32)$$

Hedef güncelleme mesafesi (D_u) hedef koordinat ile balistik tehditin koordinatı arasındaki mesafeye oranlı olarak hesaplanmaktadır. Karşılama füzesi ve balistik hedef arasındaki mesafe zamanla kısılacığı için güncelleme mesafesi de buna bağlı olarak dinamik bir şekilde kısalmakta ve daha hassas bir manevra mekanizması sağlamaktadır.

Güncelleme mesafesinin çok kısılması karşılama füzesinin güzergâhtan tekrar dışarı savrulması ve işlem yükünün artması gibi olumsuz etkilere sebep olurken, mesafenin büyük tutulması ise güzergâha girişin ertelenmesi ve kestirme yönelimlerine sebep olabilmektedir (Bkz. Şekil 5.9). Bu sebeple hedef güncelleme mesafesinin en büyük ve en küçük alabileceği değerler belirlenerek değişimi sınırlandırılmaktadır.



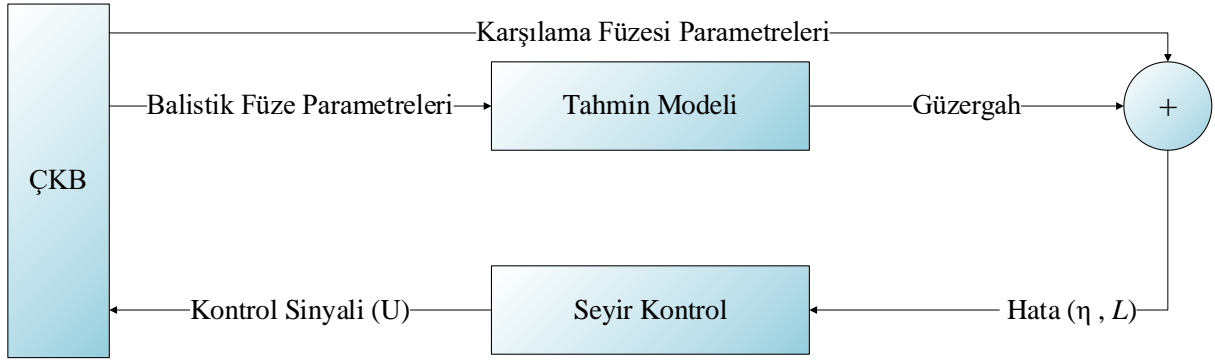
Şekil 5.9. Kısa hedef güncelleme mesafesinin sebep olduğu sapma hareketleri. (a)Savrulma
(b)Kestirme

5.3.2. Karşılama füzesi

Tehdit ajanından farklı olarak karşılama ajanı bir seyir füzesidir ve etkin bir seyir kontrol mekanizmasına sahiptir. Balistik füzenin engellenmesi bu kontrol sisteminin karşılayıcıyı devamlı güncellenen güzergâhın üzerinde ilerleyecek şekilde yönlendirmesi ile sağlanmaktadır. Seyir kontrol sistemi, komuta kontrol tarafından belirlenen hedef koordinatlara ulaşmak gereken ivmeyi hesaplar, bu ivmeyi sağlayacak gücün bileşenlerini hesaplayarak uygular.

Seyir kontrol sistemi

Her döngü sonrası hedef ile mevcut pozisyon arasındaki mesafe (L) ve hareket doğrultusundaki açısal sapma (η) hata geribeslemesi olarak kontrol modeline iletilir. Kontrol modelinin geribesleme döngüsü Şekil 5.10'da verilmiştir.

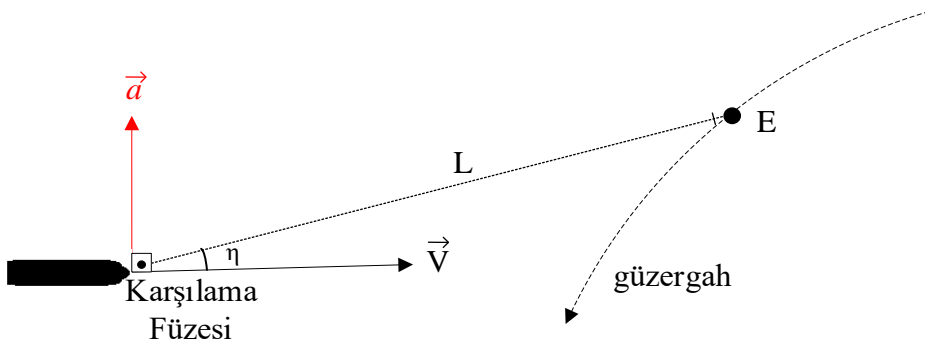


Şekil 5.10. Kuvvet Kontrolörü Modeli

Karşılama füzesi kontrolörü oransal seyir kontrolü kullanmaktadır [108]. Savunma sektöründe yaygın olarak kullanılmakta olan bu kontrol sistemi füzenin hızını ve hedef koordinata olan mesafesini kullanarak karşılama ajanının belirlenen hedefe ulaşmak için uygulaması gereken ivmeyi hesaplar. İvme (a) Eş. 5.33'te verilen bağıntı ile hesaplanır.

$$a = \frac{2V^2 \times \sin\eta}{L} \quad (5.33)$$

Eş. 5.33'te a denge için gerekli lateral ivmeyi, V karşılama füzesinin mevcut hızını, η karşılama füzesinin hedef görüş doğrultusu ile hızı arasındaki açığı, L ise karşılama füzesi ile hedef arasındaki mesafeyi ifade eder (Bkz. Şekil 5.11).



Şekil 5.11. Oransal Seyir Kontrolü ile Hedef Takibi

Şekil 5.11'de görüldüğü üzere ivme yönü mevcut hıza diktir. Bu yüzden uygulanacak kuvvette hıza dik olmalıdır. Bu açının ve η açısının üç boyutlu ortamda hangi yöne göre ele alınacağını belirlemek için savunma füzesinin (V_1), hedefin (V_2) ve balistik tehditin (V_3)

bir arada bulunduğu düzlemden faydalanılmalıdır. Bu üç noktadan geçen düzlem Eş. 5.34'te verilen matrisin determinantından faydalanılarak bulunabilir:

$$\begin{vmatrix} x-x_1 & y-y_1 & z-z_1 \\ x_2-x_1 & y_2-y_1 & z_2-z_1 \\ x_3-x_1 & y_3-y_1 & z_3-z_1 \end{vmatrix} = 0 \quad (5.34)$$

Açılar savunma füzesine uygulanacak kuvvetlere ait olduğu için bu düzlemin savunma füzesi koordinatındaki normalinin etrafında hesaplanmalıdır. Bu normal vektör, hız ve görüş açısı vektörlerinin çarpımıyla bulunabilir.

$$\vec{N} = \vec{V} \times \vec{L} \quad (5.35)$$

Rotasyon işleminden sonra normalizasyon işlemi ile gerekli ivme vektörü elde edilir.

$$\vec{a} = a \cdot \vec{N} \quad (5.36)$$

Füzelerin ve hedefin koordinatları her döngüde değişeceği için hesaplamalar da tekrarlanmalıdır. Kontrolörün hesapladığı lateral ivmeyi sağlamak için gerekli kuvvet (\vec{F}_L) temel newton kanununun 4. bağıntısı ile hesaplanır:

$$\vec{F}_L = m \times \vec{a} \quad (5.37)$$

Füzeler aerodinamik olarak genellikle hareket yönünde konumlanacak şekilde tasarlandığı için lateral ivmeyi sağlayabilecek güçlerin üretimini sağlamak adına savunma füzesinin en yüksek hızı 1.5km/sn civarı olacak şekilde sınırlandırılmıştır. Eğer lateral ivmeyi üretmek için gerekli kuvvet bu sınırın üzerine çıkarsa seyir kontrol sistemi maksimum güç sınırına göre normalize edilmiş komut üretecektir.

$$\vec{U} = \begin{cases} \vec{F}, & |\vec{F}| < F_{\text{mak}} \\ \vec{F} \times \frac{F_{\text{mak}}}{|\vec{F}|}, & |\vec{F}| \geq F_{\text{mak}} \end{cases} \quad (5.38)$$

Güzergâh üzerinde kalma karşılayıcının önceliği olduğu için seyir kontrol sistemi sadece lateral güç (F_L) üretiminden geri kalan gücü (F_a) hızlanmaya ayırmaktadır. Bu güç ile lateral güç birleştiğinde maksimum güce (F_{mak}) ulaşılır.

$$\vec{F}_a = (F_{mak} - |\vec{F}_L|) \frac{\vec{V}}{|\vec{V}|} \quad (5.39)$$

$$\vec{U} = \vec{F}_a + \vec{F}_L \quad (5.40)$$

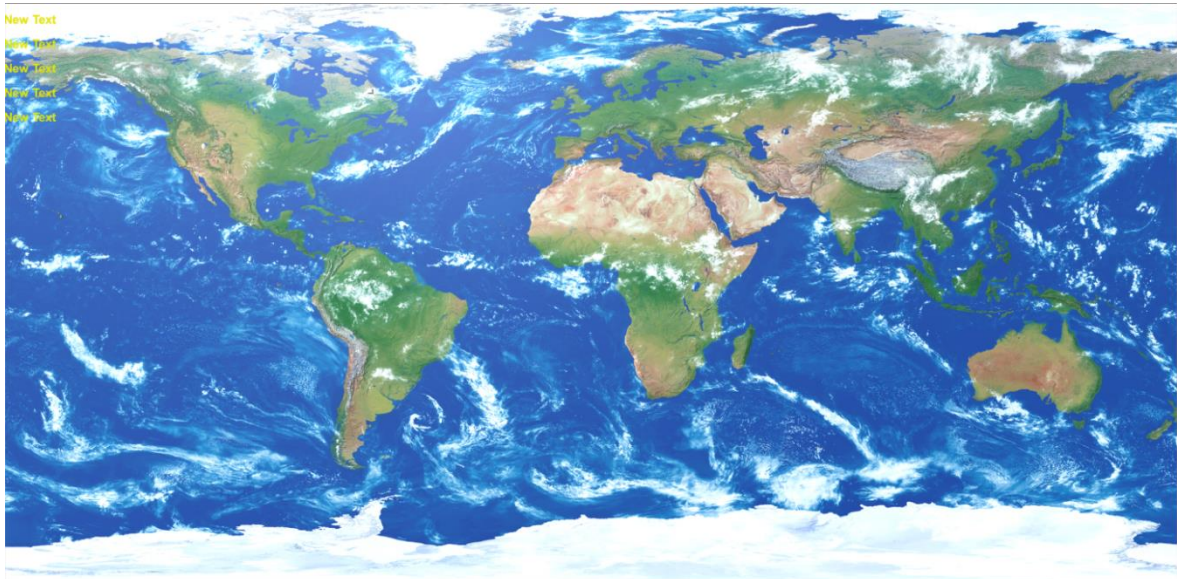
Güç sınırı karşılama füzesinin çevikliğini ve hızını etkileyen önemli bir faktördür. Bu sebeple savunma sisteminin etkinliğini önemli ölçüde etkileme potansiyeline sahiptir. Seyir kontrol modülü kontrol çıkışını hesapladıktan sonra hesaplanan değeri benzetime gönderir. Kontrol çıkış sinyali bir sonraki döngünün geri beslemesinin bir bileşenidir.

6. TEST ORTAMI VE SENARYOLARI

Tasarlanan karşılama modelinin başarımlı modellemesini oluşturmak ve etkinliğini ölçmek adına dinamik bir benzetim ortamı hazırlanmıştır. Modelin farklı koşullardaki etkinliğinin tespit edilmesi için, benzetim ortamında farklı niteliklerde birçok saldırı canlandırılmış, bu saldırılara karşı savunma modelinin davranışları gözlemlenmiştir.

Benzetim UNITY 3D ortamında geliştirilmiştir. Benzetim ortamı, gerçeğe uygun olması için 3 boyutlu uzayda tasarlanmıştır. Saldırı ve savunma koordinatların coğrafi izdüşümleri yönünden fikir vermesi amacıyla benzetimde yer alacak öğeler Şekil 5'te görülen dünya haritası düzlemi üzerinde konumlandırılmıştır. Çalışmanın odak noktası savunma sisteminin başarısıdır, bu sebeple dünyanın küreselliğinden kaynaklı ülkeler arası mesafe ve yön değişimleri göz ardı edilmiştir.

Dünya yüzeyinde yer alan meridyen uzunluklarının yaklaşık 20.004km, ekvatordaki paralel uzunluğunun ise 40.075km olduğu için çalışmada kullanılan coğrafi dünya haritası düzlemi yatayda 40.0750, dikeyde ise 20.0040 birim olacak şekilde düzenlenmiştir (Bkz. Resim 6.1). Yani her birim 100 m'ye karşılık gelir.



Resim 6.1. Benzetim düzleminde kullanılan dünya haritası

Ajanlar eş zamanlı çalışan birbirinden bağımsız iş süreçleri olarak programlanmıştır. ÇKB'nin benzetimdeki durumları yenileme frekansı 50 Hz olarak ayarlanmıştır. Bu, her

ajanın 20 ms'de tek bir iterasyonunu tamamlaması gerektiği anlamına gelir. Benzetim Intel Core i7 2.80 GHz CPU ve GeForce GTX 870M GPU özelliklerine sahip bir bilgisayarda test edilmiş, herhangi bir performans sorunu gözlenmemiştir.

Kullanılan balistik füze modeli Resim 6.2'de görülebilir. Tahmini balistik güzergâhlar görselleştirilerek balistik füzenin mevcut konumunun üzerine iz düşümle yansıtılmaktadır (Bkz. Resim 5.1).



Resim 6.2. Balistik füze modeli

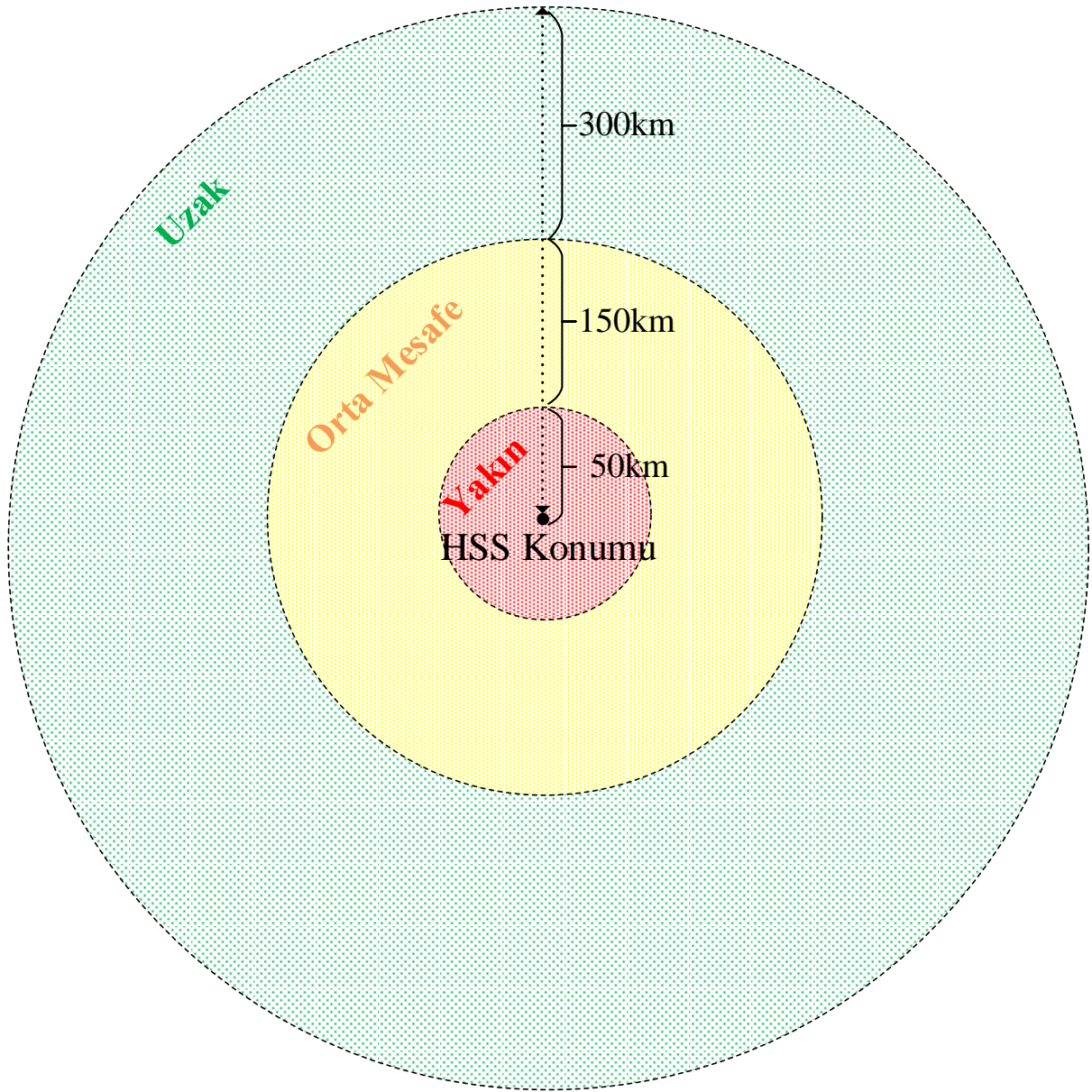
Farklı menziller için farklı ülkelerin cephaneliklerinde aktif olarak kullanılan balistik füzelerin özellikleri kullanılmıştır. Dört füze sınıfı için kullanılan füze özelliklerinin listesi Çizelge 6.1'de verilmiştir [109-112].

Çizelge 6.1. Testlerde kullanılan balistik füze modelleri ve özellikleri

Füze	Sınıf	Orjin	Menzil (km)	Ağırlık (Kg)	Yük Kapasitesi (Kg)	Çaplar (m)		
						İlk Safha	İkinci Safha	Üçüncü Safha
Hwasong-9 [109]	KMBF	Kuzey Kore	1000	6400	500	0.88	-	-
Jericho-2 [110]	OMBF	İsrail	3500	22000	1500	1.35	1.35	-
DF-4 [111]	UMBF	Çin	5500	82000	2200	2.25	2.0	-
RS-12M (Topol) [112]	KABF	Rusya	11000	45100	1000	1.6	1.55	1.34

Modeli test etmek için farklı balistik füze saldırı senaryoları tanımlanmıştır. Testlerde füzeler yere 45° açıyla ve doğrudan HSS konumunu hedef alacak şekilde fırlatılmıştır. Testler, savunma perspektifinden iki önemli faktöre göre sınıflandırılmıştır. Bunlar fırlatma mesafesi ve çarpma noktasının HSS konumuna mesafesidir. Bu mesafe aynı zamanda hedeften sapma payını ifade eder ve testlerde ODH içerisindeki sapma kapsamında yorumlanır.

Test senaryolarında, aynı mesafeden yapılan saldırılar arasındaki ayırt ediciliği arttırmak adına ODH alanı yarıçapı fırlatma parametrelerinin bir miktar değiştirilmesi ile 500 km'ye yükseltilmiştir. Fırlatmalardaki sapma sonucu füzelerin düştüğü noktaların HSS konumuna uzaklığına göre Şekil 6.1'deki gibi 3 grupta sınıflandırılmaktadır.



Şekil 6.1. ODH içerisinde kalan alanın sınıflandırılması

Performans değerlendirmesi için tanımlanan menzil ve sapma mesafesi farklı 33 test senaryosu Çizelge 6.2'de verilmiştir. Karşılama füzesinin özellikleri benzer özelliklere sahip bir savunma sistemi olan THAAD önleyicilerinden alınmıştır [113]. Karşılama füzesinin ağırlığı 900 kg, çapı ise 34 cm'dir.

Çizelge 6.2: Test Senaryoları

Test	Füze Sınıfı	Saldırı Mesafesi (km)	ODH Bölgesi
1	KMBF	1000	Yakın (<50 km)
2	KMBF	1000	Orta Mesafe (>50km ve <200 km)
3	KMBF	1000	Uzak (>200km ve <500 km)
4	OMBF	2000	Yakın (<50 km)
5	OMBF	2000	Orta Mesafe (>50km ve <200 km)
6	OMBF	2000	Uzak (>200km ve <500 km)
7	UMBF	3000	Yakın (<50 km)
8	UMBF	3000	Orta Mesafe (>50km ve <200 km)
9	UMBF	3000	Uzak (>200km ve <500 km)
10	UMBF	4000	Yakın (<50 km)
11	UMBF	4000	Orta Mesafe (>50km ve <200 km)
12	UMBF	4000	Uzak (>200km ve <500 km)
13	UMBF	5000	Yakın (<50 km)
14	UMBF	5000	Orta Mesafe (>50km ve <200 km)
15	UMBF	5000	Uzak (>200km ve <500 km)
16	KABF	6000	Yakın (<50 km)
17	KABF	6000	Orta Mesafe (>50km ve <200 km)
18	KABF	6000	Uzak (>200km ve <500 km)
19	KABF	7000	Yakın (<50 km)
20	KABF	7000	Orta Mesafe (>50km ve <200 km)
21	KABF	7000	Uzak (>200km ve <500 km)
22	KABF	8000	Yakın (<50 km)
23	KABF	8000	Orta Mesafe (>50km ve <200 km)
24	KABF	8000	Uzak (>200km ve <500 km)
25	KABF	9000	Yakın (<50 km)
26	KABF	9000	Orta Mesafe (>50km ve <200 km)
27	KABF	9000	Uzak (>200km ve <500 km)
28	KABF	10000	Yakın (<50 km)
29	KABF	10000	Orta Mesafe (>50km ve <200 km)
30	KABF	10000	Uzak (>200km ve <500 km)
31	KABF	11000	Yakın (<50 km)
32	KABF	11000	Orta Mesafe (>50km ve <200 km)
33	KABF	11000	Uzak (>200km ve <500 km)

Gerçek uygulamalarda genellikle önleyicilerin lehine olmasına rağmen, balistik füzenin ve karşılama füzesinin motor gücü çıktıları, her biri için 3kgF/kg olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu tasarım seçimi, karşılama füzesinin arasındaki hız dezavantajını genişletmek için yapılmıştır. Karşılama füzesinin, uçuş için yeterli yakıtı sahip olduğu varsayılmış; yakıt tüketim mekanizması tanımlanmamıştır.

7. BULGULAR VE TARTIŞMA

Hedef güncelleme mesafesi ve itici motor gücü savunma modelinin verimliliğini büyük ölçüde etkiler, dolayısıyla bu faktörler testlerden önce kapsamlı bir şekilde analiz edilerek kalibrasyona tabi tutulmuştur. Kalibrasyonlarla etkinliği artırılan modelin testlerdeki başarısı gözlemlenmiştir.

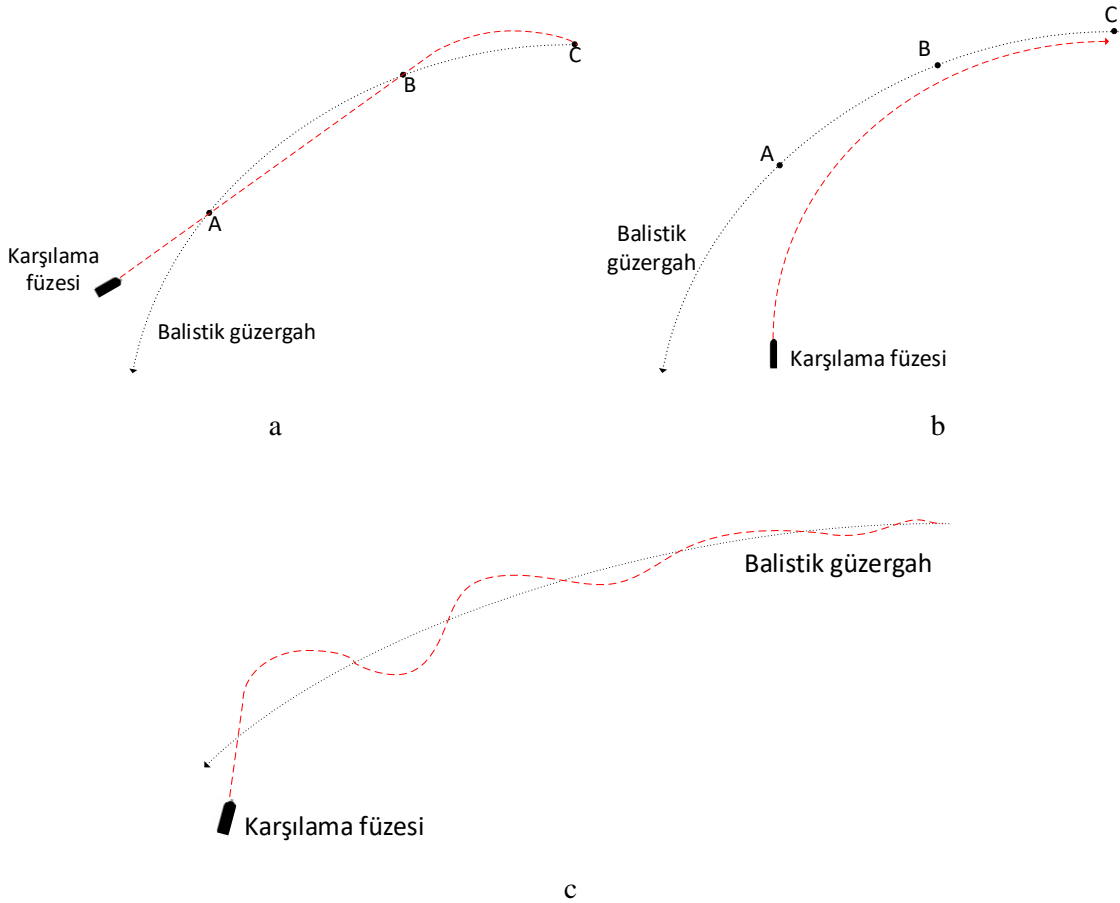
7.1. Hedef Güncelleme Mesafesinin Etkisi ve Kalibrasyonu

Hedef güncelleme yakınlık mesafesinin (D_u) belirlenmesi, başarılı bir müdahale için çok önemli bir adımdır. Hedefler, seyir kontrol sistemi için balistik füze güzergahına oryantasyon sürecindeki hata geri bildirimleri için referans değerler olarak kullanılırlar. Hedefler birbirinden uzağa yerleştirildiğinde, karşılama füzesi yörüngeden kayabilir, öte yandan sık hedef yerleştirme kontrol girdilerinin sık sık değişmesine sebep olur. Bu durum daha hassas ve kontrollü bir uçuş sağlasa da, genellikle karşılayıcının hızlanma sağlayamaması nedeniyle yavaş bir uçuş ile sonuçlanır. D_u uzun bir mesafe olarak belirlenirse karşılama füzesi;

- kestirme hareketi ile güzergâhtan çıkabilir (Bkz. Şekil 7.1(a)),
- güzergâhtan dışarı savrulabilir (Bkz. Şekil 7.1 (a)),
- veya güzergâha geç yakınsayarak oryantasyonu geciktirebilir (Bkz. Şekil 7.1 (b)).

Öte yandan D_u mesafesinin kısa belirlenmesi geç hedef güncellenmesi sebebiyle güzergâha giriş aşamasında salınım hareketine sebep olur (Bkz. Şekil 7.1 (c)). Salınım hareketi genellikle sönümlenme eğilimlidir yani, salınım neticesinde oluşan sapmaların büyüklüğü zamanla azalır ve salınım tamamen yok olabilir. Dolayısıyla başarılı bir güzergâh takip hareketinin başlarında belirli bir ölçüde salınım göz ardı edilebilir. Ancak uzun süren salınımlar karşılama füzesinin atanan hedeflerden bazılarını hatta balistik füzeyi ıskalmasına sebep olabilir. Bu sebeple yukarıda belirtilen sapmalar güzergâh takibinin ilk aşamalarında sonlanmalı ve dengeli takip başlamalıdır. Dengeli takip, karşılama füzesinin seyir kontrol sisteminin füzeyi tamamen balistik güzergâhın üzerinde tutmayı başardığı durumdur. Dengeli takip durumunda kontrol sistemi sadece güzergâhtan sapmaları engellemeye yönelik düzeltme ve güncellenen güzergâha uyum komutları üretir. Dengeli takibi sağlamak, özellikle karşılama füzesi ve balistik tehdit arasındaki mesafe kapandıkça

daha çok önem kazanır. Dengeli takip durumuna geçişi tamamlamış olan karşılama füzesi seyirinin çoğunluğunu balistik güzergâh üzerinde geçirmekte, bu da balistik tehdidi karşılama şansını arttırmaktadır. Dengeli takibe geçişi tamamlamış olmak her ne kadar karşılama başarısını yükseltse de tehdidin başarılı şekilde imha edilmesini garantilemez. Çünkü dengeli takip esnasında da güzergâhtaki güncellemeler dolaylı olarak karşılama füzesinin kısa süreli de olsa planlanan seyir dışında kalmasına sebep olabilir. Ancak, dengeli takibin sağlanması etkili bir karşılama planının ön koşuludur.



Şekil 7.1. Hedef güncelleme yakınlık mesafesine bağlı uçuş davranışları. (a) Kestirme ve sarkma, (b) Geç oryantasyon, (c) Salınım

Etkin bir D_u değeri belirlemek için farklı uzaklıklardan yapılan saldırılardaki güzergâh takip performansları gözlemlenmelidir. Güzergâh takibinin verimini ölçmek için takip edilecek güzergâha olan dik uzaklığı gözlemlenmelidir. Belirlenen üç D_u değerinin farklı

saldırıları karşısında güzergâh takip performanslarına ilişkin gözlem sonuçları Şekil 7.2’de sunulmuştur.



Şekil 7.2. D_u mesafesinin 100km, 200km ve 500km olduğu karşılama modellerinin farklı saldırı senaryolarındaki güzergâh takip performansları

D_u 500 km olarak ayarlandığında, özellikle kısa mesafe saldırı senaryolarında karşılama füzesinin kestirme davranışı sergilediği gözlemlenmiştir (Test-1 ve Test-4). Uzun menzilli saldırı senaryolarında karşılama füzesi güzergâha vardığında hızı yüksek olduğu için savrulma gerçekleşir (Test-13 ve Test-31).

D_u mesafesinin 200 km olarak ayarlanması sonucunda geç oryantasyon gözlemlenmiştir. Kısa mesafe saldırı senaryolarında geç oryantasyon oluşması sebebiyle karşılayıcı balistik yörüngeye girememiştir (Test-1). Diğer testlerde ise balistik güzergâha ulaşan karşılayıcının savrulma hareketi yaptığı gözlemlenmektedir. Test sonuçlarından görüldüğü üzere 200km ve üzerindeki D_u değerler karşılama başarısı yönünden uygunsuzdur.

D_u mesafesinin 100 km olması uzak mesafe balistik saldırılarda dengeli takibe başlayarak etkili sayılabilecek bir karşılama penceresi oluşturmaktadır (Test-13 ve Test-31). Ancak, testlerde görüldüğü gibi bu modelin kısa mesafe saldırılarda etkinliği düşmektedir. Kısa mesafe saldırı senaryolarında oluşan sapmalar seçilen değerin (100 km) kısa mesafe saldırılar için uzun olduğunu göstermektedir. Öte yandan karşılayıcının uzun mesafe saldırılarda uzun bir müddet salınım hareketi yaptığı, bunun grafiklere etkisinin kalınlaşma ve çarpıklaşma şeklinde yansıdığı görülmektedir. Bu durum seçilen değerin uzun mesafe saldırılar için kısa kalmasının sonuçlarından biridir. Yapılan testler sabit bir D_u değerinin farklı senaryolarda aynı anda etkili olamayacağını göstermektedir. Bu sebeple etkili bir model oluşturmak için D_u mesafesi seyir esnasında dinamik olarak güncellenmelidir.

Sabit D_u değerleri ile yapılan testlerde görüldüğü üzere D_u değerinin karşılama füzesi ve tehdit arasındaki mesafeyle doğru orantılı olarak değişmesi gerekmektedir. Güzergâh takibi sırasında yapılacak manevralarda verimi arttırabilmek adına D_u değeri balistik füze ve karşılama füzesi arasındaki mesafeye oranlı olarak değişecek şekilde ayarlanmıştır. Bu sayede karşılama füzesi hedefe yaklaştıkça güncelleme mesafesi kısılacak, karşılama füzesinin dengeli takibe girmesi ve karşılama penceresinde seyir etmesi sırasında hem çevikliği hem de hassasiyeti artacaktır. D_u değeri için kullanılan oransal bağıntı Eş. 7.1’de verilmiştir.

$$D_u = \frac{d}{p} + (\vec{V}_b + \vec{V}_t)\Delta t \quad (7.1)$$

Yukarıdaki denklemde d balistik füze ve karşılama füzesi arasındaki mesafeyi, p ise güzergâh oranını temsil etmektedir. \vec{V}_b ve \vec{V}_t ise sırasıyla balistik füze ve karşılama füzesinin hızlarını ifade eder. Hızların denkleme dahil edilmesinin temel sebebi güncelleme mesafesinin (D_u) bir zaman adımıda iki füzenin birbirine karşı bağıl hız değerinden küçük olmasının ve bu yüzden tam karşılama öncesi atanan hedefin balistik füzenin gerisinde bir koordinata denk gelmesinin engellenmesidir.

Bu modelde güzergâh oranı (p), D_u değeri için kalibrasyon parametresi fonksiyonu görmektedir. p değeri yükseldikçe iki füze arasındaki mesafenin daha küçük bir bölümü D_u için ölçek olarak kullanılacaktır. Oransal D_u değeri kullanan model için yapılan test sonuçları Şekil 7.3’te görülmektedir.



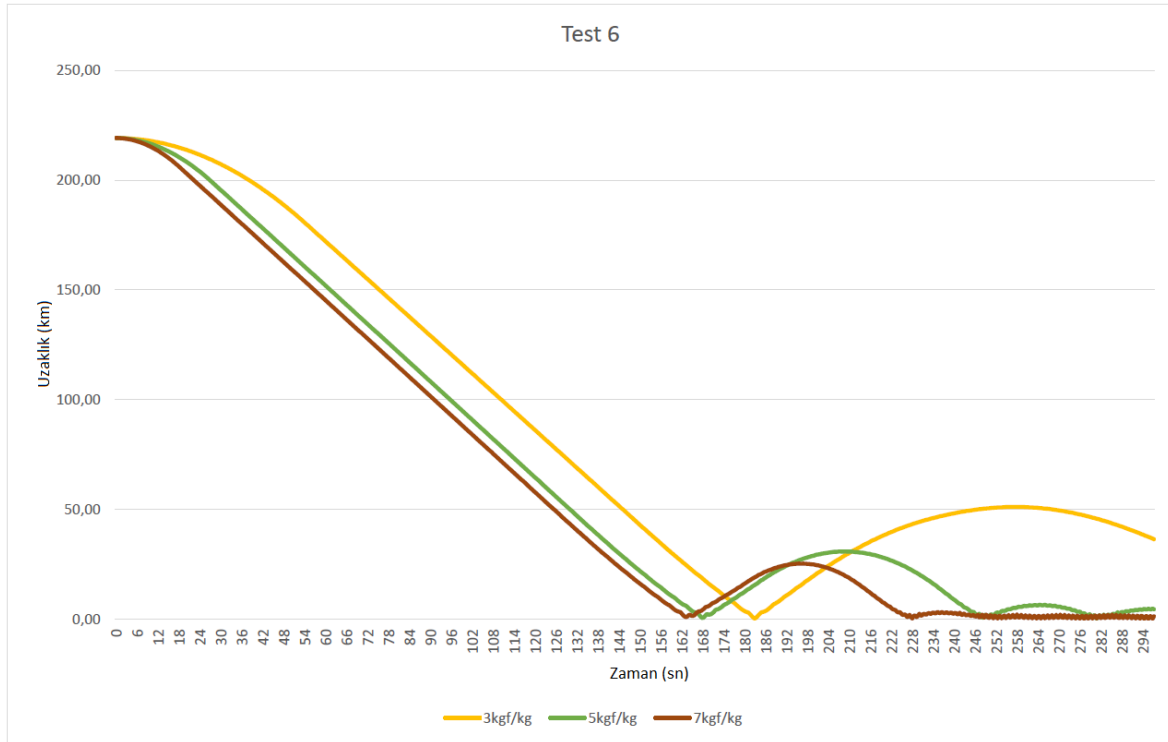
Şekil 7.3. Oransal D_u modelinde $p=10$, $p=20$ ve $p=50$ değerleri için test sonuçları

D_u değeri oransal belirlendiği için kısa mesafe saldırı senaryolarında D_u değerleri zamanla birbirine yakınsayan küçük değerler olarak atanmaktadır. Bu yaklaşım sonucunda farklı testlerde benzer dengeli takip performansları elde edilmiştir (Test-1). Saldırı menzili uzadıkça D_u başlangıç değerleri arasındaki fark kendini göstermeye başlamaktadır. Bu durumlar için genel olarak büyük p değerinin ($p=50$) dengeli takibe daha erken geçtiği gözlemlenmiştir dolayısıyla daha iyi performans gösterdiği söylenebilir (Test 4, 13 ve 31). Farklı saldırı senaryolarında başarılı olan D_u modeli $p=50$ olarak belirlenerek kalibrasyon adımı tamamlanmıştır.

7.2. İtiş Motoru Güç Sınırının Etkisi

İtiş motorunun maksimum kuvvet çıkış kapasitesi, füzenin maksimum hızı, ivmesi ve manevra yetenekleri ile doğrudan ilişkilidir. Testlerde saldırı ve savunma unsurları arasında ivme yönünden denklik sağlanması amacıyla hem balistik füzenin hem de karşılama

füzelerin itiş gücü, kütleyle oranla eşit tutulmuş, 3kgf/kg olarak belirlenmiştir. İtiş gücünün karşılama füzelerinin hareket kabiliyetine etkisini incelemek adına farklı motor güçlerinde karşılayıcının seyri incelenmiştir. Maksimum motor gücü 3kgf/kg, 5kgf/kg ve 7kgf/kg olarak ayarlandığı durumlarda füzenin balistik yörüngeye giriş performansı Şekil 7.4'te verilmiştir.



Şekil 7.4. Farklı itici güç çıkışlarına göre güzergâha olan uzaklığın değişimi

Maksimum güç değerinin etkisi özellikle keskin uçuş manevraları gerektiren durumlarda daha belirginleşmektedir. Şekil 7.4'te de görüldüğü üzere motor gücü arttıkça füzenin balistik yörüngeye giriş ve dengeli takibe geçiş süreleri kısaltılmakta, dolayısıyla genel güzergâh takip başarısı artmaktadır. Örneğin motor gücü sınırı test senaryolarında varsayılan değer olan 3kgf/kg olarak belirlendiğinde karşılama füzesi balistik tehdidi büyük bir farkla ıskalamaktadır. Bu fark 5kgf/kg için çok daha azalmaktadır. Gücün 7kgf/kg olarak belirlendiği durumda ise hedef başarıyla imha edilmektedir. Yapılan testlerde kuvvetle paralel olarak artan ivmelenmenin etkisi füzenin balistik güzergâhla ilk kesişme süresinde belirgin olarak görülebilir. Bu kesişme sonrasında oluşan savrulmanın boyutu da kuvvetteki artışla ters orantılı olarak azalmaktadır, çünkü kuvvet arttıkça seyir kontrol sistemi yörüngeden sapmaları daha hızlı ve etkili bir şekilde elimine edebilmektedir.

7.3. Performans ve Etkinlik Ölçümü

Tasarlanan benzetim ortamında HSS modelinin balistik füzelere karşı performansı test edilmiştir. Çizelge-6.2’de yer alan saldırı senaryolarının her biri 100 defa tekrarlanarak saldırı sırasında savunma modelinin davranışları ve imha başarısı gözlemlenmiştir. Testlere ilişkin yapılan gözlemlerde saldırı karakteristiğini ve savunma etkinliğini belirleyen ölçütler kayıt altına alınmış, 100 saldırıdan imha edilenlerin sayısı savunma sisteminin saldırıyı karşılama oranı olarak değerlendirmeye alınmıştır. Testlere ilişkin kayıt altına alınan diğer değerler balistik füzenin apojesi (A), ortalama imha irtifası (H), imha konumunun savunma noktasına uzaklığının izdüşümü (D), balistik füzenin çarpışma öncesi son kaydedilen hızı (V) ve son olarak balistik füzenin uçuş süresi. Eğer bir senaryoda hiç başarılı imha gerçekleşmediyse V ve T değerleri sırasıyla hedefe çarpma hızı ve toplam uçuş süresi olarak kaydedilmiştir. Test sonuçları Çizelge 7.1’de yer almaktadır.

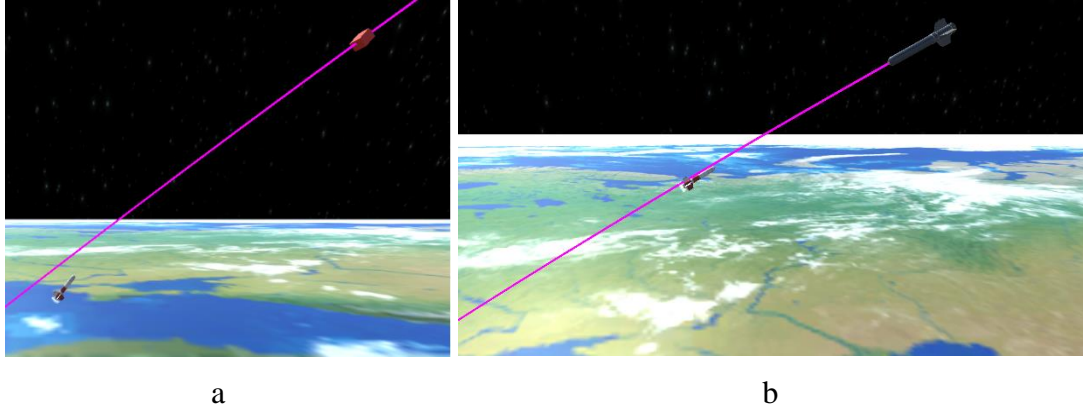
Çizelge 7.1. Test Sonuçları

Test No	A (km)	H (km)	D (km)	V (km/s)	T (dk)	Karşılama Oranı (%)
1	163	123.59	267.59	2.15	5.84	58
2	189	133.16	261.4	2.48	7.82	11
3	248	-	-	3.04	9.10	0
4	343	240.08	413.6	3.17	8.73	78
5	373	313.86	439.1	3.19	8.40	44
6	413	318.54	432.7	3.83	11.71	17
7	515	320.46	544.4	3.93	10.99	81
8	542	386.66	535.3	3.95	10.84	72
9	589	322.34	501.2	4.57	11.98	37
10	690	399.23	648	4.56	12.92	89
11	711	625.38	1156.3	4.35	11.20	82
12	764	554.81	555.7	4.68	12.78	61
13	862	517.54	860.1	5.10	14.32	94
14	885	556.82	806.2	5.14	14.34	84
15	938	724.66	905.45	5.13	13.80	77
16	1032	508.15	810.1	5.70	16.27	97
17	1058	607.71	861.65	5.68	16.01	89
18	1102	822.33	1109.45	5.58	15.16	82
19	1204	561.71	886.4	6.19	17.72	95
20	1232	663.6	924.9	6.18	17.50	92
21	1279	984.21	1408.5	5.99	16.14	88
22	1377	615.42	955.5	6.65	19.07	96
23	1401	696.6	972.4	6.64	18.92	89
24	1455	970.9	1247.01	6.54	18.09	83
25	1547	656.02	1024.34	7.08	20.35	91
26	1569	723.8	1022.54	7.07	20.26	87
27	1626	1031.99	1329.05	6.95	19.38	82
28	1720	707.68	1091.90	7.48	21.55	89
29	1739	760.39	1076.3	7.48	21.49	86
30	1789	994.66	1244.9	7.42	22.90	87
31	1891	744.54	1146.85	7.86	22.70	85
32	1908	792.26	1132.01	7.87	22.64	80
33	1961	873.21	1247.9	7.94	22.54	81

Testlerde gerçekleşen tüm karşılaşmalar balistik füzenin alçalma safhalarında meydana gelmiştir. Kısa mesafe saldırılar incelendiğinde saldırı ve savunma konumlarının uzaklığının savunma başarısına etkisi gözlemlenebilmektedir (Test 1 ve 3). HSS konumunun yakınına düşmekte olan balistik füzelerin tahmin edilen güzergâhı da doğal olarak HSS konumuna yakın bir koordinatta sonlanmaktadır. Bu durumda oluşturulan karşılaşma planında çoğunlukla yörüngeye giriş noktası diğer senaryolara göre HSS konumuna daha yakın bir koordinat olarak belirlenmektedir. Bunun sonucunda karşılaşma füzesi yörüngeye daha erken ulaşmakta ve yörüngeye ulaştığında henüz yüksek hızlara ulaşmadığı için büyük savrulmalara maruz kalmamaktadır. Dolayısıyla bu senaryolarda karşılaşma füzesi dengeli takibe geçebilmektedir. Testlerde gözlemlenen bu davranış, karşılaşma başarı oranlarına da yansımaktadır. Aynı sınıftaki balistik füzelere ait senaryoların başarı oranları karşılaştırıldığında (örneğin test 1-3, 4-6 ve 7-9) balistik füzenin düşeceği koordinat ile HSS konumu arasındaki mesafe arttıkça karşılaşma oranlarının düştüğü gözlemlenmektedir.

Balistik füzenin düştüğü ODH bölgesinin karşılaşma başarısı üzerindeki etkisi saldırı menzili arttıkça azalmaktadır (Test 28-30). Bu durum doğrudan saldırının aldığı süreden kaynaklanmaktadır. Uzun menzilli saldırıların hedefe ulaşacağı süre, karşılaşma füzesinin seyir kontrol sisteminin, ODH kaynaklı dezavantajlı durumu ortadan kaldırmasına ve balistik yörüngeye yakınsayarak dengeli takibe geçişi sağlamasına yetecek uzunluktadır.

Saldırı mesafesinin uzaması HSS sisteminin karşılaşma planını icra etmesi için tanınan süreyi uzatması sebebiyle karşılaşma başarısına olumlu etki göstermiştir (Test 1-22). Ancak saldırı mesafesinin artması sonucunda balistik füzeler atmosfer dışına çıkmaya ve alçalma safhasında daha yüksek hızlara ulaşmaya başlamaktadır. KABF saldırı senaryolarının başarı oranları karşılaştırıldığında, balistik füzenin alçalma safhasında ulaştığı yüksek hızların HSS başarısındaki olumsuz etkisi gözlemlenebilmektedir (Test 22 - 31).



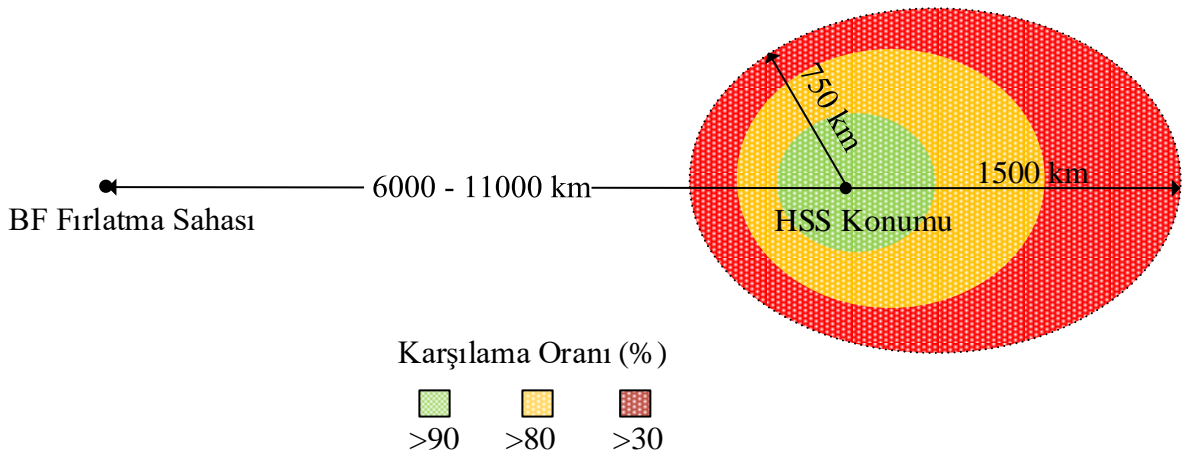
Resim 7.1. Yörüngeye girme (a), ve tehdidin karşılanması (b). Kırmızı kutu yörüngeye giriş noktasını gösterir.

Saldırıların hızı ve menzili, ona karşı yapılacak savunma açısından önem arz etmektedir. Dolayısıyla, etkili bir savunma sistemi beklenen saldırıların karakteristiğine göre tasarlanmalıdır. Test sonuçlarından da görüldüğü üzere sunduğumuz HSS modeli uzun menzilli saldırılara karşı etkili performans göstermektedir. Bu hedefe ulaşmak için sistem tehdidin güzergâhını kullanarak tehdidi kafa kafaya karşılayarak imha etme yaklaşımını kullanmaktadır. Bu yaklaşımın uygulamaya konması için ele alınan karşılama senaryosunda gerekli manevraları gerçekleştirecek zamanın olması gerekmektedir. Kısa mesafeli balistik saldırılar yüksek hızlara ulaşmamakta ama hedeflerine çok daha kısa sürede varmaktadırlar. Bu yüzden bu saldırılara karşı söz konusu yaklaşımın uygulanmaya çalışması başarısızlıkla sonuçlanabilmektedir. Bu olumsuz duruma rağmen model kısa menzilli saldırılara karşı (özellikle balistik füzenin yakın ODH bölgesine düştüğü testlerde) kayda değer bir başarı göstermiştir. Karşılama modelinin balistik füze sınıflarına karşı genel başarı oranları Çizelge 7.2’de verilmiştir.

Çizelge 7.2. Füze sınıflarına göre karşılama oranları

Füze Sınıfı	Karşılama Oranı %
KMBF (1000km)	23
OMBF (1000km-3000km)	54.83
UMBF (3000-5500km)	81.16
KABF (6000km-11000km)	88.27

Balistik füzenin uçuş süresinin uzamasının HSS davranışına başka bir etkisi de savunulan alanın büyümesidir. Uzun menzilli saldırılara karşı HSS daha geniş bir hava sahasına ulaşarak karşılama yapabilmektedir. Bu durum doğal olarak HSS'nin savunma sahasını genişletmektedir. Ancak savunma sahası tüm eksenlerde aynı oranda genişlememektedir. Saha bir daireden ziyade elips şeklini almaktadır çünkü HSS savunma hattının arkasında kalan bölgeye daha derinlemesine koruma sağlayabilmektedir (Bkz. Şekil 7.5).



Şekil 7.5. KABF saldırılarına karşı oluşan savunma sahası

7.4. Geleneksel Karşılama Yaklaşımları İle Karşılaştırma

Sunulan modelin karşılama yaklaşımı, iki geleneksel yaklaşımla birlikte test edilmiş ve yöntemin etkinliğini gözlemlemek amacıyla sonuçlar karşılaştırılmıştır. Geleneksel karşılama yaklaşımlarından ilki olan yalın takip, hedefi doğrudan takip eden bir engelleme yaklaşımıdır ve bu durumda oransal navigasyon olarak tanımlanan yönlendirme modelini kullanır. Bu yöntem basitliği ve etkinliği sebebiyle güdümlü füzelerde yaygın kullanılan bir yaklaşımdır. ABD menşeli AIM-9 Sidewinder ve Rus yapımı Soviet K-13 (AA-2 'Atoll') füzeleri bu güdüm metodunu kullanan sistemlere örnek gösterilebilir [114, 115]. Karşılaştırmada referans olarak kullanılan ikinci yaklaşım ise yalın çarpışma yaklaşımıdır. Yalın çarpışma yaklaşımında uçuş güzergâhı, bir engelleyicinin hedefle çarpışmak için uçtuğu doğrusal çizgidir [108]. Ateşleme yapılacak güzergâhın belirlenmesi basit bir MTK kullanmaktadır. Bu metot ABD yapımı C-RAM ve Alman üretimi MANTIS gibi son teknoloji karşılama barajı sistemlerinde etkin bir şekilde kullanılmaktadır [116, 117]. Karşılaştırılan üç engelleme modeli, Tablo 3'te tanımlanan senaryolar için 10 defa test edilmiştir. Bu testler sırasında, engelleme koordinatının ve savunma noktasına mesafesi (D)

ölçülmüştür. 10 testteki engelleme sayısı, engelleme oranı olarak yorumlanmıştır. Karşılaştırma sonuçları Çizelge 7.3'te verilmiştir.

Çizelge 7.3. Geleneksel güdüm yaklaşımlarıyla karşılaştırma

Test	Yalın Takip		Yalın Çarpışma		Güzergâh Geri İzleme	
	D (km)	Karşılama Oranı (%)	D (km)	Karşılama Oranı (%)	D (km)	Karşılama Oranı (%)
1	271.43	80	312.90	40	267.59	50
2	280.70	90	304.09	50	261.40	10
3	266.9	90	316.55	50	-	0
4	442.61	70	524.80	40	413.62	70
5	440.21	80	530.61	30	439.10	40
6	445.90	80	529.0	40	432.75	10
7	565.22	70	609.19	30	544.40	80
8	555.13	60	622.45	20	535.37	70
9	542.05	70	598.83	40	501.28	30
10	658.62	50	802.74	20	648.00	80
11	706.30	60	812.50	30	663.40	80
12	625.25	70	786.75	20	555.72	60
13	902.44	30	1002.26	10	860.15	90
14	871.36	30	1011.13	20	806.29	80
15	945.70	40	1058.65	10	905.45	70
16	802.04	10	-	0	810.14	90
17	910.54	20	1183.41	20	861.65	80
18	977.18	10	1412.88	10	1109.45	80
19	906.23	20	1506.02	10	886.44	90
20	-	0	1488.15	20	924.98	90
21	1295.52	10	1718.00	10	1408.52	80
22	1301.11	10	1689.23	0	955.50	90
23	1226.42	10	1705.13	10	972.46	80
24	-	0	-	0	1247.01	80
25	-	0	-	0	1024.34	90
26	-	0	2102.71	10	1022.54	80
27	-	0	-	0	1329.05	80
28	-	0	-	0	1091.90	80
29	-	0	-	0	1076.33	70
30	-	0	-	0	1244.90	80
31	-	0	-	0	1146.85	80
32	-	0	-	0	1132.01	70
33	-	0	-	0	1247.94	70

Sonuçlar, yalın takip yaklaşımının diğer yöntemlere karşı özellikle kısa menzilli balistik füzeler karşısında daha iyi performans gösterdiğini göstermektedir. Ancak yalın takip yaklaşımının engelleme oranının, saldırı menzili arttıkça azaldığı gözlemlenmektedir. Saldırı menzili arttıkça balistik füze alçalma safhasında yüksek hızlara ulaştığından, karşılama füzesinin hız avantajı azalır. Bu saldırı ve savunma dinamiklerindeki değişiklik, yaklaşımın başarısında belirgin bir azalmaya neden olmaktadır. Sonuçlar, yalın takip yaklaşımının engelleyicinin hız üstünlüğüne dayandığını desteklemektedir. Zaten bu güdüm modeli genellikle kısa menzilli savunma sistemlerinde kullanılmaktadır.

Yalın çarpışma engelleme yaklaşımı tek bir tahmine dayanır ve ateşleme sonrasında seyir düzeltme mekanizmaları içermez. Test modelinde, çevresel etkiler ve ölçüm gürültüsü tahminlerin hata payını artıran önemli faktörlerdir. Bu nedenle, bu yöntemin testlerdeki performansı genellikle diğer yöntemlerden daha düşüktür. Öte yandan, karşılayıcı doğrusal bir güzergâh izlediği için başarılı karşılama senaryolarında, tehdidin diğer yaklaşımlardan daha önce ve daha uzak mesafede imha edilmesine olanak sağlar. Yalın çarpışma yaklaşımını kullanan savunma sistemleri genellikle yayılım veya baraj ateşlemesi prensibi ile çalışır ve birçok karşılayıcı unsuru ardı ardına ateşler, böylece savunma modeli daha geniş bir olasılık havuzunu kapsayarak yaklaşımın tahminlerindeki hata payının ve hedefin manevralarının sistemin başarı oranını düşürmesinin önüne geçilmesini sağlar.

Sonuçlar, yalın takip ve yalın çarpışma engelleme yöntemlerinin saldırıların ODH yarıçapından etkilenmediğini göstermektedir. Savunma sisteminin iniş noktası ile konumu arasındaki mesafenin güzergâh geri izleme yöntemi üzerindeki etkisi KMBF fırlatmalarına karşı yapılan testlerde (Testler 1-3) açıkça görülmektedir. Balistik füze, savunma sisteminin yakınına fırlatıldığında, balistik füzenin tahmin edilen rotası, karşılama füzesinin fırlatılacağı konuma yakın bir noktada sonlanır ve bu durumda karşılama füzesi güzergâha daha erken girebilir. Aynı balistik füze sınıfının fırlatmalarının (örneğin test çiftleri 1-3, 4-6, 7-9) yakalama oranlarının karşılaştırıldığında, balistik füzenin isabet edeceği nokta HSS konumuna uzaklaştıkça karşılama füzesinin isabet oranının azaldığı görülmektedir. Bu olumsuz durum, balistik füze menzili arttıkça azalır, çünkü uzun menzilli saldırılar, karşılama füzesinin güzergâha başarılı bir şekilde girmesi ve güzergâh takibine başlayabilmesi için genellikle yeterli zamanı sağlamaktadır (örneğin Testler 28-30). Bunun sonucunda uzun menzilli saldırılara karşı, güzergâh geri izleme yönteminin isabet oranının artması beklenebilir. Ancak saldırı mesafesi arttıkça aynı zamanda balistik füzenin iniş

safhasında ulaştığı hız da artar. Bu yüzden karşılama füzelerinin güzergâhtan anlık ve küçük bir sapması bile isabetsizliğe neden olmasına sebep olmaktadır. Bu durum uzun menzilli saldırılarda belirli bir menzilden sonra karşılama başarısının düşüşe geçmesiyle sonuçlanmaktadır (Testler 30-33).

7.5. Endüstride Mevcut Sistemlerle Karşılaştırma

Yetenekleri, özellikleri ve başarı oranı yönünden geliştirilen HSS modelinin, farklı ülkeler tarafından üretilerek cephaneye alınmış veya henüz test aşamasında olan balistik füze savunma sistemleri ile karşılaştırması Çizelge 7.4'te verilmiştir. Sunulan sistemin yetenekleri tasarım amacı ile örtüşmekte, özellikleri ise endüstride mevcut olan GMD (Ground-based Midcourse Defense), S-500, ve Arrow-3 gibi UMBF savunma sistemlerinin özellikleri ile örtüşmektedir. Sunulan model öncelikli olarak stratejik savunma katmanında görev almaya uygundur, ancak tiyatral katmanda savunma desteği sağlama kabiliyetine de sahiptir.

Çizelge 7.4. Endüstrideki son teknoloji savunma sistemleri ile karşılaştırma

Sistem	Orijin	Savunma Kabiliyeti					Menzil (km)	Karşılama Hızı (km/s)	Karşılama Oranı (%)	Test Sayısı
		KMBF	OMBF	UMBF	KABF	KMBF				
Demir Kubbe [118, 119]	İsrail	Evet	Hayır	Hayır	Hayır	40	0.7	90.1	805 ¹	
MEADS [120]	Almanya, ABD, İtalya	Evet	Evet	Hayır	Hayır	70	1.4	100	3	
Patriot AC-3 [121,122]	ABD	Evet	Evet	Hayır	Hayır	70	1.4	66.6	6	
Arrow-2 [123, 124]	İsrail	Evet	Evet	Hayır	Hayır	90	3.0	90	10	
NASAMS [125]	Norveç, ABD	Evet	Evet	Hayır	Hayır	180	1.36	90.1	2181	
THAAD [113, 126]	ABD	Evet	Evet	Evet	Hayır	200	2.8	100	16	
S-400 [127]	Rusya	Evet	Evet	Hayır	Hayır	250	4.8	80	Bilinmiyor	
Davud Saparı [128]	İsrail	Evet	Evet	Hayır	Hayır	300	2.55	Bilinmiyor	Bilinmiyor	
Aegis HSS [126, 129]	ABD	Hayır	Evet	Evet	Hayır	370	3.5	81.63	49	
SAMP/T [130, 131]	Fransa, İtalya	Evet	Evet	Hayır	Hayır	600	1.4	100	13	
S-500 ² [132]	Rusya	Hayır	Hayır	Evet	Evet	600	7	-	-	
Arrow-3 [124, 133]	İsrail	Hayır	Evet	Evet ³	Evet ³	2400	3	100	1	
GMD ² [126, 134-137]	ABD	Hayır	Hayır	Evet	Evet	Bilinmiyor	6.66	55	20	
Çok Ajanlı HSS ⁴	-	Hayır ⁵	Hayır ⁵	Evet	Evet	1500 ⁶	1.53 ⁶	86.5 ⁷	2400 ⁷	

¹ Karşılama istatistiği hem test hem de gerçek saldırı durumlarını içerir

² Sistem hala geliştirilmekte, ilan edilen özellikler değişiklik gösterebilir

³ Öne sürülen özellikler henüz test edilmemiştir

⁴ Bu çalışmada sunulan karşılama modeli

⁵ Testler sistemin yakın mesafeyi hedefleyen saldırılarda etkili olduğunu göstermektedir (bkz. Çizelge 7.1)

⁶ Donanımsal sınırların göz önünde bulundurulması sebebiyle yazılımsal olarak sınırlandırılmıştır

⁷ Sadece UMBF ve KABF saldırıları göz önüne alınarak hesaplanmıştır

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Simülasyonun yüksek doğruluk düzeyi, modelin gerçek hayatta uygulanabilir bir sistem olarak kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Model testlerde balistik tehditlerin güzergâhını yüksek isabetle tahmin etmiştir. Sonuçlar, modelin ve onun başa-çıkma yaklaşımının özellikle atmosfer dışında karşılamayı hedefleyen yakalama senaryoları için etkili ve uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Testler, uzun menzilli saldırı senaryolarında sistemin balistik füzeyi henüz düşüş safhasına geçmeden yakalamayı başardığını ve ayrıca kısa ve orta menzilli saldırılara karşı düşüş safhasında karşılama gerçekleştirmeyi başardığını göstermektedir. Karşılama füzesinin itiş gücündeki kısıtlamalarına rağmen, model tehditleri %86.5 oranda başarılı bir şekilde karşılamaktadır.

Çalışma kapsamında yapılan testler, saldırıların menziline ve tehditlerin hızına özel yaklaşımlar gerektiğini kanıtlamaktadır. Bu nedenle, genellikle tek bir sistem tüm saldırı türlerine karşı etkili değildir. Bu çalışmada geliştirilen güzergâh geri izleme yaklaşımı, sistemin sahip olduğu karşılama füzelerinin maksimum hızlarından daha yüksek hızlara ulaşan balistik tehditleri yakalamak için tasarlanmıştır ve öngörüldüğü gibi uzun menzilli saldırılara karşı daha iyi performans göstermektedir. Ancak, uygulanan strateji, yakalama manevraları için hazırlık zamanı gerektirir; bu nedenle, yöntem hızlı ve kısa menzilli saldırılara karşı uygun değildir. Savunma modelimizin KMBF ve OMBF saldırılarına karşı genel başarı oranı düşük olsa da, HSS'nin yakın çevresini hedefleyen kısa mesafe saldırılara karşı etkili bir savunma sağlamaktadır.

Sistemin karşılama etkinliği ve verimliliği savunma bataryalarının stratejik pozisyonlanması veya kritik olan ve stratejik öneme sahip alanların savunmasına odaklanması gibi önlemler olarak daha da iyileştirilebilir. Ek olarak, balistik füzenin güç aşamasında füze fırlatma dizisini tetikleyen bir öngörüsöl olasılık modeli geliştirilebilir, böylece sistemin savunma alanının doğal olarak genişletilmesi ve balistik uçuşun daha erken aşamalarında yakalama sağlanması sağlanabilir.

Çalışmada savunma modeli özgün bir ajan tabanlı mimari olan ABÇK ile tasarlanmıştır. Her ne kadar ABÇK mimarisi bu çalışmada nispeten geleneksel bir model oluşturmak için kullanılmış olsa da sağladığı yapısal özellikler iç içe benzetim modelleri, çok katmanlı

benzetim modelleri, sistemlerden oluşan sistemler (SOS) ve karmaşık adaptif sistemler gibi birçok yenilikçi yaklaşımı modellemeye olanak tanır. Ayrıca, ABÇK'nın kullandığı izin tabanlı etkileşim modeli, etkileşimlerin yönetimini ve işlemlerini çevreye devrederek ajanların fonksiyonlarını enkapsüle eder, böylece ajan tasarımı sadece davranış ve çıkarım modeline odaklanılarak tasarlanabilir.

Model, ajan tabanlı yapısı sayesinde karşılama görevlerini yerine getirmek için hiçbir insan etkileşimine veya dış müdahaleye ihtiyaç duymayacak yapıda tasarlanmıştır. Hem Kaber vd., hem de Sheridan tarafından yapılan otonomi sınıflandırmalarına göre, modelimiz tamamen otonomdur [138, 139]. Ancak, icra ettiği kritik görevin hassasiyeti nedeniyle, karşılama füzelerini ateşleyen mekanizma, yakalama girişimini başlatmak için onay bekleyecek şekilde düzenlenmesi veya sistemin karar vericilere karşılama planını hesaplayan bir karar destek sistemi olarak hareket etmesi uygun kullanım alanları olarak değerlendirilebilir.

Benzetim Intel Core i7 2.80 GHz CPU ve GeForce GTX 870M GPU özelliklerine sahip bir bilgisayarda test edilmiş, 50Hz frekansla çalıştırılması esnasında herhangi bir performans sorunu gözlenmemiştir.

Bu çalışma tek başlıklı balistik füze saldırılarına karşı bir savunma yaklaşımı sunmaktadır. Modern uzun menzilli balistik füzelerin önemli bir kısmı çok başlıklı mühimmat taşıyacak şekilde tasarlandığından, bu çalışmada sunulan model, manevra kabiliyetine sahip seyir füzeleri ve çok başlıklı mühimmata sahip balistik füzelere karşı savunma özellikleri yönünden geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

1. Hillson, F. J. (1989). Barrage balloons for low-level air defense. *Air & Space Power*, 3.
2. İnternet: United Nations. (1968). Treaty on the non-proliferation of nuclear weapons (NPT). URL: <https://www.un.org/disarmament/wmd/nuclear/npt/>, Son Erişim Tarihi: 06.03.2023.
3. İnternet: Encyclopaedia Britannica. Deterrence. URL: <https://www.britannica.com/topic/deterrence-political-and-military-strategy>, Son Erişim Tarihi: 06.03.2023.
4. Brodie, B. (1970). *The anatomy of deterrence. Theories of Peace and Security*. New York: Springer, 87–105.
5. Parrington, A. J. (1997). Mutually Assured Destruction Revisited. Strategic Doctrine in Question. *Air University Maxwell Afb Al Airpower Journal*, 1.
6. İnternet: Lockheed Martin Corporation. THAAD: Integrated air and missile defense with proven hit-to-kill technology. URL: <https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/thaad.html>, Son Erişim Tarihi: 06.03.2023.
7. İnternet: Boeing. Ground-based Midcourse Defense (GMD). URL: <https://www.boeing.com/defense/missile-defense/ground-based-midcourse/>, Son Erişim Tarihi: 06.03.2023.
8. Edwards, P. N. (1997). *The closed world: Computers and the politics of discourse in Cold War America*. New York: MIT Press.
9. İnternet: Missile Defense Project. AN/SPY-1 Radar. URL: <https://missilethreat.csis.org/defsys/an-spy-1-radar/>, Son Erişim Tarihi: 06.03.2023.
10. Farina, A., Benvenuti, D., Ristic, B. (2002). Tracking a ballistic target: comparison of several nonlinear filters. *IEEE Transactions on aerospace and electronic systems*, 38, 854–867.
11. Farina, A., Benvenuti, D., Ristic, B. (2002). *Estimation accuracy of a landing point of a ballistic target*. Proceedings of the Fifth International Conference on Information Fusion (FUSION), (1), 2–9.
12. Siouris, G., Chen, M. G., Wang, J. (1997) Tracking an incoming ballistic missile using an extended interval kalman filter. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, (33), 232–240.
13. Wang, X., Qin, W., Bai, Y., Cui, N. (2016). Trajectory estimation for ballistic missile in boost stage using robust filtering. *IET Radar, Sonar & Navigation*, (11), 513–519.

14. Yu, M., Gong, L., Oh, H., Chen, W.H. Chambers, J. (2017). Multiple model ballistic missile tracking with state-dependent transitions and gaussian particle filtering. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, (54), 1066–1081.
15. Yu, M., Gong, L., Chen, W.H., Chambers, J. (2017). State dependent multiple model-based particle filtering for ballistic missile tracking in a lowobservable environment. *Aerospace Science and Technology*, (67), 144–154.
16. Tian, K., Zhang, F. (2013). Multi-target tracking algorithm of boost-phase ballistic missile defense. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, (24), 90–100.
17. Farrell, W. J. (2008). Interacting multiple model filter for tactical ballistic missile tracking. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, (44), 418–426.
18. Chapman, S. (1968). Catching a baseball. *American Journal of Physics*, (36) 868–870.
19. Rossel, S., Corlija, J., Schuster, S. (2002). Predicting three-dimensional target motion: how archer fish determine where to catch their dislodged prey. *Journal of Experimental Biology*, (205), 3321–3326.
20. Burko, L. M., Price, R. H. (2005). Ballistic trajectory: Parabola, ellipse, or what?, *American Journal of Physics*, (73) 516–520.
21. Stojadinovi'c, S., Pantovi'c, R., Žiki'c, M. (2011). Prediction of flyrock trajectories for forensic applications using ballistic flight equations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* (48), 1086–1094.
22. Chang, C. (1980). Ballistic trajectory estimation with angle-only measurements. *IEEE Transactions on Automatic Control*, (25), 474–480.
23. Harlin, W., Cicci, D. A. (2007). Ballistic missile trajectory prediction using a state transition matrix. *Applied Mathematics and Computation*, (188), 1832–1847.
24. Danis, N. J. (1993). Space-based tactical ballistic missile launch parameter estimation. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, (29), 412–424.
25. Benavoli, A., Chisci, L., Farina, A. (2007). Tracking of a ballistic missile with a-priori information. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, (43), 1000–1016.
26. Akgül, A., Karasoy, S. (2005). Development of a tactical ballistic missile trajectory prediction tool. *Journal of Electrical & Electronics Engineering*, (5), 1463–1467.
27. Lih, Y., Kirubarajan, T., Bar-Shalom, Y., Yeddanapudi, M. (1999). Trajectory and launch point estimation for ballistic missiles from boost phase LOS measurements. *IEEE Aerospace Conference. Proceedings*, (4), 425–442.
28. Cerone, V., Milanese, M., Regruto, D. (2008). Combined automatic lanekeeping and driver's steering through a 2-dof control strategy. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, (17), 135–142.

29. Wu, S. J., Chiang, H. H., Perng, J. W., Chen, C. J., Wu, B. F., Lee, T.T. (2008). The heterogeneous systems integration design and implementation for lane keeping on a vehicle. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, (9), 246–263.
30. Marino, R., Scalzi, S., Orlando, G., Netto, M. (2009). A nested pid steering control for lane keeping in vision based autonomous vehicles. *American Control Conference*, 2885–2890.
31. Hatipoglu, C., Ozguner, U., Redmill, K. A. (2003). Automated lane change controller design. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, (4), 13–22.
32. You, F., Zhang, R., Lie, G., Wang, H., Wen, H., Xu, J. (2015). Trajectory planning and tracking control for autonomous lane change maneuver based on the cooperative vehicle infrastructure system. *Expert Systems with Applications*, (42) 5932–5946.
33. Zheng, X., Yang, S., Zhang, K. (2018). *Design and simulation of trajectory tracking guidance law based on LQR for target missile*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, (435).
34. Nelson, D. R., Barber, D. B., McLain, T. W., Beard, R. W. (2007). Vector field path following for miniature air vehicles. *IEEE Transactions on Robotics*, (23), 519–529.
35. Park, S., Deyst, J., How, J. (2004). A new nonlinear guidance logic for trajectory tracking. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, 4900–4916.
36. Giulietti, F., Pollini, L., Innocenti, (2000). M. Autonomous formation flight. *IEEE Control Systems Magazine*, (20), 34–44.
37. Borrelli, F., Keviczky, T., Balas, G. J. (2004). *Collision-free uav formation flight using decentralized optimization and invariant sets*. 43rd IEEE Conference on Decision and Control (CDC), (1), 1099–1104.
38. Stipanovi'c, D. M. Inalhan, G. Teo, R. Tomlin, C. J. (2004). Decentralized overlapping control of a formation of unmanned aerial vehicles. *Automatica*, (40) 1285–1296.
39. Paul, T., Krogstad, T. R., Gravdahl, J. T. (2008). Modelling of UAV formation flight using 3d potential field. *Simulation Modelling Practice and Theory*, (16) 1453–1462.
40. Bayezit, I., Fidan, B. (2012). Distributed cohesive motion control of flight vehicle formations. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, (60), 5763–5772.
41. Saska, M., Hert, D., Baca, T., Kratky, V., Nascimento, T. (2020). Formation control of unmanned micro aerial vehicles for straitened environments. *Autonomous Robots*, 44(20), 1–18.
42. Chao, Z., Zhou, S.L., Ming, L., Zhang, W.G. (2012). UAV formation flight based on nonlinear model predictive control. *Mathematical Problems in Engineering*, (2012).

43. Richards, A., How, J. (2004). *A decentralized algorithm for robust constrained model predictive control*. Proceedings of the 2004 American control conference, (5), 4261–4266.
44. Wang, W., Rivera, D. E., Kempf, K. G. (2007). Model predictive control strategies for supply chain management in semiconductor manufacturing. *International Journal of Production Economics*, (107), 56–77.
45. Rosolia, U., Carvalho, A., Borrelli, F. (2017). Autonomous racing using learning model predictive control. *2017 American control conference (ACC-2017)*, 5115–5120.
46. Alcalá, E., Puig, V., Quevedo, J., Rosolia, U. (2020). Autonomous racing using linear parameter varying-model predictive control (LPV-MPC). *Control Engineering Practice*, (95).
47. Hung, N. T., Pascoal, A. M., Johansen, T. A. (2020). Cooperative path following of constrained autonomous vehicles with model predictive control and event-triggered communications. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, (30), 2644–2670.
48. Liu, J., Qin, X., Qi, B., Cui, X. (2020). 3D online path planning of UAV based on improved differential evolution and model predictive control. *International Journal of Innovative Computing*, (16), 315–329.
49. Shamekhi, A. M., Taghavipour, A., Shamekhi, A. H. (2020). Engine idle speed control using nonlinear multiparametric model predictive control. *Optimal Control Applications and Methods*, (41), 960–979.
50. Wang, X., Yao, X., Zhang, L. (2020). Path planning under constraints and path following control of autonomous underwater vehicle with dynamical uncertainties and wave disturbances. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 1–18.
51. Mammarella, M., Capello, E. (2020). Tube-based robust mpc processor-in-the-loop validation for fixed-wing uavs. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 1–20.
52. Tavernini, D. Vacca, F., Metzler, M., Savitski, D., Ivanov, V., Gruber, P., Hartavi, A. E., Dhaens, M., Sorniotti, A. (2019). An explicit nonlinear model predictive abs controller for electro-hydraulic braking systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, (67) 3990–4001.
53. Na, M. G., Shin, S. H., Kim, W. C. (2003). A model predictive controller for nuclear reactor power. *Korean Nuclear Society Journal*, 35, 399–411.
54. Patrinos, P., Trimboli, S., Bemporad, A. (2011). *Stochastic mpc for realtime market-based optimal power dispatch*. 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, 7111–7116.
55. Ramandi, M. Y., Bigdeli, N., Afshar, K. (2020). Stochastic economic model predictive control for real-time scheduling of balance responsible parties. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, (118).

56. Morato, M. M., Mendes, P. R., Normey-Rico, J. E. Bordons, C. (2020). LPV-MPC fault-tolerant energy management strategy for renewable microgrids. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, (117).
57. Ghanbarpour, K., Bayat, F., Jalilvand, A. (2020). Dependable power extraction in wind turbines using model predictive fault tolerant control. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, (118).
58. Lynch, C. J., Diallo, S. Y., Tolk, A. (2013). *Representing the ballistic missile defense system using agent-based modeling*. Proceedings of the Military Modeling & Simulation Symposium, (2013), 1–8.
59. Yao, Z., Wu, S. (2018). *Cooperation strategy of multi-target attack in confrontation environment for ballistic missiles group*. 37th Chinese Control Conference (CCC), 4644–4648.
60. Cheng, Z., Fan, L., Zhang, Y. (2017). Multi-agent decision support system for missile defense based on improved pso algorithm. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, (28), 514–525.
61. Xie, B., Wang, J. (2014). *Recognition of warhead in ballistic missile defense*. 7th International Congress on Image and Signal Processing, 1110–1114.
62. Vidanovic, N., Rašuo, Kastratović, B. G., Maksimovic, Curcic, S. D., Samardžic, M. (2017). Aerodynamic-structural missile fin optimization. *Aerospace Science and Technology*, (65), 26–45.
63. Longyue, L., Chengli, F., Qinghua, X., Hailong, X., Huizhen, Z. (2020). Optimal index shooting policy for layered missile defense system. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, (31) 118–129.
64. Ann, S., Lee, S., Kim, Y. (2018). *Intercept point prediction for midcourse guidance of anti-ballistic missile*. 26th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), 1–9.
65. Wu, D., Jin, Y., Qian, L., Bai, H., Li, Z. (2019). *Simulation method of missile autopilot performance test based on aerodynamic environment*. 3rd International Conference on Computer Science and Application Engineering, 1–7.
66. Deng, H.Z., Dong, M.Z., Yan, J. (2012). Optimal allocation of interceptors for multi-layered tmd, *Command Control & Simulation*, (4).
67. Li, L., Liu, F., Long, G., Guo, P., Mei, Y. (2016). Intercepts allocation for layered defense. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, (27), 602–611.
68. Ender, T., Leurck, R. F., Weaver, B., Miceli, P., Blair, W. D., West, P., Mavris, D. (2010). Systems-of-systems analysis of ballistic missile defense architecture effectiveness through surrogate modeling and simulation. *IEEE Systems Journal*, (4), 156–166.

69. Horla, D. (2019). Variational calculus approach to optimal interception task of a ballistic missile in 1D and 2D cases. *Algorithms*, (12), 148.
70. Barton, D. K., Falcone, R., Kleppner, D., Lamb, F. K., Lau, M. K., Lynch, H. L., Moncton, D., Montague, D., Mosher, D. E., Priedhorsky, W. (2004). Report of the american physical society study group on boost-phase intercept systems for national missile defense: Scientific and technical issues. *Reviews of Modern Physics*, (76), 1-424.
71. Wilkening, D. A. (2004). Airborne boost-phase ballistic missile defense. *Science and Global Security*, (12), 1–67.
72. İnternet: Missile Defence Agency. (2012). The Ballistic Missile Defence System. URL: <https://www.defense.gov/Portals/1/Interactive/2018/11-2019-Missile-Defense-Review/MDR-BMDS-Factsheet-UPDATED.pdf>, Son Erişim Tarihi: 06.03.2023.
73. İnternet: NASA. Shape effects on drag. URL: <https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/shape-effects-on-drag/>, Son Erişim Tarihi: 06.03.2023.
74. İnternet: University Corporation of Atmospheric Research (UCAR). The Layered Atmosphere. URL: https://www.eo.ucar.edu/basics/wx_1_b.html, Son Erişim Tarihi: 06.03.2023.
75. İnternet: NASA. Earth's atmospheric layers. URL: https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/science/atmosphere-layers2.html, Son Erişim Tarihi: 06.03.2023.
76. US National Oceanic and Atmospheric Administration and US Air Force. (1976). *US standard atmosphere*. National Oceanic and Atmospheric Administration, (76).
77. Wang, H., Tong, C., M. Sun, J. J. (2013). Study on the trajectory simulation of the ballistic missile. *Applied Mechanics and Materials*, (416), 1845–1850.
78. İnternet: Sharp, T. How big is Earth? URL: <https://www.space.com/17638-how-big-is-earth.html>, Son Erişim Tarihi: 06.03.2023.
79. İnternet: Odenwald, S. What is the speed of the earth's rotation?, URL: <https://image.gsfc.nasa.gov/poetry/ask/a10840.html>, Son Erişim Tarihi: 06.03.2023.
80. Sheedy, C. (1988). *Circular error probable (CEP)*. Air Force Operational Test Evaluation Center.
81. Nelson. W., (1988). *Use of circular error probability in target detection*. Mitre Corp.
82. Fortino, G., North, M. J. (2013). Simulation-based development and validation of multi-agent systems: AOSE and ABMS approaches. *Journal of Simulation*, (7), 137–143.
83. Axelrod, R. (1997). *The Complexity of Cooperation: Agent-Based Models of Competition and Collaboration*. Princeton: Princeton University Press. ISBN 978-0-691-01567-5.

84. Colson, C. M., Nehrir, M. H. (2011). Agent-based power management of microgrids including renewable energy power generation. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 1-3.
85. Banerjee, B., Abukmail, A., Kraemer, L. (2009). Layered Intelligence for Agent-based Crowd Simulation. *Simulation*, 85(10), 621-633.
86. Cetin, A., Bulbul, E. (2020). Hierarchical Behavior Model for Multi-Agent System with Evasion Capabilities and Dynamic Memory. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(4).
87. Cosgrove, J., Butler, J., Alden, K., Read, M., Kumar, V., Cucurull-Sanchez, L., Timmis, J., Coles, M. (2015). Agent-Based Modeling in Systems Pharmacology. *CPT: Pharmacometrics & Systems Pharmacology*, 4(11), 615-29.
88. Cheng, Z., Fan, L., Zhang, Y. (2017). Multi-agent decision support system for missile defense based on improved pso algorithm. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, (28), 514–525.
89. Connors, C.D., Miller, J.O., Lunday, B.J. (2016). Using agent-based modeling and a designed experiment to simulate and analyze a new air-to-air missile. *The Journal of Defense Modeling and Simulation*, 13(3), 321-330.
90. Bellifemine, F., Poggi, A., Rimassa, G. (1999). *Jade, A FIPA-compliant Agent Framework*. 4th International Conference on Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agent Technology.
91. Ferber, J., Gutknecht, O., Michel, F. (2003). *From Agents to Organizations: an Organizational View of Multi-Agent Systems*. *Agent-Oriented Software Engineering IV*. New York: Springer-Verlag.
92. Ferber, J., Müller, J. P. (1996). *Influences and Reaction: a Model of Situated Multiagent Systems*. 2th International Conference on Multi-agent Systems, Japan, AAAI Press.
93. Weyns, D., Parunak, H. V. D., Michel, F., Holvoet, T., Ferber, J. (2005). *Environment for multi-agent systems*. Berlin: Springer, (3374), 1–47.
94. Philippe, M., Gildas, M., Sebastien, P. (2018). Multi-level agent-based simulations: Four design patterns. *Simulation Modeling Practice and Theory*, (83), 51-64.
95. Hennessy, J. L., Patterson, D. A. (2003). *Computer Architecture: a Quantitative Approach*, (Third Edition). Massachusetts: Morgan Kaufmann.
96. Zhu, F. Yao, Y. Li, J. Tang, W. (2019). Reusability and composability analysis for an agent-based hierarchical modeling and simulation framework. *Simulation Modeling Practice and Theory*, (90), 81-97.
97. Newton, I. (1999) *The Principia: mathematical principles of natural philosophy*. (Çev. I. Bernard Cohen, Anne Whitman ve Julia Budenz). California: University of California Press. (Eserin orijinali 1687’de yayımlandı).

98. İnternet: National institute of Standards and Technology (NIST). (2018). Newtonian constant of gravitation. URL: <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?bg>, Son Erişim Tarihi: 06.03.2023.
99. İnternet: Astronomical Applications Department of the U.S. Naval Observatory. (2016). The Astronomical Almanac Online, Selected astronomical constants. URL: https://aa.usno.navy.mil/downloads/publications/Constants_2021.pdf, Son Erişim Tarihi: 06.03.2023.
- 100.İnternet: NASA. (2021). Earth atmosphere model, URL: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/rocket/atmosmet.html>, Son Erişim Tarihi: 06.03.2023.
- 101.Alekhyia, N., Manthena, S. (2018) . *Drag prediction on the conical and ogival shaped noses of aerodynamic bodies*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (455).
- 102.Pedlosky, J. (1987). *Geophysical Fluid Dynamics*, (2 edition.), New York: Springer Publishing.
- 103.Zhang, C. H., Liu, H. B., Long, T. (2008). *Signal-to-noise ratio analysis in satellite-airship bistatic space based radar*. 2008 International Conference on Radar, 434–439.
- 104.MDA. (2007). *Ballistic Missile Defense System (BMDS) Programmatic Environmental Impact Statement*. US Department of Defense.
- 105.Bunn, M., Tsipis, K. (1983). The uncertainties of a preemptive nuclear attack. *Scientific American*, (249), 38–47.
- 106.Haug, A.. (2015). *A Tutorial on Bayesian Estimation and Tracking Techniques Applicable to Non-Linear and Non-Gaussian Processes*. Mitre Corp.
- 107.İnternet: Saho, K. (2018). Kalman Filter for Moving Object Tracking: Performance Analysis and Filter Design. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/57673>, Son Erişim Tarihi: 06.03.2023.
- 108.Siouris, G. M. (2004). *Missile Guidance and Control Systems*. New York: Springer.
- 109.İnternet: Center for Strategic and International Studies – Missile Threat Agency (CSIS-MDA). (2016). Hwasong-9 (Scud-ER) URL: <https://missilethreat.csis.org/missile/scud-er/>, Son Erişim Tarihi: 06.03.2023.
- 110.İnternet: Center for Strategic and International Studies – Missile Threat Agency (CSIS-MDA). (2017). Jericho-2 URL: <https://missilethreat.csis.org/missile/jericho-2/>, Son Erişim Tarihi: 06.03.2023.
- 111.İnternet: Center for Strategic and International Studies – Missile Threat Agency (CSIS-MDA). (2017). DF-4 (Dong Feng-4 / CSS-3) URL: <https://missilethreat.csis.org/missile/df-4/>, Son Erişim Tarihi: 06.03.2023.

- 112.İnternet: Center for Strategic and International Studies – Missile Threat Agency (CSIS-MDA). (2016). SS-25 (RS-12M Topol) URL: <https://missilethreat.csis.org/missile/ss-25/>, Son Erişim Tarihi: 06.03.2023.
- 113.İnternet: Army Technology. (2018). THAAD: Theatre High Altitude Area Defense – Missile System. URL: <https://www.army-technology.com/projects/thaad/>, Son Erişim Tarihi: 06.03.2023.
- 114.İnternet: Raytheon Technologies. AIM-9 Sidewinder. URL: <https://www.raytheonmissilesanddefense.com/what-we-do/naval-warfare/advanced-strike-weapons/aim-9x-sidewinder-missile>, Son Erişim Tarihi: 06.03.2023.
- 115.İnternet: Smithsonian National and Space Museum. Soviet K-13 (AA-2 'Atoll'). URL: https://airandspace.si.edu/collection-objects/missile-air-air-atoll-also-designated-k-13-aa-2/nasm_A19930363000, Son Erişim Tarihi: 06.03.2023.
- 116.İnternet: United States Army – Acquisition Support Center (USAASC). Counter-Rocket, Artillery, Mortar (C-RAM) Intercept Land-Based Phalanx Weapon System (LPWS). URL: https://asc.army.mil/web/portfolio-item/ms-c-ram_lpws/, Son Erişim Tarihi: 06.03.2023.
- 117.İnternet: Army Technology. Nächstbereichschutzsystem (NBS) MANTIS Air Defence Protection System. <https://www.army-technology.com/projects/mantis/>, Son Erişim Tarihi: 06.03.2023.
- 118.Cordesman, A. Gold, B. (2014). *The gulf military balance volume ii: The missile and nuclear dimensions*. Center for Strategic &International Studies.
- 119.İnternet: Raytheon Technologies. (2016). Iron Dome System and Skyhunter Missile URL: <https://www.raytheonmissilesanddefense.com/capabilities/products/irondome>, Son Erişim Tarihi: 06.03.2023.
- 120.İnternet: Center for Strategic and International Studies – Missile Threat Agency (CSIS-MDA). Medium Extended Air Defense System (MEADS), URL: <https://missilethreat.csis.org/defsys/meads/>, Son Erişim Tarihi: 06.03.2023.
- 121.İnternet: Center for Strategic and International Studies – Missile Threat Agency (CSIS-MDA). URL: <https://missilethreat.csis.org/system/patriot/>, Son Erişim Tarihi: 06.03.2023.
- 122.İnternet: GlobalSecurity.org. Patriot PAC-3 Developmental Testing. (2011). URL: <https://www.globalsecurity.org/space/systems/patriot-ac-3-dt.htm>, Son Erişim Tarihi: 06.03.2023.
- 123.İnternet: Army Technology. (2018). Arrow 2 Theatre Ballistic Missile Defence System. URL: <https://www.army-technology.com/projects/arrow2/>, Son Erişim Tarihi: 06.03.2023.

- 124.İnternet: Missile Defense Advocacy Alliance. (2017). Arrow Ballistic Missile Defence Testing Record. URL: <https://missiledefenseadvocacy.org/missile-defense-systems-2/missile-defense-intercept-test-record/allies-missile-defense-intercept-test-record/>, Son Erişim Tarihi: 06.03.2023.
- 125.İnternet: Kongsberg, NASAMS Air Defence System, URL: <https://www.kongsberg.com/kda/what-we-do/defence-and-security/integrated-air-and-missile-defence/nasams-air-defence-system/>, Son Erişim Tarihi: 06.03.2023.
- 126.İnternet: Missile Defense Agency (MDA). Ballistic Missile Defense Intercept Flight Test Record, Technical Report, US Department of Defense, URL: <https://www.mda.mil/global/documents/pdf/testrecord.pdf>, Son Erişim Tarihi: 06.03.2023.
- 127.Almaz Central Design Bureau. (2011). *S-400 Triumph surface-to-air missile system (Rusça)*. Almaz-Antey Corp.
- 128.İnternet: Center for Strategic and International Studies – Missile Threat Agency (CSIS-MDA). David’s Sling, URL: <https://missilethreat.csis.org/defsys/davids-sling/>, Son Erişim Tarihi: 06.03.2023.
- 129.İnternet: Center for Strategic and International Studies – Missile Threat Agency (CSIS-MDA). Aegis Ballistic Missile Defense. URL: <https://missilethreat.csis.org/system/aegis/>, Son Erişim Tarihi: 06.03.2023.
- 130.İnternet: Center for Strategic and International Studies – Missile Threat Agency (CSIS-MDA). Sol-Air Moyenne Portée/Terrestre (SAMP/T). URL: <https://missilethreat.csis.org/defsys/samp-t/>, Son Erişim Tarihi: 06.03.2023.
- 131.İnternet: Army Technology,. (2018). Aster 30 SAMP/T Surface-to-Air Missile Platform. URL: <https://www.army-technology.com/projects/aster-30/>, Son Erişim Tarihi: 06.03.2023.
- 132.Giles, K. (2015). *Russian Ballistic Missile Defense: Rhetoric And Reality*. Strategic Studies Institute, US Army War College. <http://www.jstor.org/stable/resrep11662>.
- 133.Foss, C. F. (2012). *IHS Jane’s Land Warfare Platforms: Artillery & Air Defence*. IHS Jane’s, IHS Global Limited.
- 134.İnternet: Center for Strategic and International Studies – Missile Threat Agency (CSIS-MDA). Ground-based Midcourse Defense (GMD) System. URL: <https://missilethreat.csis.org/system/gmd/>, Son Erişim Tarihi: 06.03.2023.
- 135.İnternet: Center for Strategic and International Studies – Missile Threat Agency (CSIS-MDA). Ground-based interceptor development. URL: <https://missilethreat.csis.org/ground-based-interceptor-development/>, Son Erişim Tarihi: 06.03.2023.
- 136.Samson, V., Black, S. (2007). *Flight Tests For Ground-Based Midcourse Defense (GMD) System*. California, Center for Defense Information.

137. U.S. Office of the Director, Operational Test & Evaluation. (2012). *Flight Tests For Ground-Based Midcourse Defense (GMD) System*.
138. Kaber, D. B., Endsley, M. R. (2004). The effects of level of automation and adaptive automation on human performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, (5), 113–153.
139. Sheridan, T. B. (2002). *Humans and automation: System design and research issues*. Washington: John Wiley & Sons Inc.



Gazili olmak ayrıcalıktır