

# **PASİF TORPİDO GÜDÜMÜ İÇİN YENİ BİR YÖNTEM**

## **A NEW METHOD FOR PASSIVE TORPEDO GUIDANCE**

**TURAN TOPALOĞLU**

**Dr. Öğr. Üyesi YAKUP ÖZKAZANÇ**

**Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Elektrik ve Elektronik Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2019

**Turan TOPALOĞLU**'nun hazırladığı “ Pasif Torpido Güdümü İçin Yeni Bir Yöntem” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **ELEKTRİK ve ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Murat EFE

Bařkan



Dr. Öğr. Üyesi Yakup ÖZKAZANÇ

Danışman



Prof. Dr. Hüseyin DEMİRCİOĞLU

ye



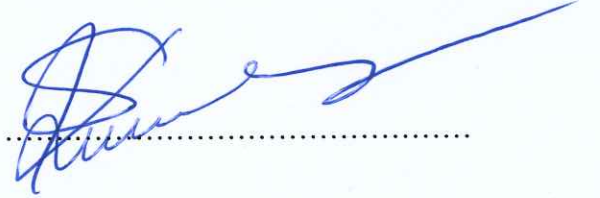
Dr. Öğr. Üyesi Derya ALTUNAY

ye



Dr. Öğr. Üyesi řölen Kumbay YILDIZ

ye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak ..... / ..... /.....tarihinde onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemře GüMüřDERELİOĐLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

**Her zaman yanımda olan canım aileme...**



## ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

27/09 /2019

*Turan*

Turan TOPALOĞLU

## YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan "*Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge*" kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricince YÖK Ulusal Tez Merkezi / H. Ü. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren ....ay ertelenmiştir.
- Tezim ile ilgili gizlilik kararı verilmiştir.

27 / 09 / 2019  
..... / ..... / .....

*turan* (İmza)

Turan TOPALOĞLU

# ÖZET

## PASİF TORPİDO GÜDÜMÜ İÇİN YENİ BİR YÖNTEM

**Turan TOPALOĞLU**

**Yüksek Lisans, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü**

**Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Yakup ÖZKAZANÇ**

**Eylül 2019, 118 sayfa**

Torpidolar aktif veya pasif arayıcıya sahip mühimmatlardır. Pasif arayıcıya sahip torpido ile hedef takibi yapabilmek için pasif hedef izleme yöntemleri kullanılmalıdır. Hedef takibinde en çok kullanılan yöntemlerden biri Kalman filtresidir. Doğrusal Kalman filtresinde kullanılan dinamik modelin de doğrusal olması gerekmektedir. Pasif hedef takibinde ise kullanılan dinamik model doğrusal olmadığı için, Kalman filtresinin farklı türevleri veya farklı yaklaşımlar kullanılmaktadır. Pasif arayıcıların hedefi hangi bakış açısından izledikleri de takip açısından önem arz etmektedir. Hedef takibinin kalitesini belirleyen unsurlardan biri de torpido ile hedef geometrisidir.

Torpedo güdümünde kullanılan oransal seyir güdümü, torpedo-hedef yaklaşma hızına ihtiyaç duymaktadır. Torpidolar bu bilgiyi pasif arayıcı üzerinden elde edememektedirler. Bu nedenle güdüm algoritmasında ortalama bir yaklaşma hızı kullanılmaktadır. Bu güdüm yaklaşımında torpidonun ıskalama mesafesi başarımını hedefin ne tarafından atıldığına göre değiştirebilmektedir.

Bu çalışmada, Genişletilmiş Kalman Filtresi ve Sözcü Ölçümlü Kalman Filtresi olmak üzere iki farklı pasif izleme yöntemi üzerinde durulmuştur. Bu iki yöntem kullanılarak torpido pasif arayıcısı ile pasif hedef takibi yapılmıştır. Farklı senaryolarla

simülasyonlar yapılmış ve torpido anlık olarak farklı manevralara maruz bırakılarak farklı ölçüm geometrileri elde edilmiştir. Bu simülasyonlarla en iyi takibi sağlayacak ölçüm açısı dögüsel bir yöntemle bulunmaya çalışılmıştır.

Bulunan bu ölçüm açısını sağlayacak ivme ile oransal seyir güdüm ivmesi, bir ağırlıklandırma fonksiyonu ile birleştirilmiştir ve hibrit bir güdüm ivmesi hesaplanmıştır. Nihai güdüm ivmesi ile aynı anda hem pasif hedef takibi yapılarak hedef durum değişkenleri kestirilmiştir hem de torpidonun hedefe doğru güdümlenmesi sağlanmıştır. Kestirilen hedef hızından torpido-hedef geometrisi kullanılarak yaklaşma hızı hesaplanmıştır. Hesaplanan yaklaşma hızı ve ortalama yaklaşma hızı, oransal seyir güdümüne girdi olarak verilerek farklı senaryolar üzerinde başarıml analizleri yapılmıştır. Daha sonra simülasyonları daha gerçekçi yapmak için, pasif arayıcı gimbal açıları limitlenmiş ve hedefe belirli bir mesafe kala torpido güdümü kesilmiştir. Böylelikle daha gerçekçi senaryolarda kestirilen yaklaşma hızının oransal seyir güdümü üzerinde ne kadar etkili olduğu da anlaşılmaya çalışılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Torpido Güdümü, Pasif Güdüm, Oransal Seyir Güdümü, Yaklaşma Hızı Kestirimi, Genişletilmiş Kalman Filtresi, Sözde Ölçümlü Kalman Filtresi, Pasif Takip

# **ABSTRACT**

## **A NEW METHOD FOR PASSIVE TORPEDO GUIDANCE**

**Turan TOPALOĞLU**

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

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

**September 2019, 118 pages**

Torpedoes are ammunition that have active or passive seekers. Passive target tracking methods should be used to track targets with torpedo that has passive seeker. Kalman filter is the one of the most commonly used methods in target tracking. The dynamic model used in the linear Kalman filter must also be linear. In the passive target tracking, since the dynamic model used is not linear, different variants of Kalman filter or different approaches are used. Which point of view that passive seekers tracks the target from is important in terms of tracking. One of the factors that determine the quality of target tracking is the torpedo - target geometry.

The proportional navigation guidance that used in torpedo guidance requires torpedo – target closing velocity. Torpedoes cannot obtain this information through the passive seeker. Therefore, an average closing velocity is generally used in the guidance



algorithm. This guidance approach can change the performance of the torpedo according to what side of the target that torpedo is fired from.

In this study, two different passive target tracking methods, namely Extended Kalman Filter and Pseudo Measurement Kalman Filter, are investigated. Passive target tracking is performed by using these two different methods. Simulations are made with different scenarios and different measurement geometry are obtained by the torpedo that is instantly exposed to different maneuvers. The measurement angle which will provide the best quality tracking is tried to find by a recursive method with these simulations.

The acceleration that provides the found measurement angle and the acceleration that provides the proportional navigation guidance are merged by coefficient function and the ultimate demanded acceleration is calculated. Target state variables are estimated and the torpedo guidance to the target is provided by performing passive target tracking with ultimate demanded acceleration at the same time. Closing velocity is calculated from estimated target velocity by using torpedo – target geometry. The calculated closing velocity and average closing velocity are given as input to the proportional navigation guidance and performance analyzes are performed on different scenarios. In order to make the scenarios more realistic, the passive seeker gimbal angles are limited and the torpedo guidance is terminated at a remaining certain distance to the target. Thus, in more realistic scenarios, it is tried to understand how effective the estimated closing velocity is on proportional navigation guidance and the torpedo performance.

**Keywords:** Torpedo Guidance, Passive Guidance, Proportional Navigation Guidance, Closing Velocity Estimation, Extended Kalman Filter, Pseudo Measurement Kalman Filter, Bearings-Only Tracking.

## TEŞEKKÜR

Bu tezin olgunlaştırıp yazılmasında tavsiye, öneri, yardım ve yönlendirmeleriyle bana yardımcı olan tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Yakup ÖZKAZANÇ'a teşekkürlerimi sunuyorum.

Bana her anımda destek olup, bu süreçte kendileri de fedakarlık yapan sevgili aileme çok teşekkür ederim.



# İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	i
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xvi
SÖZLÜKÇE.....	xvii
KISALTMALAR.....	xx
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Hedef Takibi .....	2
1.2. Tezin Amacı.....	3
1.3. Literatür Taraması.....	4
2. PASİF GÜDÜM.....	7
3. PASİF HEDEF TAKİBİ .....	10
3.1. Hedef Takibi .....	10
3.2. Doğrusal Sistem Modellemesi .....	10
3.3. Doğrusal Olmayan Sistem Modellemesi.....	11
3.4. Denetlenebilirlik ve Gözlenebilirlik Kavramları .....	13
3.5. Hedef Hareket Modelleri .....	13
3.5.1. Sabit Hız Modeli .....	15
3.5.2. Sabit İvme Modeli.....	15
3.6. Doğrusal Kalman Filtresi .....	15
3.7. Torpido Probleminde Pasif Hedef Takibi .....	21
3.8. Genişletilmiş Kalman Filtresi (EKF) .....	22
3.9. Sözde Ölçümlü Kalman Filtresi (Pseudo Measurement KF).....	25
4. TORPİDOLAR İÇİN PASİF GÜDÜM YÖNTEMİ.....	27
4.1. Pasif Hedef Takibinde Gözlemci Yörüngesinin Optimizasyonu .....	27

4.1.1. Gözlemci Yörüngesinin Genişletilmiş KF ile Optimizasyonu .....	29
4.1.2. Gözlemci Yörüngesinin Sözde Ölçümlü KF ile Optimizasyonu .....	31
4.2. Oransal Seyir Güdümü ile Optimum Takip Manevrasının Birleştirilmesi.....	34
4.2.1. Pasif Takip ve Önleme Hibrit Güdümü.....	36
4.2.2. Sabit Hızlı Hedefe Önleme.....	37
4.2.2.1. Sabit Hızlı Hedefe Arkadan Atış Yapılarak Önleme .....	38
4.2.2.2. Sabit Hızlı Hedefe Yandan Atış Yapılarak Önleme.....	51
4.2.2.3. Sabit Hızlı Hedefe Önden Atış Yapılarak Önleme .....	64
4.2.3. Sabit Hedefe Önleme.....	77
4.2.4. İvmeli Hareket Yapan Hedefe Yandan Atış Yapılarak Önleme .....	90
4.3. Sabit ve Kestirilmiş Yaklaşma Hızının Oransal Seyir Güdümüne Etkisi .....	103
4.3.1. Hareketli Hedefe Önden Atış .....	104
4.3.2. Hareketli Hedefe Yandan Atış .....	105
4.4. Torpido Gerçek Limitlerinin Kullanılmasının Etkisi .....	106
4.4.1. Hareketli Hedefe Önden Atış .....	107
4.4.2. Hareketli Hedefe Yandan Atış .....	108
4.4.3. Hareketli Hedefe Arkadan Atış .....	109
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	111
6. KAYNAKLAR.....	114
ÖZGEÇMİŞ .....	118

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1 Torpido yapısı.....	1
Şekil 2 Oransal seyir güdümünün türetildiği geometri.....	7
Şekil 3 z1 ve z2 ölçümleri için koşullu olasılık yoğunluk fonksiyonu [26].....	17
Şekil 4 Kalman filtresi algoritması akış diyagramı.....	20
Şekil 5 Gözetleyici - hedef geometrisi.....	21
Şekil 6 Genişletilmiş Kalman filtresi algoritması akış diyagramı.....	25
Şekil 7 Sabit hedef için optimal platform yörüngesi ( EKF tabanlı ).....	29
Şekil 8 Sabit hedef için pasif takipte hata-zaman grafiği ( EKF tabanlı ).....	30
Şekil 9 Sabit hızlı hedef için optimal yörünge ( EKF tabanlı ).....	30
Şekil 10 Sabit hızlı hedef için pasif takipte hata-zaman grafiği ( EKF tabanlı ).....	31
Şekil 11 Sabit hedef için optimal yörünge ( Sözde ölçümlü KF tabanlı ).....	32
Şekil 12 Sabit hedef için pasif takipte hata-zaman grafiği ( Sözde ölçümlü KF tabanlı ) .....	32
Şekil 13 Sabit hızlı hedef için optimal yörünge ( Sözde ölçümlü KF tabanlı ).....	33
Şekil 14 Sabit hızlı hedef için pasif takipte hata-zaman grafiği ( Sözde ölçümlü KF tabanlı ).....	33
Şekil 15 Delta ağırlıklandırma fonksiyonları.....	36
Şekil 16 Delta 1 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışla önleme .....	38
Şekil 17 Delta 1 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışta hata- zaman grafiği.....	39
Şekil 18 Delta 1 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışta torpido- gemi mesafesi grafiği.....	39
Şekil 19 Delta 2 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışla önleme .....	40
Şekil 20 Delta 2 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışta hata- zaman grafiği.....	40
Şekil 21 Delta2 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışta torpido- gemi mesafesi grafiği.....	41

Şekil 22 Delta 3 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışla önleme .....	41
Şekil 23 Delta 3 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışta hata- zaman grafiği .....	42
Şekil 24 Delta 3 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışta torpido- gemi mesafesi grafiği.....	42
Şekil 25 Delta 4 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışla önleme .....	43
Şekil 26 Delta 4 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışta hata- zaman grafiği .....	43
Şekil 27 Delta 4 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışta torpido- gemi mesafesi grafiği.....	44
Şekil 28 Delta 5 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışla önleme .....	44
Şekil 29 Delta 5 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışta hata- zaman grafiği .....	45
Şekil 30 Delta 5 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışta torpido- gemi mesafesi grafiği.....	45
Şekil 31 Delta 6 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışla önleme .....	46
Şekil 32 Delta 6 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışta hata- zaman grafiği .....	46
Şekil 33 Delta 6 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışta torpido- gemi mesafesi grafiği.....	47
Şekil 34 Delta 7 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışla önleme .....	47
Şekil 35 Delta 7 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışta hata- zaman grafiği .....	48
Şekil 36 Delta 7 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışta torpido- gemi mesafesi grafiği.....	48
Şekil 37 Delta 8 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışla önleme .....	49

Şekil 38 Delta 8 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışta hata- zaman grafiği.....	49
Şekil 39 Delta 8 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışta torpido- gemi mesafesi grafiği .....	50
Şekil 40 Delta 1 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışla önleme .....	51
Şekil 41 Delta 1 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışta hata- zaman grafiği.....	52
Şekil 42 Delta 1 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışta torpido- gemi mesafesi grafiği .....	52
Şekil 43 Delta 2 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışla önleme .....	53
Şekil 44 Delta 2 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışta hata- zaman grafiği.....	53
Şekil 45 Delta 2 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışta torpido- gemi mesafesi grafiği .....	54
Şekil 46 Delta 3 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışla önleme .....	54
Şekil 47 Delta 3 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışta hata- zaman grafiği.....	55
Şekil 48 Delta 3 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışta torpido- gemi mesafesi grafiği .....	55
Şekil 49 Delta 4 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışla önleme .....	56
Şekil 50 Delta 4 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışta hata- zaman grafiği.....	56
Şekil 51 Delta 4 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışta torpido- gemi mesafesi grafiği .....	57
Şekil 52 Delta 5 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışla önleme .....	57
Şekil 53 Delta 5 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışta hata- zaman grafiği.....	58

Şekil 54 Delta 5 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışta torpido- gemi mesafesi grafiği.....	58
Şekil 55 Delta 6 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışla önleme .....	59
Şekil 56 Delta 6 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışta hata- zaman grafiği .....	59
Şekil 57 Delta 6 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışta torpido- gemi mesafesi grafiği.....	60
Şekil 58 Delta 7 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışla önleme .....	60
Şekil 59 Delta 7 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışta hata- zaman grafiği .....	61
Şekil 60 Delta 7 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışta torpido- gemi mesafesi grafiği.....	61
Şekil 61 Delta 8 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışla önleme .....	62
Şekil 62 Delta 8 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışta hata- zaman grafiği .....	62
Şekil 63 Delta 8 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışta torpido- gemi mesafesi grafiği.....	63
Şekil 64 Delta 1 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışla önleme	64
Şekil 65 Delta 1 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışta hata- zaman grafiği .....	65
Şekil 66 Delta 1 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışta torpido- gemi mesafesi grafiği.....	65
Şekil 67 Delta 2 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışla önleme	66
Şekil 68 Delta 2 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışta hata- zaman grafiği .....	66
Şekil 69 Delta 2 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışta torpido- gemi mesafesi grafiği.....	67
Şekil 70 Delta 3 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışla önleme	67
Şekil 71 Delta 3 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışta hata- zaman grafiği .....	68



Şekil 72 Delta 3 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışta torpido-gemi mesafesi grafiği .....	68
Şekil 73 Delta 4 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışla önleme	69
Şekil 74 Delta 4 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışta hata-zaman grafiği.....	69
Şekil 75 Delta 4 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışta torpido-gemi mesafesi grafiği .....	70
Şekil 76 Delta 5 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışla önleme	70
Şekil 77 Delta 5 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışta hata-zaman grafiği.....	71
Şekil 78 Delta 5 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışta torpido-gemi mesafesi grafiği .....	71
Şekil 79 Delta 6 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışla önleme	72
Şekil 80 Delta 6 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışta hata-zaman grafiği.....	72
Şekil 81 Delta 6 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışta torpido-gemi mesafesi grafiği .....	73
Şekil 82 Delta 7 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışla önleme	73
Şekil 83 Delta 7 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışta hata-zaman grafiği.....	74
Şekil 84 Delta 7 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışta torpido-gemi mesafesi grafiği .....	74
Şekil 85 Delta 8 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışla önleme	75
Şekil 86 Delta 8 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışta hata-zaman grafiği.....	75
Şekil 87 Delta 8 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışta torpido-gemi mesafesi grafiği .....	76
Şekil 88 Delta 1 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önleme .....	78
Şekil 89 Delta 1 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önlemede hata-zaman grafiği .....	78
Şekil 90 Delta 1 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önlemede torpido-gemi mesafesi grafiği .....	79
Şekil 91 Delta 2 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önleme .....	79

Şekil 92	Delta 2 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önlemede hata-zaman grafiği.....	80
Şekil 93	Delta 2 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önlemede torpido-gemi mesafesi grafiği.....	80
Şekil 94	Delta 3 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önleme .....	81
Şekil 95	Delta 3 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önlemede hata-zaman grafiği.....	81
Şekil 96	Delta 3 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önlemede torpido-gemi mesafesi grafiği.....	82
Şekil 97	Delta 4 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önleme .....	82
Şekil 98	Delta 4 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önlemede hata-zaman grafiği.....	83
Şekil 99	Delta 4 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önlemede torpido-gemi mesafesi grafiği.....	83
Şekil 100	Delta 5 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önleme .....	84
Şekil 101	Delta 5 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önlemede hata-zaman grafiği.....	84
Şekil 102	Delta 5 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önlemede torpido-gemi mesafesi grafiği.....	85
Şekil 103	Delta 6 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önleme .....	85
Şekil 104	Delta 6 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önlemede hata-zaman grafiği.....	86
Şekil 105	Delta 6 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önlemede torpido-gemi mesafesi grafiği.....	86
Şekil 106	Delta 7 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önleme .....	87
Şekil 107	Delta 7 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önlemede hata-zaman grafiği.....	87
Şekil 108	Delta 7 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önlemede torpido-gemi mesafesi grafiği.....	88
Şekil 109	Delta 8 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önleme .....	88
Şekil 110	Delta 8 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önlemede hata-zaman grafiği.....	89

Şekil 111 Delta 8 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önlemede torpido-gemi mesafesi grafiği .....	89
Şekil 112 Delta 1 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önleme .	91
Şekil 113 Delta 1 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önlemede hata-zaman grafiği.....	91
Şekil 114 Delta 1 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önlemede torpido-gemi mesafesi grafiği .....	92
Şekil 115 Delta 2 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önleme .	92
Şekil 116 Delta 2 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önlemede hata-zaman grafiği.....	93
Şekil 117 Delta 2 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önlemede torpido-gemi mesafesi grafiği .....	93
Şekil 118 Delta 3 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önleme .	94
Şekil 119 Delta 3 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önlemede hata-zaman grafiği.....	94
Şekil 120 Delta 3 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önlemede torpido-gemi mesafesi grafiği .....	95
Şekil 121 Delta 4 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önleme .	95
Şekil 122 Delta 4 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önlemede hata-zaman grafiği.....	96
Şekil 123 Delta 4 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önlemede torpido-gemi mesafesi grafiği .....	96
Şekil 124 Delta 5 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önleme .	97
Şekil 125 Delta 5 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önlemede hata-zaman grafiği.....	97
Şekil 126 Delta 5 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önlemede torpido-gemi mesafesi grafiği .....	98
Şekil 127 Delta 6 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önleme .	98
Şekil 128 Delta 6 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önlemede hata-zaman grafiği.....	99
Şekil 129 Delta 6 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önlemede torpido-gemi mesafesi grafiği .....	99
Şekil 130 Delta 7 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önleme	100

Şekil 131 Delta 7 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önlemede hata-zaman grafiği .....	100
Şekil 132 Delta 7 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önlemede torpido-gemi mesafesi grafiği.....	101
Şekil 133 Delta 8 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önleme	101
Şekil 134 Delta 8 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önlemede hata-zaman grafiği .....	102
Şekil 135 Delta 8 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önlemede torpido-gemi mesafesi grafiği.....	102



## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1 Delta ağırlıklandırma fonksiyonlarının tanımı .....	35
Çizelge 2 Sabit hızlı hedefe arkadan atışta oluşan ıskalama mesafeleri ve önleme zamanları.....	50
Çizelge 3 Sabit hızlı hedefe yandan atışta oluşan ıskalama mesafeleri ve önleme zamanları.....	63
Çizelge 4 Sabit hızlı hedefe önden atışta oluşan ıskalama mesafeleri ve önleme zamanları.....	76
Çizelge 5 Sabit hedefe atışta oluşan ıskalama mesafeleri ve önleme zamanları .....	90
Çizelge 6 İvmeli hedefe yandan atışta oluşan ıskalama mesafeleri ve önleme zamanları .....	103
Çizelge 7 Farklı yaklaşma hızları için sabit hızlı hedefe önden atışta oluşan ıskalama mesafeleri ve önleme zamanları.....	105
Çizelge 8 Farklı yaklaşma hızları için sabit hızlı hedefe yandan atışta oluşan ıskalama mesafeleri ve önleme zamanları.....	106
Çizelge 9 Farklı yaklaşma hızları için sabit hızlı hedefe önden atışta gerçekçi senaryolarda oluşan ıskalama mesafeleri ve önleme zamanları.....	108
Çizelge 10 Farklı yaklaşma hızları için sabit hızlı hedefe yandan atışta gerçekçi senaryolarda oluşan ıskalama mesafeleri ve önleme zamanları.....	109
Çizelge 11 Farklı yaklaşma hızları için sabit hızlı hedefe arkadan atışta gerçekçi senaryolarda oluşan ıskalama mesafeleri ve önleme zamanları.....	110

## SÖZLÜKÇE

Aktif Hedef Takibi	Active Target Tracking
Algılayıcı	Sensor
Angajman	Engagement
Arayıcı Başlık	Seeker
Başarım	Performance
Çapraz Eş Değişinti	Cross Covariance
Değişinti	Variance
Denetlenebilirlik	Controlability
Deniz Harbi	Naval Warfare
Doppler Hızı	Doppler Velocity
Durum Geçiş Matrisi	State Transition Matrix
Durum Uzayı	State-Space
Durum Vektörü	State Vector
Elektronik Destek Sistemi	Electronic Support Measure
Elektronik Karşı Tedbir	Electronic Countermeasure
En Küçükleme	Minimization
Eş Değişinti	Covariance
Etkileşimli Çoklu Model	Interacting Multiple Model
Genişletilmiş Kalman Filtresi	Extended Kalman Filter (EKF)
Girdi Kazanç Matrisi	Input Gain Matrix
Görüş Hattı	Line of Sight
Gözlenebilirlik	Observability
Güdümlü Sabiti	Navigation Constant
Hedef Hareket Analizi	Target Motion Analysis

Hedef Hareket Modeli	Target Motion Model
Hedef Önleme	Target Interception
Hedef Takibi	Target Tracking
İlinti	Correlation
İtki Sistemi	Propulsion System
Kalman Filtresi	Kalman Filter (KF)
Karşı Tedbir	Countermeasure
Kesikli Zaman	Discrete Time
Kestirim	Estimation
Kızılötesi	Infrared
Kokusuz Kalman Filtresi	Unscented Kalman Filter
Kontrol Girdi Vektörü	Control Input Vector
Kutupsal	Polar
Menzil Parametrelili EKF	Range-parameterised EKF
Minimum Ortalama Kareysel Hata	Minimum Mean Square Error
Sözde Ölçümlü KF	Pseudo Measurement KF
Oransal Seyir Güdümü	Proportional Navigation Guidance
Ölçüm Gürültüsü	Measurement Noise
Ölçüm Matrisi	Measurement Matrix
Ölçüm Vektörü	Measurement Vector
Önleme	Interception
Özdeğer	Eigenvalue
Parazit Yankı	Clutter
Parçacık Filtresi	Particle Filter
Pasif Hedef Takibi	Passive Target Tracking
İskalama mesafesi	Miss Distance

Savaş Başlığı	Warhead
Süreç Gürültüsü	Process Noise
Uyarlanmış Kutupsal Koordinatlar	Modified Polar Coordinates
Yaklaşma Hızı	Closing Velocity
Yalnızca Yönel İzleme	Bearings Only Tracking
Yanca	Azimuth
Yanca Açısı	Azimuth Angle
Yer Merkezli Yer Sabit	Earth Centered Earth Fixed
Yinelemeli	Recursive
Yükseliş	Elevation
Yükseliş Açısı	Elevation Angle



## KISALTMALAR

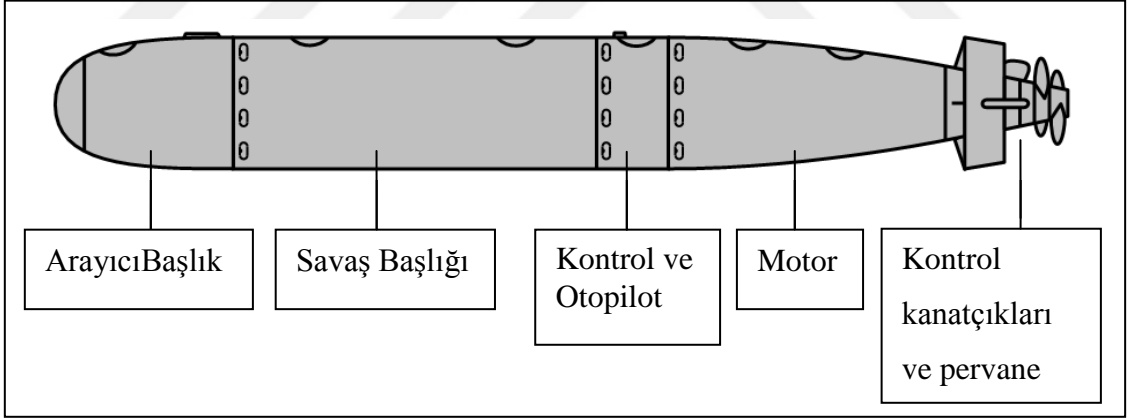
### Kısaltmalar

ECEF	Yer Merkezli Yer Sabit
ECM	Elektronik Karşı Tedbir
EKF	Genişletilmiş Kalman Filtresi
ESM	Elektronik Destek Sistemi
Eş Değiş.	Eş Değişinti Matrisi
HOT	Yüksek Dereceli Terimler
IMM	Etkileşimli Çoklu Model
IR	Kızılötesi
KF	Kalman Filtresi
MMSE	Minimum Ortalama Karesel Hata
TMA	Hedef Hareket Analizi
UKF	Kokusuz Kalman Filtresi

# 1. GİRİŞ

Deniz harbinde önemli yer tutan torpidolar; savaş gemilerinden, denizaltılardan hatta uçaklardan atılabilen güdümlü mühimmatlardır. Torpidolar su altından giderek düşman gemisine saldırırlar. İlk modern torpido, 1866 yılında Robert White tarafından İngiltere’de geliştirilmiştir. Özellikle 2. Dünya savaşından sonra torpidolar donanmaların en etkin silahları olmuştur [1].

Torpidolar genel olarak beş kısımdan oluşur. Ön kısmında hedefi tespit eden ve güdüm sinyallerini üreten arayıcı başlık bloğu vardır. Onun ardında hedefe çarpınca ya da hedef manyetik alanıyla tetiklenerek patlayıp hedefe hasar verecek olan savaş başlığı bulunmaktadır. Bir sonraki blok kontrol kanatçıklarına güdüm komutları doğrultusunda sinyal sağlayan kontrol ve otopilot bloğudur. Daha sonraki blok ise itki sistemi motorunu içermektedir. Modern torpidolarda bu motorlar torpidonun hızını 60 knots’a kadar çıkarabilmektedir. Son blokta ise kontrol ve otopilot bloğundan aldığı komutlarla torpidoya yön veren kontrol kanatçıkları ve itkiyi sağlayan pervane bulunmaktadır.



Şekil 1 Torpido yapısı

Günümüzde modern torpido sistemleri akustik arayıcı başlıklarla donatılmıştır. Akustik arayıcı başlıklar aktif veya pasif arayıcı olarak ikiye ayrılırlar. Bunun haricinde kablo ile güdümlenen torpido modelleri de vardır. SONAR olarak adlandırılan aktif başlık, akustik sinyal yayarak ve hedeften yansıyan sinyalleri sezimleyerek, hedefin hem mesafe bilgisini hem de yönünü belirleyebilirler. Fakat aktif akustik yayın yapan bu başlığın düşman hedefine yakalanma ve karşı tedbir uygulanarak karıştırılma ihtimali vardır. Pasif arayıcı ise sadece hedeften gelen akustik sinyalleri dinler. Dolayısıyla pasif

arayıcılar hedef hakkında sadece yön bilgisi (bearings only) üretebilirler. SONAR tabanlı birçok sistem yükseliş açısını ölçmez, sadece yanca açığı ölçerler. Ölçülen bu yanca açığı kullanılarak pasif hedef takibi yapılmaya çalışılır. Fakat bu tür hedef takibinde bazı zorluklar mevcuttur. Pasif arayıcıya sahip torpido ile daha iyi takip yapabilmek ve hedefin gözlenebilirliğini arttırmak için, torpidonun hedefe göre daha manevralı hareket yapması gerekmektedir [2].

Torpidoların başarımını tüm alt sistemleri beraber belirler. Bunlar arasında en önemlilerinden biri de güdüm bloğudur. Güdüm bloğunun hedefe önleme yapacak şekilde torpidoyu yönlendirmesi gerekmektedir. Burada en kritik olansa hedef hakkında mümkün olduğunca fazla bilgiye sahip olabilmektir. Bu doğrultuda torpido, hedeften en çok fayda sağlayacak bilgiyi toplaması için farklı torpido hareket modelleri kullanabilir. Torpidonun başarımında kendi iç dinamikleri kadar, torpido hedef geometrisi de oldukça etkin rol oynar.

Hedef önleminde en yaygın kullanılan güdüm yöntemlerinden biri oransal seyir güdümüdür. Oransal seyir güdümünün oldukça basit ve kolay uygulanabilir bir yapısı vardır. Diğer güdüm yöntemlerine göre daha başarılı sonuçlar verebilmektedir [3]. Güdüm bloğundan çıkan güdüm komutları otopilot bloğuna gönderilerek, torpidonun hedefe önleme yapması sağlanmaktadır. Dolayısıyla güdüm bloğunda üretilen güdüm komutları, torpidonun başarımına doğrudan etki etmektedir. Oransal seyir güdümünde torpido - hedef yaklaşma hızı önem arz etmektedir. Pasif arayıcı başlığa sahip torpidolarda oransal seyir güdümünde genelde sabit bir torpido-hedef yaklaşma hızı kullanılmaktadır. Fakat pasif hedef takibi yöntemleriyle hedefin konumu ve hızı kestirilirse, torpido-hedef yaklaşma hızı hesaplanabilir ve oransal seyir güdümüne girdi olarak verilebilir. Bu da torpidonun hedef ıskalama mesafesi başarımını etkiler.

### **1.1. Hedef Takibi**

Genel olarak hedef takibi, aktif hedef takibi ve pasif hedef takibi olarak ikiye ayrılır. Aktif algılayıcılar (arayıcı başlık) aracılığıyla yapılan izlemeye aktif hedef takibi, pasif algılayıcılar aracılığıyla yapılan izlemeye ise pasif hedef takibi denir.

Aktif izlemede başarımlar pasif izlemeye göre daha fazladır. Çünkü aktif izlemede algılayıcının sağladığı bilgi daha fazladır. Mesela, aktif algılayıcılar menzile, menzile

değişim oranı (doppler hızı), yanca ve yükseliş açısı gibi bilgiler verirken, pasif akustik algılayıcılar ise yalnızca yanca açısı verirler.

İzleme algoritmalarının başarımında algılayıcının konuşlandığı platformun yörüngesi, manevrası, hedefin yörüngesi, manevrası, ortam gürültü yoğunluğu, parazit yankı yoğunluğu ve benzeri etmenlerin etkisi vardır. Bunların birçoğuna doğrudan müdahale edilememektedir. Başarımı arttırmak için müdahale edilebilecek etmenleri optimize etmeye çalışmak en tutarlı yoldur. Bunlar ise platformun yörüngesi, manevrası, algılayıcının hassasiyeti, doğruluğu ve takip algoritmasıdır.

## **1.2. Tezin Amacı**

Pasif arayıcı başlığa sahip torpidolar için torpido-hedef yaklaşma hızı bilinmemektedir. Eğer hedefin konumu ve hızı kestirilebilirse torpido güdümünde kullanılmak üzere torpido-hedef yaklaşma hızı hesaplanabilir. Bu doğrultuda hedefin konum ve hız kestirimi için pasif hedef takibi yöntemleri incelenecektir. Pasif hedef takibi, pasif algılayıcılardan (ESM, IR, Pasif Sonar) gelen ölçümler kullanılarak yapılan takip işlemidir. Pasif algılayıcılar, aktif radarlar gibi sinyal gönderip almak yerine, hedefin yaydığı sinyalleri (frekans, gürültü, sıcaklık, v.b.) sezimlerler. Sezimlenen bu sinyaller aracılığıyla hedefin yönünü belirlemeye çalışırlar. Elde edilen bu yön bilgisiyle hedefin yeri tespit edilmeye çalışılır. Yalnız yanca açısını kullanarak kestirim yapmak zor bir problemdir. Gözlenebilirlik sorunundan dolayı her zaman tutarlı sonuçlar elde edilemeyebilir. Çünkü pasif hedef takibinin başarımı birçok parametreye bağlıdır. Bunlar algılayıcının bulunduğu platformunun manevrası, hedefin manevrası, gelen ölçümdeki hata, izleme algoritmasının başarımı, ortamın gürültü yoğunluğu, hedefin uyguladığı karşı tedbir sistemlerinin etkisi gibi sıralanabilir. Bunların yanında hedeften ölçüm almak için hedefe hangi açıdan baktığımız da takip başarımı için çok önemlidir. Bu problemin çözümü için öncelikle temel takip algoritmaları üzerinden geçilecektir. Daha sonra pasif hedef takibi ve yöntemleri hakkında bilgi verilecektir. İki farklı pasif izleme algoritması kullanılarak, en iyi izleme açısının ne olduğunu simülasyonlarla gösterilecektir. Bir diğer deyişle, platformun yörüngesini daha iyi bir izleme yapabilmek için nasıl optimize edileceği anlatılacaktır.

Takip yapan platformun yörüngesi takibin kalitesini arttıracak yani kestirim hatasını küçültecek şekilde optimize edildikten sonra, hedefe doğru önleme yapabilmek için gerekli manevranın hesaplanması gerekmektedir. Daha önce bahsedildiği üzere oransal seyir güdümü hedefe en iyi önleme sağlayan güdüm yöntemlerinden biridir. Fakat bu yöntem için torpido-hedef yaklaşma hızı önem arz etmektedir. Pasif arayıcıya sahip platformlarda bu hızı kestirmek mümkün değildir. Genellikle önceden belirlenmiş ortalama yaklaşma hızı gibi yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada, pasif hedef takibi yaparak hedef hakkında elde edilen bilgiden faydalanıp torpido-hedef yaklaşma hızı hesaplanacaktır. Ardından hibrit bir güdüm yöntemi önerilerek sabit yaklaşma hızı ile kestirilmiş yaklaşma hızı kullanımı karşılaştırılacaktır. Bu iki farklı yaklaşma hızının torpidonun başarımına etkisi analiz edilecektir.

### **1.3. Literatür Taraması**

Pasif izlemede amaç, sadece hedefin hangi yönde olduğu ölçülebilen durumlarda hedefi izlemektir, yani konumunu belirleyebilmektir. Literatürde bu problemin hedef hareket analizi (Target Motion Analysis, TMA) olarak geçtiği de görülür [4, 5, 6, 7, 8]. Hedef hareket modelleri bölüm 3.5'de daha ayrıntılı incelenecektir. Hedef takip algoritmasında kullanılan hareket modelinin doğru seçilmesi, hedef takibi açısından oldukça önemlidir. Bu bağlamda hareket modeli bilinmeyen hedefler için farklı hareket modelleri üzerinden hedef takibi yapıp, bu hedef kestirimleri olasılıksal olarak birleştirilerek daha iyi bir kestirim elde edilmesi sağlanır. Literatürde bu yaklaşım etkileşimli çoklu model (IMM) filtrelemesi olarak geçmektedir [9]. Pasif izlemede modeller doğrusal olmadığından ve bazı 'gözlenebilirlik' sorunları nedeni ile uygulamalar sorunlu olmaktadır [8]. Özellikle gözlem yapan platformun manevra yapmaması durumunda hedef menzili bulunamamaktadır.

Çeşitli kaynaklar hedefin konumunu sağlıklı bir biçimde belirleyebilmek için platformun hedefe göre daha keskin manevralar yapması gerektiğini belirtmektedir [8, 10]. Platform hedefe göre daha keskin manevralar yapmazsa gözlenebilirlik problemi ortaya çıkar [8, 11].

Literatüde bulunan bazı pasif hedef takibi yöntemleri:

- Genişletilmiş Kalman Filtresi (EKF)

- Uyarlanmış kutupsal koordinatlarda EKF (Modified Polar Coordinates EKF)
  - Menzil parametrelili EKF
  - Söзде ölçümlü KF (Pseudo Measurement KF)
  - Kokusuz Kalman Filtresi (Unscented Kalman Filter)
  - Parçacık Filtresi (Particle Filter)
- olarak sıralanabilir.

Bu algoritmaların hepsini incelemek bu tez çalışmasının hedeflerinin ötesinde olduğu için bazıları üzerinde kısaca bilgi verilip, üzerinde çalışılacak olan Genişletilmiş Kalman Filtresi ve Söзде Ölçümlü Kalman Filtresi algoritmaları ayrıntılı olarak incelenecektir.

Kartezyen koordinatlarda pasif izlemede ölçüm fonksiyonu doğrusal değildir. Uyarlanmış kutupsal koordinatlarda ise durum vektörü kutupsal koordinatlarda tanımlandığı için durum geçiş matrisi doğrusal değildir. Fakat uyarlanmış kutupsal koordinat sisteminde ölçüm fonksiyonu doğrusal olmaktadır [4, 12].

Menzil parametrelili EKF’de ise, menzil bilinmediği için, önceden belirlenmiş farklı menzil değerleri için ayrı ayrı EKF ile takip yapılır. Takip sonunda çıkan durum kestirimleri olasılıksal olarak birleştirilir [2, 7, 13, 14].

Kokusuz Kalman filtresinde ise rastgele bir değişken olan  $x$  durum vektörünün ortalama değeri etrafında normal dağılıma sahip özel noktalar (sigma points) oluşturulur. Ardından bu özel noktalar belirli ağırlıklarla çarpılarak durum vektörünün doğru kestirilmesi amaçlanır. Yani bu özel noktalar sayesinde durum vektörü kestirilmiş olur [15].

Parçacık Filtresinde belirli bir olasılık yoğunluk fonksiyonuna sahip parçacıklar üzerinden hedef takibi yapılır. Bu parçacık izleri belirli ağırlıklar kullanılarak birleştirilip nihai kestirim bulunur ve tekrar örnekleme yapılarak yeni parçacıklar hesaplanır. Bu süreç yinelemeli olarak devam eder ve işlem yükü oldukça fazladır [2, 14].

Pasif Torpido güdümünde hedefin yönünün kestirimi oldukça önem arz etmektedir. Özellikle su altındaki akustik gürültü sinyalleri ve başka etmenler torpidonun yanlış tespit yapmasına vesile olabilir ve ıskalama mesafesi başarımını düşürebilir. Ayrıca

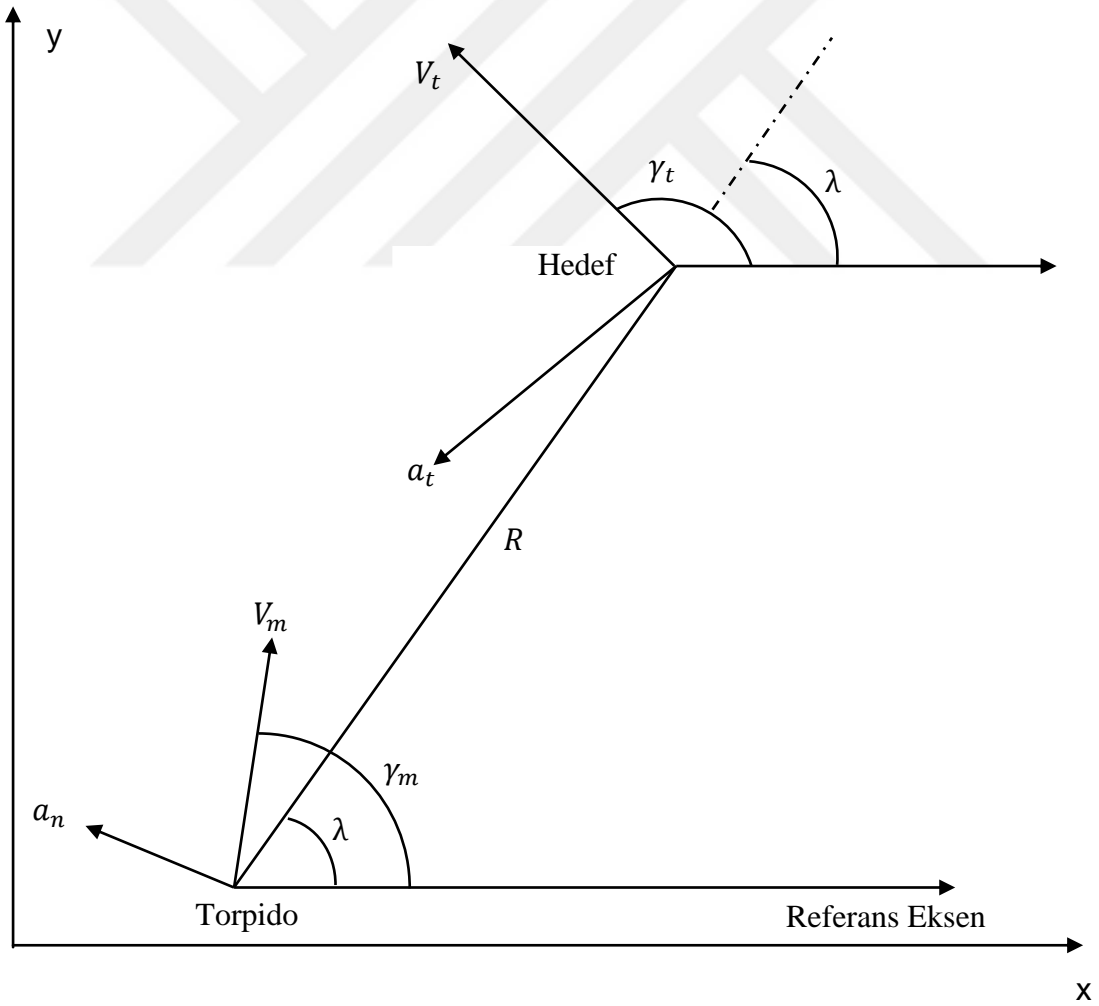
hedef hızının, hedef mesafesinin, hedef manevrasının, torpido parametrelerinin torpido başarımı üzerinde etkisi vardır [16].

Bazı torpidolar üzerindeki ataletsel seyri-sefer sistemleri ile hedefe belirli bir mesafe yaklaşp daha sonra arayıcı başlıklarını açarak hedefi bulmaya çalışırlar. Arayıcı başlık açıldığı zaman hedef belirli bir menzil ve açı penceresi içerisinde aranır ve torpidolar bulunan hedeften gelen akustik sinyalleri sezimleyerek hedefe doğru güdümlenirler. Bazı torpidolar ise atıldığı andan itibaren hedefe doğru güdümlenirler [17].



## 2. PASİF GÜDÜM

Günümüzde en çok kullanılan güdüm yöntemlerinden biri oransal seyir güdümüdür. Çünkü kolay uygulanabilmesi ve başarımının iyi olması tercih edilme sebeplerinin başında gelir [3]. Klasik oransal seyir güdümü basitçe açıklanacak olursa, birbirine yaklaşan iki cisim varsa ve bu iki cismin görüş hattı açısı değişmiyorsa, bu iki cisim bir müddet sonra çarpışacaktır. Diğer bir deyişle oransal seyir güdümü, torpidonun doğrultusunu görüş hattı değişimiyle yönlendirerek, manevrasız hedeflere karşı görüş hattı değişimini sıfırlamaya çalışır. Örneğin; oransal seyir güdümüyle giden bir torpido, oluşacak herhangi bir görüş hattı değişimini sıfırlamaya çalışır. Füzeler ve torpidolar bu işi, kanatçıklara belirli bir sapma vererek yapmaktadır [18]. Kanatçıklardaki bu sapma, füzenin veya torpidonun anlık hız vektörüne dik bir ivmeye sebep olur. Dolayısıyla torpido, üzerinde oluşan bu  $g$  ile görüş hattı değişimini sıfırlamaya çalışır.



Şekil 2 Oransal seyir güdümünün türetildiği geometri



Şekil 2'deki parametreler aşağıda açıklanmıştır.

$R$  : Torpido – hedef arası mesafeyi

$V_m$  : Torpido hızını

$V_t$  : Hedef hızını

$\lambda = \tan^{-1}((y_t - y_m)/(x_t - x_m))$  : Görüş hattı açısını

$\gamma_m$ : Torpido uçuş yolu açısını (torpido hız vektörü ile referans eksen arasında kalan açı)

$\gamma_t$ : Hedef uçuş yolu açısını

belirtmektedir.

Anlatılan bu duruma göre oransal seyir güdümü eşitliği,

$$a_n = N V_c \left( \frac{d\lambda}{dt} \right) \quad (1)$$

şeklinde yazılır. Burada;

$a_n$  : Torpido hız vektörüne dik ivmeyi

$N$  : Güdüm sabitini

$V_c = V_m - V_t$  : Torpido- hedef yaklaşma hızını

$\frac{d\lambda}{dt}$  : Torpido – hedef görüş hattı değişimini

gösterir.

Oransal güdüm faktörü, güdüm sabiti, yaklaşma hızı çarpanı ve geometrik kazanç faktörü olan torpido – hedef görüş hattı değişiminden oluşur. Güdüm sabiti  $N$ , torpidonun manevra gereksinimine göre değişir ve hedefin manevrasına ve sisteme etki eden diğer izleme hatalarına bağlıdır. Torpidonun manevra gereksinimlerini azaltmak için güdüm sabiti  $N$ , 3 ile 5 arasında bir değer kabul edilebilir. Birçok uygulamada güdüm sabiti tam sayı değere sahip olacak şekilde kullanılır. Bu çalışma boyunca oransal seyir güdüm sabiti  $N = 3$  olarak alınacaktır.

Temel olarak oransal seyir denklemlerinin türetilmesi kolaydır. Ayrıca doğru analitik çözüm, sınırlı ve özel koşullarda mevcuttur. Doğru çözümün elde edilemediği durumlarda birçok yaklaşım mevcuttur. Şekil 2'de görüldüğü üzere bir torpido güdüm yaklaşımında oransal seyir problemi, torpido üzerindeki güdüm bloğu tarafından

çözömlenir. Torpido-hedef yaklaşma hızı da önem arz etmektedir. Yaklaşma hızı ne kadar fazla ise torpidonun da o derece daha yüksek manevra yapma ihtiyacı doğar.

Oransal seyir güdümde, görüş hattı açısının dönüş oranı, torpido üzerindeki referans eksene göre yapılır. Önleyici füze veya torpidonun manevra yapmasını sağlayan ivme, torpido hız vektörüne dik olacak şekilde uygulanır. Torpidonun manevra yapması, hız vektörü ile görüş hattı arasında bir açı oluşmasına vesile olur. Tüm bunların yanında oransal seyir güdümü birçok angajman koşulunda oldukça başarılı sonuç verse de, çok yüksek manevra kabiliyetine sahip hedefler için başarımı düşmektedir. Literatürde oransal seyir güdümü türevleri de mevcuttur [19, 20, 21, 22].

Oransal seyir güdümünde arayıcı başlıktan gelen kritik güdüm sinyali hedef-görüş hattı açısının değişim oranıdır. Yön izleme yeteneğine sahip bir arayıcı başlığın torpido gövdesine göre açısal hızını ölçmek bunun için yeterlidir. Bu nedenle, oransal seyir güdüm sadece açısal izleme yapan bir arayıcı başlık ile gerçekleştirilebilir; mesafe bilgisine ihtiyaç duyulmaz. Pasif bir arayıcı başlık ile torpido-hedef yaklaşma hızını ölçmek mümkün değildir. Ancak, oransal seyir güdümü gerçek yaklaşma hızı yerine, sabit ve yaklaşık bir yaklaşma hızı esas alındığında da başarı ile çalışmaktadır. Torpido-hedef yaklaşma hızının bilinmesi torpido ıskalama mesafesi başarımına etki edebilmektedir. Bu doğrultuda pasif hedef takibi yöntemleriyle hedefin konumu kestirilebilir ve buradan da torpido-hedef yaklaşma hızı hesaplanabilir.

### 3. PASİF HEDEF TAKİBİ

#### 3.1. Hedef Takibi

Hedef takibi, hedeften alınan ölçümlerle hedefin durum kestirimini yapmak, konumunu ve/veya hızını belirlemek olarak açıklanabilir. Bu takip, hareketli veya sabit platform üzerinden bulunan algılayıcılar üzerinden alınan ölçümlerle olabilir [10].

Savaş gemileri genelde sabit hızla giden platformlardır. Elektronik karşı tedbire (ECM) maruz kalmamak için torpidolar, pasif arayıcı SONAR başlıkları kullanırlar. Aktif arayıcı başlıklarda hedefin hem menzili hem de yanca açısı elde edilebilirken, pasif arayıcılarda sadece hedef yanca açısı elde edilebilmektedir. Sadece hedefin yanca açısının bilindiği durumda hedef takibinin başarımı, hedef hakkında elde edilen ölçümler kullanılarak hedefin durumu vektörünün en iyi şekilde kestirimi ile mümkündür. Hedef takip algoritmalarında, takip edilecek hedefin hareket modeli de önem arz etmektedir. Hedef dinamik modeli hedef hareketi ile ne denli örtüşürse, kestirimin kalitesi o denli yüksek olur [5, 23].

Bu çalışmada hedef platformun noktasal bir kaynak olduğu değerlendirilmiş ve pasif arayıcılardan alınan ölçümlerin sıfır ortalamalı Gauss dağılımlı bir gürültü etkisi altında olduğu varsayılmıştır. Hedef takibi amacıyla gürültülü ölçümleri kullanarak Kalman filtresiyle kestirim yapmak, kestirim hatasını en küçükleme yöntemlerinin temelini oluşturmaktadır [10].

#### 3.2. Doğrusal Sistem Modellemesi

Hedef takibinde Kalman filtresi kullanabilmek için takip edilen hedefin durum ve ölçüm fonksiyonunun doğrusal olması gerekmektedir. Kesikli zamanda doğrusal olasılıksal sistem modeli:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{F}(k) \mathbf{x}(k) + \mathbf{G}(k) \mathbf{u}(k) + \mathbf{v}(k) \quad (2)$$

$$\mathbf{z}(k) = \mathbf{H}(k) \mathbf{x}(k) + \mathbf{w}(k) \quad (3)$$

şeklindedir. Burada;

$\mathbf{x}(k)$  : durum vektörü

$F(k)$  : doğrusal durum geçiş matrisi

$z(k)$  : ölçüm vektörü

$H(k)$  : doğrusal ölçüm matrisi

$G(k)$  : girdi kazanç matrisi

$u(k)$  : kontrol girdi vektörü

$v(k)$  : sıfır ortalamalı beyaz Gauss dağılımlı süreç gürültüsü

$w(k)$ : sıfır ortalamalı beyaz Gauss dağılımlı ölçüm gürültüsü

olarak tanımlanmaktadır.

Bu doğrusal olasılıksal sistem modelinde,

süreç gürültü eş değişinti matrisi  $E[v(k)v^T(k)] = Q(k)$ ,

ölçüm gürültü eş değişinti matrisi  $E[w(k)w^T(k)] = R(k)$  olarak alınacaktır.

Kalman filtresi ise kısaca, o andaki durum vektörünü ( $x(k|k)$ ) ve eş değişinti matrisini ( $P(k|k)$ ) kullanarak ve gelen ölçümleri değerlendirerek, bir sonraki durum vektörünü ( $x(k+1|k+1)$ ) ve eş değişinti matrisini ( $P(k+1|k+1)$ ) kestirir. Kalman filtresiyle takip ile ilgili daha ayrıntılı bilgi bölüm 3.6'da verilmiştir.

### 3.3. Doğrusal Olmayan Sistem Modellemesi

Torpedo ile pasif izlemede hedefin sadece yanca açısı ölçülebilmektedir ve ölçülen bu açı da hedef konumundan türetilen doğrusal olmayan bir fonksiyondur.

$$\beta(k) = \tan^{-1}(x_k/y_k) \quad (4)$$

Burada;

$\beta(k)$  : hedefin yanca açısını

$x_k$  : hedefin x koordinatındaki göreceli konumunu

$y_k$  : hedefin y koordinatındaki göreceli konumunu

göstermektedir.

Dolayısıyla pasif izlemede doğrusal olmayan ölçüm mevcut olduğu için Kalman filtresini doğrudan kullanılamamaktadır. Doğrusal olmayan olasılıksal sistem ise şu şekilde modellenebilir:

$$\mathbf{x}(k + 1) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k), \mathbf{v}(k)) \quad (5)$$

$$\mathbf{z}(k) = \mathbf{h}(\mathbf{x}(k), \mathbf{w}(k)) \quad (6)$$

Burada  $\mathbf{f}$  veya  $\mathbf{h}$  fonksiyonlarından en az biri doğrusal olmadığında, dinamik sistem doğrusallık özelliğini kaybeder. Sistem modeli doğrusal değilse lokal doğrusallaştırmalarla doğrusal hale getirilip Kalman filtresi kullanılabilir. Bu filtrenin adı genişletilmiş (extended) Kalman filtresidir (EKF) [10].

EKF 'de amaç doğrusal olmayan sistem hareket modelini doğrusal hale getirmeye çalışmaktır. Böylece Kalman filtresi için yapılan doğrusal sistem varsayımları altında kullanılabilir. Bunun için doğrusal olmayan dinamiklerin 1. derece türevi alınarak bu dinamikler zamanla değişen doğrusal parçacıklara bölünür, böylece standart Kalman filtresi uygulanabilir hale getirilir [10]. Bu doğrusallaştırma işlemi için doğrusal olmayan vektörlerin Jacobianı alınır. Eşitlik ( 5 )'te kullanılan doğrusal olmayan  $\mathbf{f}(k)$  vektörünün Jacobianı aşağıda gösterildiği gibi alınarak doğrusallaştırılır:

$$\mathbf{f}_x(k) = \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x} = \mathbf{x}_k} \quad (7)$$

Aynı şekilde eşitlik ( 6 )'da doğrusal olmayan  $\mathbf{h}(k)$  vektörünün Jacobianı aşağıdaki gösterildiği gibi alınarak doğrusallaştırılır:

$$\mathbf{h}_x(k) = \left. \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x} = \mathbf{x}_k} \quad (8)$$

Bu doğrusallaştırılmış modelden sonra, standart Kalman filtresi işlemleri uygulanır [24]. Bu doğrultuda, hedef takibi yapmak amacıyla doğrusal olmayan durum veya ölçüm fonksiyonunun doğrusallaştırılıp kullanıldığı EKF türevi birçok uygulama mevcuttur.

### 3.4. Denetlenebilirlik ve Gözlenebilirlik Kavramları

Daha önce kesikli zamanda doğrusal durum sistemi eşitlik ( 2 )'de verilmişti. Kesikli zamanda kararlı bir sistemin tamamen denetlenebilir olması, sistemin başlangıç değerinden nihai bir hedef değerine sınırlı sayıda adımla ulaşabilmesini gerektirir. Zamanla değişmeyen doğrusal bir sistem için denetlenebilirlik şartı  $\{F, G\}$  çiftinin denetlenebilir olmasıdır. Yani denetlenebilirlik matrisi,

$$Q_c = [G \ FG \ \dots \ F^{n_x-1}G] \quad (9)$$

$n_x$  boyutlu  $x(k)$  durum vektörü için en yüksek kerteğe (full rank) sahip olmalıdır [10].

Bir sistemin tamamen gözlenebilir olması ise, sistem çıkışından alınan sınırlı sayıda ölçüm ve girdi bilgileriyle, sistemin başlangıç durumunun elde edilebilmesini gerektirir. Eğer sistem gözlenebilir ise, başlangıç durumu herhangi bir durumundan elde edilebilir. Buradan eşitlik ( 2 ) ve ( 3 )'ün girdi ve çıktıları kullanılarak, ortamda hiç gürültü olmadığı durumda, sistem durumu tamamen bulunabilir. Zamanla değişmeyen doğrusal sistem için gözlenebilirlik şartı  $\{F, H\}$  çiftinin gözlenebilir olmasıdır. Yani gözlenebilirlik matrisi,

$$Q_o = \begin{bmatrix} H \\ HF \\ \vdots \\ HF^{n_x-1} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$n_x$  boyutlu  $x(k)$  durum vektörü için en yüksek kerteğe (full rank) sahip olmalıdır [10].

Özellikle pasif izlemede, gözlemci hedefe göre manevrasız hareket yaptığı durumlarda, hedef durum vektörü kestirilememektedir. Bu problemi aşmak için gözlemci hedefe göre daha manevralı hareket yapmalıdır [8, 25].

### 3.5. Hedef Hareket Modelleri

Hedef izlemede başarının anahtarı, gözlemlerden hedefin durumu hakkında en tutarlı ve etkili bilginin çıkartılmasıdır. Hedefin doğru modellenmesi, gözlemler kullanılarak daha doğru kestirimin yapılmasına yardımcı olacaktır. Bu yüzden hedef için doğru hareket modelinin seçilmesi büyük önem arz etmektedir.

Son yıllarda birçok matematiksel hedef hareket modeli geliştirilmiştir [10, 23]. Bunların arasından en yaygın olanları aşağıda açıklanacaktır.

Hedef dinamik modeli ya da hareket modeli hedef durum değişkeninin zamana göre değişimini gösterir. Üç boyutlu fiziksel dünyada hareketler, üç boyutlu konum ve hız vektörüyle modellenebilir. Örneğin kartezyen koordinatlarda, durum vektörü:

$$\mathbf{x}(k) = [x \ v_x \ y \ v_y \ z \ v_z]^T \quad (11)$$

şeklinde gösterilebilir. Burada  $(x, y, z)$ , kartezyen koordinatlarındaki  $x, y, z$ , konum bilgisini ve  $(v_x, v_y, v_z)$ , kartezyen koordinatlarındaki  $x, y, z$ , hız bilgisini vermektedir. Takip algoritmaları, hedefin hareketinin ve hedef gözlemlerinin bazı matematiksel modellerle doğru bir şekilde modellendiğini farz ederler. En yaygın kullanıma sahip durum uzayı (state-space) hareket modeli aşağıdaki gibidir.

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k)) + \mathbf{v}(k) \quad (12)$$

$$\mathbf{z}(k+1) = \mathbf{h}(\mathbf{x}(k)) + \mathbf{w}(k) \quad (13)$$

Yukarıdaki eşitliklerde;

$\mathbf{x}(k)$  : Hedef durum vektörü

$\mathbf{f}$  : Durum geçiş fonksiyonu

$\mathbf{u}(k)$  : Kontrol girdi vektörü

$\mathbf{w}(k)$  : Ölçüm gürültüsü

$\mathbf{v}(k)$  : Süreç gürültüsü

$\mathbf{z}(k)$  : Ölçüm vektörü

$\mathbf{h}$  : Ölçüm fonksiyonu

$k$  : Kesikli zaman indeksi

olarak tanımlanmıştır. Verilen bu genel bilgiler ışığında hareket modelleri aşağıdaki gibi açıklanabilir.

### 3.5.1. Sabit Hız Modeli

3 boyutta sabit hıza sahip bir hedefin sistem modellemesi eşitlik ( 2 ) ve eşitlik ( 3 ) kullanılarak doğrusal bir model ile gösterilebilir. Sistemi modellerken, sisteme dışarıdan bir girdinin etki etmediği farzedilip, kontrol girdi vektörü göz ardı edilmektedir.  $T$  örnekleme zamanına sahip sabit hız modellemesi aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\mathbf{x}(k+1) = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{x}(k) + \begin{bmatrix} T^2/2 & 0 & 0 \\ T & 0 & 0 \\ 0 & T^2/2 & 0 \\ 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & T^2/2 \\ 0 & 0 & T \end{bmatrix} \mathbf{v}(k) \quad (14)$$

Burada sistemin ivmesi süreç gürültüsü olarak kabul edilmiş ve örnekleme aralığı boyunca hedefin hızının sabit olduğu (çok değişmediği) varsayılmıştır.

### 3.5.2. Sabit İvme Modeli

Sabit ivme modelinde, sistemin ivmeli hareket yaptığı varsayılmıştır. Ayrıca sisteme dışarıdan süreç gürültüsü etki etmektedir. Aşağıda durum geçiş matrisinin büyüklüğünden dolayı 2 boyuttaki durum eşitliği yazılmıştır.

$$\mathbf{x}(k+1) = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^k \\ v_x^k \\ a_x^k \\ y^k \\ v_y^k \\ a_y^k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T^3/6 & 0 \\ T^2/2 & 0 \\ T & 0 \\ 0 & T^3/6 \\ 0 & T^2/2 \\ 0 & T \end{bmatrix} \mathbf{v}(k) \quad (15)$$

Bu farklı 2 hareket modelinin yanında literatürde tanımlanmış çok farklı hareket modelleri de mevcuttur [23]. Burada örnekleme aralığı boyunca hareket ivmesinin çok değişmediği varsayılmış ve  $(x, y)$  yönlerindeki Jerk süreç gürültüsü olarak modellenmiştir.

### 3.6. Doğrusal Kalman Filtresi

Kalman Filtresi ile nasıl kestirim yapılabileceği daha anlaşılır olması açısından bir örnek üzerinden anlatılacaktır. Bir teknede, gece yolculuk yaparken kaybedilen yolun



bulunmaya çalışıldığı bir durum varsayılmıştır. Yıldızların hareketinden yaklaşık yol tayini yapma kabiliyeti olduğu durumda, bir yıldız üzerinden sürekli ölçüm alınarak yer tahmini yapılmaya çalışılmaktadır. Problemin basitleştirilmesi adına tek boyutta kestirim yapıldığı varsayılmıştır. Bu durumda yapılan ölçümler  $z_1, z_2, z_3, z_4, z_5, \dots, z_n$  olsun. Yön tahminini, alınan ölçümlerin ortalamasının alınarak bulmaya çalışılan bir yöntem kullanılacaktır [26].

1) İlk ölçüm alındığında ortalaması kendisi olmaktadır.  $\mu_1 = z_1$

2) İkinci ölçüm alındığında ortalaması:  $\mu_2 = \frac{z_1 + z_2}{2}$

3) Üçüncü ölçüm alındığında ortalaması:  $\mu_3 = \frac{z_1 + z_2 + z_3}{3}$

4) n. ölçümü alındığında ortalaması:  $\mu_n = \frac{z_1 + z_2 + z_3 + \dots + z_n}{n}$  şeklinde yazılabilir.

Farklı bir yaklaşımla ölçümlerin değerlendirilip ortalamanın bulunduğu başka bir yöntem izlenebilir. Bu yöntemde, bir önceki ortalama ve o andaki alınan ölçümler ağırlıklandırılıp toplanarak nihai ortalamanın elde edildiği yinelemeli bir algoritma bulunacaktır.

1) İlk ölçüm alındığında ortalaması kendisi olmaktadır.  $\mu_1 = z_1$

2) İkinci ölçüm alındığında ortalaması :  $\mu_2 = \frac{\mu_1}{2} + \frac{z_2}{2}$

3) Üçüncü ölçüm alındığında ortalaması :  $\mu_3 = \frac{2\mu_2}{3} + \frac{z_3}{3}$

4) n. ölçümü alındığında ortalaması:  $\mu_n = \frac{(n-1)\mu_{n-1}}{n} + \frac{z_n}{n}$  şeklinde yazılabilir.

İkinci yaklaşımda genel formül tekrar yazılacak olursa:

$$\mu_n = \left(\frac{n-1}{n}\right)\mu_{n-1} + \left(\frac{1}{n}\right)z_n$$

$$\mu_n = \mu_{n-1} + \left(\frac{1}{n}\right)(z_n - \mu_{n-1}) \quad (16)$$

eşitliği elde edilmiş olur. Burada,

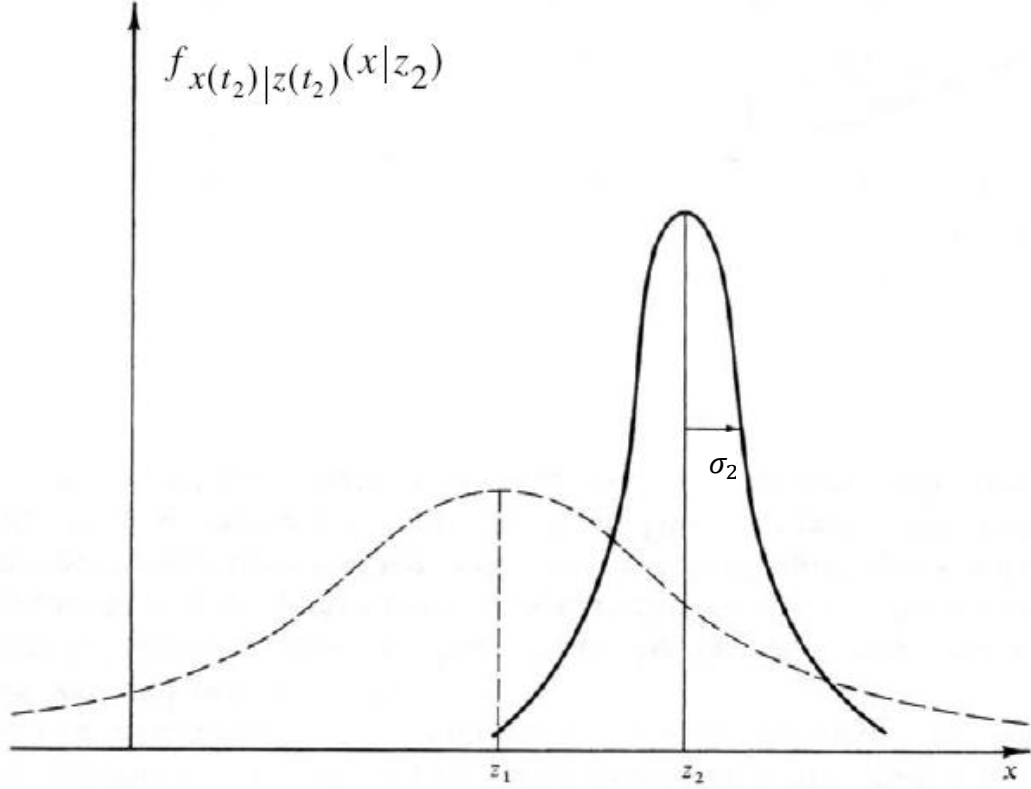
$\mu_{n-1}$  : Bir önceki kestirim

$\frac{1}{n}$  : Kazanç

$z_n$ : Gelen yeni ölçüm

$z_n - \mu_{n-1}$  : Gelen yeni ölçüm ve yapılan kestirim arasındaki fark olur.

Eğer iki ölçümü grafiksel olarak birleştirilmeye çalışılırsa; Şekil 3’de görüldüğü üzere, ilk gelen ölçüm; ortalaması  $z_1$ , belirsizliği  $\sigma_1$  olan Gauss dağılıma sahip olur. Aynı şekilde ikinci ölçüm; ortalaması  $z_2$ , belirsizliği  $\sigma_2$  olan Gauss dağılıma sahiptir.



Şekil 3  $z_1$  ve  $z_2$  ölçümleri için koşullu olasılık yoğunluk fonksiyonu [26]

Gelen iki ölçüm, ölçüm kazançları ile çarpılıp durum kestirimi yapılmaya çalışılırsa;

$$\mu = \varepsilon_1 z_1 + \varepsilon_2 z_2 \quad (17)$$

$\varepsilon_1$  :  $z_1$  ölçümünün kazancı,

$\varepsilon_2$  :  $z_2$  ölçümünün kazancı

olmak üzere eşitlik ( 17 ) yazılabilir.

İki Gauss dağılımına sahip fonksiyonu birleştirebilmek için, gelen ölçüm belirsizliklerinin ( $\sigma_1, \sigma_2$ ) normalize edilmesi ve kazançlarının belirlenmesi gerekmektedir. Buradaki yaklaşımda, belirsizliği ( $\sigma$ ) büyük olan ölçümün, kazancı

küçük; aynı şekilde belirsizliği küçük olan ölçümün kazancı büyük olduğu varsayılmıştır. İki Gauss dağılımının birleştirildiği durumda yeni dağılımın belirsizliği;

$$1/\sigma = 1/\sigma_1 + 1/\sigma_2 \quad (18)$$

eşitliğinden hesaplanır. Eşitlik ( 18 )'den eşitlik ( 17 )'de kullanılmak üzere ölçümlerin kazançları çıkarılacak olursa aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (19)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (20)$$

Eşitlik ( 19 ) ve ( 20 ), eşitlik ( 17 )'de yerine yazılacak olursa;

$$\mu = \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} z_1 + \frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} z_2 = z_1 + \frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} (z_2 - z_1) \quad (21)$$

eşitliği ile ölçümler ve belirsizlikleri cinsinden durum kestirimi yapılmış olur. Eşitlik ( 21 ) üzerinde yapılan analizde, birinci ölçümün belirsizliğinin ( $\sigma_1$ ) çok büyük olduğu varsayıldığında, ikinci ölçümün kazancı  $\left(\frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}\right) \cong 1$  olacaktır. Dolayısıyla ikinci gelen ölçüm ilkinе göre daha güvenli olacak ve kestirilen konum eşitlik ( 21 )'de kullanılarak,  $z_1 + 1(z_2 - z_1) = z_2$  olarak bulunacaktır. Tersini düşünülduğünde, ikinci ölçümün belirsizliği çok büyük olduğunda kazanç  $\left(\frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}\right) \cong 0$  olacaktır. Bu durumda ilk gelen ölçüm ikincisine göre daha güvenli olacak ve kestirilen konum eşitlik ( 21 )'de kullanılarak  $z_1 + 0(z_2 - z_1) = z_1$  olarak bulunacaktır. Kazancın değerinin “0” ile “1” arasında salınım yaptığı görülmektedir ve buna göre kestirilen yer optimize bir şekilde bulunmaya çalışılmaktadır.

Yukarıda anlatılan pratik örnekten hareketle, kuramsal olarak Kalman filtresinin incelemesi aşağıda yapılmıştır. Beyaz Gauss dağılımlı gürültüye sahip kesik zamanlı doğrusal dinamik bir sistem düşünülecek olursa; durum uzay modeli

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{F}(k) \mathbf{x}(k) + \mathbf{v}(k) \quad (22)$$

$$\mathbf{z}(k) = \mathbf{H}(k) \mathbf{x}(k) + \mathbf{w}(k) \quad (23)$$

şeklinde tanımlanabilir. Burada;

$\mathbf{x}(k)$  : Durum vektörünü

$\mathbf{F}(k)$  : Durum geçiş matrisini

$\mathbf{z}(k)$  : Ölçüm vektörü

$\mathbf{H}(k)$  : Ölçüm matrisini

$\mathbf{v}(k)$ : Süreç gürültüsünü

$\mathbf{w}(k)$ : Ölçüm gürültüsünü

ifade etmektedir.

Sıfır ortalamalı beyaz Gauss dağılımlı süreç gürültüsünün eş değişinti matrisi:

$$\mathbf{E}[\mathbf{v}(k)\mathbf{v}(k)^T] = \mathbf{Q}(k) \quad (24)$$

Sıfır ortalamalı beyaz Gauss dağılımlı ölçüm gürültüsünün ise eş değişinti matrisi:

$$\mathbf{E}[\mathbf{w}(k)\mathbf{w}(k)^T] = \mathbf{R}(k) \quad (25)$$

şeklinde hesaplanabilir. Süreç ve ölçüm gürültüleri arasında ilinti olmadığı varsayılmıştır. Dolayısıyla çapraz eş değişinti matrisi  $\mathbf{E}[\mathbf{v}(k)\mathbf{w}(k)^T] = 0$  olduğu varsayılacaktır.

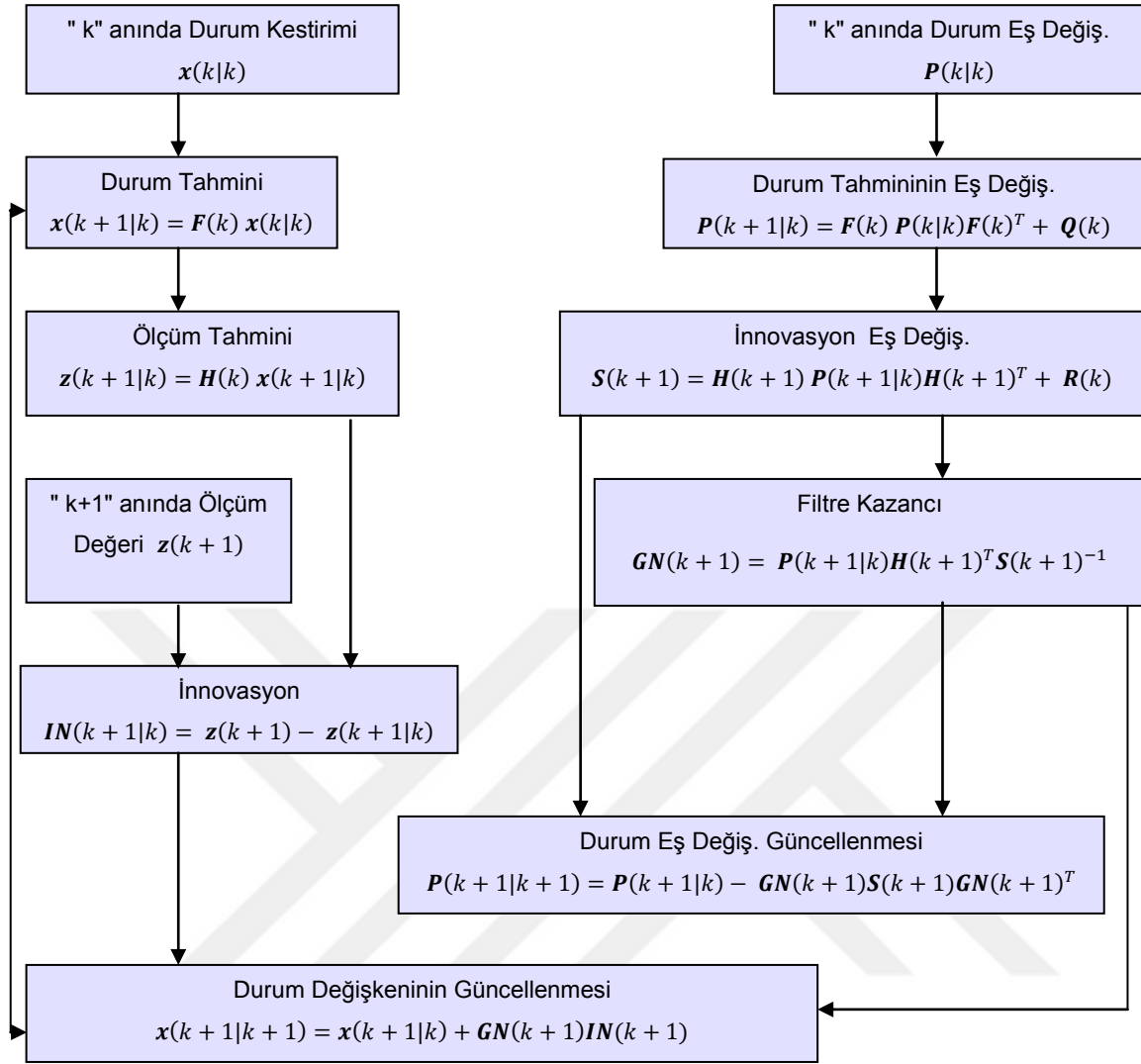
Kalman filtresi, o andaki  $\mathbf{x}(k|k)$  durum vektörünü ve  $\mathbf{P}(k|k)$  durum eş değişinti matrisini kullanıp gelen ölçümleri değerlendirerek, bir sonraki  $\mathbf{x}(k+1|k+1)$  durum vektörünü ve  $\mathbf{P}(k+1|k+1)$  durum eş değişinti matrisini kestirmeye çalışır.

Yukarıda tanımlanan iki gürültü ile ilintisiz kabul edilen  $\mathbf{P}(0|0)$  ve  $\mathbf{x}(0|0)$  başlangıç değerleri ile filtreye başlanılacak olursa, durum kestirimi iki döngüden oluşmaktadır:

- Durum ve ölçüm tahmini (Time Update)
- Durum güncelleme (Measurement Update)

Kalman filtresinin durum ve ölçüm tahmini ile durum güncellemesini içeren Kalman

filtresi algoritması Şekil 4'de ayrıntılı görülebilir.



Şekil 4 Kalman filtresi algoritması akış diyagramı

Diyagramdan da görüldüğü üzere durum eş değışinti matrisinin güncellenmesi durum kestirim hesaplamalarından bağımsız olarak yapılır. Bu, Kalman filtresinin model tabanlı bir algoritma olması ile ilintilidir ve algoritmanın modele aşırı bağımlı olduğunu gösterir.

Sonuç olarak, başlangıç koşulu ve sisteme giren bütün gürültülerin normal dağılıma sahip olduğu varsayımı altında, Kalman Filtresi optimal minimum ortalama karesel hata (MMSE) tahmin edicisidir [10]. MMSE tahmin edicisi;  $\mathbf{x}$  durum vektörünün,  $\mathbf{z}$  ölçüm vektörüne koşullu beklenen değeridir.

$$\hat{\mathbf{x}}(k) = E[\mathbf{x}(k)|\mathbf{z}(k)] = \bar{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{P}_{xz}(k)\mathbf{P}_{zz}^{-1}(k)(\mathbf{z}(k) - \bar{\mathbf{z}}(k)) \quad (26)$$

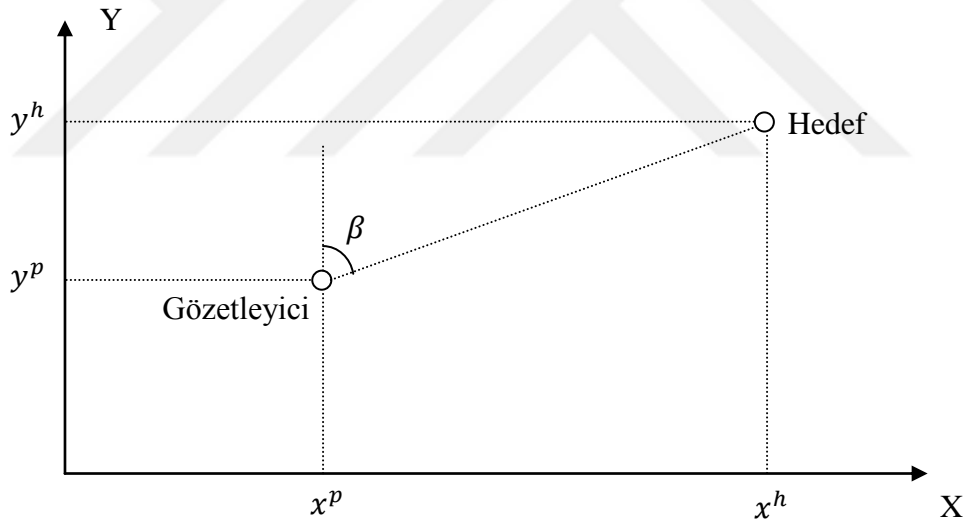
Burada  $\hat{\mathbf{x}}(k)$  durum vektörünün kestirimini,  $\bar{\mathbf{x}}(k)$  durum vektörünün tahminini,  $\bar{\mathbf{z}}(k)$  ise ölçümün tahminini belirtmektedir. Koşullu durum eş değişinti matrisi ise aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{xx|z}(k) &= E \left[ (\mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}(k))(\mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}(k))^T \mid \mathbf{z}(k) \right] \\ &= \mathbf{P}_{xx}(k) - \mathbf{P}_{xz}(k)\mathbf{P}_{zz}^{-1}(k)\mathbf{P}_{zx}(k) \end{aligned} \quad (27)$$

Burada  $\mathbf{P}$  matrisleri vektörlerin eş değişinti matrisi ile çapraz eş değişinti matrisini göstermektedir.

### 3.7. Torpido Probleminde Pasif Hedef Takibi

Torpido probleminde gözetleyici ile hedef geometrisi Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 5 Gözetleyici - hedef geometrisi

Burada hedeften alınan ölçüm aşağıda modellenmiştir.

$$\mathbf{z}(k) = \mathbf{h}(k, \mathbf{x}(k)) + \mathbf{w}(k) = \tan^{-1}((x^h - x^p)/(y^h - y^p)) + \mathbf{w}(k) \quad (28)$$

Pasif hedef takibi kartezyen koordinatlarda yapıldığında, iki boyutta hedef ve gözlemciye ait konum ve hız bilgisini içeren durum vektörü sırasıyla  $\mathbf{x}^h(k) = [x^h v_x^h y^h v_y^h]^T$  ve  $\mathbf{x}^p(k) = [x^p v_x^p y^p v_y^p]^T$  olmaktadır. Hedef takibi göreceli

durum vektörü  $\mathbf{x}(k) = \mathbf{x}^h(k) - \mathbf{x}^p(k) = [x \ v_x \ y \ v_y]^T$  üzerinden yapılacaktır. Bu durumda, sabit hızlı hareket modeline sahip sistem durum modeli aşağıdaki eşitlikle gösterilebilir.

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{F}(k) \mathbf{x}(k) + \mathbf{G}(k) \mathbf{v}(k) \quad (29)$$

$$\text{Burada, } \mathbf{F}(k) = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ ve } \mathbf{G}(k) = \begin{bmatrix} T^2/T & 0 \\ T & 0 \\ 0 & T^2/T \\ 0 & T \end{bmatrix} \text{ olmaktadır.}$$

Pasif arayıcı üzerinden hedeften yanca açı ölçümlerinin alındığı durumda; ölçüm matrisi

$$\mathbf{z}(k) = \mathbf{h}(k, \mathbf{w}(k)) = \tan^{-1} \left( \frac{x}{y} \right) + \mathbf{w}(k) \quad (30)$$

şeklinde olmaktadır. Buradan görüldüğü üzere, pasif arayıcıdan alınan ölçümler takip edilecek sisteme göre doğrusal değildir. Bölüm 3.8 ve 3.9'da iki farklı yöntemle doğrusal olmayan sistem modeli ile nasıl pasif hedef takibi yapılacağı açıklanacaktır. Genişletilmiş Kalman filtresi literatürde en çok kullanılan hedef takip yöntemlerinden biridir. Sözde ölçümlü Kalman filtresi ise pasif hedef takibine farklı bir yaklaşım getirmiştir. Bundan dolayı bu iki pasif hedef takibi yöntemi incelenecektir.

### 3.8. Genişletilmiş Kalman Filtresi (EKF)

Bu kısımda, doğrusal olmayan ölçümler üzerinden, kesik zamanlı doğrusal olmayan dinamik sistemlerin kestirimi üzerinde durulacaktır. Dinamiklerin birinci derece doğrusallaştırılmasında değişkenleri tahmin etmek için eşitlik ( 7 ) ve eşitlik ( 8 )'de anlatıldığı şekilde türev alınması gerekmektedir. Doğrusal olmayan dinamikler bu türevle, yine zamanla değişen doğrusal parçacıklara bölünür ve böylece standart Kalman filtresi uygulanabilir hale gelirler. Genişletilmiş Kalman filtresinde doğrusal olmayan durum uzay modeli aşağıda verilmiştir.

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{f}(k, \mathbf{x}(k)) + \mathbf{v}(k) \quad (31)$$

$$\mathbf{z}(k) = \mathbf{h}(k, \mathbf{x}(k)) + \mathbf{w}(k) \quad (32)$$

$\mathbf{x}(k)$  : Zamanla değişen durum vektörü

$\mathbf{z}(k)$  : Zamanla değişen ölçüm vektörü

$\mathbf{f}(k, \mathbf{x}(k))$  : Zamanla değişen doğrusal olmayan durum-geçiş fonksiyonu

$\mathbf{h}(k, \mathbf{x}(k))$  : Zamanla değişen doğrusal olmayan ölçüm fonksiyonu

olarak alınmıştır.

$\mathbf{v}(k)$  ve  $\mathbf{w}(k)$  sıfır ortalamalı, beyaz, Gauss dağılıma sahip süreç ve ölçüm gürültüleri olduğu varsayılmıştır.  $\mathbf{Q}(k)$  ve  $\mathbf{R}(k)$  sırasıyla gürültülerin eş değişinti matrisleridir [27].

Yukarıdaki fonksiyonlardan ( $\mathbf{f}, \mathbf{h}$ ) en az biri doğrusal olmadığında, problem doğrusal olma özelliğini kaybeder. Doğrusal olmayan fonksiyonların türevini alarak lokal doğrusallaştırma sağlayan Genişletilmiş Kalman filtresinin türetilmesi aşağıdaki kısımda ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır.

$\hat{\mathbf{x}}(k+1|k)$  durum tahminini elde etmek için, doğrusal olmayan  $\mathbf{f}(k, \mathbf{x}(k))$  fonksiyonu ile en son kestirilen  $\hat{\mathbf{x}}(k|k)$  etrafında Taylor serisi oluşturulur. İkinci mertebeye kadar Taylor genişletilmesi;

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{f}(k, \hat{\mathbf{x}}(k|k)) + \mathbf{f}_x(k)[\mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}(k|k)] \\ &\quad + \frac{1}{2} \sum [\mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}(k|k)] \mathbf{f}_{xx}(k) [\mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}(k|k)]^T + HOT^* + \mathbf{v}(k) \end{aligned} \quad (33)$$

$$\mathbf{f}_x(k) = \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_k}, \mathbf{f} \text{ vektörünün Jacobianı}$$

$$\mathbf{f}_{xx}(k) = \left. \frac{\partial^2 \mathbf{f}}{\partial^2 \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_k}, \mathbf{f} \text{ vektörünün Hessiani}$$

$HOT^*$  (High Order Terms) ise yüksek dereceli terimlerdir ve ihmal edilebilecek kadar doğrusallaştırmaya katkısı azdır.

Dolayısıyla tahmin edilen durum aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1|k) = \mathbf{f}(k, \hat{\mathbf{x}}(k|k)) + \frac{1}{2} \sum \mathbf{f}_{xx}(k) \mathbf{P}(k|k) \quad (34)$$

$HOT^*$  ihmal edildikten sonra,  $\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}$  eşitliği sıfır ortalamalı olduğundan, birinci dereceli terim sıfır ile çarpıldığı için kaybolmuştur. Sadece birinci dereceden türevini alarak (Jacobian)  $\mathbf{f}$  fonksiyonu doğrusallaştırılabilir. İkinci dereceden Taylor seri uygulaması (Hessian) işlem yükünü çok artırmakla birlikte, sistemi daha iyi doğrusallaştırabilmektedir [10]. Bu sadeleştirmelerin ardından durum eş değişinti



matrisi tahmini (ikinci dereceden terimin etkisi ihmal edilmiş) aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\mathbf{P}(k+1|k) = \mathbf{f}_x(k)\mathbf{P}(k|k)\mathbf{f}_x(k)^T + \mathbf{Q}(k) \quad (35)$$

İkinci dereceden Genişletilmiş Kalman filtresi için tahmin edilen ölçüm, tahmin edilen durum vektörü ile benzer şekilde bulunmaktadır.

$$\hat{\mathbf{z}}(k+1|k) = \mathbf{h}[k+1, \hat{\mathbf{x}}(k+1|k)] + \frac{1}{2} \sum \mathbf{h}_{xx}(k+1)\mathbf{P}(k+1|k) \quad (36)$$

Burada  $\mathbf{h}$  vektörünün Hessiani  $\mathbf{h}_{xx}(k+1) = \left. \frac{\partial^2 \mathbf{h}}{\partial^2 \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_k}$  şeklindedir. İkinci dereceden terimin etkisi ihmal edilen ölçüm tahmin eş değışinti matrisi hesaplanması (innovasyon eş değışinti matrisi) aşağıdadır.

$$\mathbf{S}(k+1) = \mathbf{h}_x(k+1)\mathbf{P}(k+1|k)\mathbf{h}_x(k+1)^T + \mathbf{Q}(k) \quad (37)$$

Burada  $\mathbf{h}$  vektörünün Jacobianı  $\mathbf{h}_x(k+1) = \left. \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_k}$  şeklindedir. Kalman filtresinin kazanç matrisi hesabı eşitlik (38)'de görülebilir.

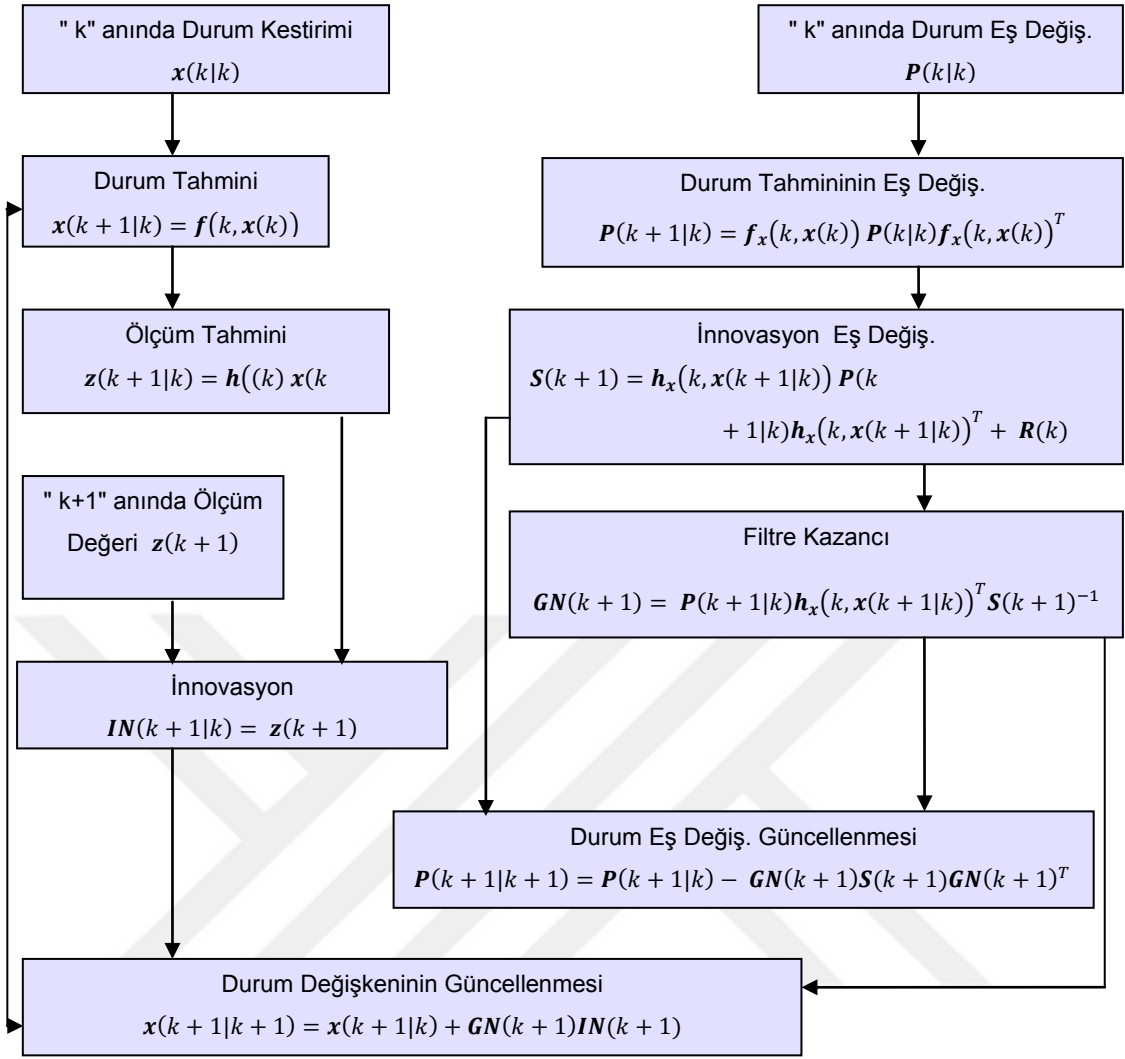
$$\mathbf{GN}(k+1) = \mathbf{P}(k+1|k)\mathbf{h}_x^T \mathbf{S}(k+1)^{-1} \quad (38)$$

Durum ve ölçüm tahminleri yapıp gerekli matrisler ve filtre kazancı hesaplandıktan sonra sıra, durum vektörü güncellemesi ve durum eş değışinti matrisi güncellemesi yapmaktadır.

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1|k+1) = \hat{\mathbf{x}}(k+1|k) + \mathbf{GN}(k+1)(\mathbf{z}(k+1) - \mathbf{h}[k+1, \hat{\mathbf{x}}(k+1|k)]) \quad (39)$$

$$\mathbf{P}(k+1|k+1) = \mathbf{P}(k+1|k) - \mathbf{GN}(k+1)\mathbf{h}_x\mathbf{P}(k+1|k) \quad (40)$$

Tüm bu çıkarımlar doğrultusunda hedeften alınan ölçümlerle hedefin konumu ve hızını kestiren yinelemeli EKF algoritması Şekil 6'dadır.



Şekil 6 Genişletilmiş Kalman filtresi algoritması akış diyagramı

### 3.9. Sözde Ölçümlü Kalman Filtresi (Pseudo Measurement KF)

Doğrusal olmayan ölçümler üzerinden, Kalman filtresi kullanarak takip yapabilmek için ölçüm fonksiyonunun doğrusallaştırılması yönteminin kullanıldığı Genişletilmiş Kalman filtresi algoritmasında ayrıntılı olarak incelenmiştir. Sözde ölçüm yöntemiyle ölçüm fonksiyonu değiştirilerek doğrusal bir forma sokulur ve Kalman filtresi ile pasif takip yapılabilir hale getirilir [7]. Pasif izlemede sabit hızlı hedefin doğrusal olmayan durum uzay modeli eşitlik ( 29 ) ve ( 30 )'da verilmiştir.

Yukarıdaki  $h(k, x(k))$  fonksiyonu doğrusal olmadığında, problem doğrusallık özelliğini kaybeder. Bu durumdan kurtulup ölçüm fonksiyonunu doğrusal hale getirmek

için, sözde ölçüm modeli türetilecektir. Hedefin gözetleyiciye göre yatay düzlemdeki açısı,

$$\tan(\beta(k)) = [x^h(k) - x^p(k)]/[y^h(k) - y^p(k)] \quad (41)$$

eşitliğini sağlamaktadır. Yukarıdaki eşitlik (41) bir diğer şekilde de şöyle yazılabilir.

$$[x^h(k) - x^p(k)] \cos(\beta(k)) - [y^h(k) - y^p(k)] \sin(\beta(k)) = 0 \quad (42)$$

Burada  $x(k) = x^h(k) - x^p(k)$  ve  $y(k) = y^h(k) - y^p(k)$  şeklinde gösterilebilir. Eşitlik (42)'yi  $x$  ve  $y$  cinsinden yeniden yazarsak:

$$x \cos(\beta(k)) - y \sin(\beta(k)) = 0 \quad (43)$$

eşitliği elde edilir.  $\mathbf{z}$  ölçümünü şöyle tanımlayalım:

$$\mathbf{z}(k) = [\cos(\beta(k)) \quad 0 \quad -\sin(\beta(k)) \quad 0] \begin{bmatrix} x \\ v_x \\ y \\ v_y \end{bmatrix} = \mathbf{H}(k) \mathbf{x}(k) \quad (44)$$

Böylece; ölçüm fonksiyonu doğrusallaştırılmış olur. Bu doğrusal yapı içinde EKF yerine, doğrusal Kalman filtre denklemi kullanılabilir. Burada hareket denklemi  $[x \ v_x \ y \ v_y]^T$  aynı kalmaktadır. Bulunan bu denklemde sol taraftaki parametreler ölçüm olarak elde edilebilir. Bu noktadan hareketle ölçüm matrisi,

$$\mathbf{H}(k) = [\cos(\beta(k)) \quad 0 \quad -\sin(\beta(k)) \quad 0] \quad (45)$$

şeklinde tanımlanabilir. Zamanla değişen ölçüm ise  $\mathbf{z}(k) = \mathbf{H}(k)\mathbf{x}(k)$  şeklinde olur.  $\mathbf{w}(k)$  ölçüm gürültüsü olduğu varsayılırsa, oluşturulan bu yeni ölçümün değişintisi:

$$\mathbf{z}(k) = x(k) \cos(\beta(k)) - y(k) \sin(\beta(k)) + w(k) \quad (46)$$

$$L = \frac{\partial z(k)}{\partial \beta(k)} = -x(k) \sin(\beta(k)) - y(k) \cos(\beta(k)) \quad (47)$$

$$R(k) = L^2 \sigma_w^2(k) \quad (48)$$

şeklinde elde edilmiş olur [28, 29].

## 4. TORPİDOLAR İÇİN PASİF GÜDÜM YÖNTEMİ

Bu bölümde daha önce bahsedilen Genişletilmiş Kalman Filtresi ve Sözde ölçümlü Kalman filtresi yöntemlerini kullanarak pasif hedef takibinde en iyi gözlemlene açısını bulmak adına yapılan çalışmalar bulunmaktadır. Daha sonra yapılan simülasyonlarda, en iyi gözlemlene açısını sağlayan torpido manevrası ile oransal seyir güdümü sağlayan manevra farklı fonksiyon tipleri aracılığıyla birleştirilmiş ve yeni torpido güdüm yöntemi önerilmiştir. Aynı torpido gimbal açıları limitlenerek ve hedefe belirli bir mesafe kala güdüm kapatılarak gerçekçi senaryoda yöntem tekrarlanmış ve sonuçlar incelenmiştir.

### 4.1. Pasif Hedef Takibinde Gözlemci Yörüngesinin Optimizasyonu

Pasif izlemede en iyi gözlemlene senaryosunu belirleyebilmek için iki farklı takip algoritması kullanılacaktır. Bunlar Genişletilmiş KF (EKF) ve Sözde ölçümlü KF'dir. Bu algoritmalar bölüm 3.8 ve bölüm 3.9'da ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Burada, bu iki yöntem karşılaştırılmalı olarak kullanılarak takip edilen hedefin kestirimi en iyi nasıl yapılır problemine çözüm bulmaya çalışılacaktır.

Simülasyonlarda başlangıç durum vektörü olarak tahmini bir  $x$  ve  $y$  konumu verilir. Aynı şekilde durum kestiriminde yapılabilecek hata göz önünde bulundurularak durum hatası eş değişinti matrisi de ilklendirilmelidir. Bu matris çok küçük verilirse, filtre durum kestirimini doğru yapamayacak ve gerçek değere yakınsayamayacaktır. Bu matris çok büyük verilirse, kestirim hataları büyük olacak ve gerçek durum etrafında salınım yapacaktır. Pasif arayıcı modeli çıktısı olarak alınacak ölçümler ayrıca ölçüm hatasını içerecektir. Süreç gürültüsü eş değişinti matrisi ise hedefin ne kadar manevra yapabileceği tahmin edilerek verilmelidir.

Bu başlangıç değerleri verildikten sonra yinelemeli kestirici algoritması başlatılmış olur. Pasif izleme algoritmasını oluşturduktan sonra, daha iyi bir izleme için optimum platformun yörüngesi aşağıdaki adımlar izlenerek bulunur:

- Yinelemeli pasif izleme algoritmasında, izleyici platformun (torpidonun) hız büyüklüğü değiştirilmeden hız vektörünün yalnızca yönü değiştirilir ve bir sonraki adım için platform farklı açılarda hareket ettirilir ve hedeften ölçüm alınır.

- Her farklı hareket yönü için bir önceki kestirilen durum vektörü ve durum eş değişinti matrisi kullanılarak yeni durum vektörü ve yeni durum eş değişinti matrisi kestirilir. Her hareket yönü için ayrı ayrı durum vektörü ve durum eş değişinti matrisi bulunur.
- Hangi durum vektörünün en doğru sonucu verdiğini bulmak için ise o durum vektörüne ait durum eş değişinti matrisinin özdeğerleri bulunur ve toplanır. Hangi toplam en küçük değere sahipse o durum vektörü en iyi kestirimi verir. Bir kare matrisin Frobenius normu,  $\|P\|_F = \text{Tr}(P^T P)$  olarak tanımlanır. Hata eş değişinti matrisi pozitif belgili bir matris olduğundan dolayı, matrisin öznitelikleri toplamını en küçükleme, Frobenius normunu en küçükleme anlamına gelir. Yani bu yöntem ile hata eş değişinti matrisi en küçüklemiştir olur.

Algoritma daha ayrıntılı olarak aşağıda tarif edilmiştir.

1. Torpidonun pasif alıcısının ölçtüğü açının  $\beta_i$  olması için durum vektörünün değeri  $\mathbf{x}_i^p(k+1)$  olsun ( $i = 1, 2, \dots, 180^\circ$ ).
2. Her alınan  $\beta_i$  ölçümü için hedefe ait kestirilen durum vektörü  $\hat{\mathbf{x}}_i^h(k+1|k+1)$  ve durum eş değişinti matrisi  $\hat{\mathbf{P}}_i^h(k+1|k+1)$  olsun ( $i = 1, 2, \dots, 180^\circ$ ).
3. Bulunan her farklı durum eş değişinti matrislerinin özdeğerleri bulunur ve toplanır.
4.  $\{\lambda_i^j\} = \text{eig}(\hat{\mathbf{P}}_i^h(k+1|k+1))$  ifadesi  $\lambda_i^j$  her bir açı değeri için durum eş değişinti matrisinin özdeğerlerini belirtmektedir ( $j$ , özdeğerlerin sayısını vermektedir).
5.  $\text{sum}_i = \sum_{n=1}^j \lambda_i^n$  ifadesi ile bulunan her bir açı değeri için durum eş değişinti matrisinin özdeğerlerinin toplamı bulunur.
6. Her  $\hat{\mathbf{P}}_i^h(k+1|k+1)$  matrisi için özdeğerlerin toplamı bulunduktan sonra en küçük toplama sahip durum eş değişinti matrisi bulunur ( $\min(\text{sum}_i)$ ).
7. En küçük toplam değerine sahip  $i$ . durum eş değişinti matrisi  $\hat{\mathbf{P}}_i^h(k+1|k+1)$ , en iyi kestirimi vermektedir. Dolayısıyla  $\hat{\mathbf{x}}_i^h(k+1|k+1)$  en iyi kestirilmiş durum vektörü olur. Bu kestirimi elde etmek için platform  $\beta_i$  ölçümünü almış olması gerekmektedir.  $\beta_i$  ölçümünü alabilmek için ise torpidonun  $\mathbf{x}_i^p(k+1)$  hareketini yapması gerekmektedir.

Bundan sonraki simülasyonlarda verilecek olan hata grafikleri hedefin konum kestirim hataları olup,  $\sqrt{(x(k) - \hat{x}(k))^2 + (y(k) - \hat{y}(k))^2}$  şeklinde hesaplanmıştır. Bu çalışmada tüm simülasyonlarda kullanılan değişkenler aşağıdaki şekilde ilklendirilmiştir.

$N = 3$  : Güdüm sabiti

$Q(k) = 0.0001 G G^T$  : Süreç gürültüsü eş değışintisi

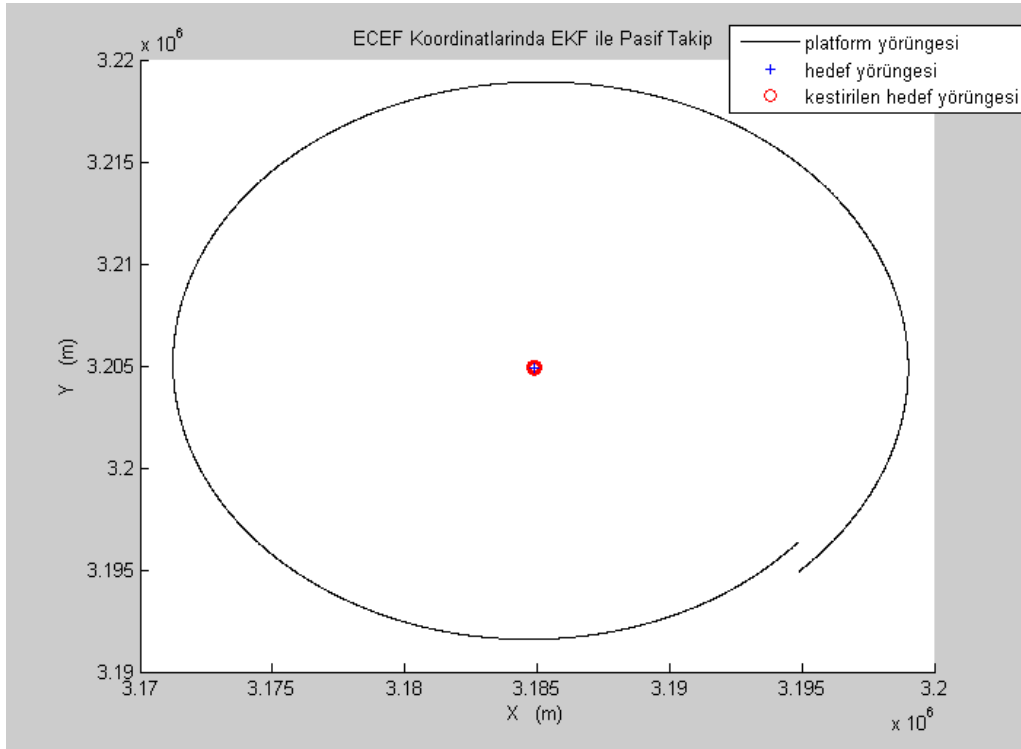
$R(k) = 0.0001$  : Ölçüm gürültüsü eş değışintisi

$$P(0) = \begin{bmatrix} 50 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 50 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 \end{bmatrix} : \text{Hata eş değışinti matrisi}$$

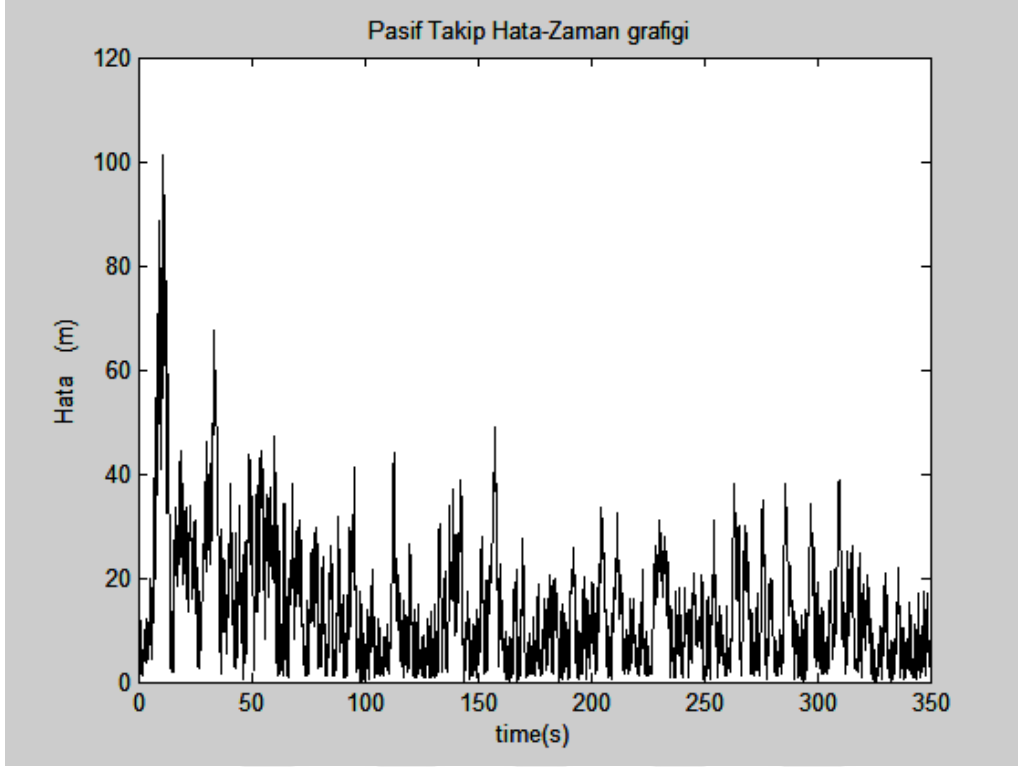
$x(0) = x_{gemi}(0) + [0 \ 0 \ 50 \ 0]^T$  : Durum vektörü

#### 4.1.1. Gözlemci Yörüngesinin Genişletilmiş KF ile Optimizasyonu

10 km uzaktaki sabit bir hedeften ölçülen açı temel alınarak Genişletilmiş Kalman Filtresi ile önerilen algoritma Yer Merkezli Yer Sabit (ECEF) koordinat sisteminde koşturuldu. Hedef konum belirsizliğini en küçükleyen platform yörüngesinin yaklaşık olarak dairesel olduğu görüldü. Yani torpido hedeften gelen ölçüm doğrultusuna dik hareket etmektedir. Sabit hedefle ilgili simülasyon çıktısı Şekil 7'de gösterilmiştir.

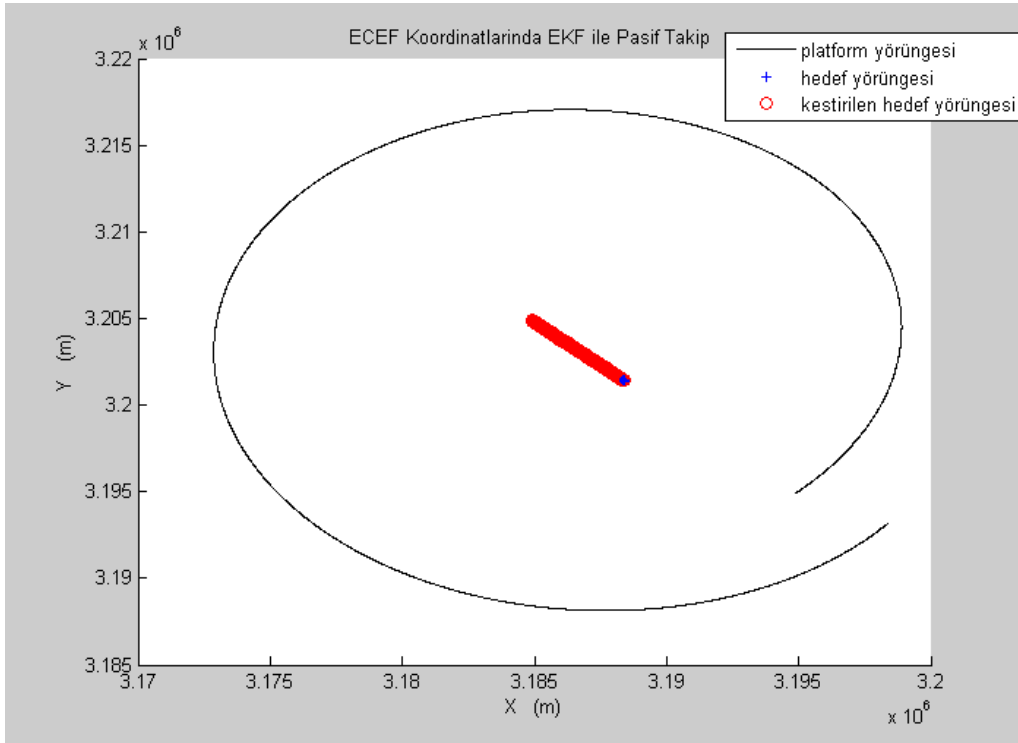


Şekil 7 Sabit hedef için optimal platform yörüngesi ( EKF tabanlı )

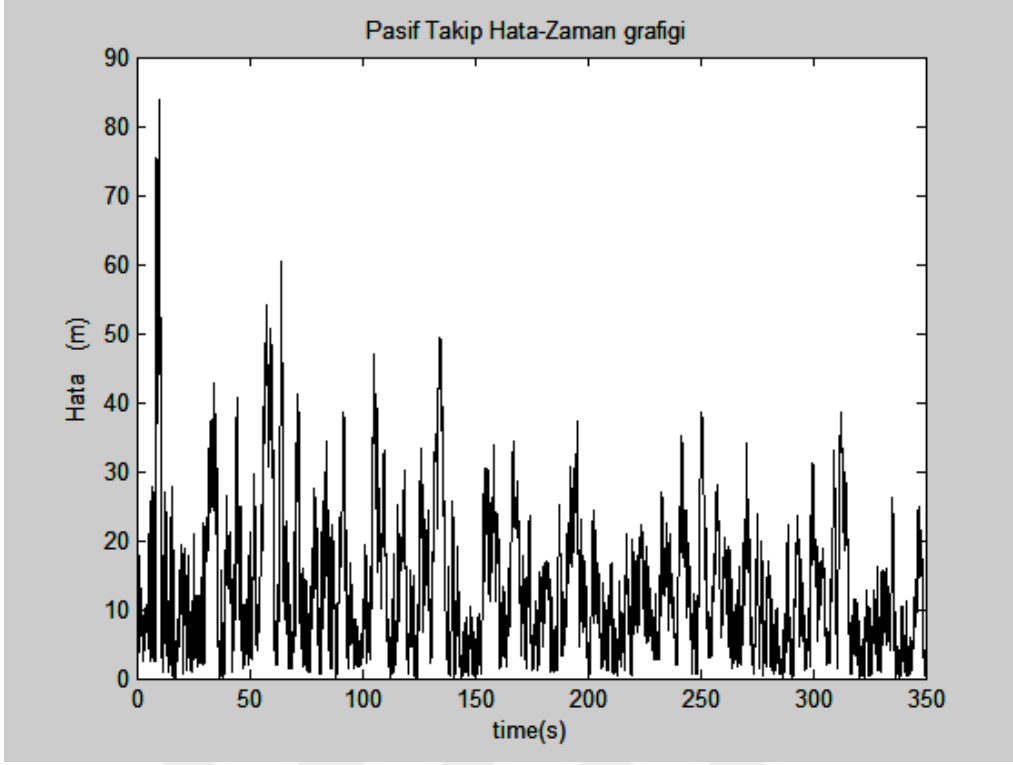


Şekil 8 Sabit hedef için pasif takipte hata-zaman grafiği ( EKF tabanlı )

10 km uzaktaki sabit hızlı hareketli bir hedef için de aynı simülasyonlar yapılmış ve optimal algılayıcı yörüngesinin hedef etrafında kabaca daire çizen bir yörünge olduğu gözlenmiştir. Sabit hızlı hedefle ilgili simülasyon çıktısı Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 9 Sabit hızlı hedef için optimal yörünge ( EKF tabanlı )

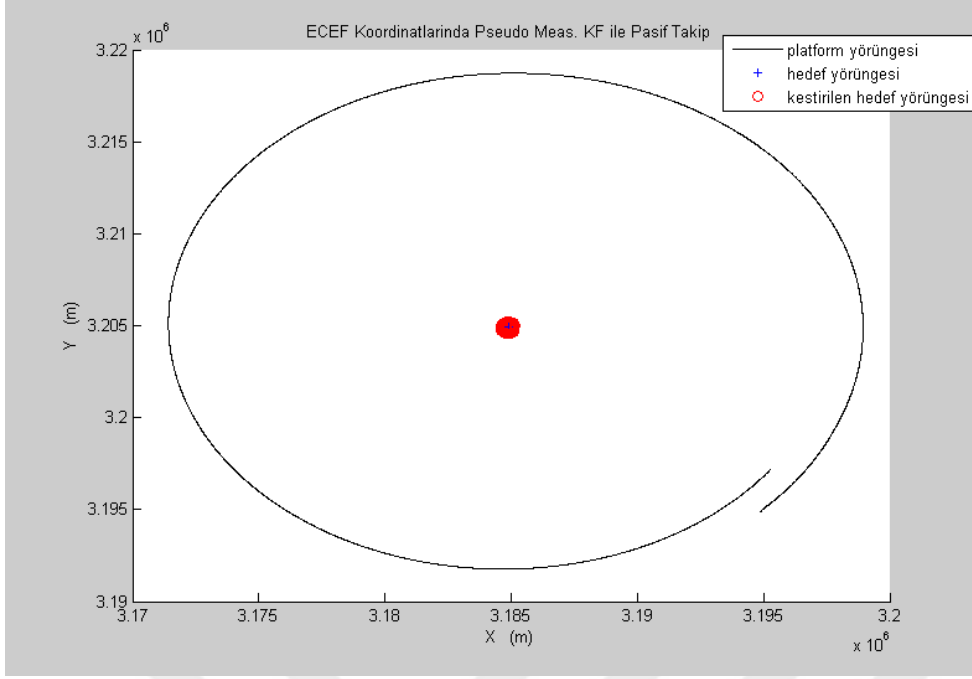


Şekil 10 Sabit hızlı hedef için pasif takipte hata-zaman grafiği ( EKF tabanlı )

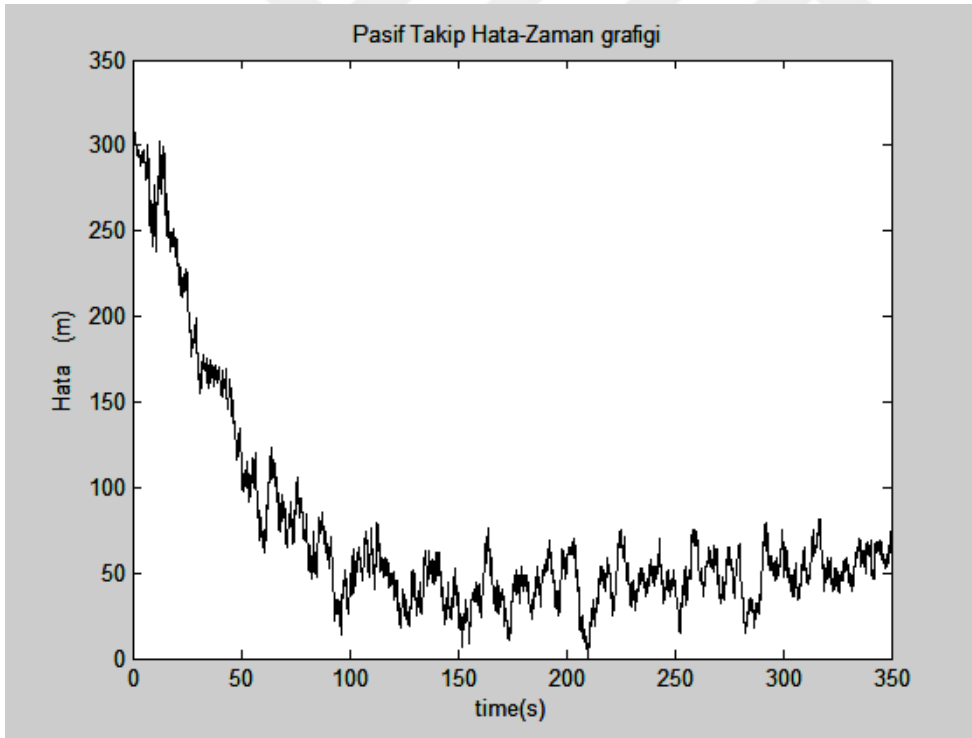
#### 4.1.2. Gözlemci Yörüngesinin Sözde Ölçümlü KF ile Optimizasyonu

Bölüm 4.1.1'de yapılan simülasyon senaryosunun aynısı Sözde Ölçümlü Kalman Filtresi ile tekrar edilmiştir. Sabit bir hedef senaryosunda, optimal platform yörüngesinin hedef etrafında bir daire olduğu gözlemlenmiştir. Sabit hedef simülasyon çıktısı aşağıdaki şekildedir.



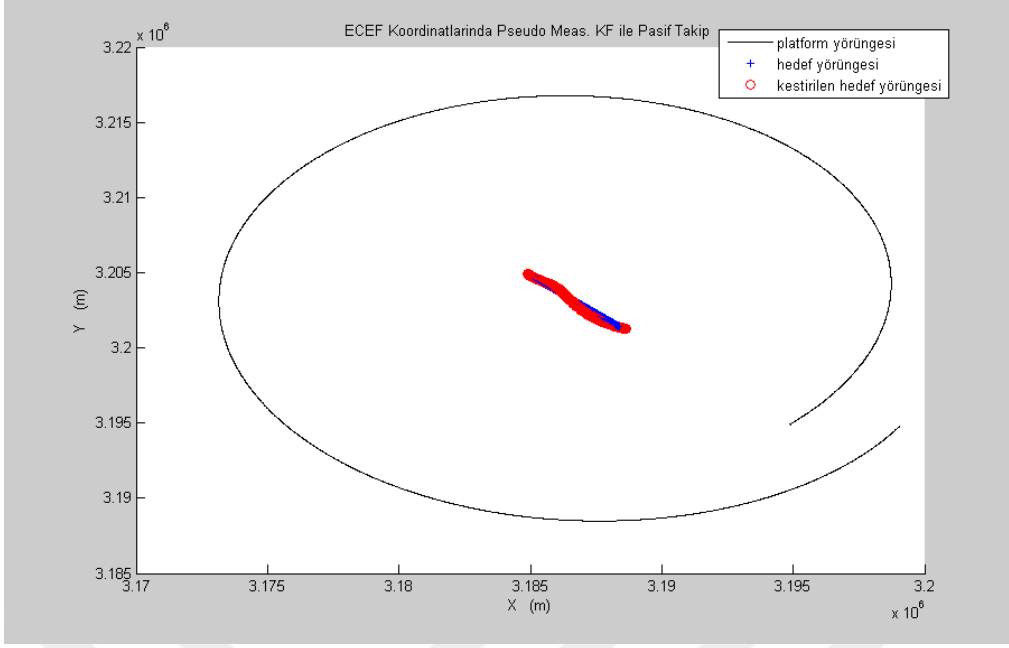


Şekil 11 Sabit hedef için optimal yörünge ( Sözde ölçümlü KF tabanlı )

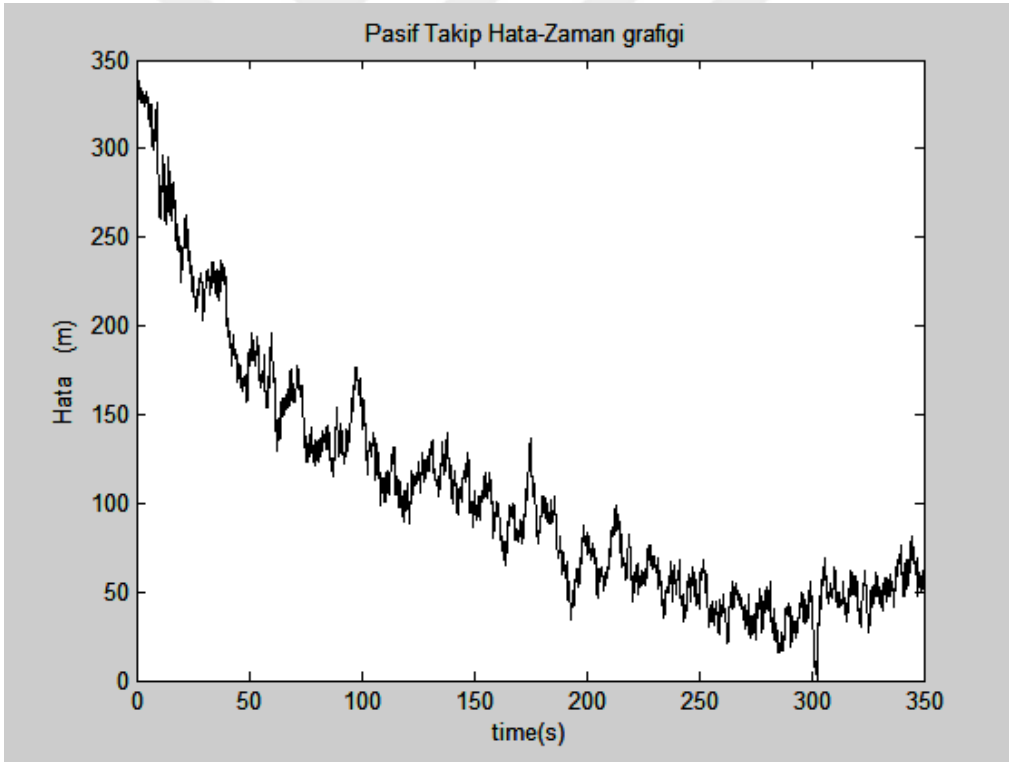


Şekil 12 Sabit hedef için pasif takipte hata-zaman grafiği ( Sözde ölçümlü KF tabanlı )

Ayrıca sabit hızlı hareketli hedef için de aynı simülasyonlar yapılmış ve optimal algılayıcı yörüngesinin hedef etrafında kabaca daire çizdiği tekrar görülmüştür. Sabit hızlı hedefle ilgili simülasyon çıktısı aşağıdaki şekildedir.



Şekil 13 Sabit hızlı hedef için optimal yörünge ( Sözde ölçümlü KF tabanlı )



Şekil 14 Sabit hızlı hedef için pasif takipte hata-zaman grafiği ( Sözde ölçümlü KF tabanlı )

Sonuç olarak, Genişletilmiş Kalman Filtresi (EKF) ve Sözde Ölçümlü Kalman Filtresi algoritmaları kullanılarak pasif arayıcı üzerinden alınan açı ölçümleriyle hedef kestirimi yapmaya çalışılmıştır. Bu algoritmalar yardımıyla daha önce bahsedilen hedefin en iyi

şekilde kestirimi için platform yörüngesinin optimizasyonu probleminde çözüm bulunmaya çalışılmıştır. Simülasyonlar sonucunda en iyi ölçüm geometrisinin hedefin platform hareketine dik olduğu durumda gerçekleştiği gösterilmiştir. Bu hareketi sağlayan ivme, en iyi kestirim ivmesi ( $a_t$ ) olarak tanımlanacaktır. Hedefin platform hareketine dik olduğu durum hedef hakkında en çok bilgi veren ölçüm geometrisidir. Beklendiği gibi gözlemci platform hareket doğrultusuyla ölçüm doğrultusunun ortogonal olduğu durumda en iyi kestirim elde edilmiştir [10, 30, 31, 32]. Ayrıca hedefin pasif izlenmesi sonucu elde edilen ortalama izleme hatasının zamanla azaldığı görülmüştür. Bu da pasif izlemede iyi bir başarımla elde edilebileceğini göstermektedir. Bundan sonraki simülasyonlarda pasif hedef takip yöntemi olarak EKF tercih edilecektir. Çünkü EKF yönteminde hedef konum kestirim hataları sözde ölçümlü KF yöntemine göre daha azdır.

#### **4.2. Oransal Seyir Güdümü ile Optimum Takip Manevrasının Birleştirilmesi**

Bölüm 4.1'de yapılan çalışmalarda iki boyutta sadece açı ölçümü kullanılarak pasif takip yapabilmek için Genişletilmiş Kalman Filtresi ve Sözde Ölçümlü Kalman Filtresi kullanılmıştı. Bu çalışmalar sonucunda bir hedef için en iyi kestirim, durum eş değişinti matrisinin özdeğerlerinin toplamına bakılarak elde edilmişti. Özdeğerlerin toplamı en küçük olan durum eş değişinti matrisine sahip hareket modeli, en iyi kestirimi yapmaya olanak sağlamıştı. Yapılan simülasyonlarda en iyi kestirim, hedefe dik yöndeki hareket ile eşleşmişti.

Elde edilen bu bilgiler ışığında, yeni bir yaklaşım geliştirilerek aynı anda hem hedefin yerini en iyi şekilde nasıl kestirebiliriz hem de hedefe doğru en iyi önlemeyi nasıl yaparız sorusunun cevabı bulunmaya çalışılacaktır. Bu doğrultuda torpidonun oransal seyir güdümü ile güdüldüğü varsayılmıştır. Oransal seyir güdümü hakkında bölüm 2'de ayrıntılı bilgi verilmiştir.

Bu yeni yaklaşımda oransal seyir güdüm ivmesi  $a_n$ , en iyi kestirimi sağlayan ivme ise  $a_t$  olsun. Bu iki ivme arasında öyle bir fonksiyon bulalım ki, hedefin konum kestirimi en az hatayla ve hedefin önlenmesi ıskalama mesafesini küçültecek şekilde sağlansın. Bu noktadan hareketle;

$$a_c = \delta(t) a_n + (1 - \delta(t)) a_t \quad \delta(t) \in [0,1] \quad (49)$$

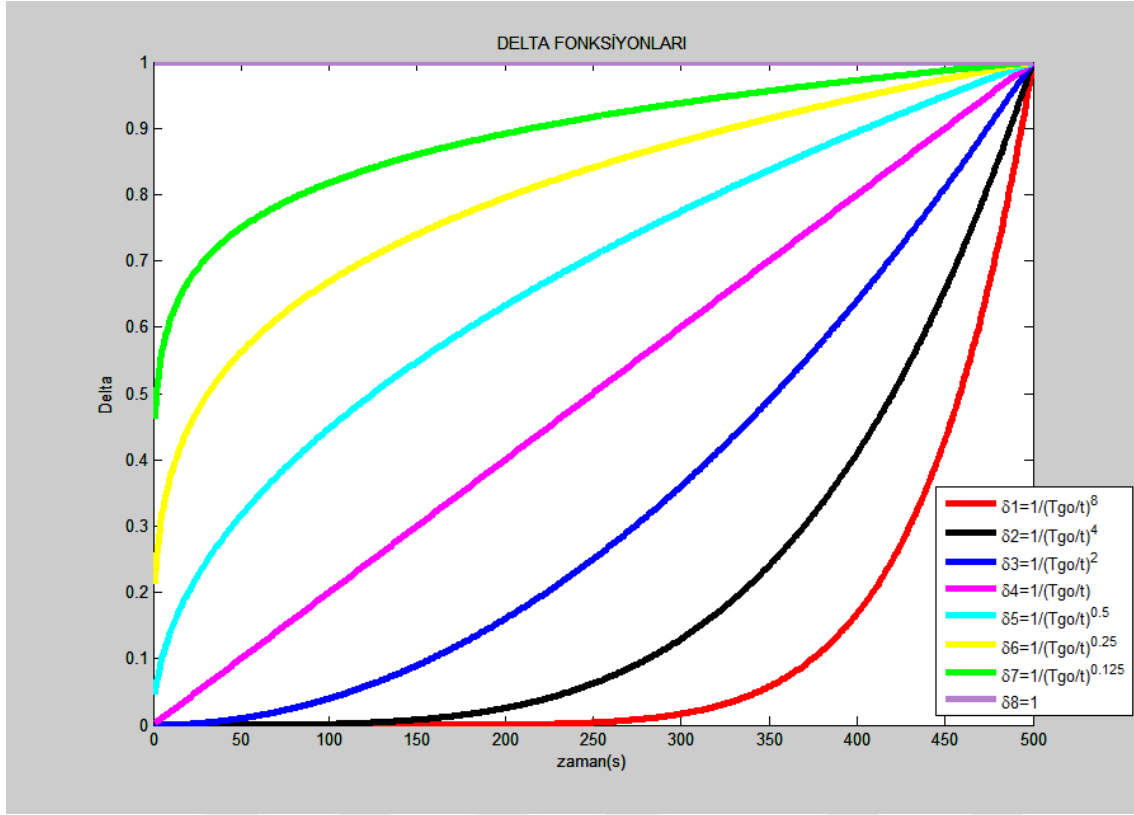
şeklinde bir eşitlik geliştirilecektir. Burada  $\delta(t)$  torpidonun hedefe önleme zamanına ( $T_{go}$ ) bağlı, 0 ile 1 arasında değişen bir fonksiyonu temsil etmektedir. Bu analiz çalışmasında  $\delta(t)$  için doğrusal ve doğrusal olmayan farklı fonksiyonlar kullanılmıştır. Bu fonksiyonlar aşağıdaki çizelgede görülebilir.

Çizelge 1 Delta ağırlıklandırma fonksiyonlarının tanımı

Fonksiyon İsmi	Fonksiyon tanımı
$\delta_1(t)$	$1/(T_{go}/t)^8$
$\delta_2(t)$	$1/(T_{go}/t)^4$
$\delta_3(t)$	$1/(T_{go}/t)^2$
$\delta_4(t)$	$1/(T_{go}/t)$
$\delta_5(t)$	$1/(T_{go}/t)^{1/2}$
$\delta_6(t)$	$1/(T_{go}/t)^{1/4}$
$\delta_7(t)$	$1/(T_{go}/t)^{1/8}$
$\delta_8(t)$	1

Kullanılacak farklı  $\delta(t)$  fonksiyonlarının etkisi ile oluşacak torpidodan talep edilen ivme ( $a_c$ ) ile hem hedef takibi yapılmaya hem de hedefe önleme yapılmaya çalışılacaktır. Bu simülasyonlar gözlemlenerek genel bir sonuca varılmaya çalışılacaktır.  $a_c$  ivmesi başlangıçta konum kestirimi ivmesine ağırlık vermekte, zaman içinde hedefe önleme yapma ivmesinin ağırlığı artmaktadır. Eğer  $a_c$  ivmesi başlangıçta hedefe önleme yapma ivmesine ağırlık verseydi hedef kestirimi düzgün yapılamayacak

ve hedef konumunun doğru kestiriminin torpido başarımına etkisi gözlenemeyecektir. Kullanılacak farklı  $\delta(t)$  fonksiyonları aşağıdaki gibidir.



Şekil 15 Delta ağırlıklandırma fonksiyonları

#### 4.2.1. Pasif Takip ve Önleme Hibrit Güdümü

Pasif hedef takibi ile hedefin önlenmesi hibrit güdümü şu şekilde etüd edilmiştir:

- Öncelikli olarak hedef gemi ve torpido için sabit ivmeli hareket modeli durum geçiş matrisleri ECEF koordinat sistemine göre oluşturulmuştur.
- Torpido ve hedef gemi birbirine göreceli olarak 1 km mesafeye yerleştirilmiş ve hız vektörleri gerçeğe uygun şekilde tanımlanmıştır.
- Hedef takibinde kullanılacak EKF için filtre iklendirme parametreleri ayarlanmıştır.
- Torpidonun kinematik limitleri tanımlanmıştır.
- Yinelemeli koşuma başlamadan önce tahmini önleme zamanı ( $T_{go}$ ) hesaplanmış ve bu zamanın 2 katı zamana kadar koşum süresi ayarlanmıştır.
- Yinelemeli koşum başlatılmış ve her örnekleme zamanı içinde (0.1sn) hedef gemi durum geçiş matrisi kullanılarak ilerletilmiştir.

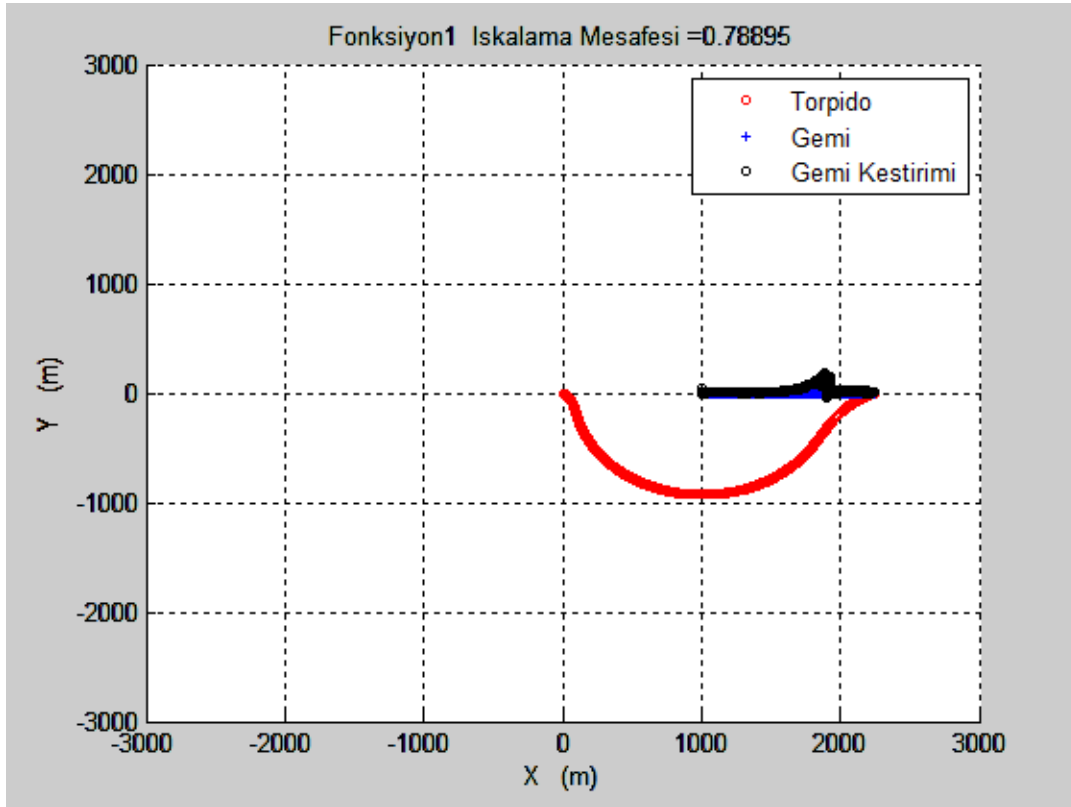
- Daha sonra torpido durum geçiş matrisi ve  $a_c$  ivmesi kullanılarak ilerletilmiştir. Torpidonun hız vektörünün büyüklüğü sabit kalmıştır.
- Torpido – hedef gemi geometrisi kullanılarak pasif arayıcı modeli üzerinden yatay düzlemde gürültülü açı ölçümü alınmıştır.
- Alınan bu ölçüm EKF ile pasif takip algoritmasına sokulmuştur ve hedef gemi için torpidoya göre göreceli bir durum kestirimi yapılmıştır. Kestirim hataları hesaplanmıştır.
- Hedef durum kestirimi kullanılarak, torpido - hedef yaklaşma hızı hesaplanmıştır. Görüş hattı değişimi oranı ise gerçek hedef durum vektöründen hesaplanmıştır.
- Durum kestiriminden ve gerçek verilerden hesaplanan bu değerler ile oransal seyir güdüm ivmesi  $a_n$  hesaplanmıştır.
- Pasif izlemede en iyi kestirimi yapabilmek için, hedeften gelen ölçüm açısının anlık torpido hız vektörüne dik olmasını sağlayacak şekilde  $a_t$  ivmesi türetilmiştir.
- $\delta(t)$  için yukarıda verilmiş fonksiyonlardan biri alınmış ve hesaplanan  $a_n$ ,  $a_t$  ve toplam simülasyon zamanı kullanılarak ( 49 ) eşitliğinde yerine koyulmuştur. Torpidodan talep edilen toplam ivme ( $a_c$ ) hesaplanmıştır.
- Talep edilen ivme değeri çok büyük değerlere ulaşmaması için limitlenmiştir.
- Hedefe önleme yapabilmek için gerekli toplam simülasyon zamanı ve hedefe önleme yapabilmek için kalan zaman ( $T_{go}$ ) her döngüde yeniden hesaplanmıştır.
- Hedefe kalan mesafe her döngüde kontrol edilmiştir. Torpido, hedefe en yakın mesafeye ulaşıncaya kadar koşum devam etmiştir.

#### 4.2.2. Sabit Hızlı Hedefe Önleme

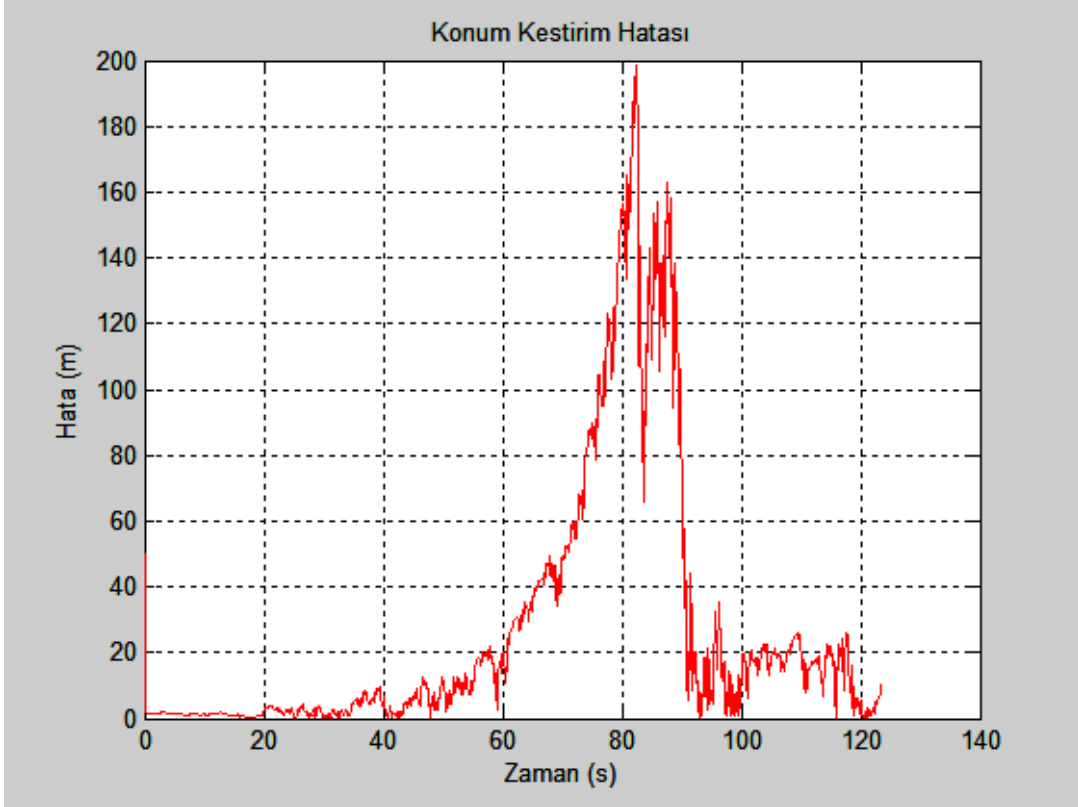
Yapılan simülasyon çalışmalarında eşitlik ( 49 ) kullanılarak farklı fonksiyonlar ile birleştirilen güdüm ivmesi ile en iyi takibi sağlayan ivmenin, torpidonu hareketi ve etkinliği üzerine olan etkileri incelenmiştir. Doğuya doğru 20 knots sabit hızla giden bir gemi simülasyona yerleştirilmiştir. Gemiden 1 km uzaktaki bir noktadan gemiye doğru 50 knots sabit hızla; geminin arkasından, önünden ve yanından torpido fırlatılmıştır. Durum kestirimi başlangıç değeri hedefin ilk konumundan  $y$  yönünde 50 metre uzakta verilmiştir. Mesafenin 1 km alınmasının sebebi simülasyon zamanını kısaltmaktır. Aynı simülasyonlar daha uzak mesafedeki hedefler için de yapılabilir.

#### 4.2.2.1. Sabit Hızlı Hedefe Arkadan Atış Yapılarak Önleme

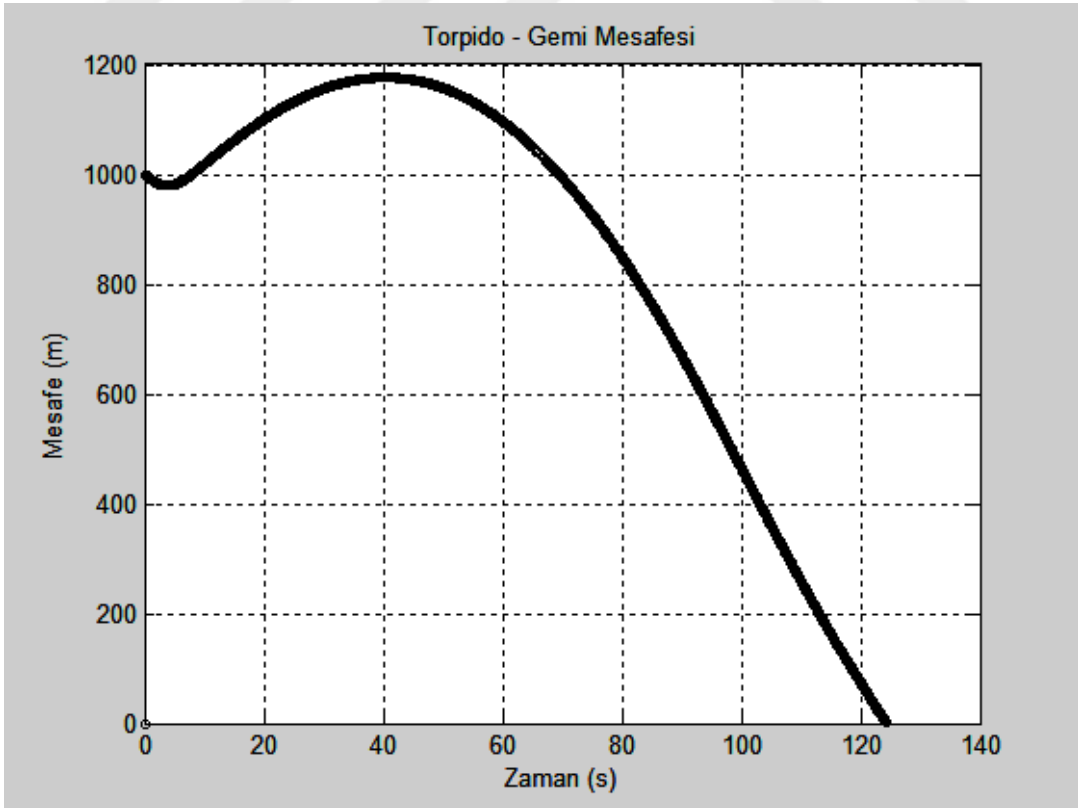
Öncelikli olarak torpidonun, geminin arkasından fırlatıldığı durum için 8 farklı  $\delta(t)$  fonksiyonu ile simülasyon yapılmıştır.  $\delta_1(t)$  fonksiyonun önce sıfıra yakın seyredip daha sonra son anda bire yakınsamasından dolayı  $a_t$  ivmesinin ağırlığı daha yüksek olduğu için torpidonun hareketi, beklendiği gibi hedef durum kestirimini en iyi şekilde yapabilmek amacıyla hedef etrafında daire çizmeye başlamıştır. Simülasyon zamanı ilerledikçe  $a_n$  (oransal seyir güdümü) ivmesi de torpidoya etki etmeye başlamış ve torpido hedefe doğru yönelmiştir.  $\delta(t)$  fonksiyonları için simülasyon çıktıları aşağıdaki şekillerde görülebilir.



Şekil 16 Delta 1 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışla önleme

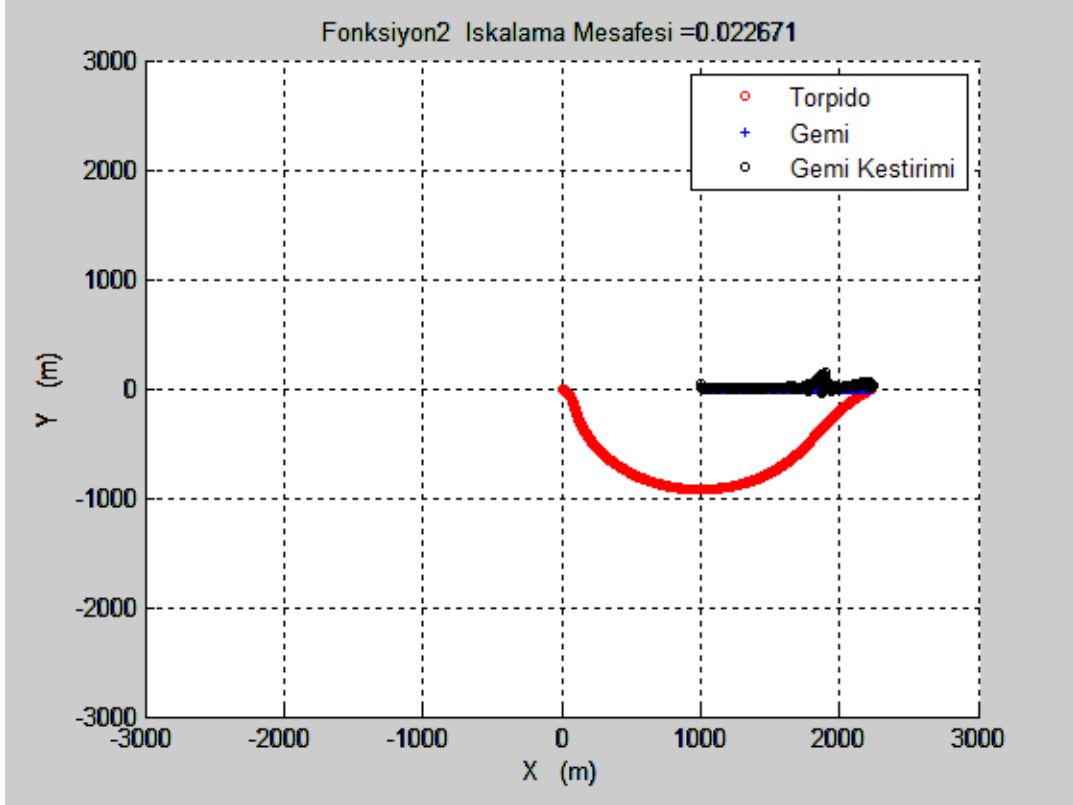


Şekil 17 Delta 1 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışta hata-zaman grafiği

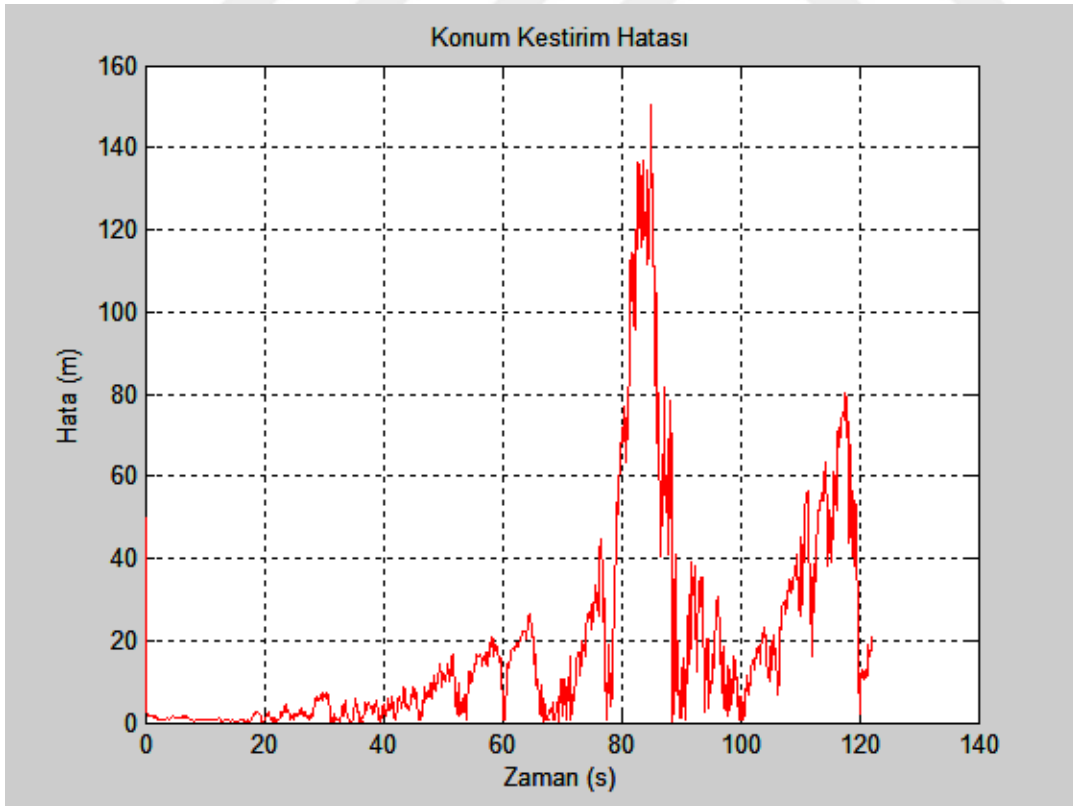


Şekil 18 Delta 1 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışta torpido-gemi mesafesi grafiği

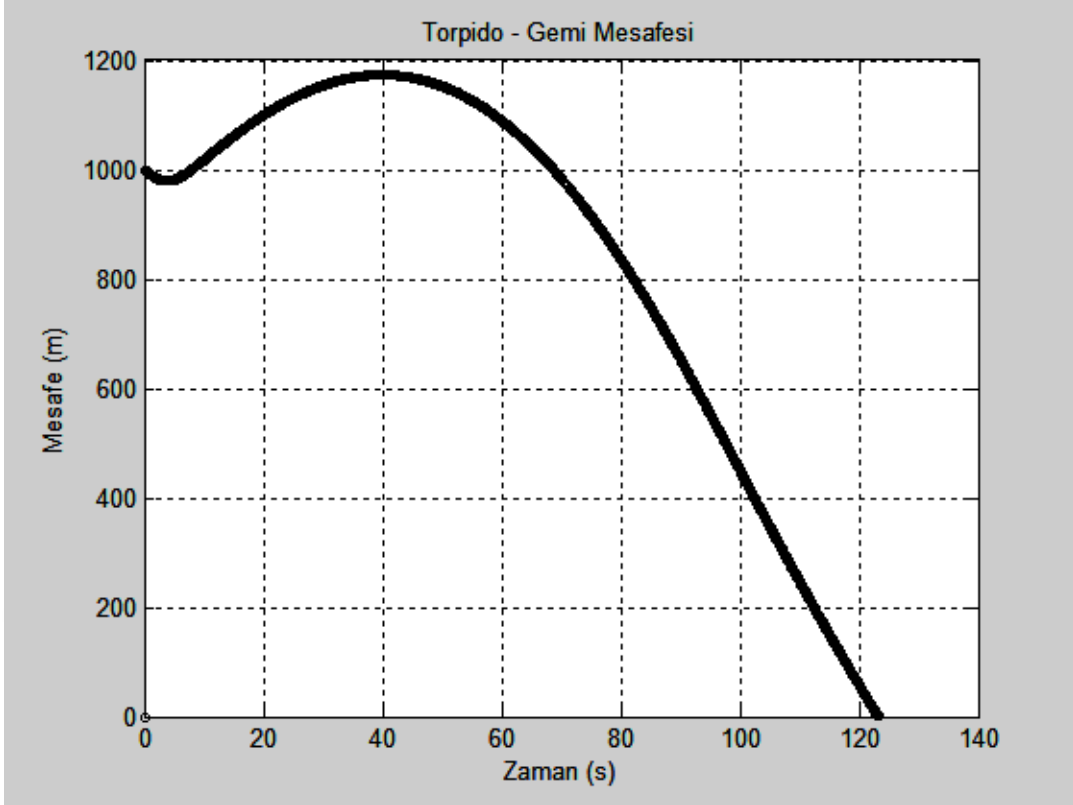




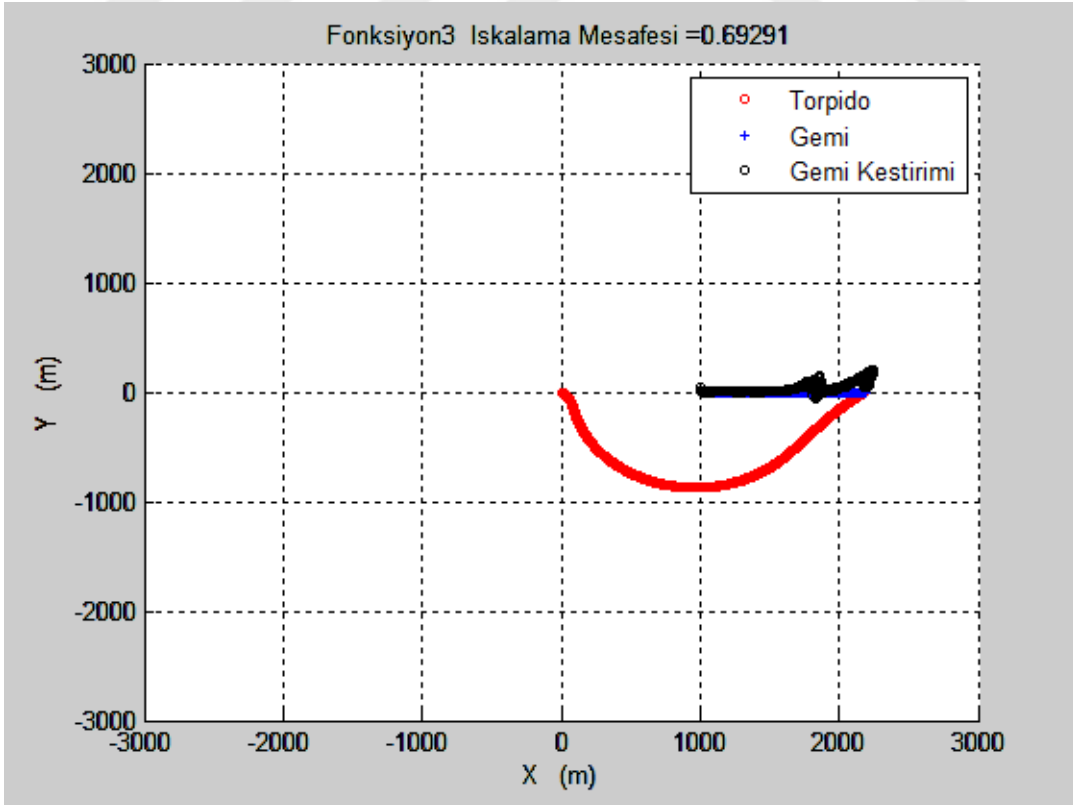
Şekil 19 Delta 2 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışla önleme



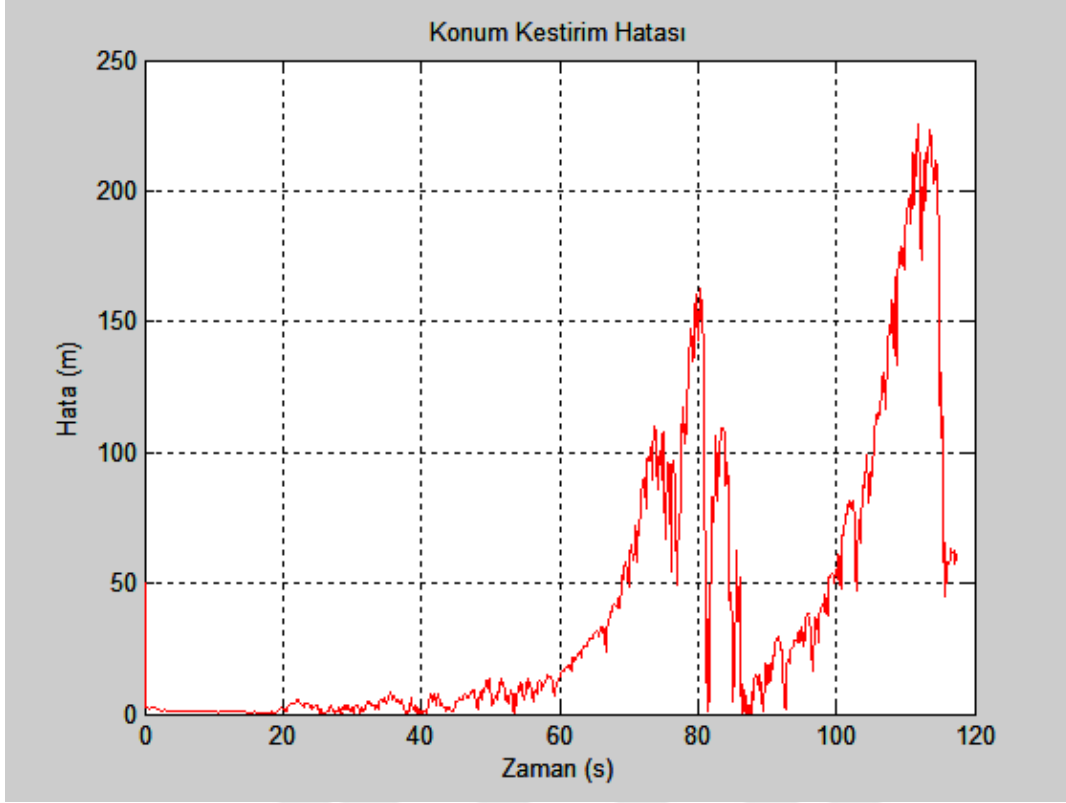
Şekil 20 Delta 2 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışta hata-zaman grafiği



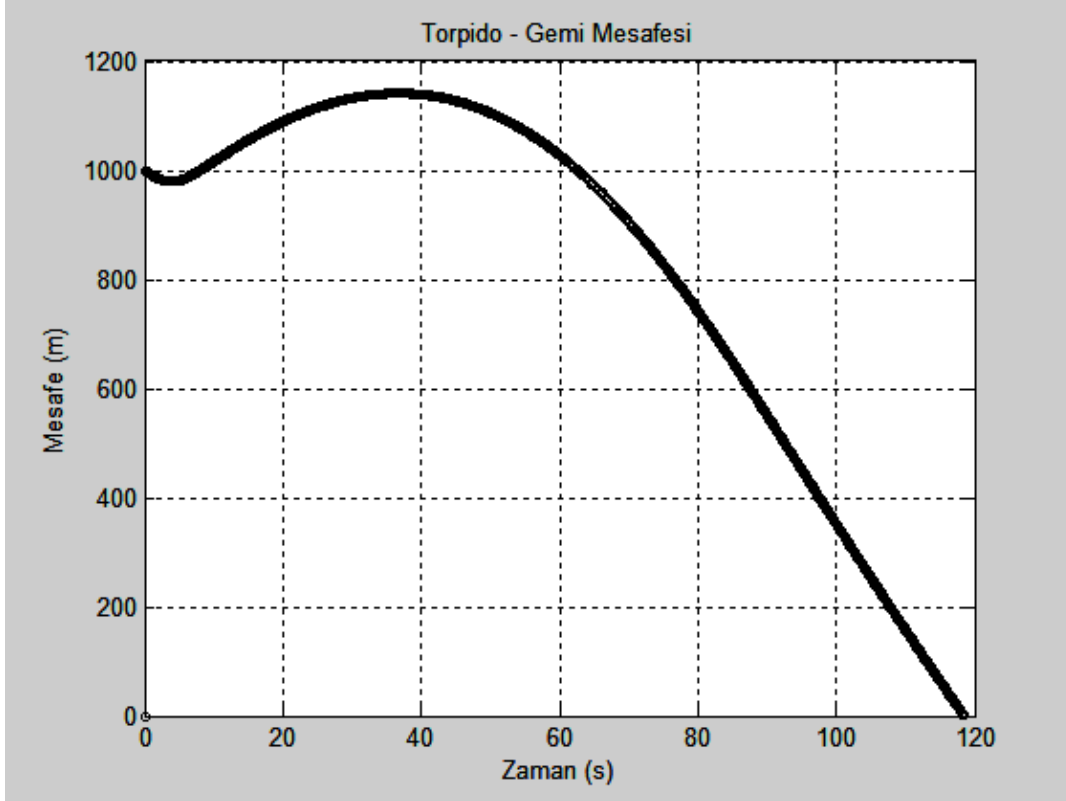
Şekil 21 Delta2 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışta torpedo-gemi mesafesi grafiği



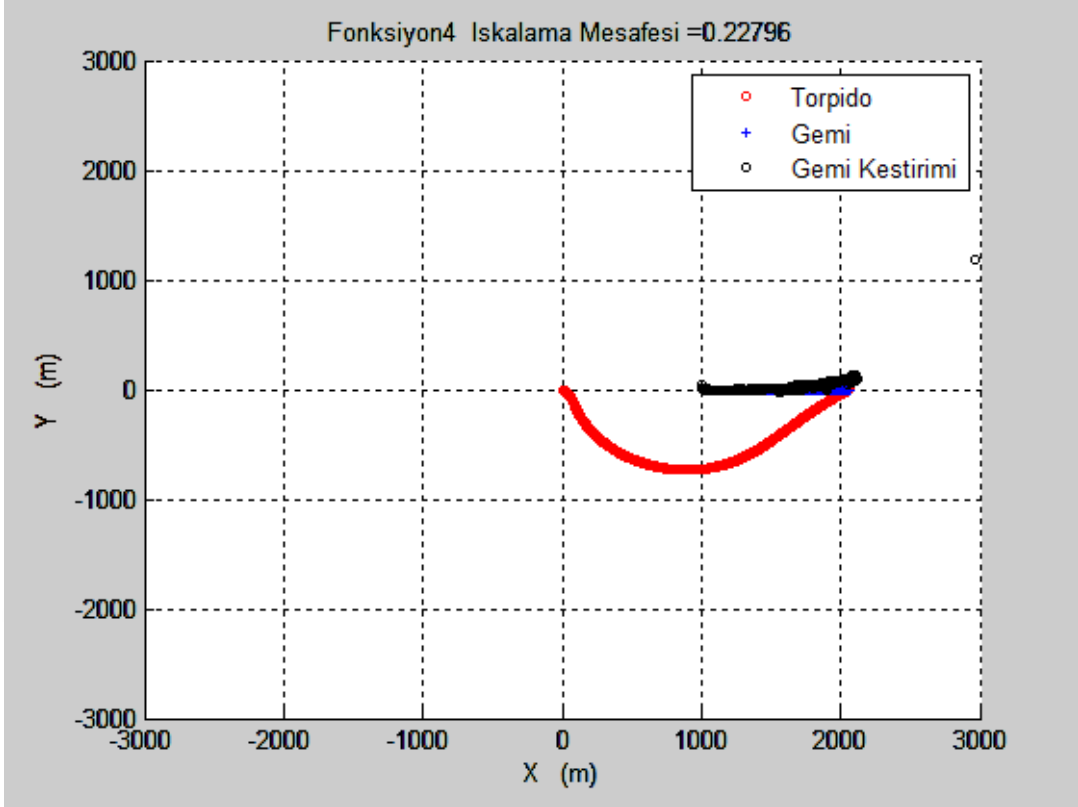
Şekil 22 Delta 3 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışla önleme



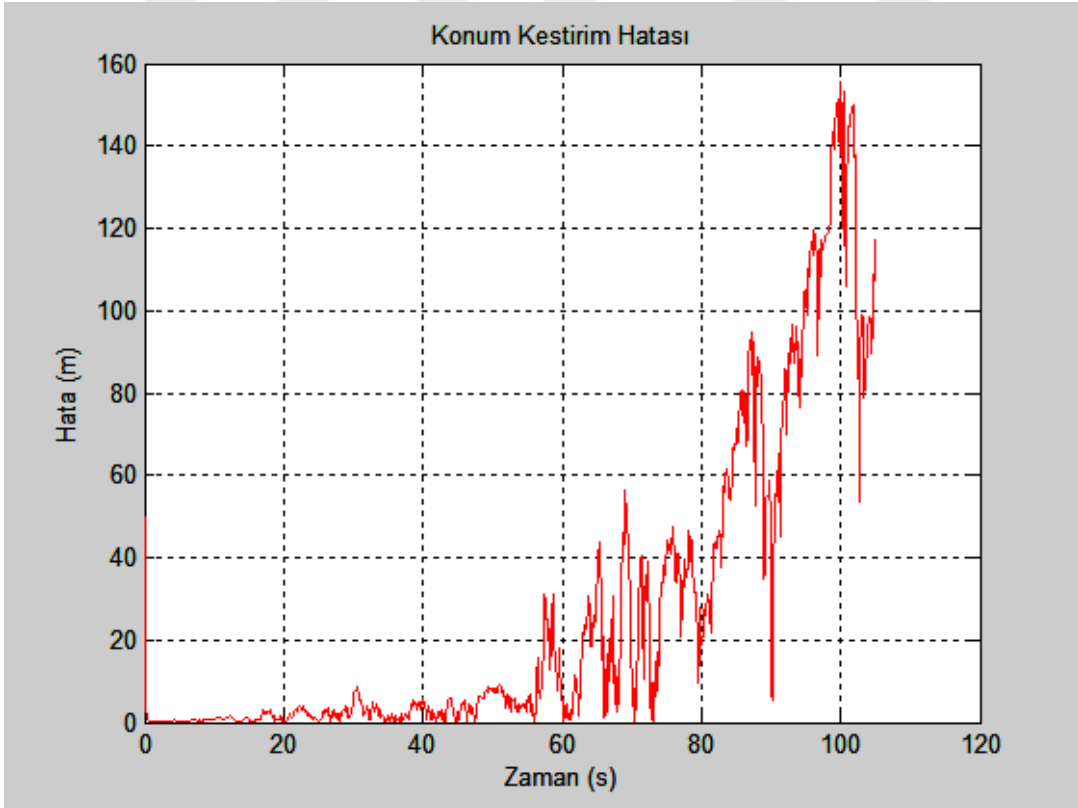
Şekil 23 Delta 3 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışta hata-zaman grafiği



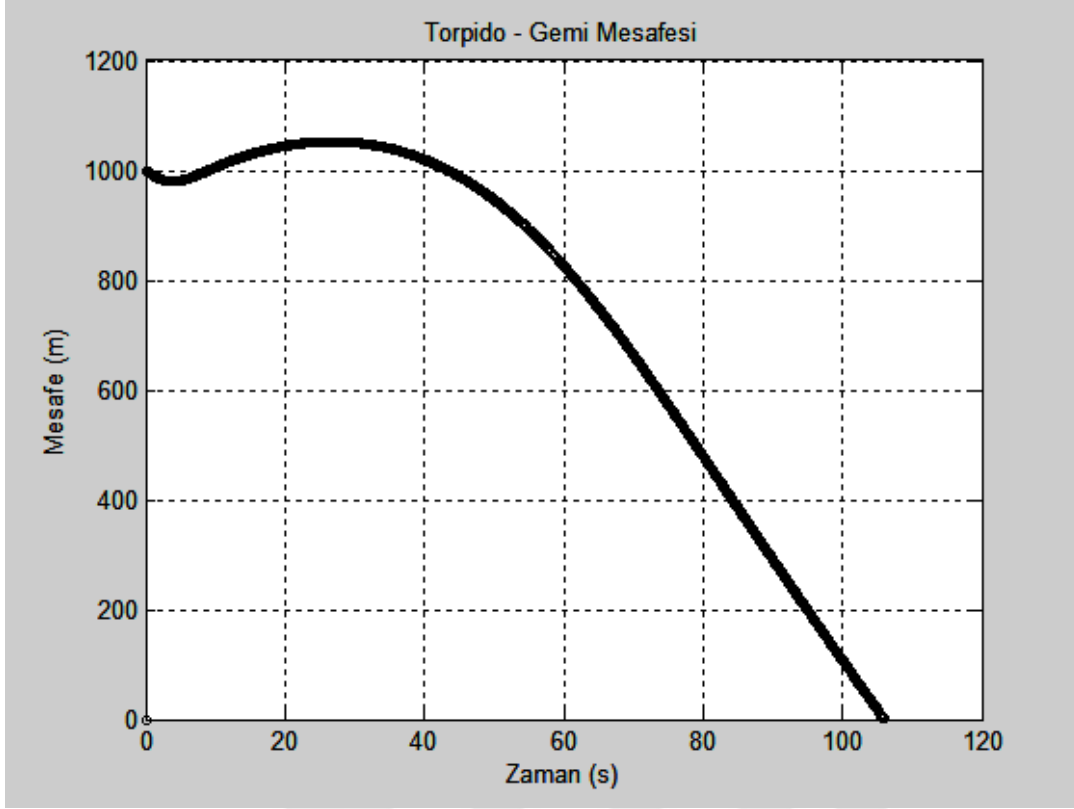
Şekil 24 Delta 3 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışta torpedo-gemi mesafesi grafiği



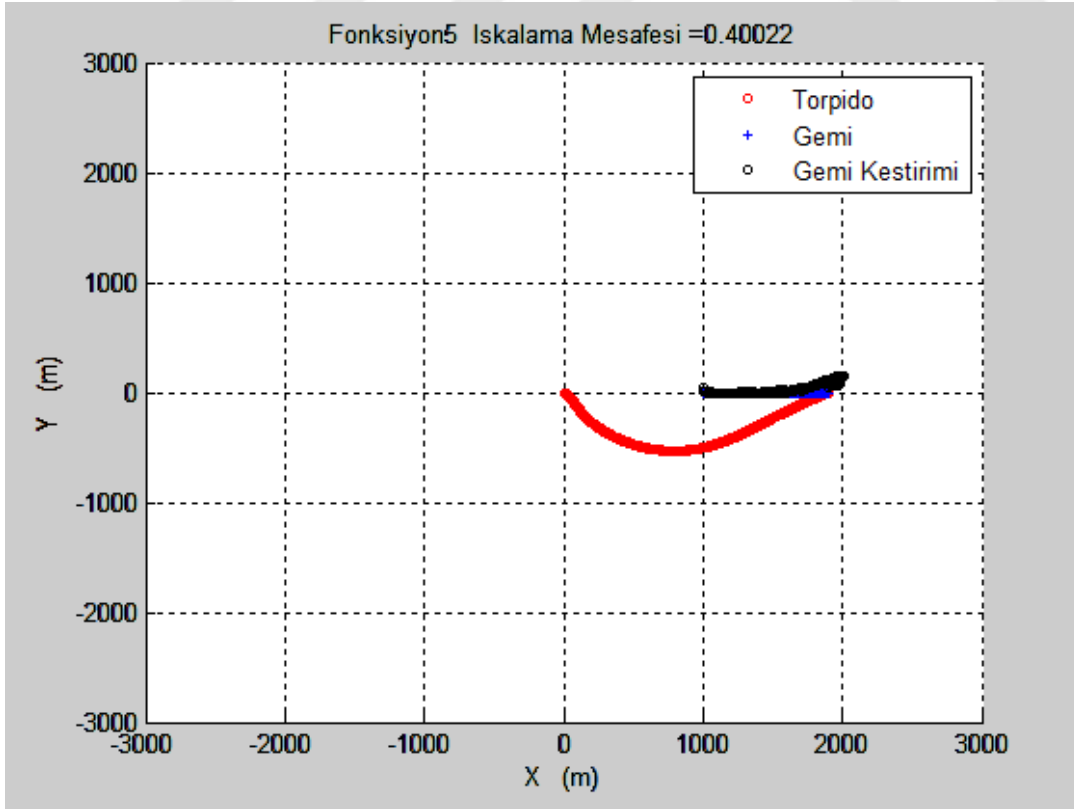
Şekil 25 Delta 4 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışla önleme



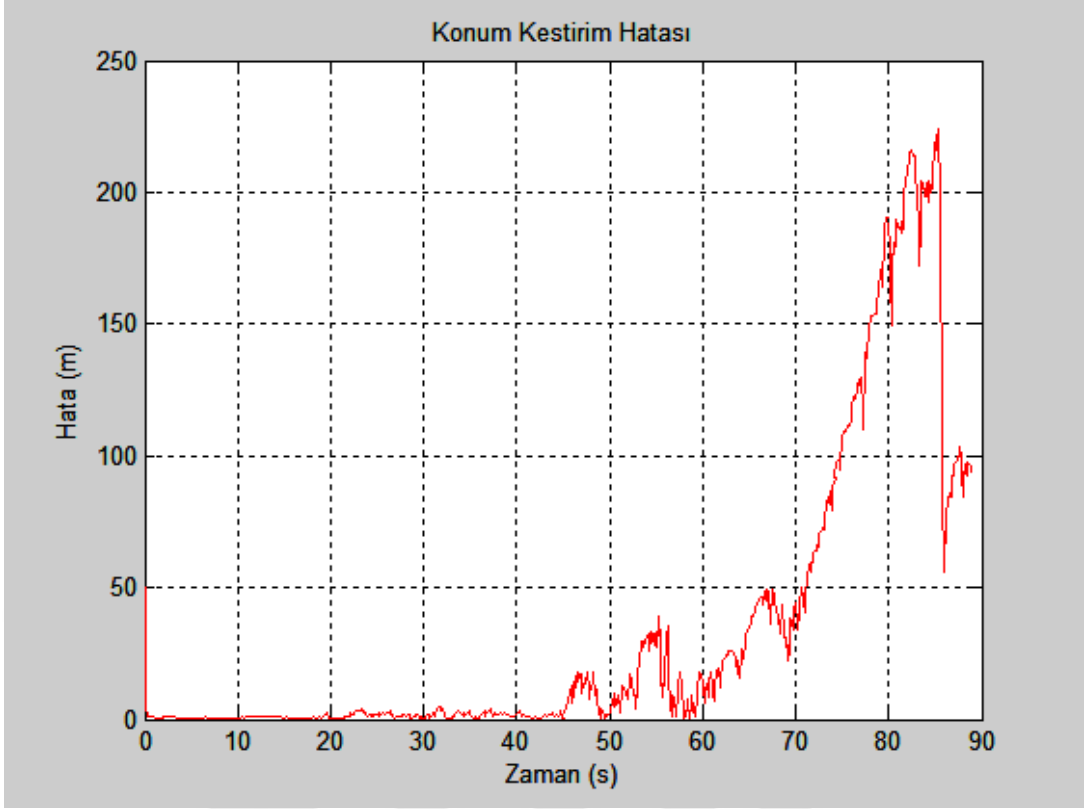
Şekil 26 Delta 4 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışta hata-zaman grafiği



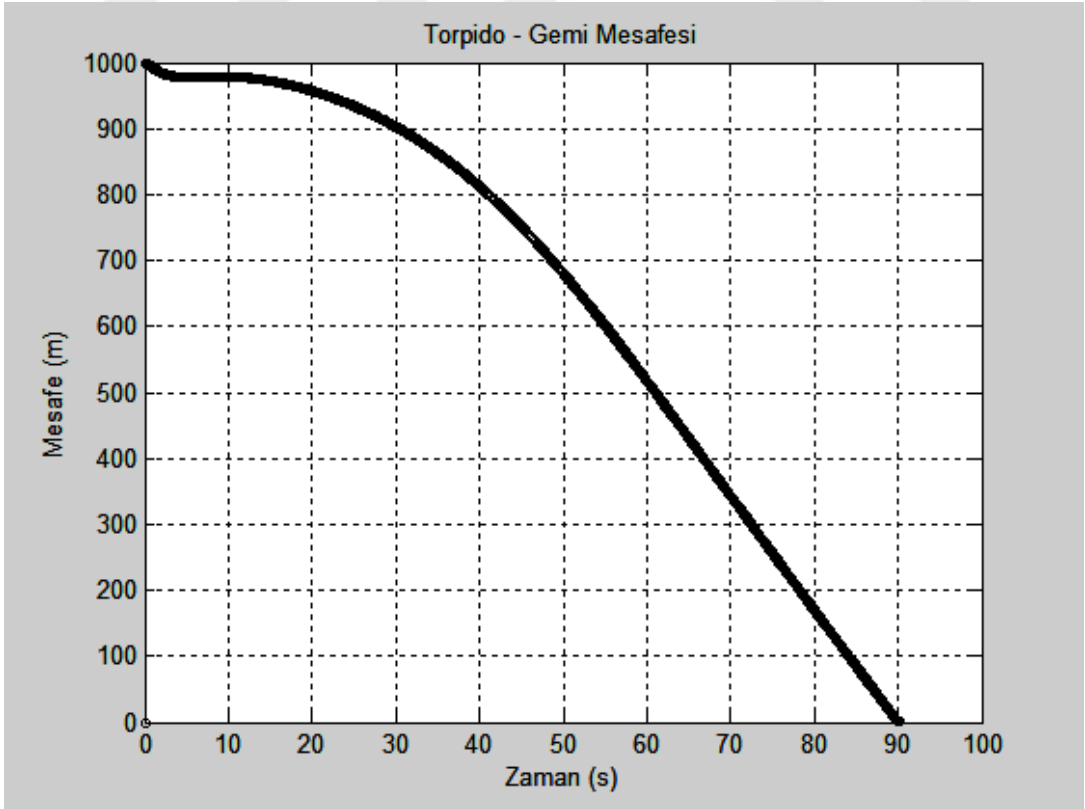
Şekil 27 Delta 4 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışta torpido-gemi mesafesi grafiği



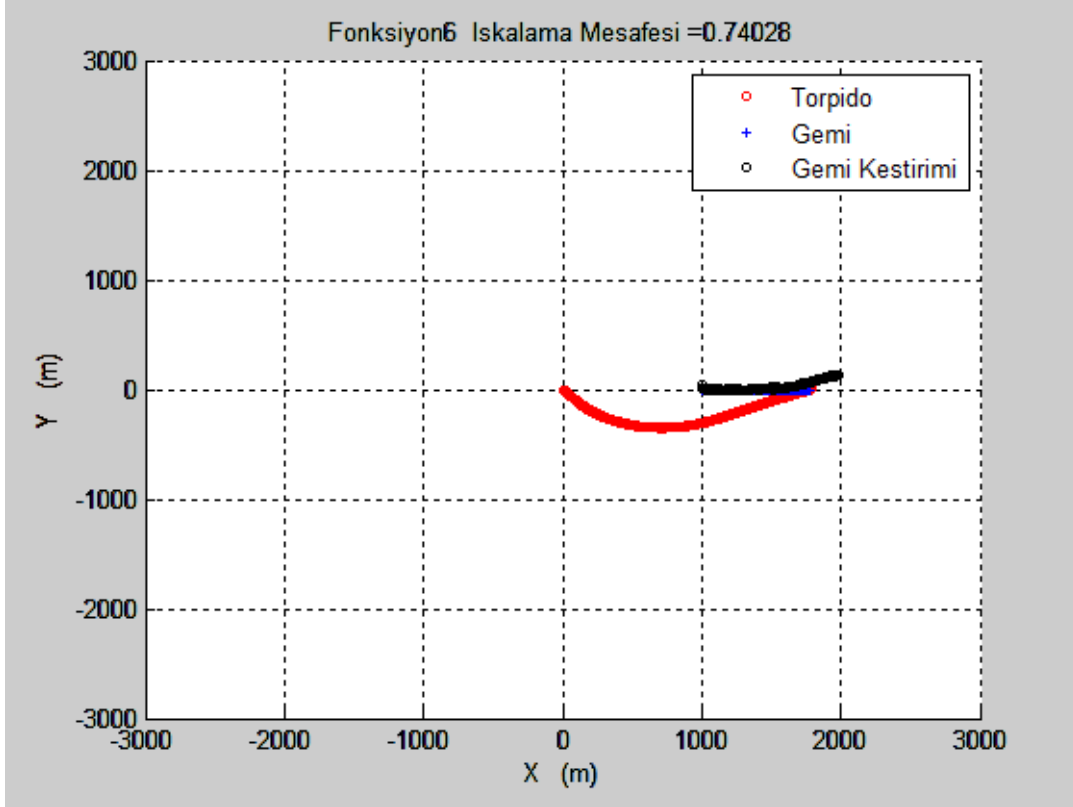
Şekil 28 Delta 5 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışla önleme



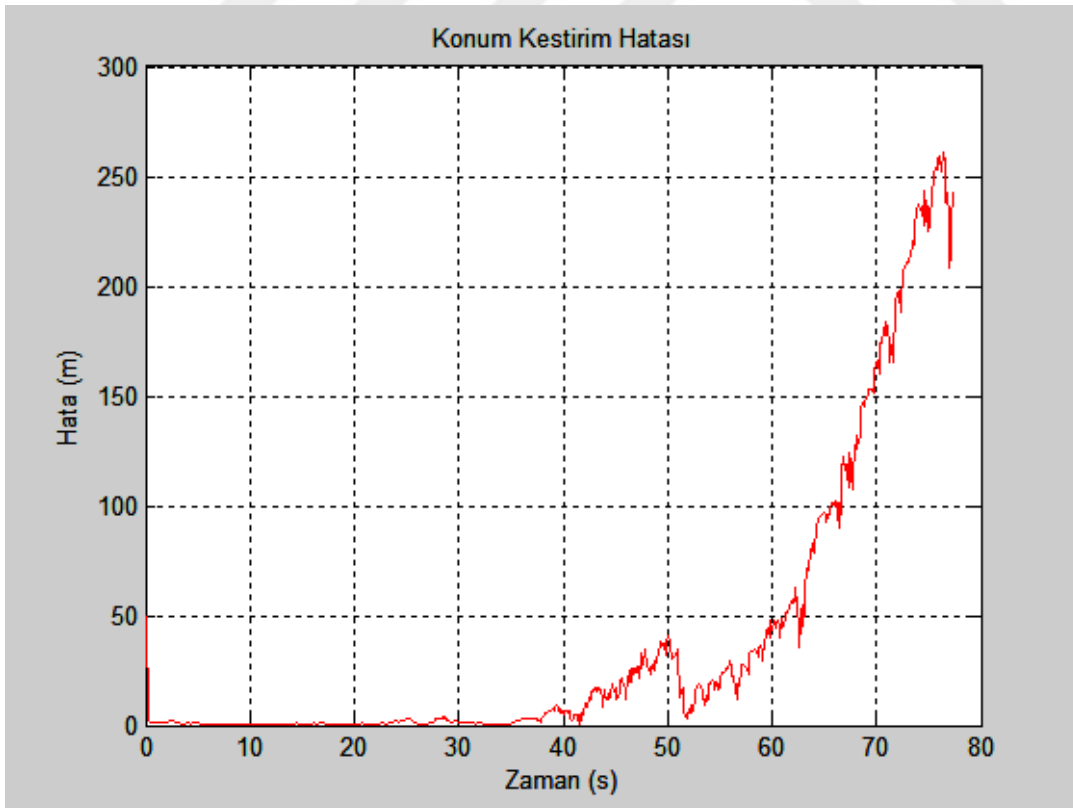
Şekil 29 Delta 5 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışta hata-zaman grafiği



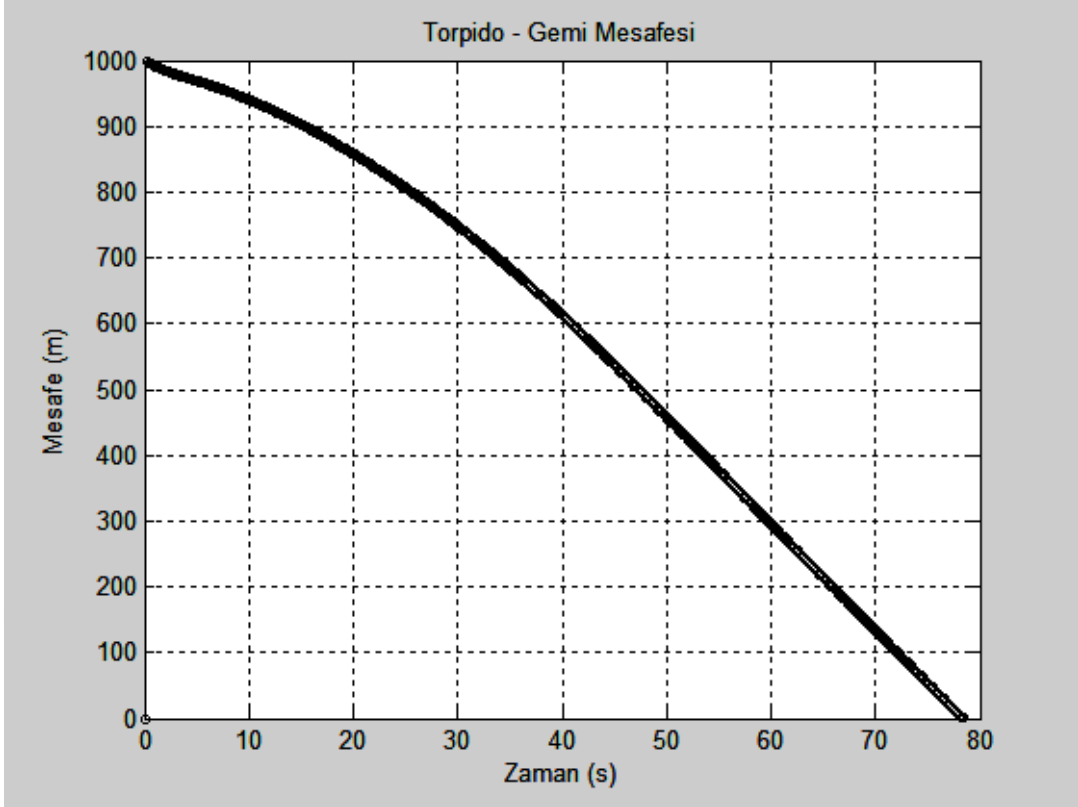
Şekil 30 Delta 5 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışta torpido-gemi mesafesi grafiği



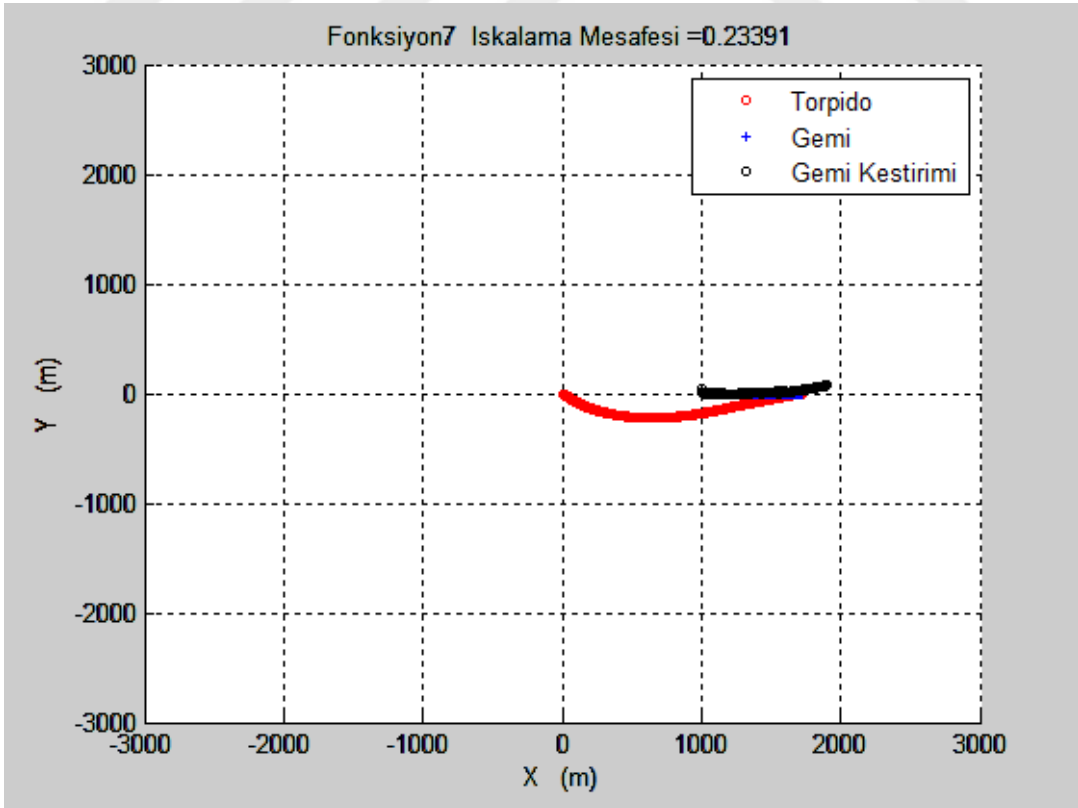
Şekil 31 Delta 6 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışla önleme



Şekil 32 Delta 6 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışta hata-zaman grafiği

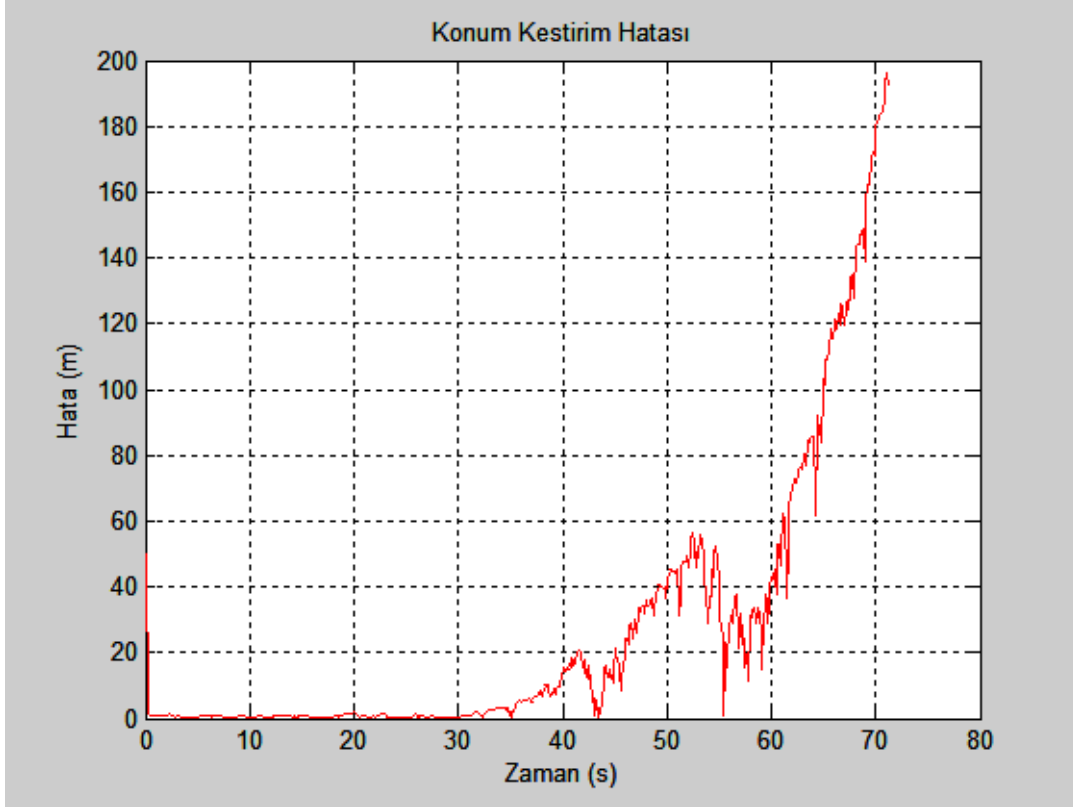


Şekil 33 Delta 6 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışta torpido-gemi mesafesi grafiği

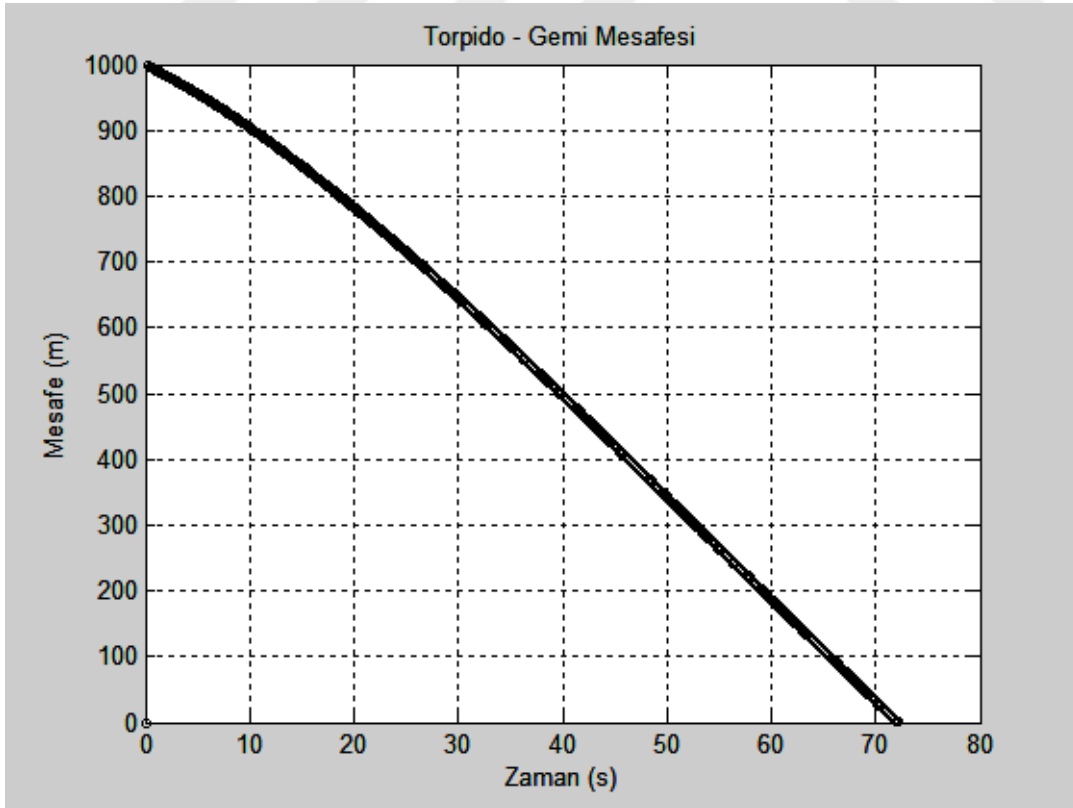


Şekil 34 Delta 7 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışla önleme

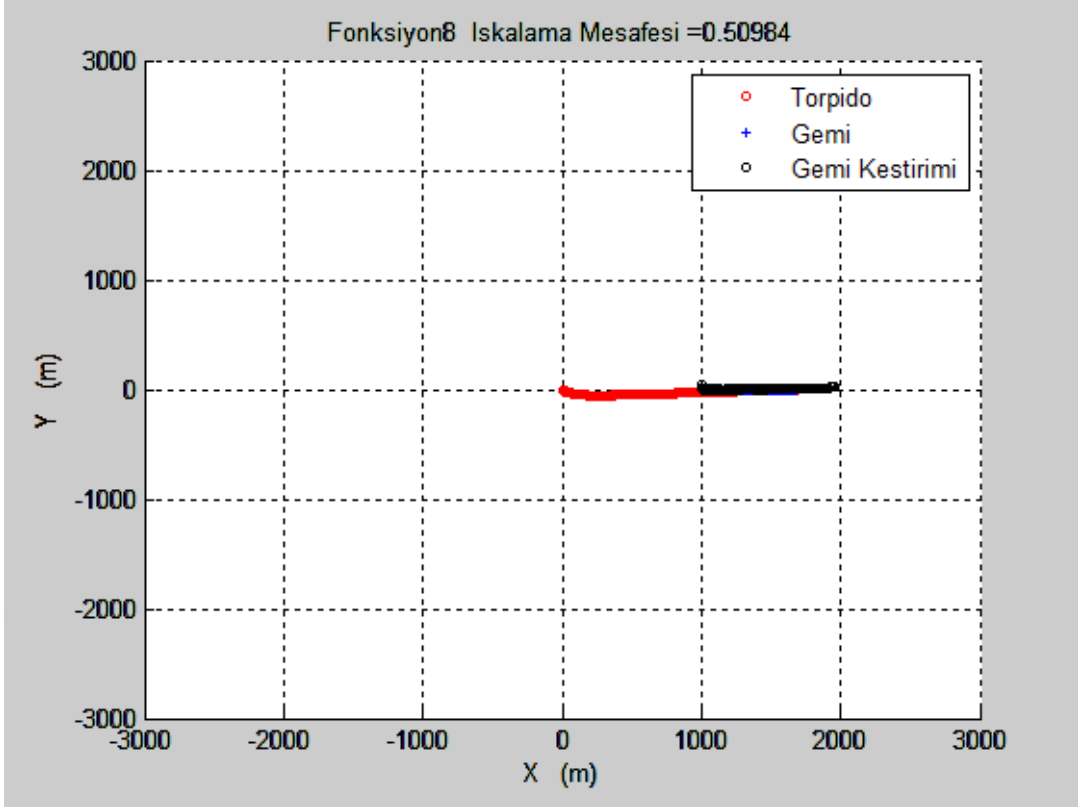




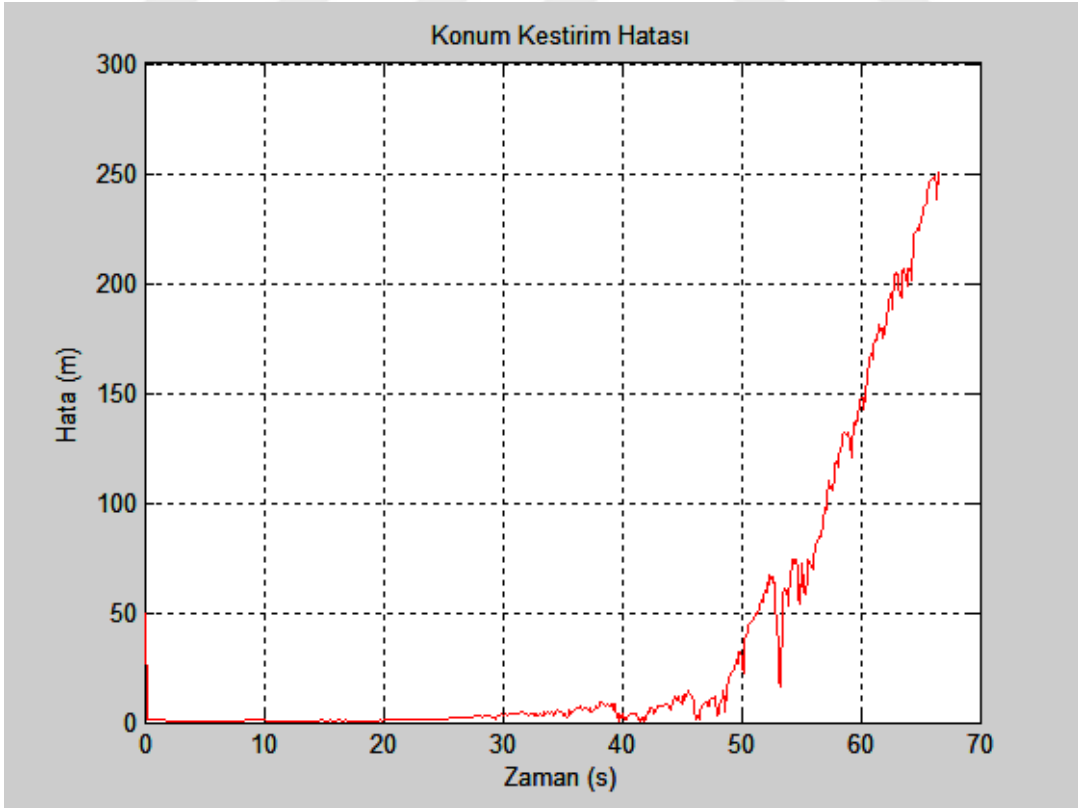
Şekil 35 Delta 7 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışta hata-zaman grafiği



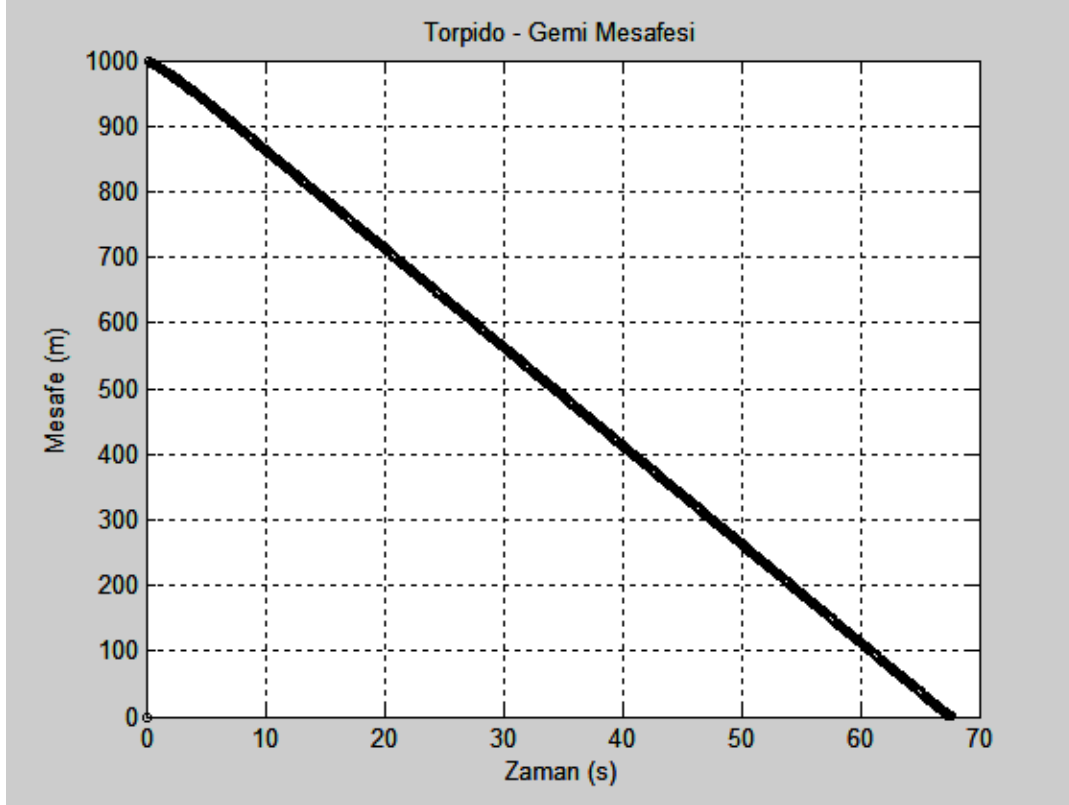
Şekil 36 Delta 7 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışta torpido-gemi mesafesi grafiği



Şekil 37 Delta 8 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışla önleme



Şekil 38 Delta 8 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışta hata-zaman grafiği



Şekil 39 Delta 8 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe arkadan atışta torpido-gemi mesafesi grafiği

Hedef kestirim grafikleri incelendikten sonra, torpidonun sabit hızlı hedefe arkadan atıldığı durumda kullanılan  $\delta(t)$  ağırlıklandırma fonksiyonlarına göre Monte Carlo simülasyonları sonucu oluşan ıskalama mesafesi değerlerinin çizelgesi aşağıdadır.

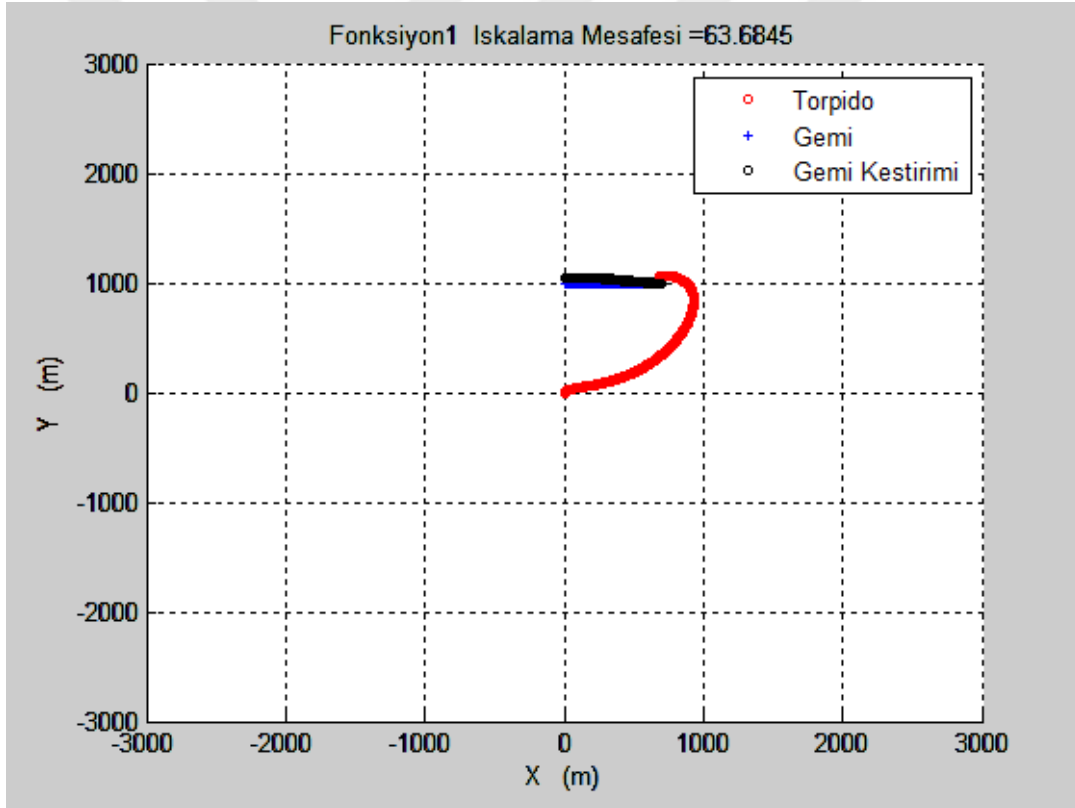
Çizelge 2 Sabit hızlı hedefe arkadan atışta oluşan ıskalama mesafeleri ve önleme zamanları

Fonksiyon	Önleme Zamanı (sn)	İskalama Mesafesi (m)
$\delta_1(t)$	124.5	0.61
$\delta_2(t)$	123.3	0.05
$\delta_3(t)$	118.6	0.71
$\delta_4(t)$	106.1	0.26
$\delta_5(t)$	90.1	0.57
$\delta_6(t)$	78.4	0.21
$\delta_7(t)$	72.2	0.25
$\delta_8(t)$	67.6	0.52

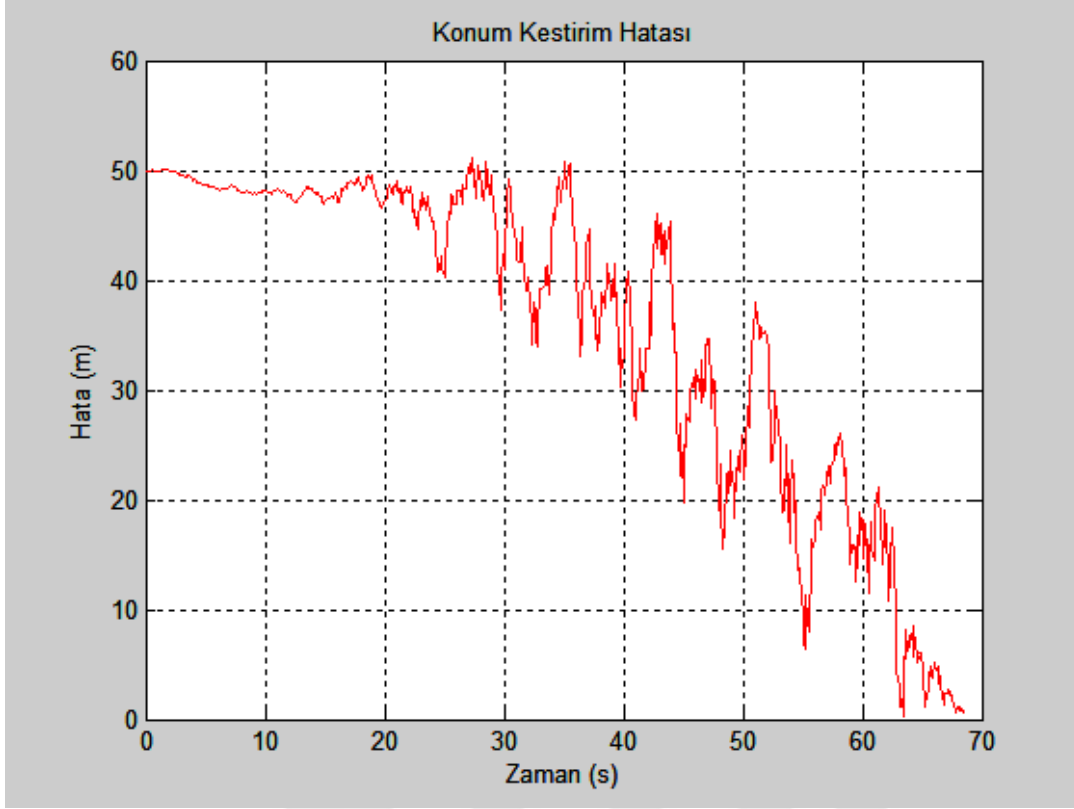
Bu çizelgeden de anlaşılacağı üzere tüm ağırlıklandırma fonksiyonları ile hedefe önleme yapılabildiği görülmüştür. Hedef noktasal olarak alındığı için ıskalama mesafeleri küçük olmaktadır. Kestirim ivmesine ağırlık verilen senaryoda hedefe daha uzun sürede önleme yapıldığı, önleme ivmesine ağırlık verilen senaryoda daha kısa sürede önleme yapıldığı anlaşılmıştır. Pasif hedef takibinde torpido manevra yapmadığı zaman kestirim hatasının arttığı hata-zaman grafiklerinde gözlemlenmiştir.

#### 4.2.2.2. Sabit Hızlı Hedefe Yandan Atış Yapılarak Önleme

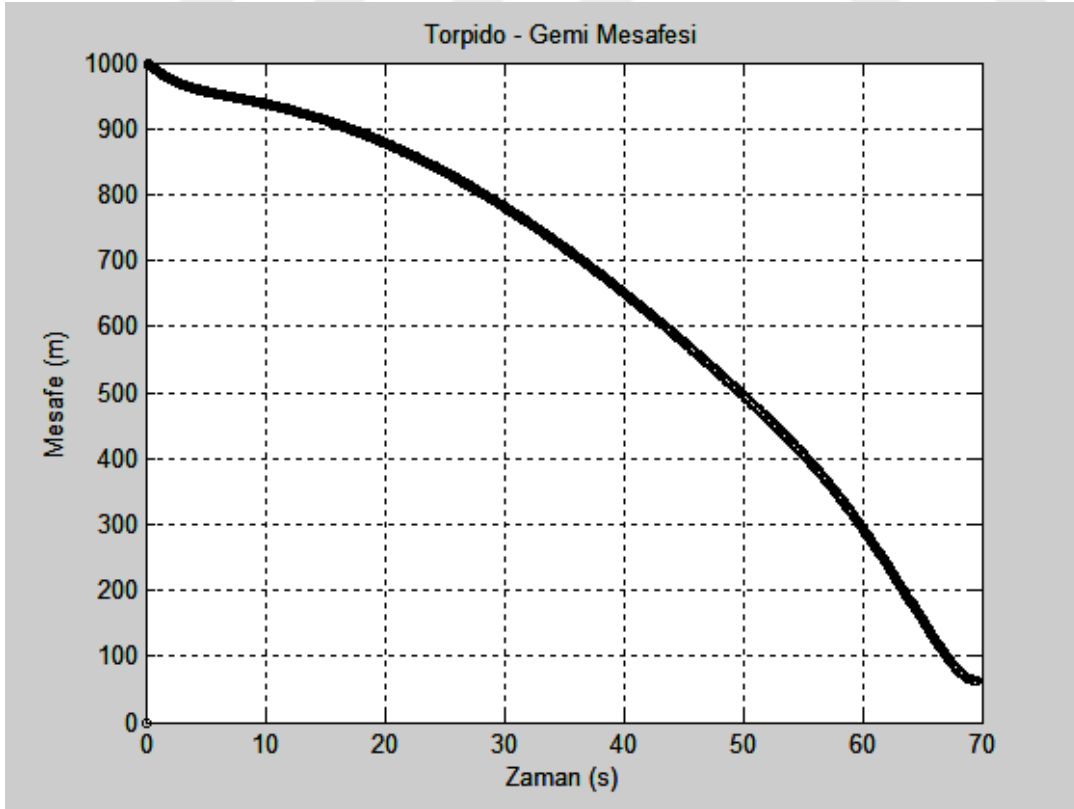
Daha önce bölüm 4.2.2.1'de yapılan tüm simülasyonlar, torpido hedefin yan tarafından fırlatılarak tekrarlanmıştır.  $\delta(t)$  fonksiyonları için simülasyon çıktıları aşağıdaki şekillerde görülebilir.



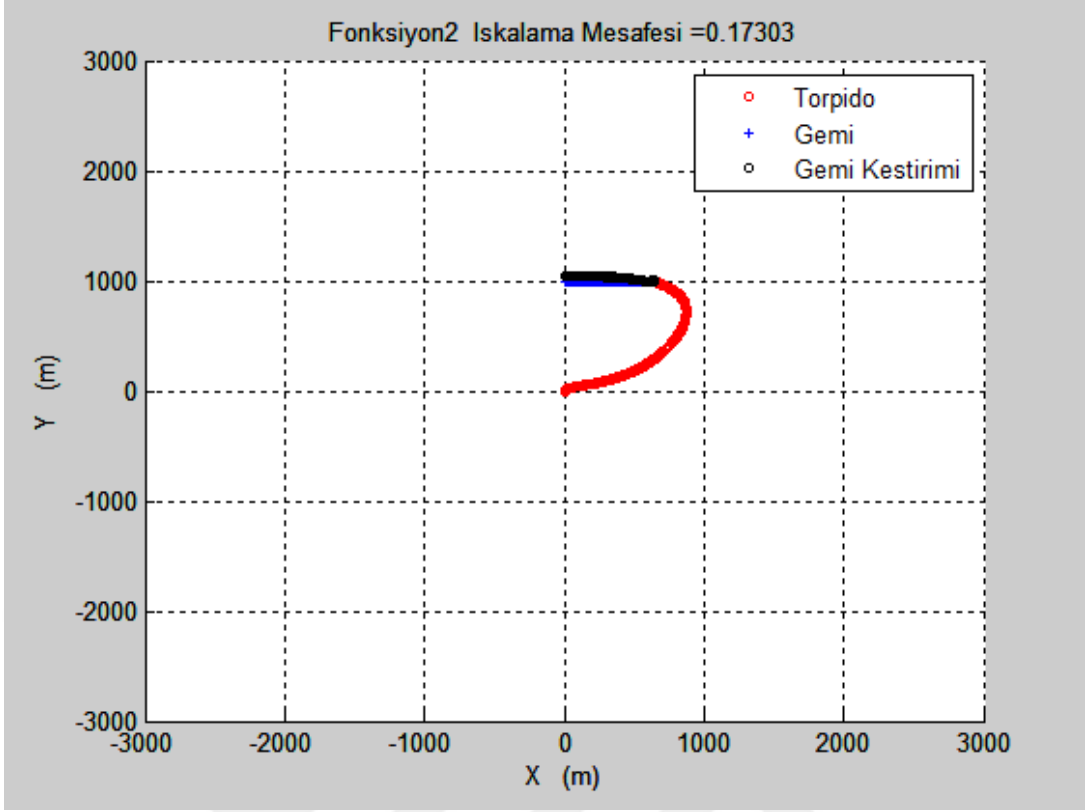
Şekil 40 Delta 1 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışla önleme



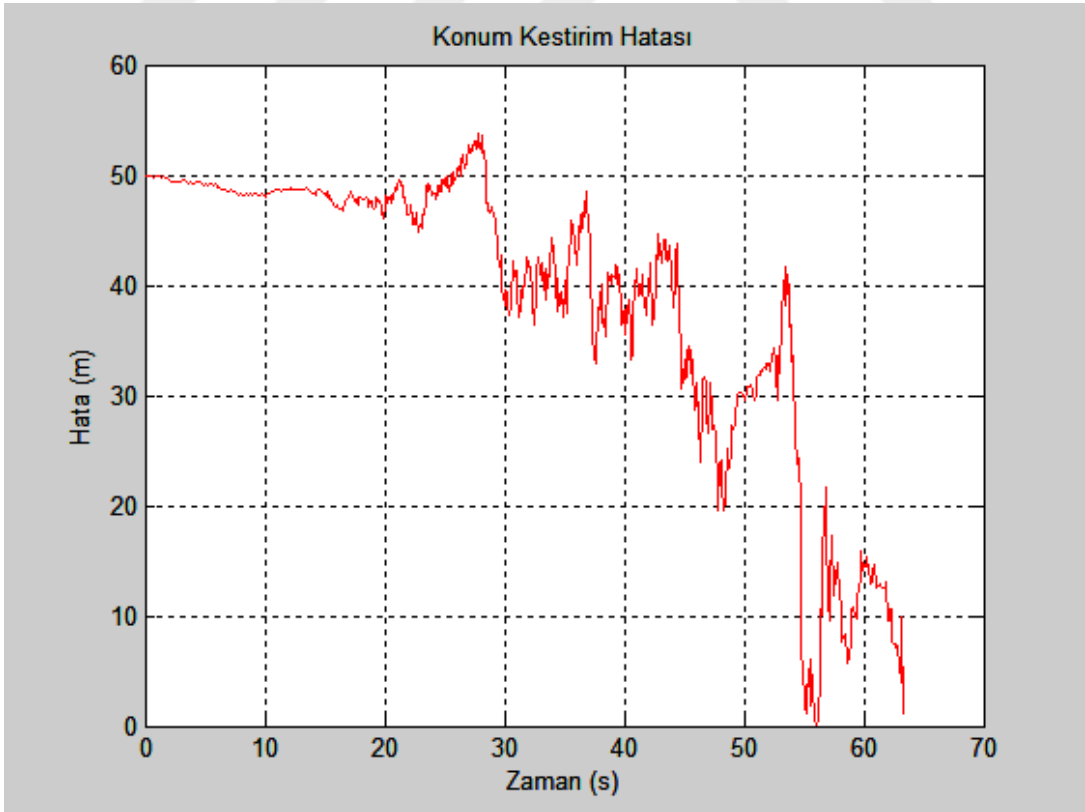
Şekil 41 Delta 1 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışta hata-zaman grafiği



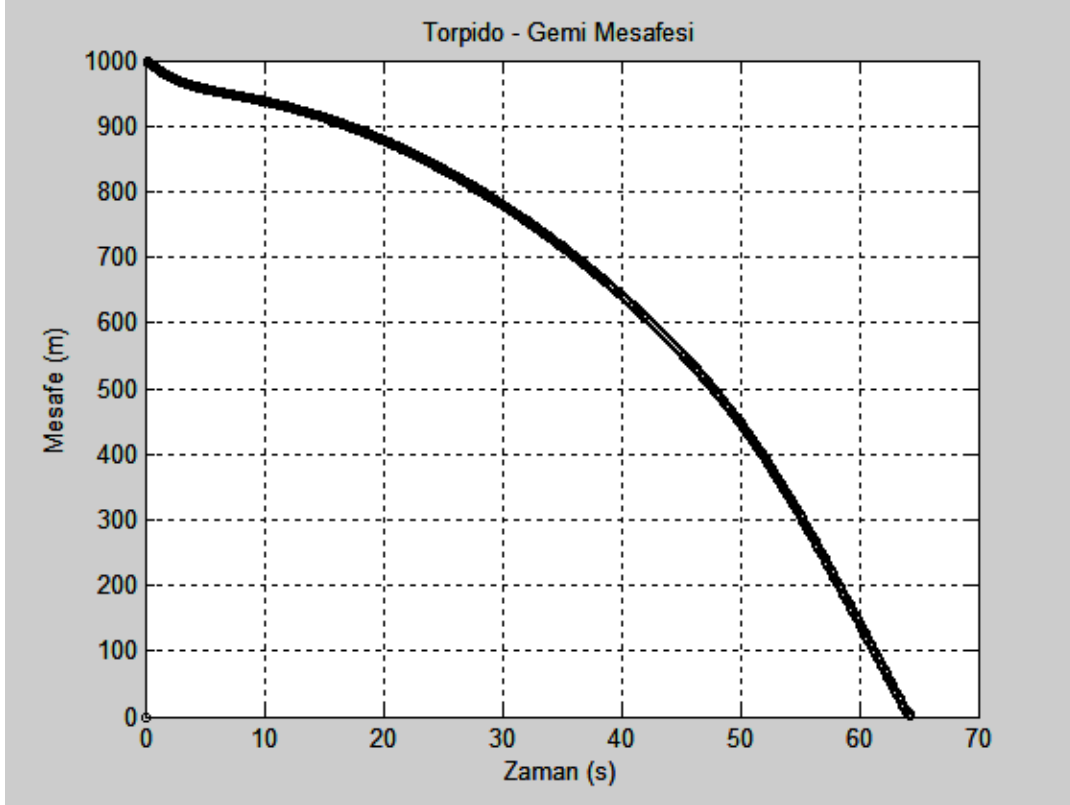
Şekil 42 Delta 1 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışta torpedo-gemi mesafesi grafiği



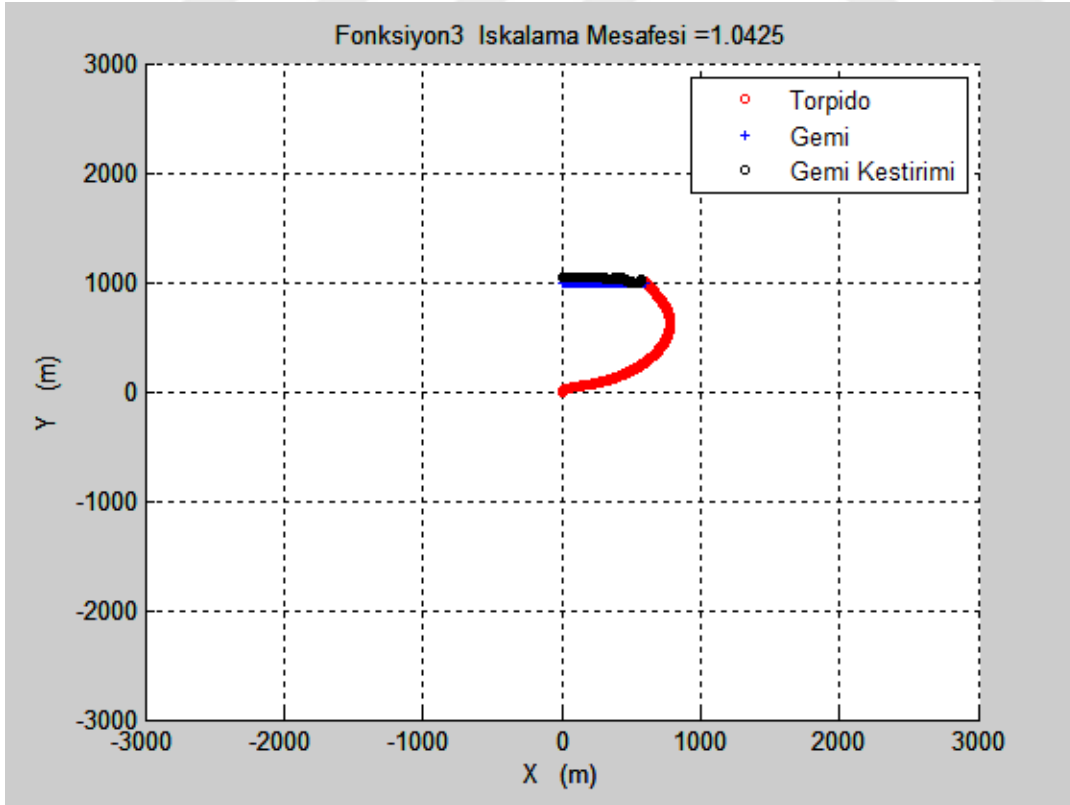
Şekil 43 Delta 2 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışla önleme



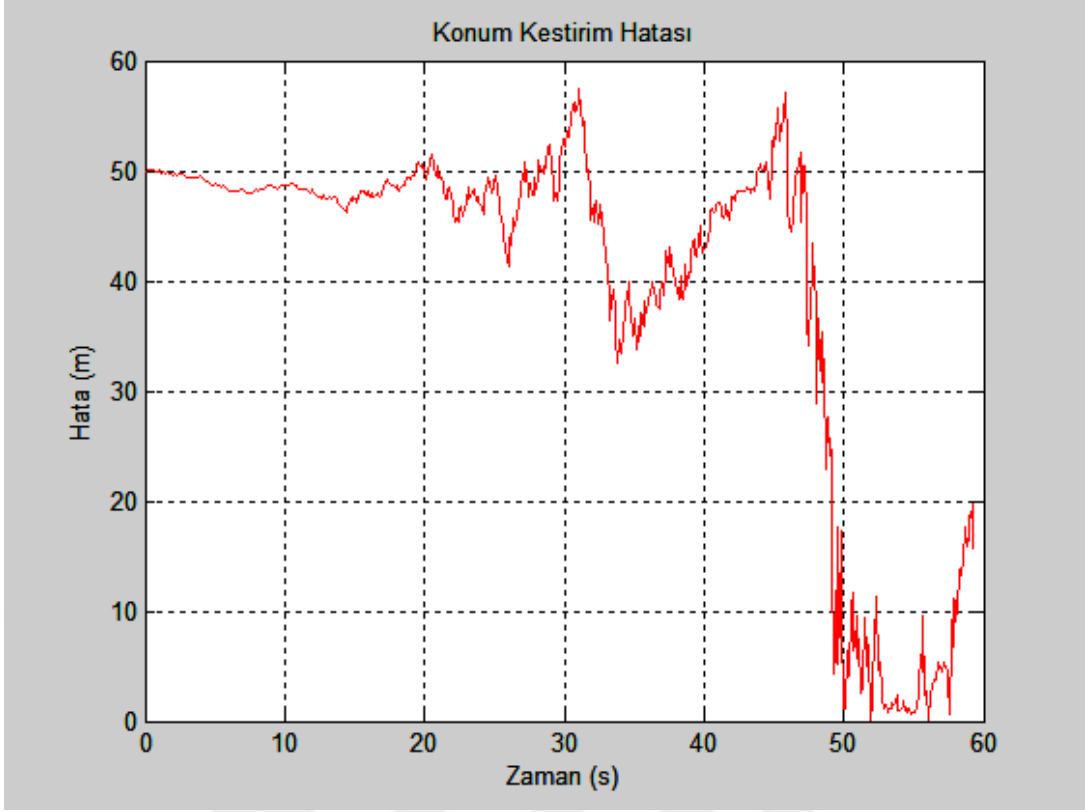
Şekil 44 Delta 2 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışta hata-zaman grafiği



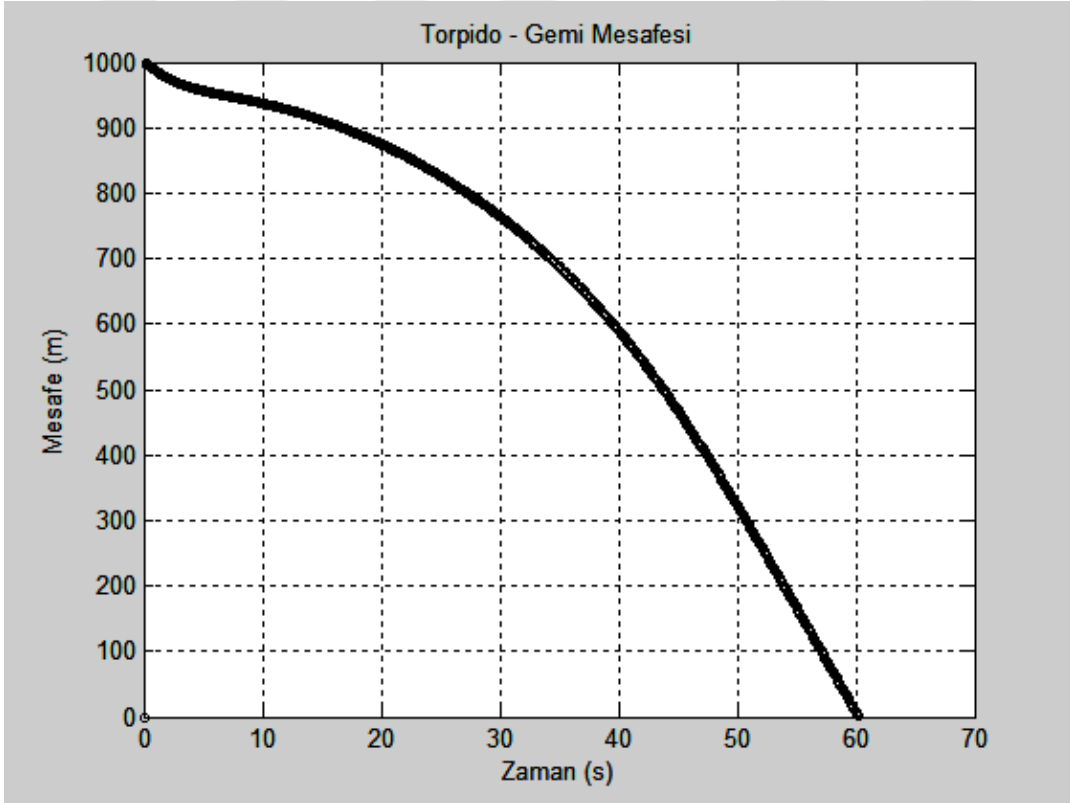
Şekil 45 Delta 2 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışta torpido-gemi mesafesi grafiği



Şekil 46 Delta 3 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışla önleme

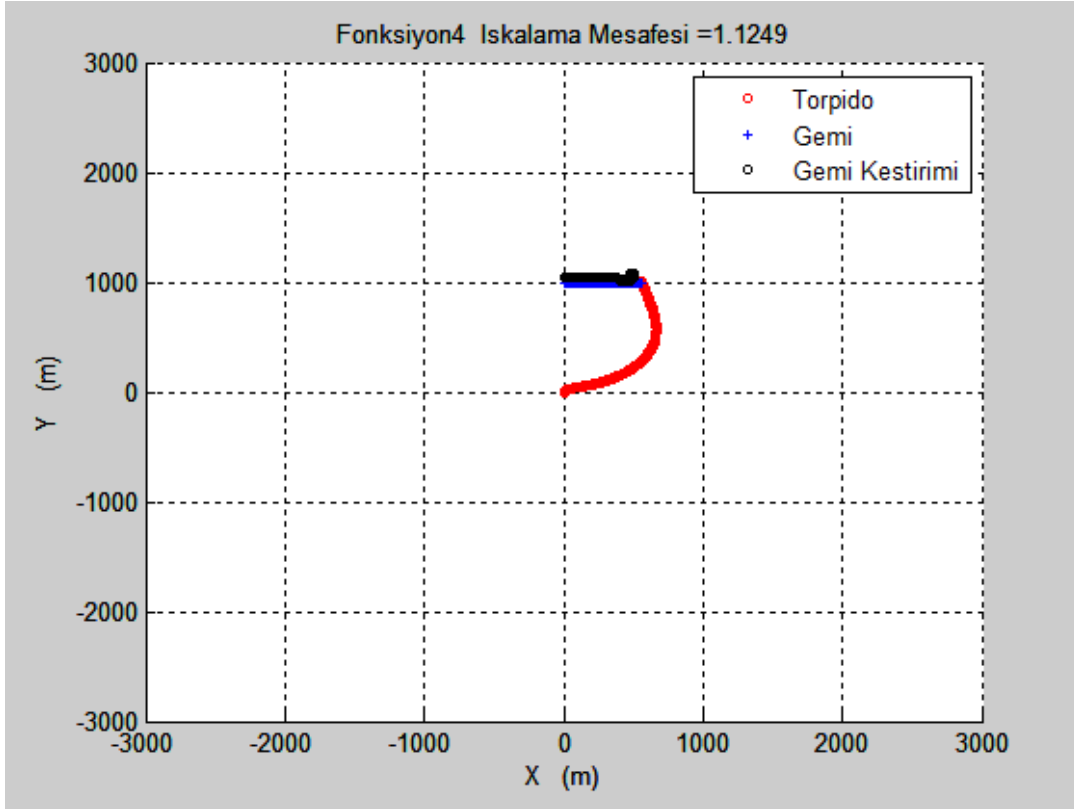


Şekil 47 Delta 3 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışta hata-zaman grafiği

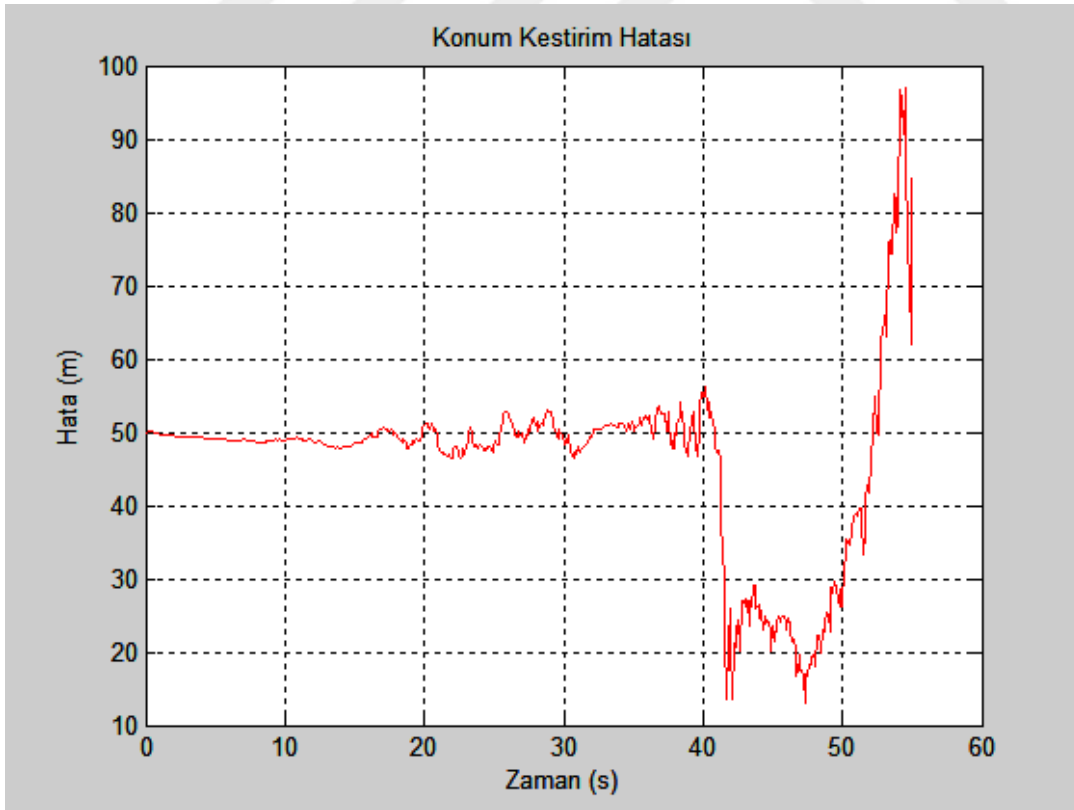


Şekil 48 Delta 3 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışta torpido-gemi mesafesi grafiği

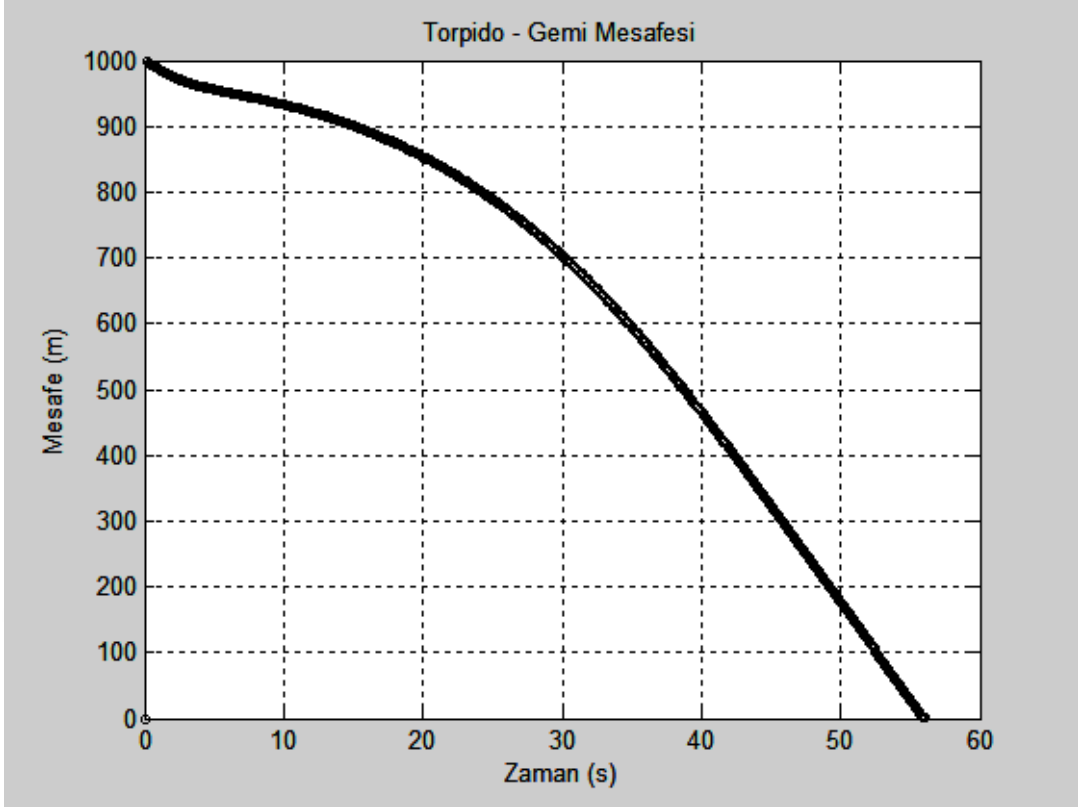




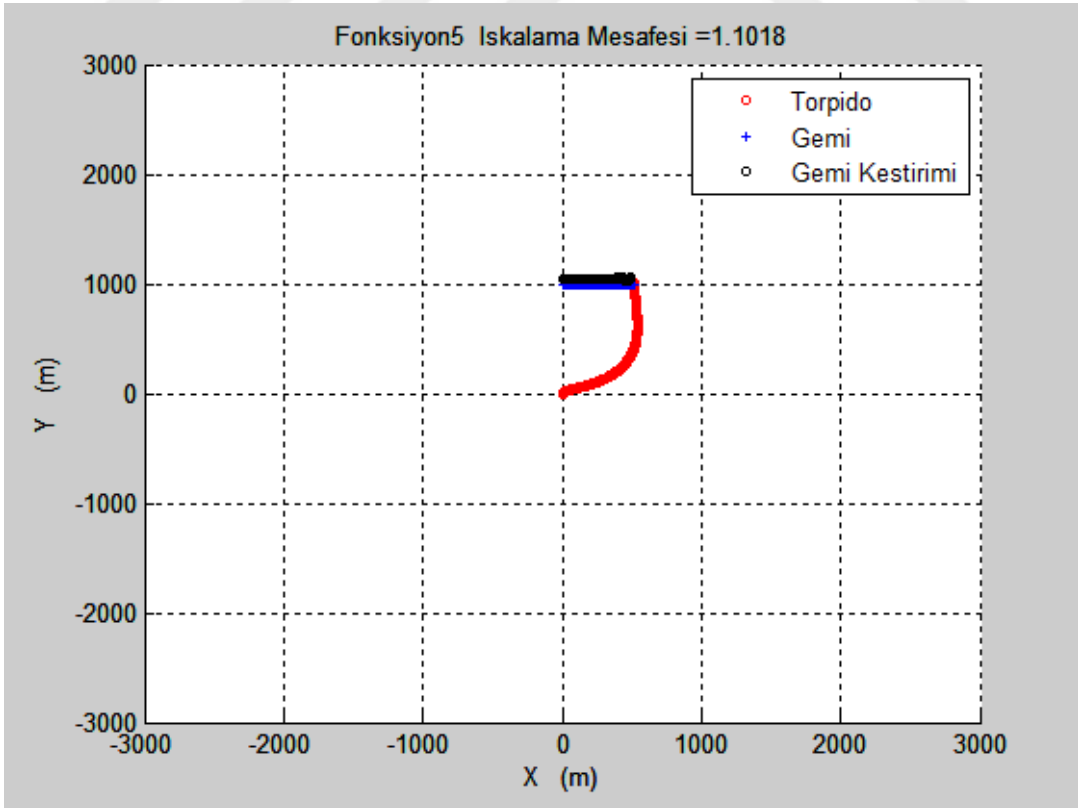
Şekil 49 Delta 4 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışla önleme



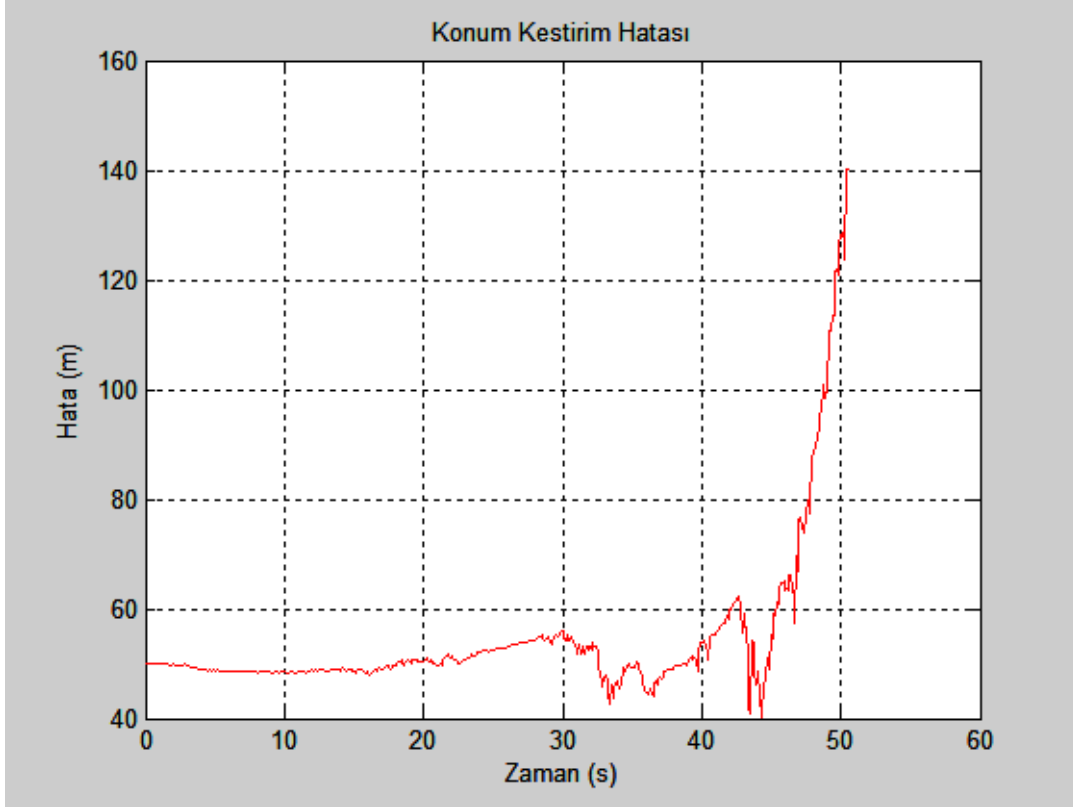
Şekil 50 Delta 4 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışta hata-zaman grafiği



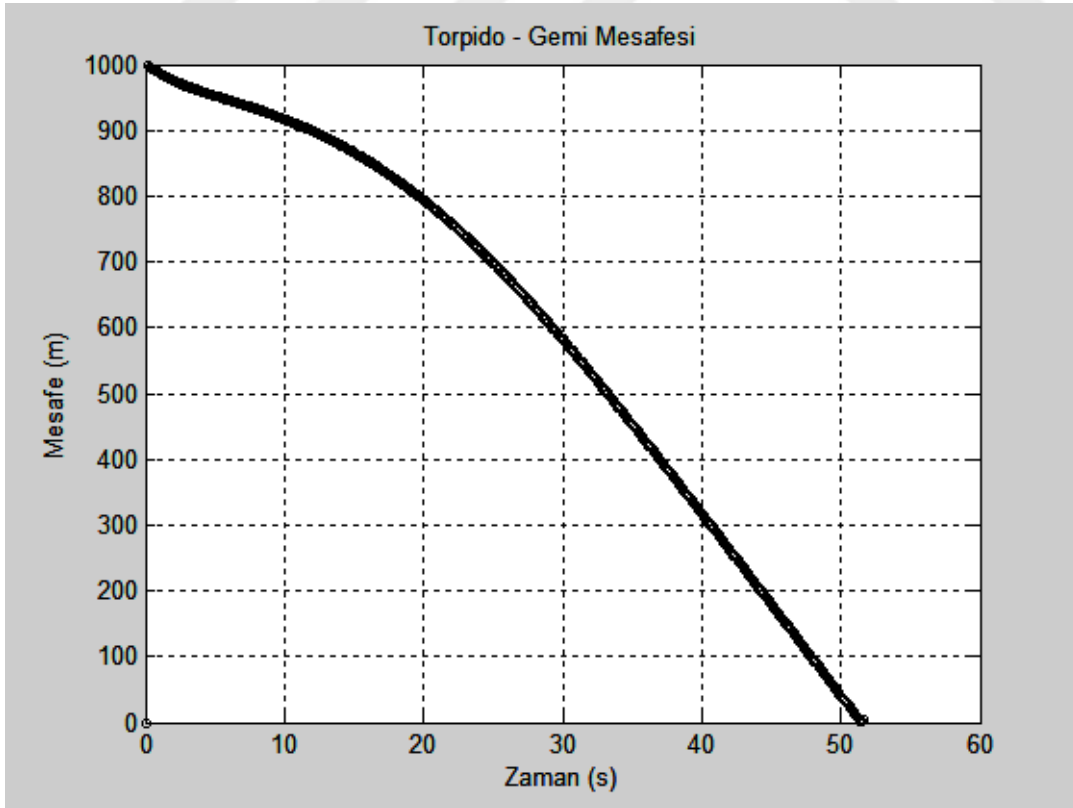
Şekil 51 Delta 4 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışta torpido-gemi mesafesi grafiği



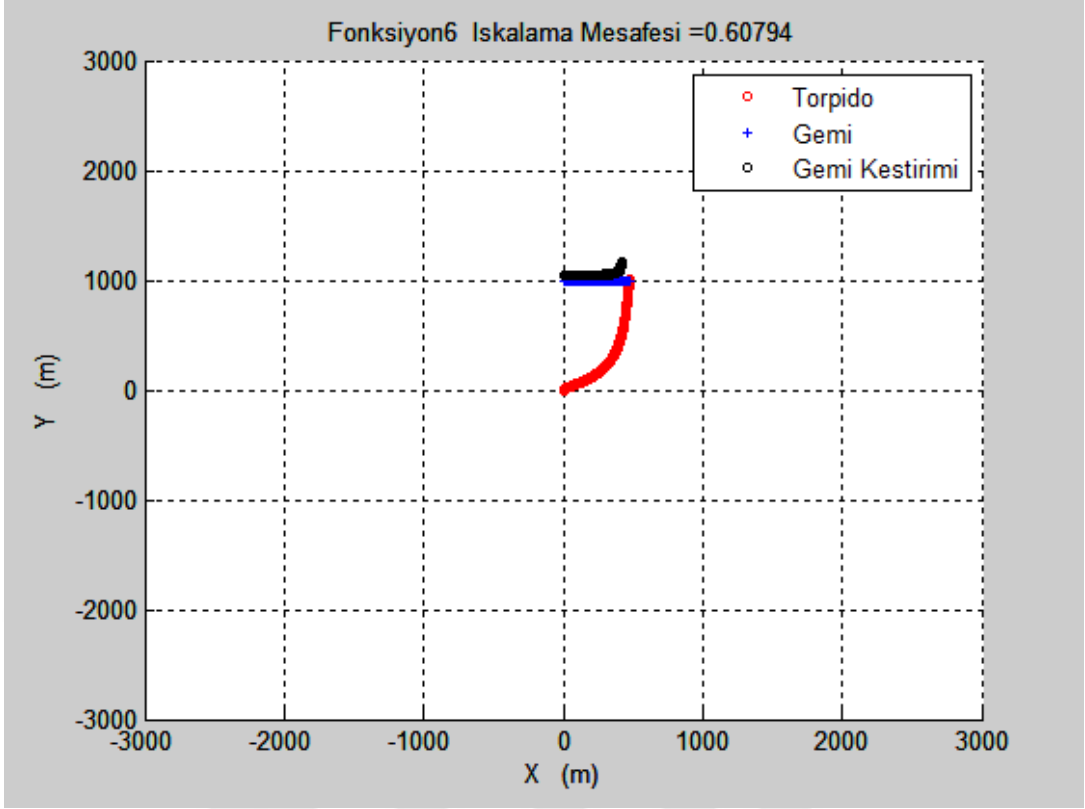
Şekil 52 Delta 5 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışla önleme



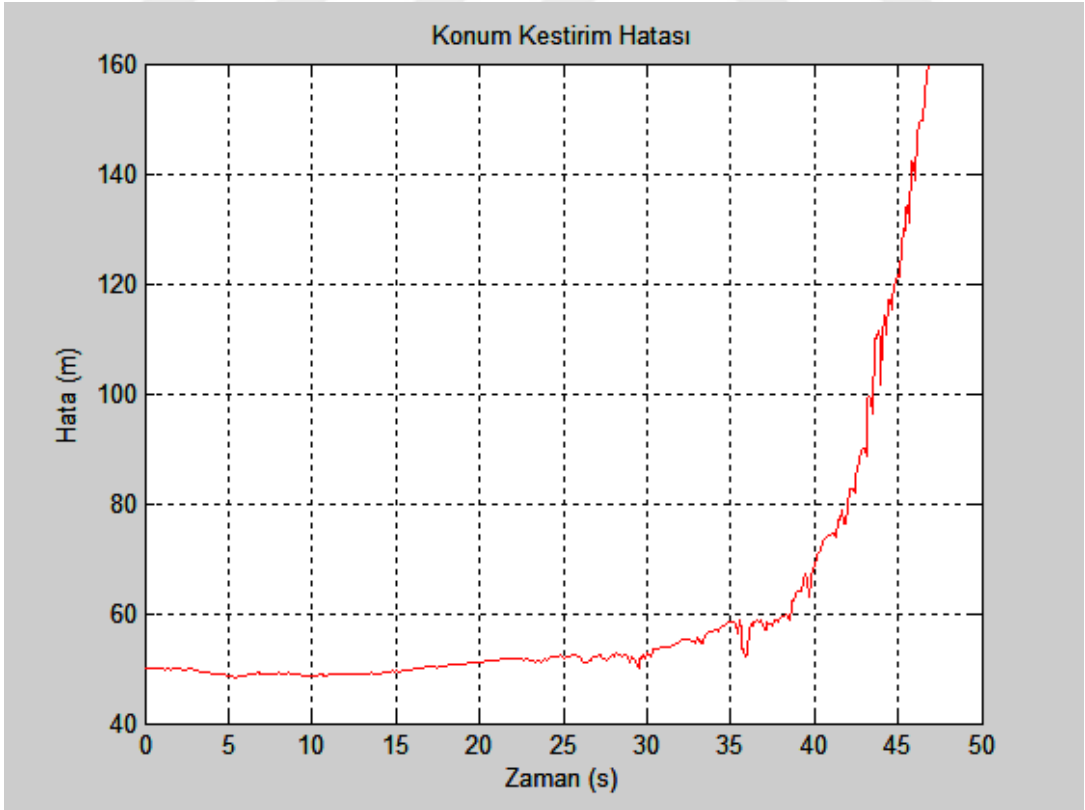
Şekil 53 Delta 5 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışta hata-zaman grafiği



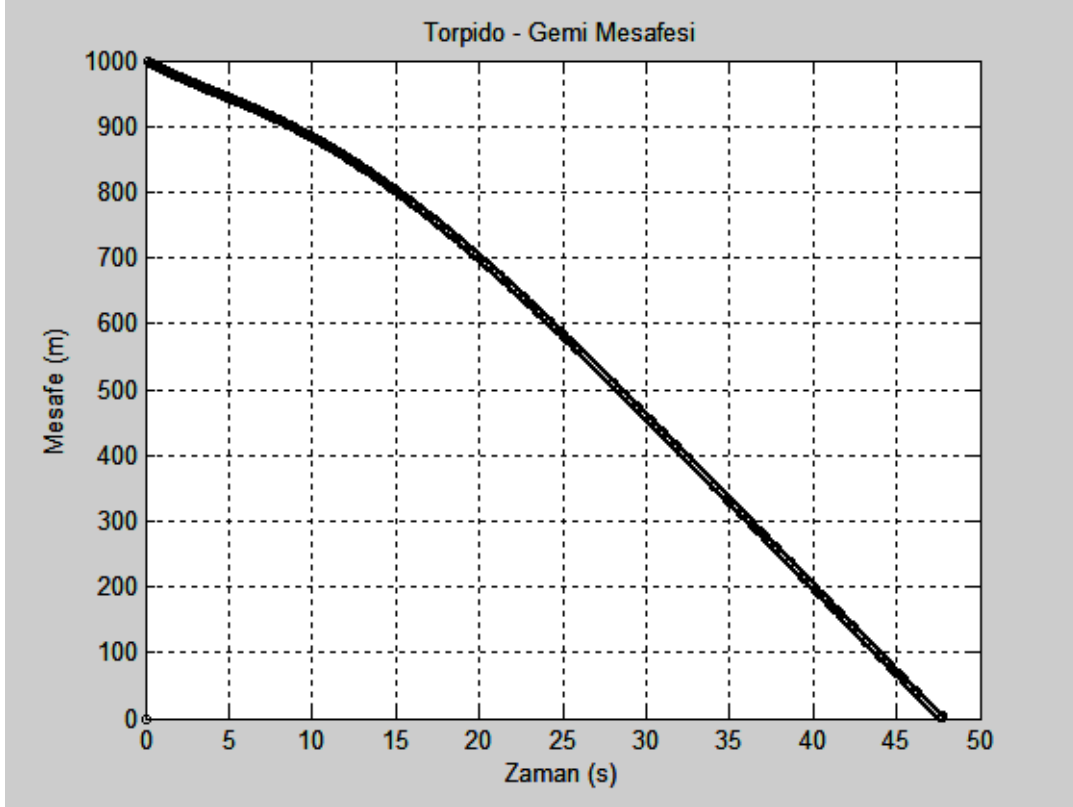
Şekil 54 Delta 5 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışta torpedo-gemi mesafesi grafiği



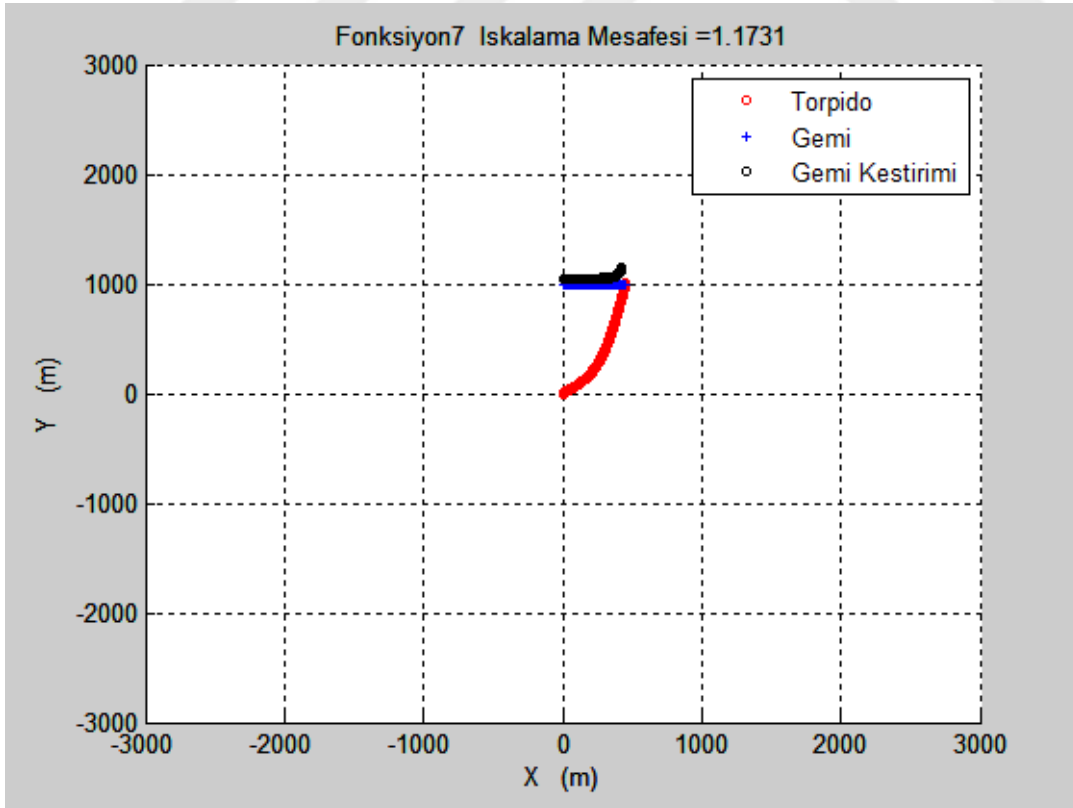
Şekil 55 Delta 6 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışla önleme



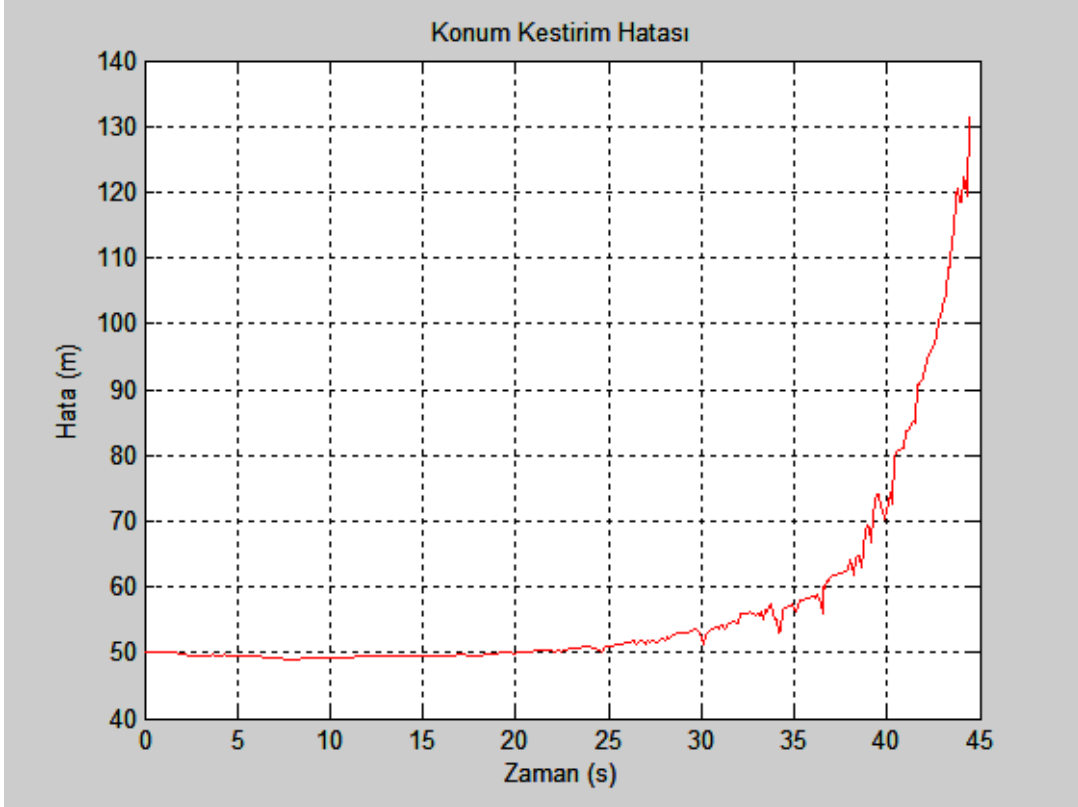
Şekil 56 Delta 6 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışta hata-zaman grafiği



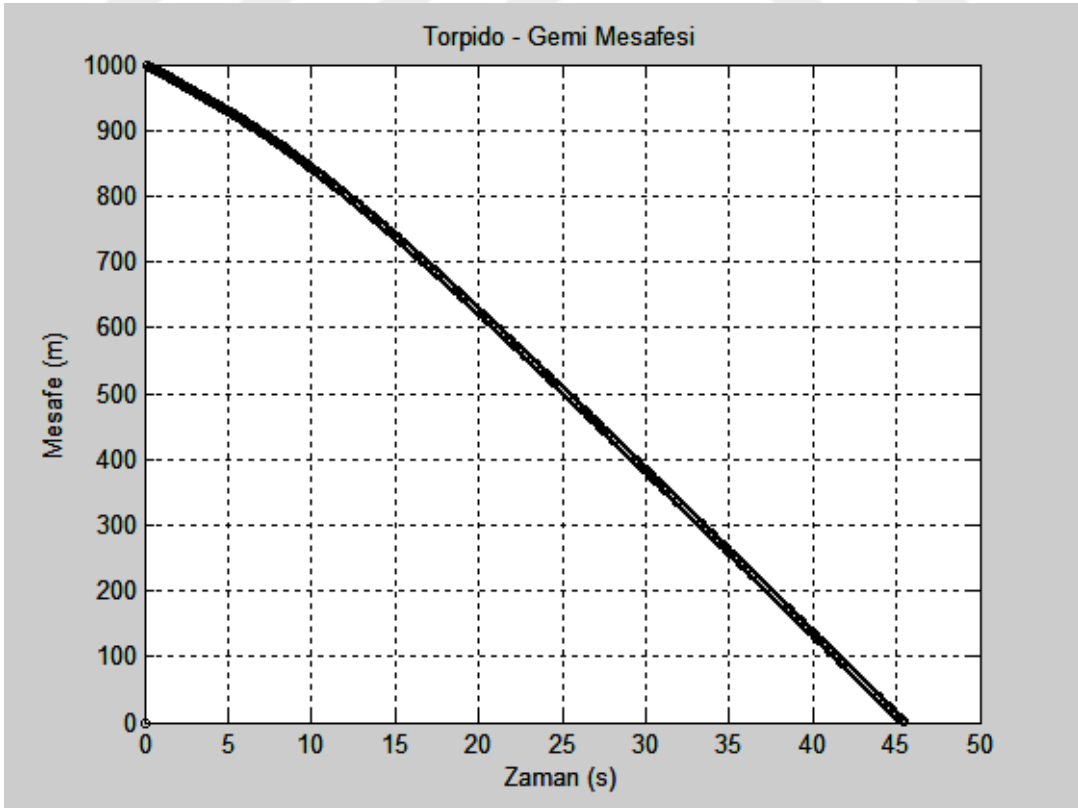
Şekil 57 Delta 6 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışta torpedo-gemi mesafesi grafiği



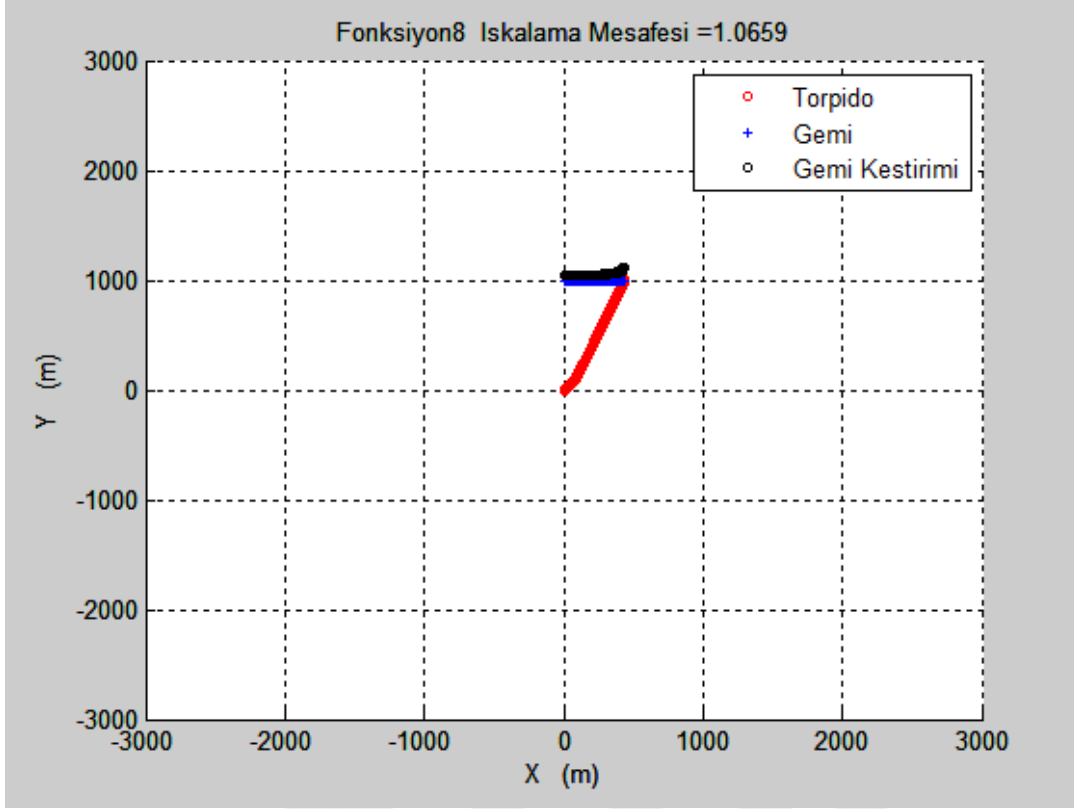
Şekil 58 Delta 7 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışla önleme



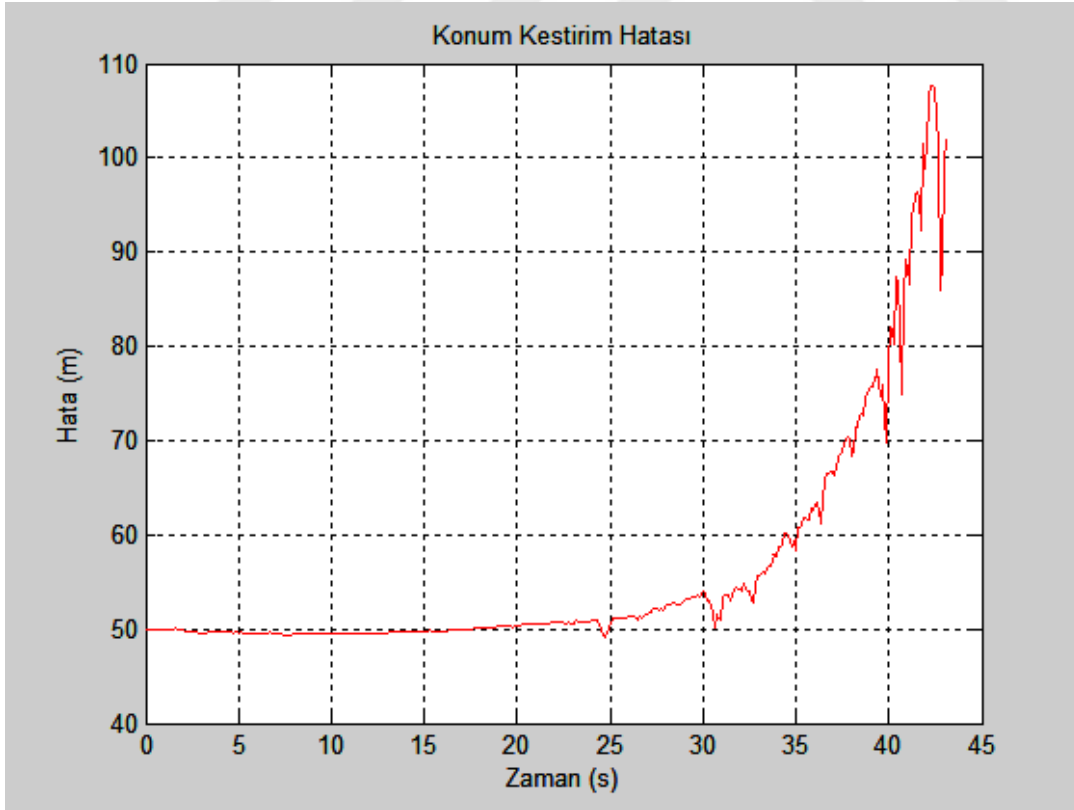
Şekil 59 Delta 7 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışta hata-zaman grafiği



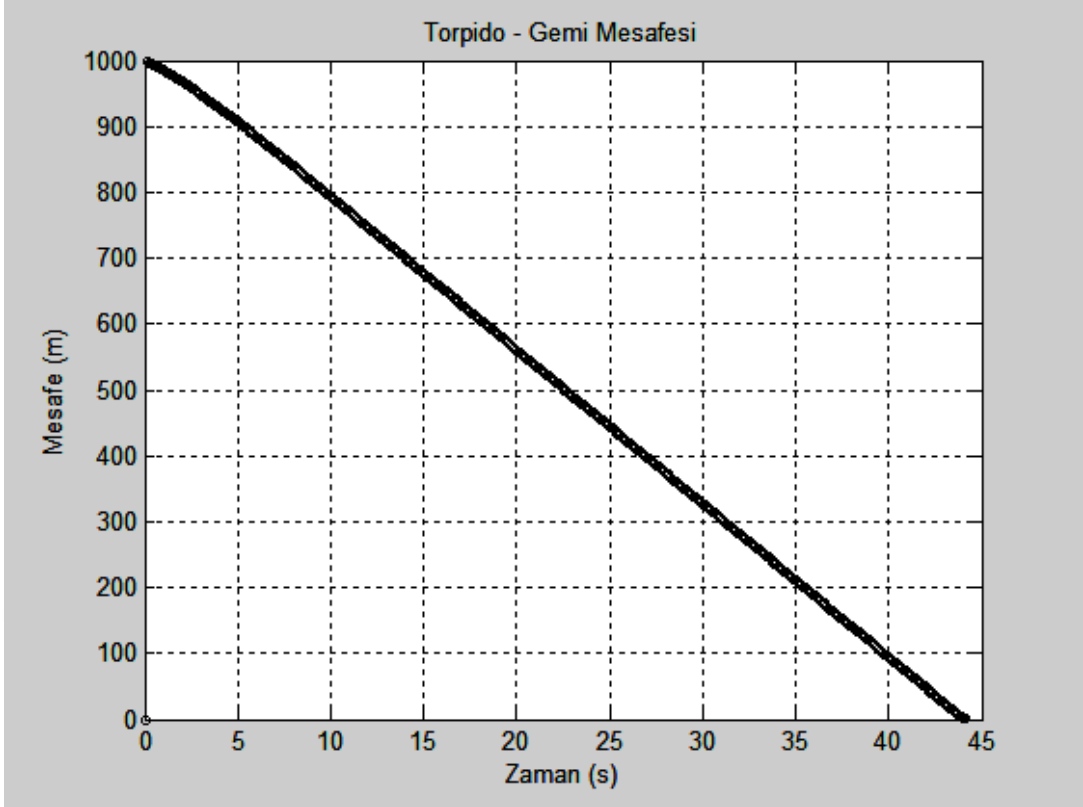
Şekil 60 Delta 7 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışta torpido-gemi mesafesi grafiği



Şekil 61 Delta 8 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışla önleme



Şekil 62 Delta 8 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışta hata-zaman grafiği



Şekil 63 Delta 8 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe yandan atışta torpido-gemi mesafesi grafiği

Hedef kestirim grafikleri incelendikten sonra, torpidonun sabit hızlı hedefe yandan atıldığı durumda kullanılan  $\delta(t)$  fonksiyonlarına göre Monte Carlo simülasyonları sonucu oluşan ıskalama mesafesi değerlerinin çizelgesi aşağıdadır.

Çizelge 3 Sabit hızlı hedefe yandan atışta oluşan ıskalama mesafeleri ve önleme zamanları

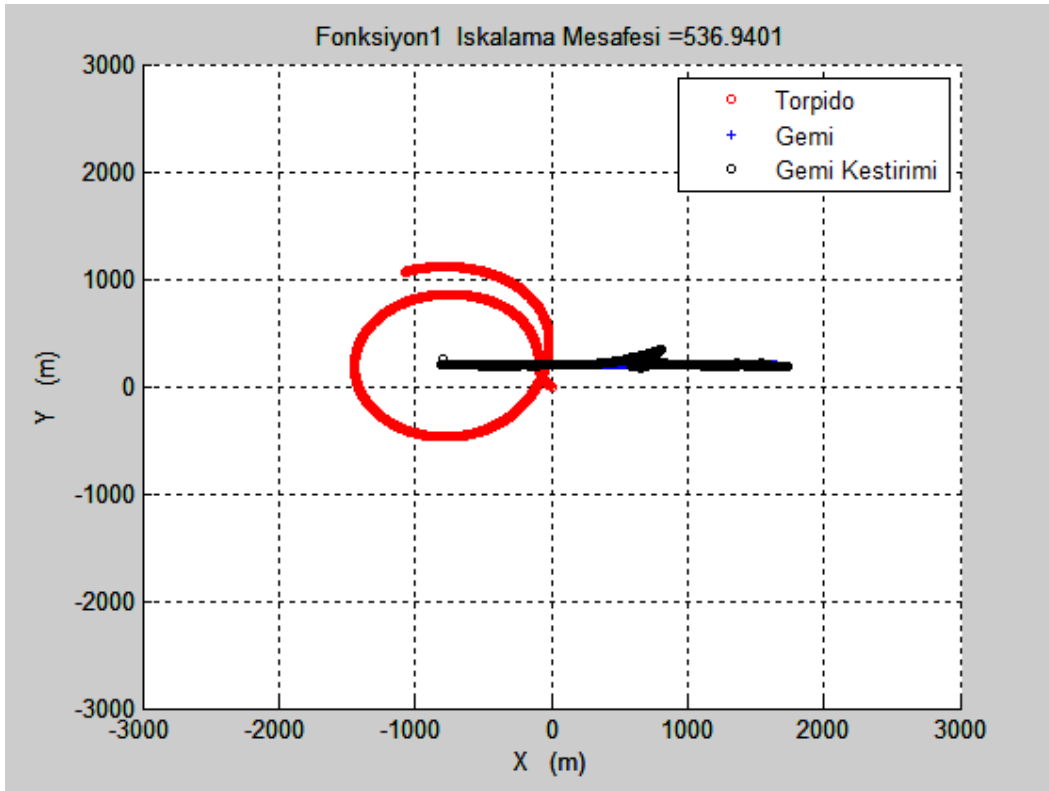
Fonksiyon	Önleme Zamanı (sn)	İskalama Mesafesi (m)
$\delta_1(t)$	69.6	63.72
$\delta_2(t)$	64.3	0.11
$\delta_3(t)$	60.3	1.0
$\delta_4(t)$	56	1.18
$\delta_5(t)$	51.6	1.14
$\delta_6(t)$	47.8	0.7
$\delta_7(t)$	45.5	1.15
$\delta_8(t)$	44.1	1.06



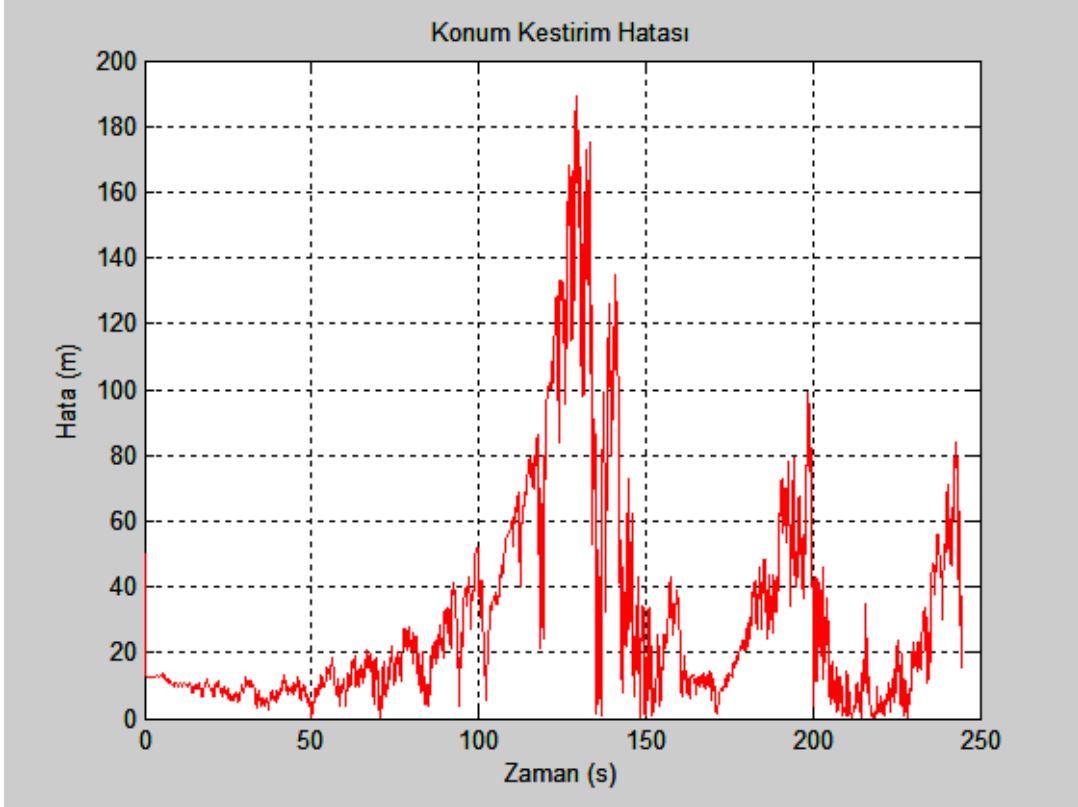
Bu çizelgeden de anlaşılacağı üzere  $\delta_1(t)$  ağırlıklandırma fonksiyonu hariç diğer tüm ağırlıklandırma fonksiyonları ile hedefe önleme yapılabildiği görülmüştür. Hedef noktasal olarak alındığı için ıskalama mesafeleri küçük olmaktadır. Kestirim ivmesine ağırlık verilen senaryoda hedefe daha uzun sürede önleme yapıldığı, önleme ivmesine ağırlık verilen senaryoda daha kısa sürede önleme yapıldığı anlaşılmıştır. Pasif hedef takibinde torpido manevra yapmadığı zaman kestirim hatasının arttığı hata-zaman grafiklerinde gözlemlenmiştir.  $\delta_1(t)$  fonksiyonunun ıskalama mesafesinin büyük çıkmasının sebebi hedef kestirimine oldukça çok ağırlık verdiği için zamanında önleme yapamamasıdır. Ayrıca yandan atışlarda arkadan atışlara göre ıskalama mesafesi bakımından başarımın düştüğü de görülmüştür.

#### 4.2.2.3. Sabit Hızlı Hedefe Önden Atış Yapılarak Önleme

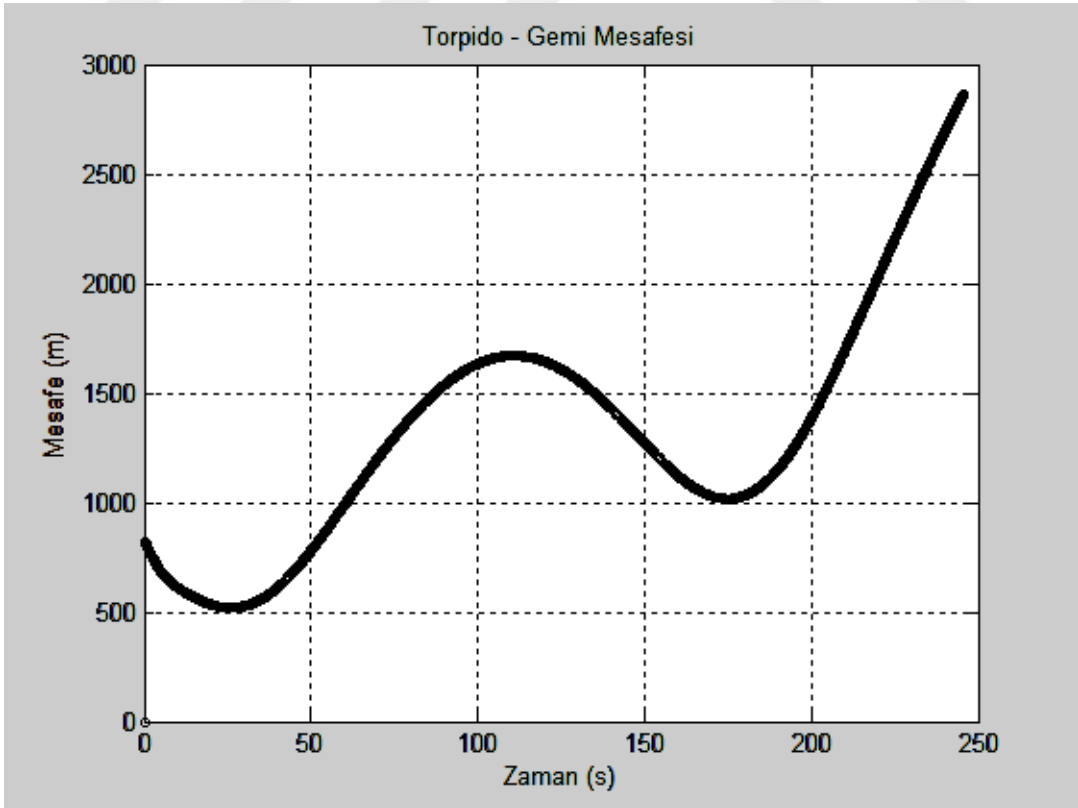
Torpidonun hedefe arkadan ve yandan yapılan atışlarda, torpidonun izlediği yol, torpidonun pasif hedef takibi ve önleme başarımı bölüm 4.2.2.1 ve bölüm 4.2.2.2'de şekillerle gösterilmiştir. Bölüm 4.2.2.1 ve bölüm 4.2.2.2'de yapılan tüm simülasyonlar, torpido hedefin ön tarafından fırlatılarak tekrarlanmıştır.  $\delta(t)$  fonksiyonları için simülasyon çıktıları aşağıdaki şekillerde görülebilir.



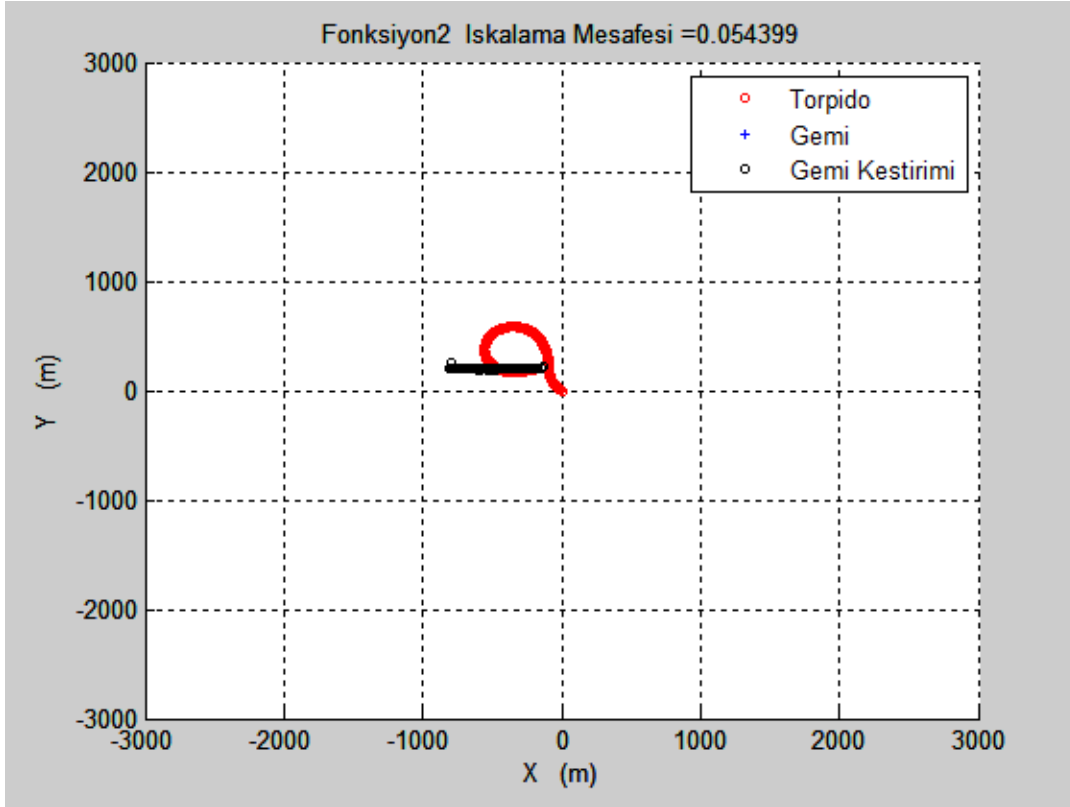
Şekil 64 Delta 1 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışla önleme



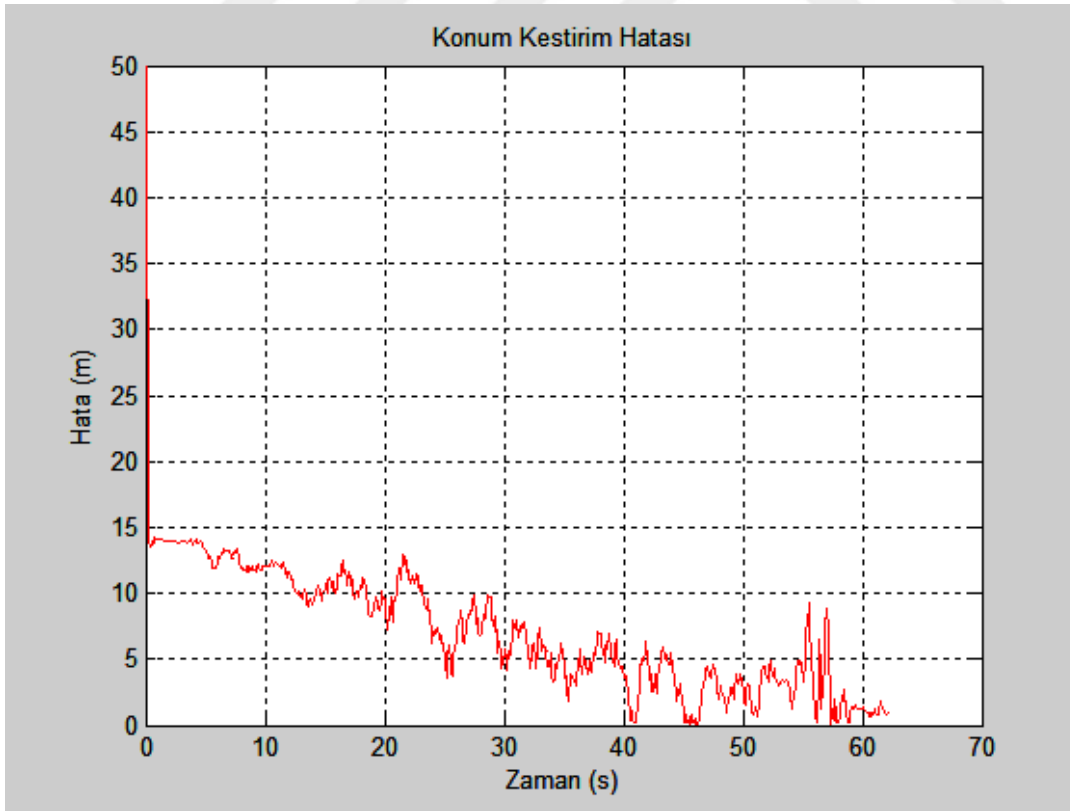
Şekil 65 Delta 1 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışta hata-zaman grafiği



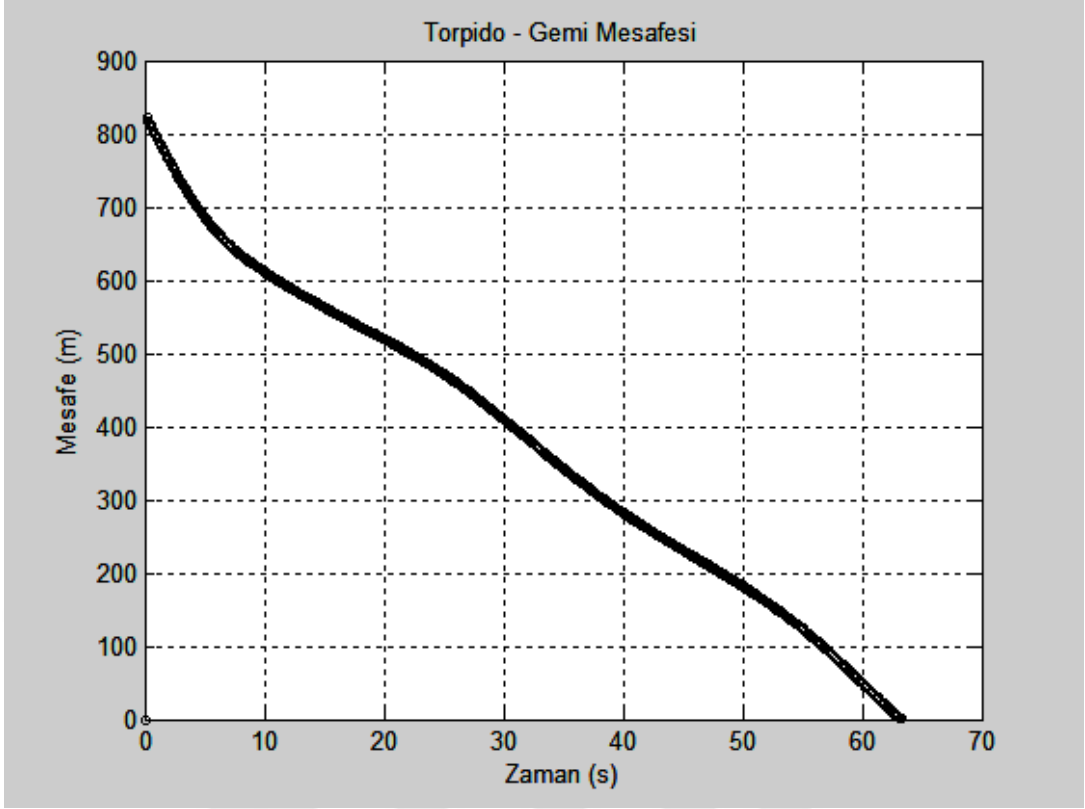
Şekil 66 Delta 1 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışta torpido-gemi mesafesi grafiği



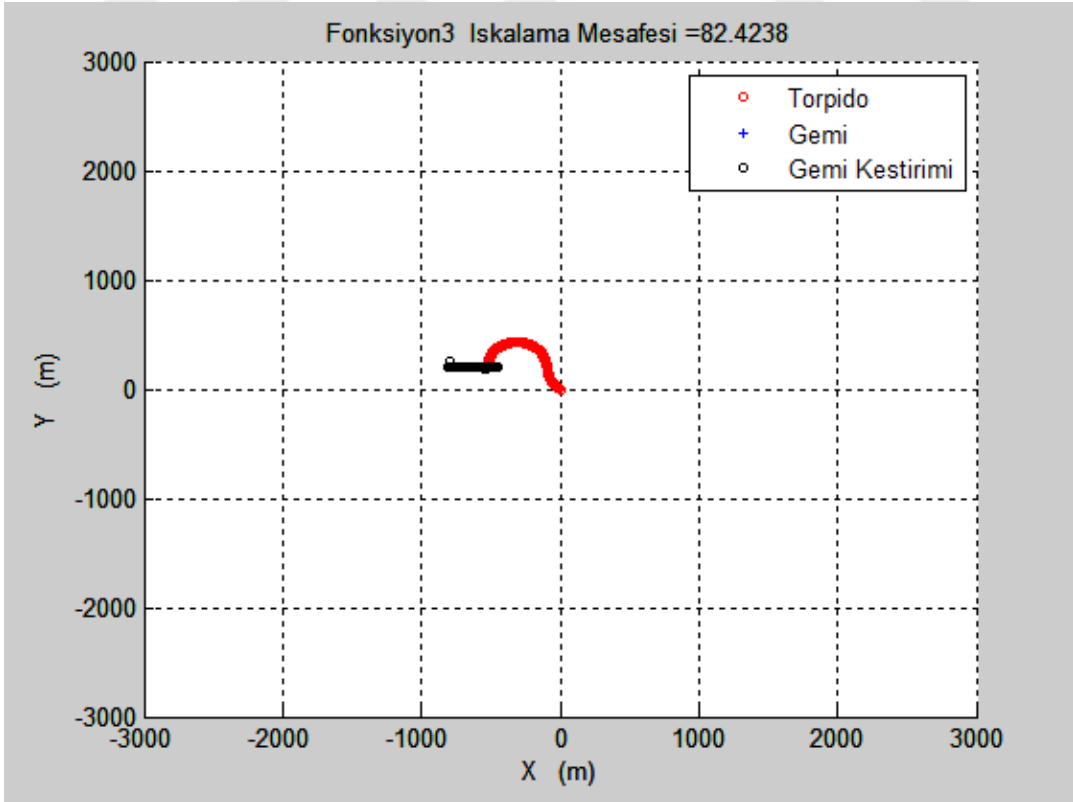
Şekil 67 Delta 2 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışla önleme



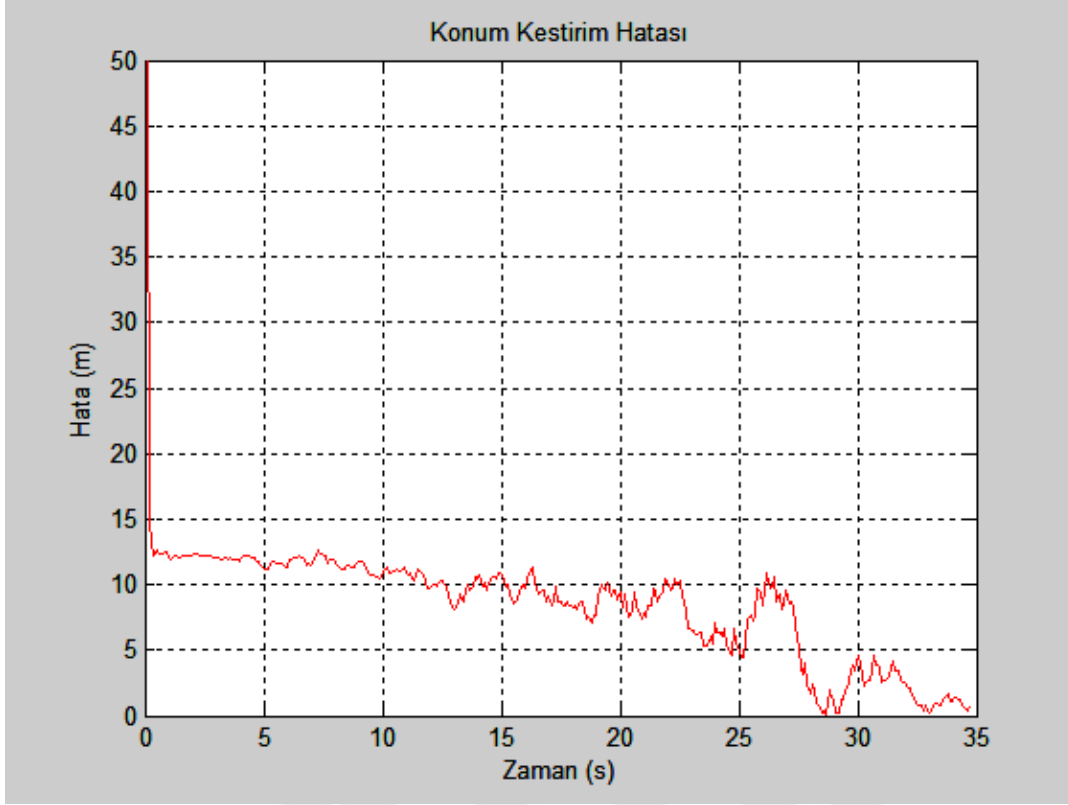
Şekil 68 Delta 2 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışta hata-zaman grafiği



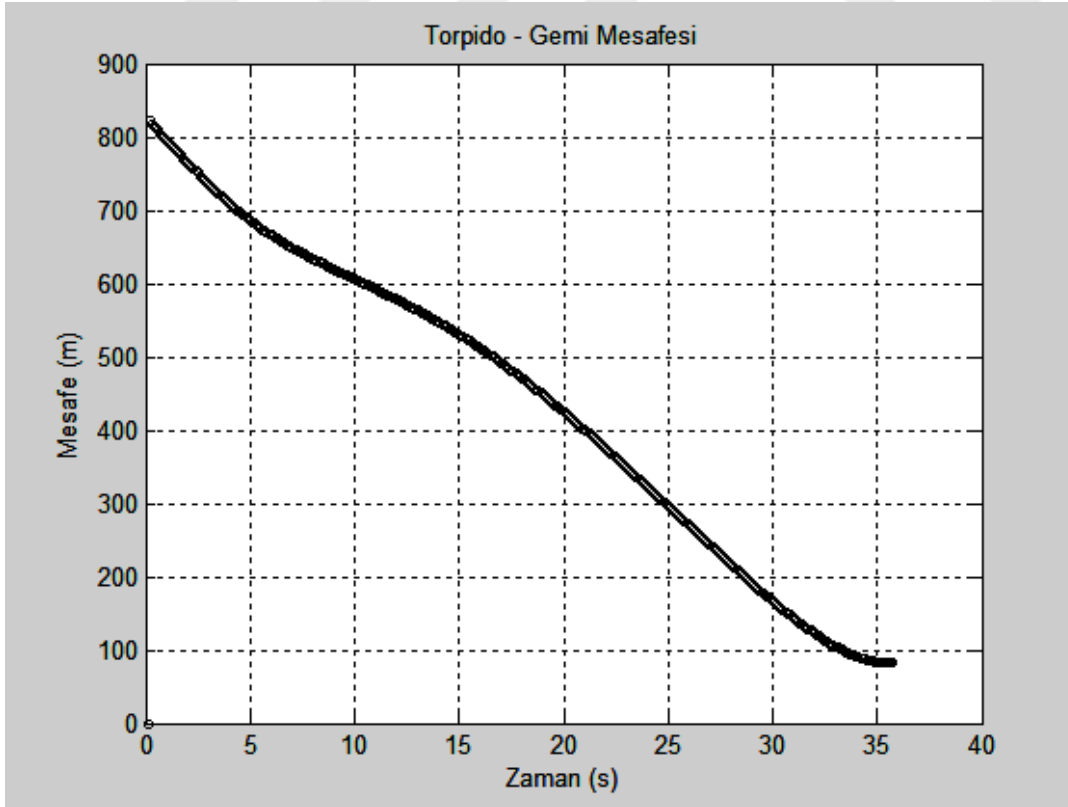
Şekil 69 Delta 2 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışta torpido-gemi mesafesi grafiği



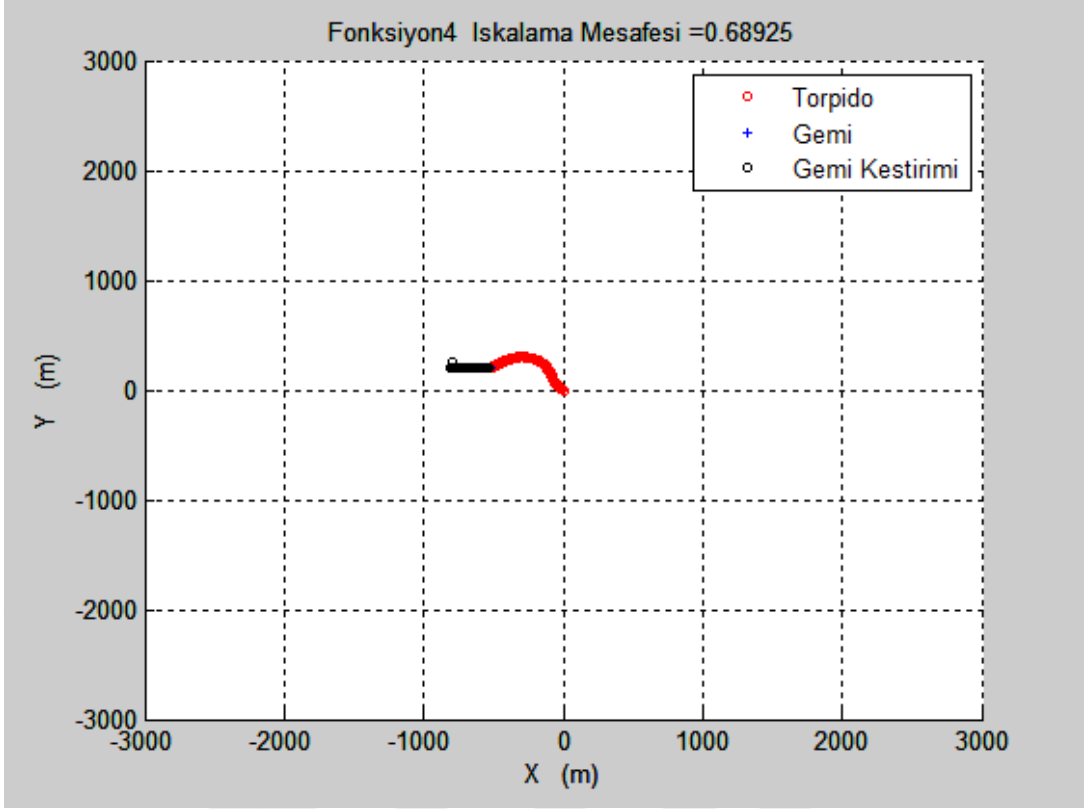
Şekil 70 Delta 3 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışla önleme



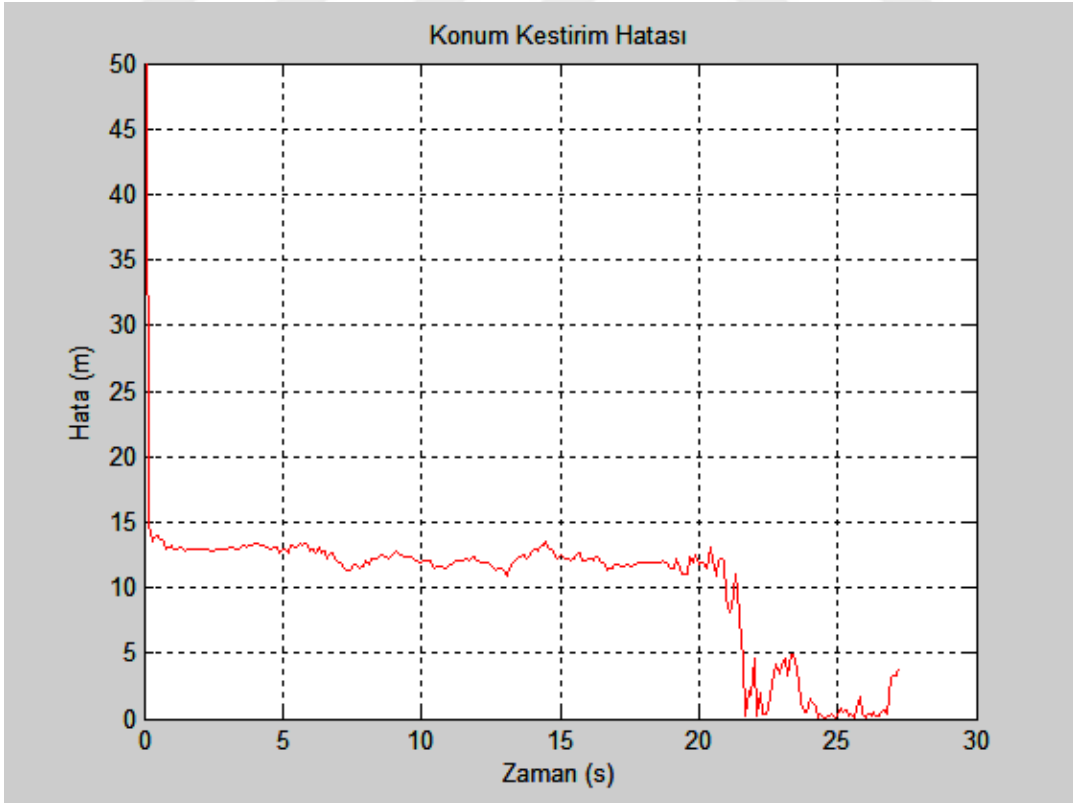
Şekil 71 Delta 3 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışta hata-zaman grafiği



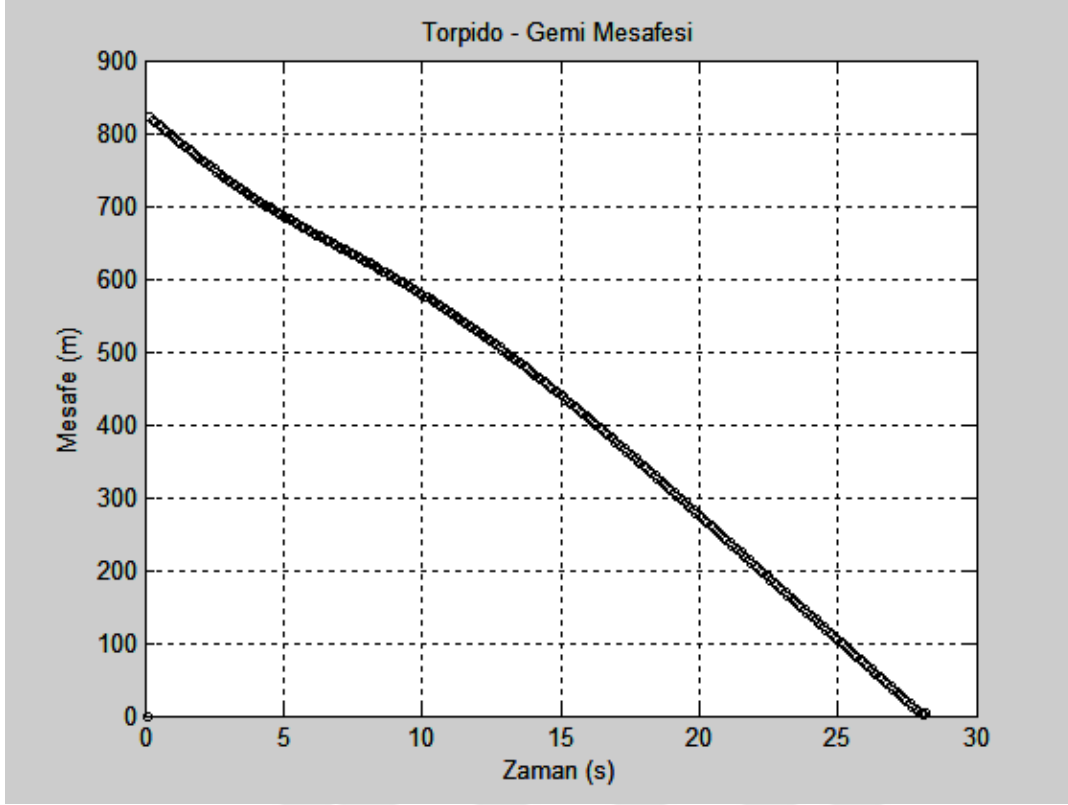
Şekil 72 Delta 3 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışta torpedo-gemi mesafesi grafiği



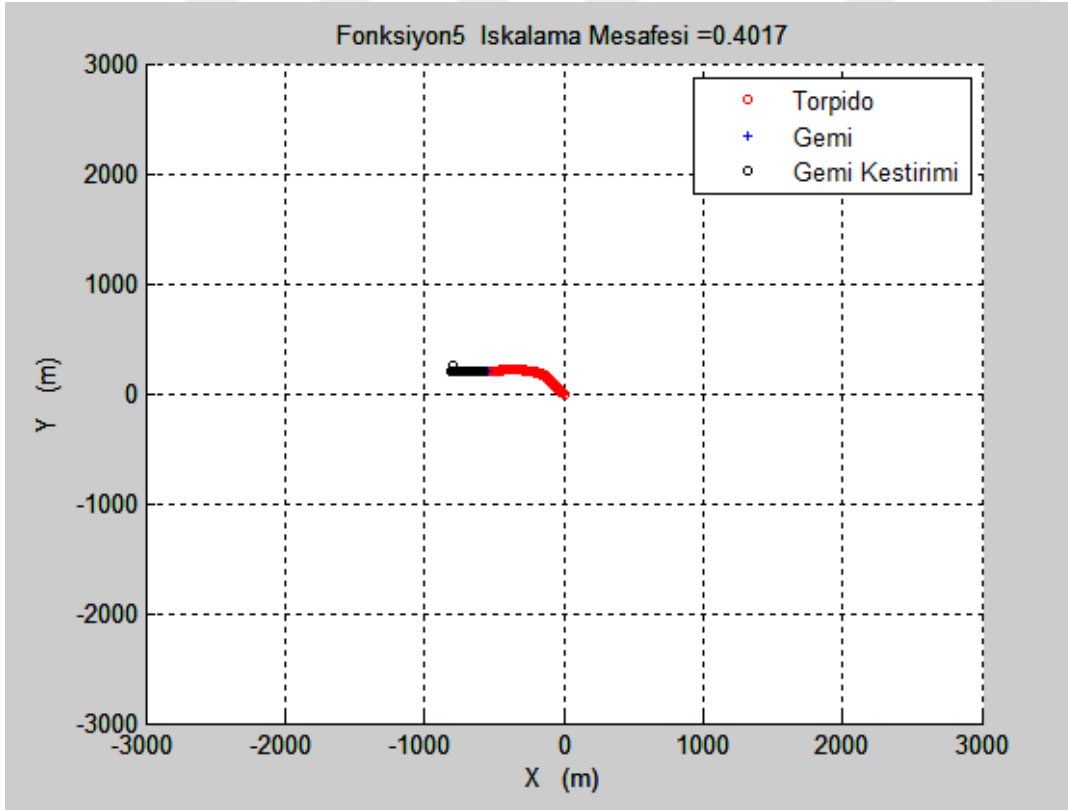
Şekil 73 Delta 4 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışla önleme



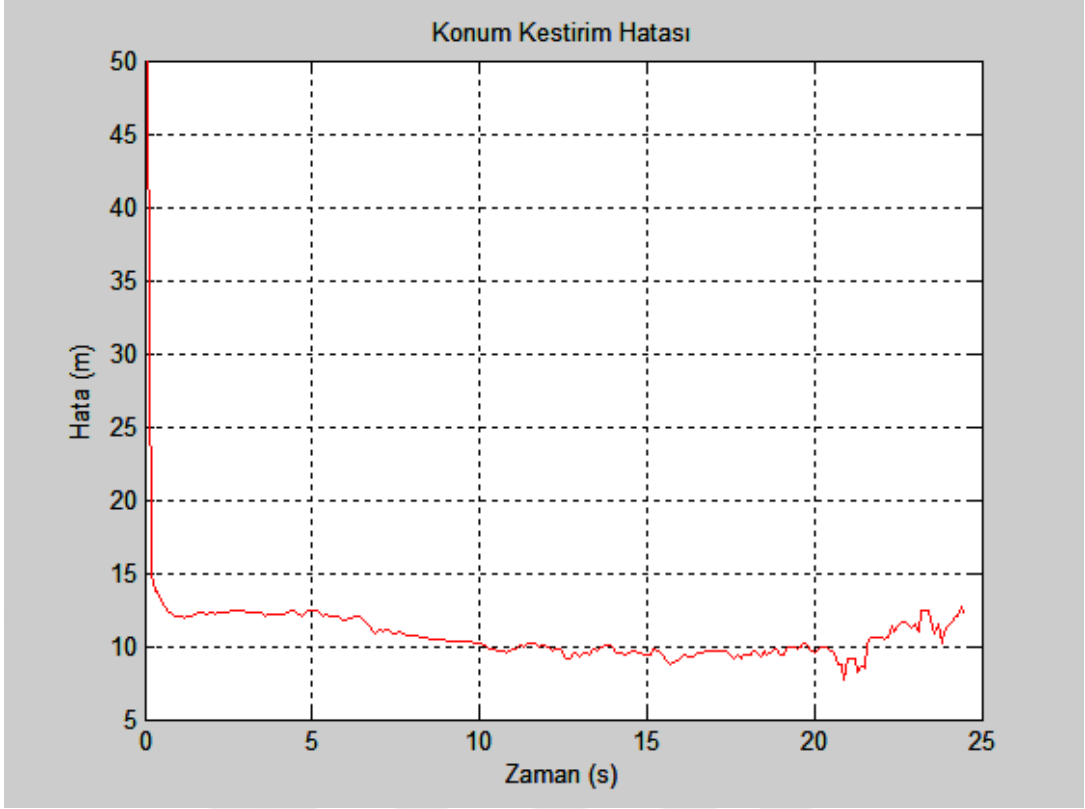
Şekil 74 Delta 4 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışta hata-zaman grafiği



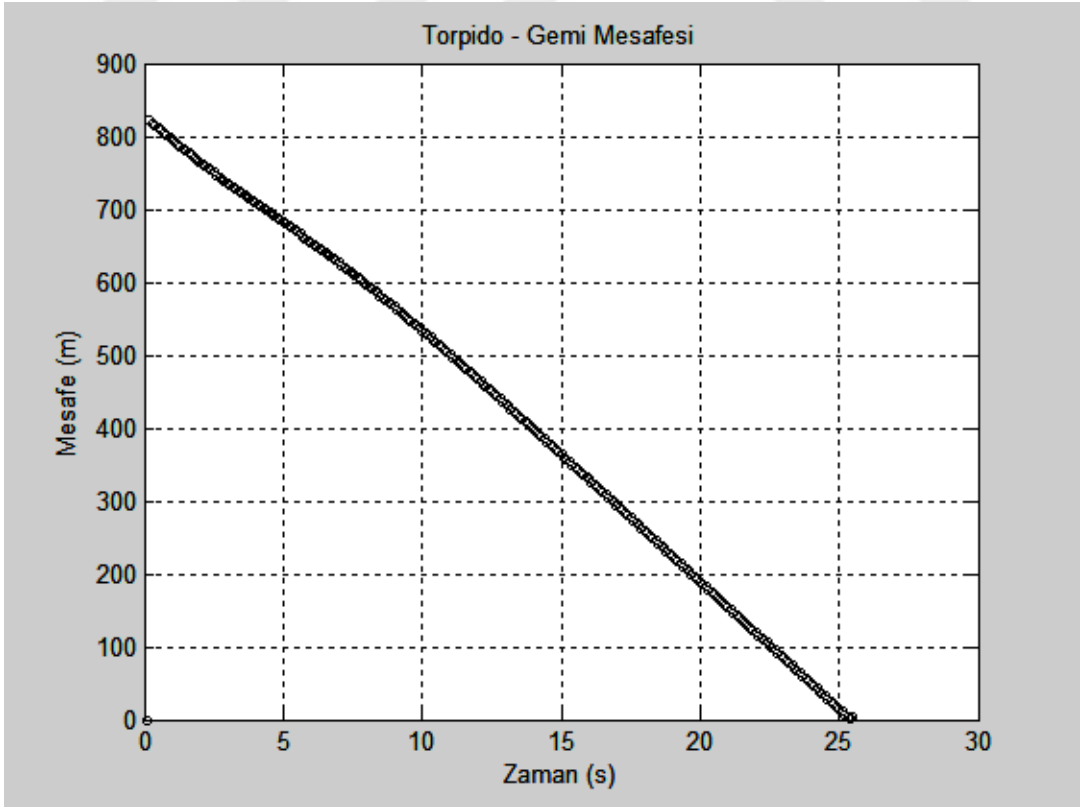
Şekil 75 Delta 4 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışta torpido-gemi mesafesi grafiği



Şekil 76 Delta 5 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışla önleme

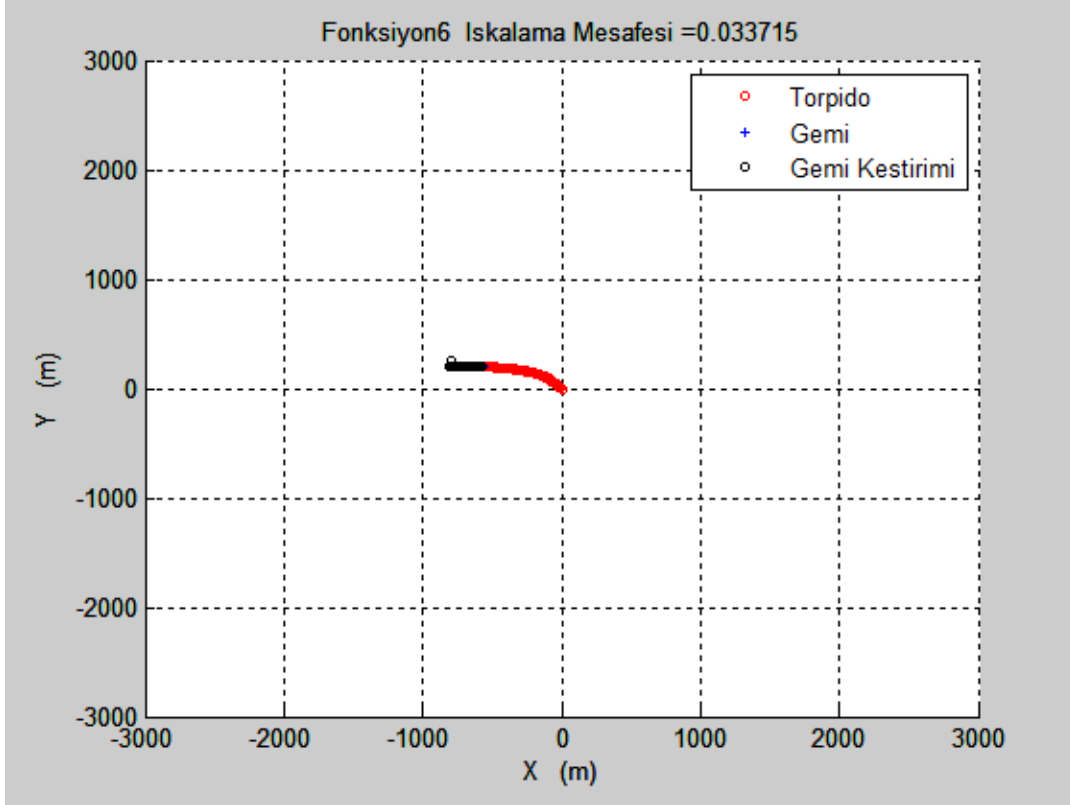


Şekil 77 Delta 5 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışta hata-zaman grafiği

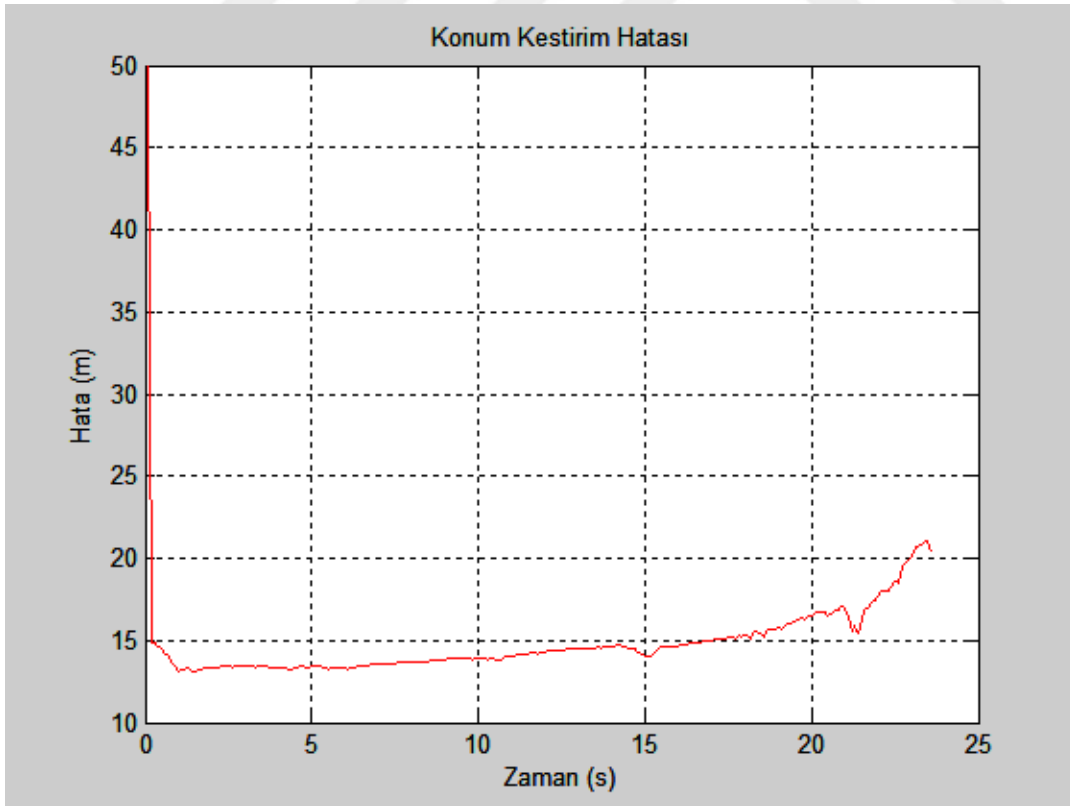


Şekil 78 Delta 5 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışta torpido-gemi mesafesi grafiği





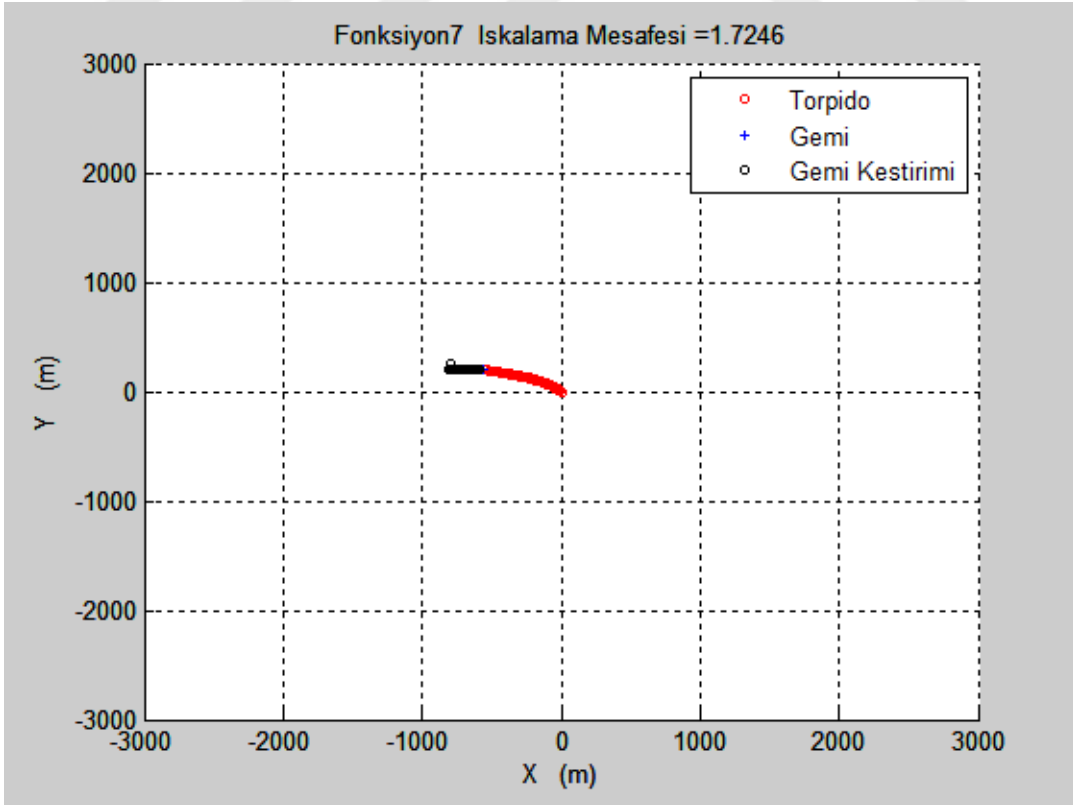
Şekil 79 Delta 6 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışla önleme



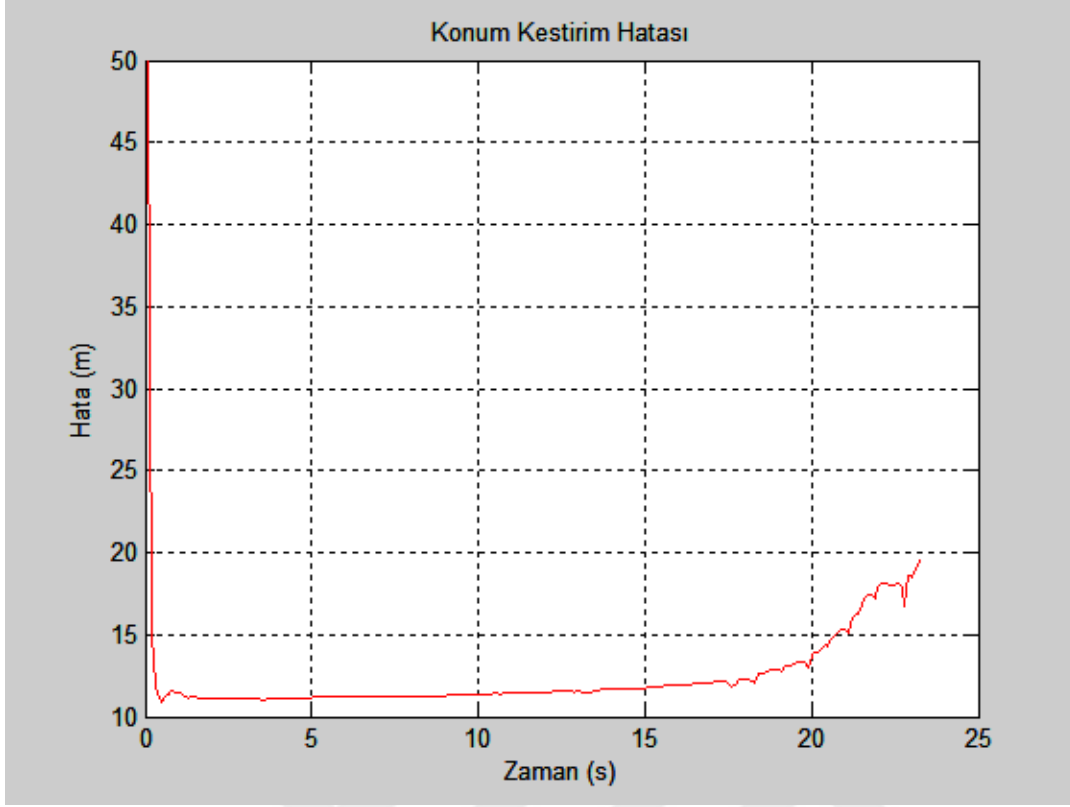
Şekil 80 Delta 6 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışta hata-zaman grafiği



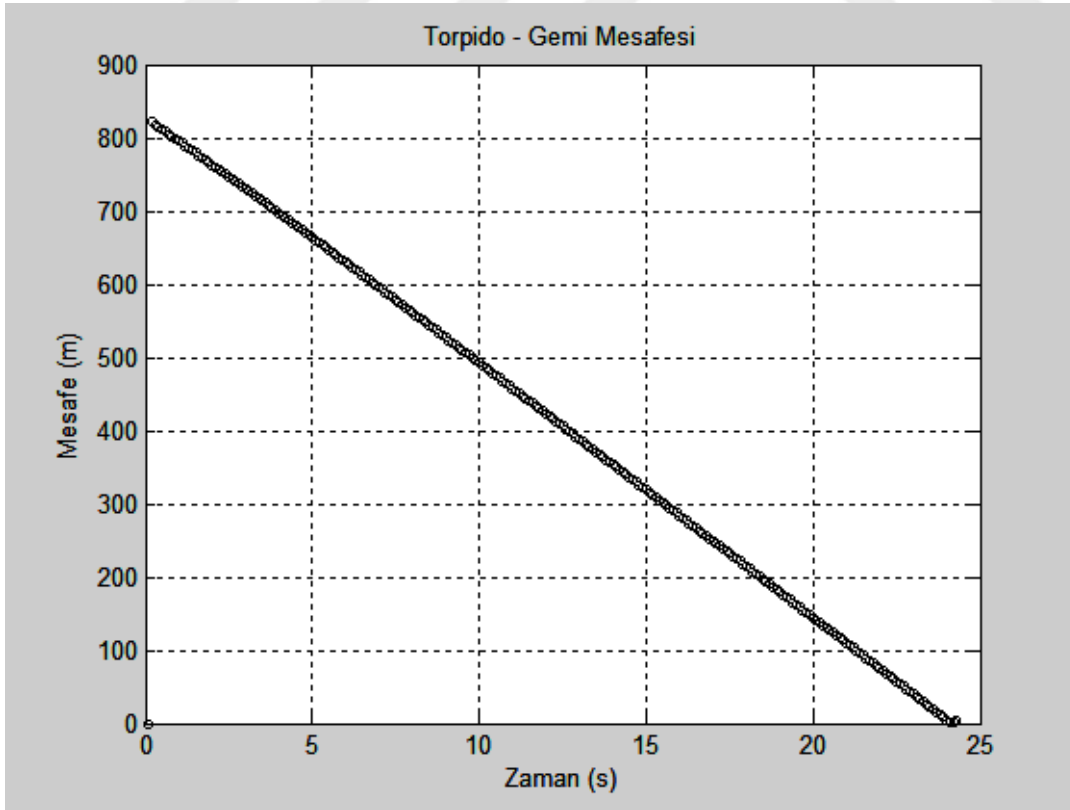
Şekil 81 Delta 6 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışta torpido-gemi mesafesi grafiği



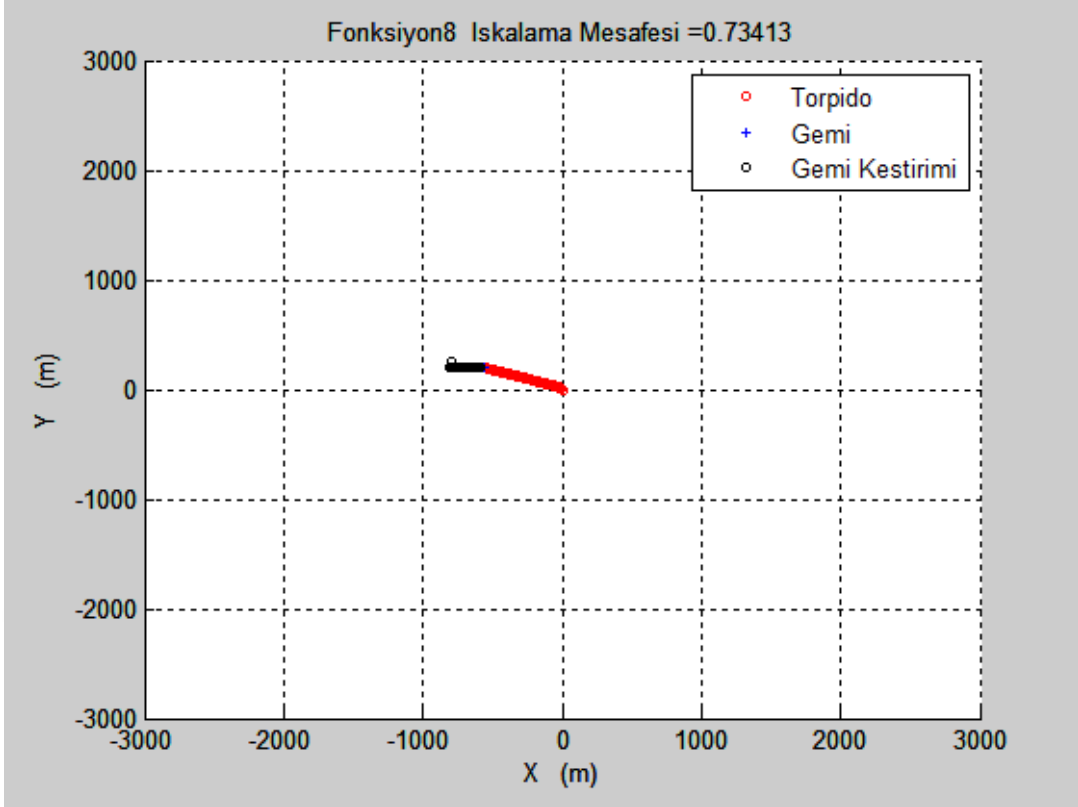
Şekil 82 Delta 7 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışla önleme



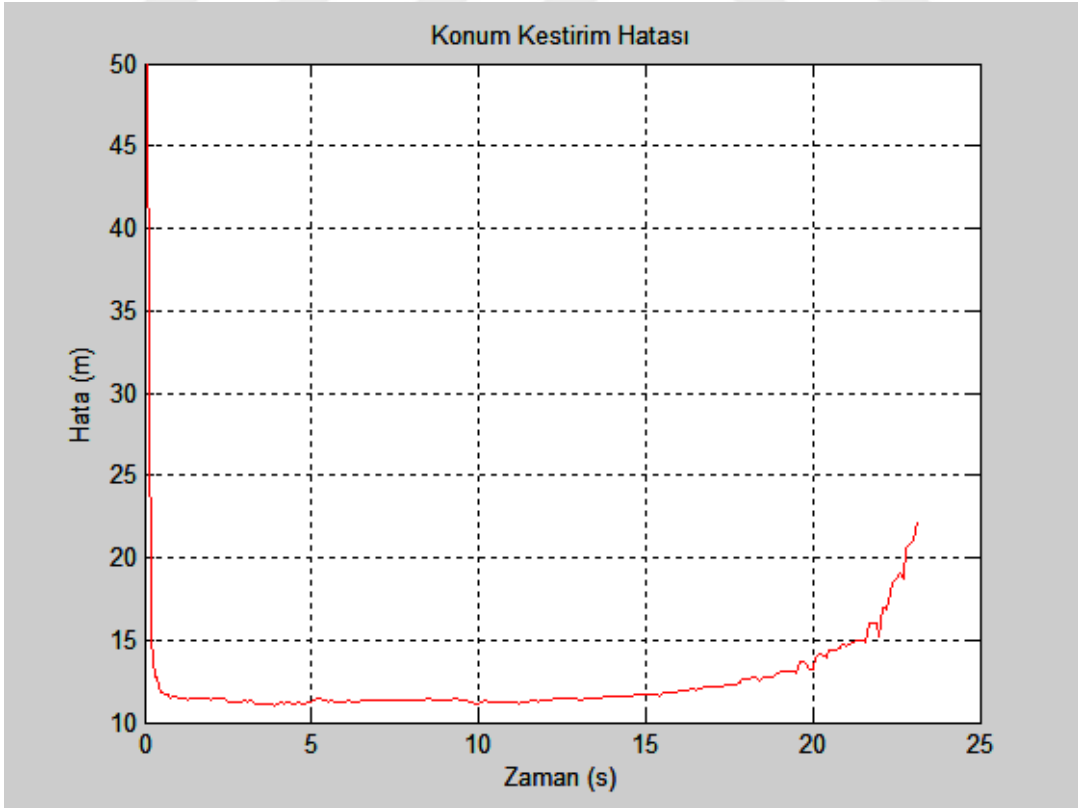
Şekil 83 Delta 7 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışta hata-zaman grafiği



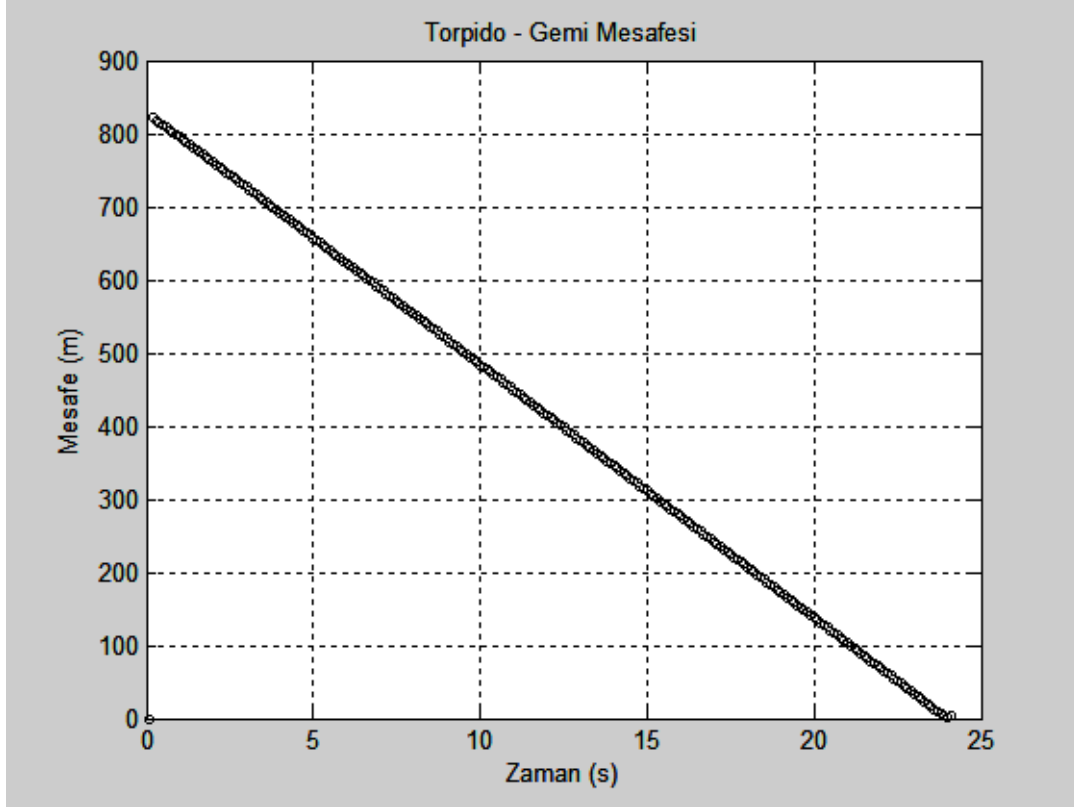
Şekil 84 Delta 7 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışta torpido-gemi mesafesi grafiği



Şekil 85 Delta 8 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışla önleme



Şekil 86 Delta 8 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışta hata-zaman grafiği



Şekil 87 Delta 8 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hızlı hedefe önden atışta torpido-gemi mesafesi grafiği

Hedef kestirim grafikleri incelendikten sonra, torpidonun sabit hızlı hedefe önden atıldığı durumda kullanılan  $\delta(t)$  fonksiyonlarına göre Monte Carlo simülasyonları sonucu oluşan ıskalama mesafesi değerlerinin çizelgesi aşağıdadır.

Çizelge 4 Sabit hızlı hedefe önden atışta oluşan ıskalama mesafeleri ve önleme zamanları

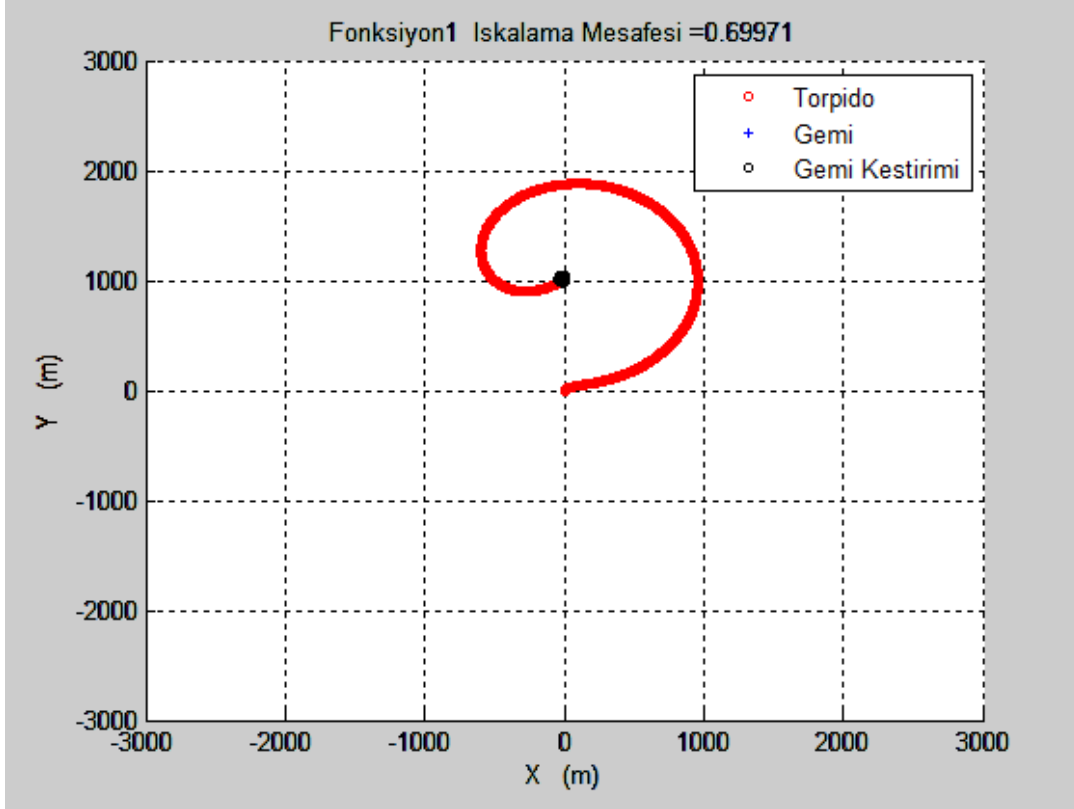
Fonksiyon	Önleme Zamanı (sn)	İskalama Mesafesi (m)
$\delta_1(t)$	69.6	517
$\delta_2(t)$	57.4	4.2
$\delta_3(t)$	35.7	82.5
$\delta_4(t)$	28.2	0.89
$\delta_5(t)$	25.5	0.67
$\delta_6(t)$	24.6	0.02
$\delta_7(t)$	24.3	1.72
$\delta_8(t)$	24.1	0.73

Bu çizelgeden de anlaşılacağı üzere  $\delta_1(t)$ ,  $\delta_2(t)$  ve  $\delta_3(t)$  ağırlıklandırma fonksiyonu hariç diğer tüm ağırlıklandırma fonksiyonları ile hedefe önleme yapılabildiği görülmüştür. Kestirim ivmesine ağırlık verilen senaryoda hedefe daha uzun sürede önleme yapıldığı, önleme ivmesine ağırlık verilen senaryoda daha kısa sürede önleme yapıldığı anlaşılmıştır. Pasif hedef takibinde torpido manevra yapmadığı zaman kestirim hatasının arttığı hata-zaman grafiklerinde gözlemlenmiştir.  $\delta_1(t)$ ,  $\delta_2(t)$  ve  $\delta_3(t)$  fonksiyonlarının ıskalama mesafesinin büyük çıkmasının sebebi hedef kestirimine oldukça çok ağırlık verdiği için zamanında önleme yapamamasıdır.

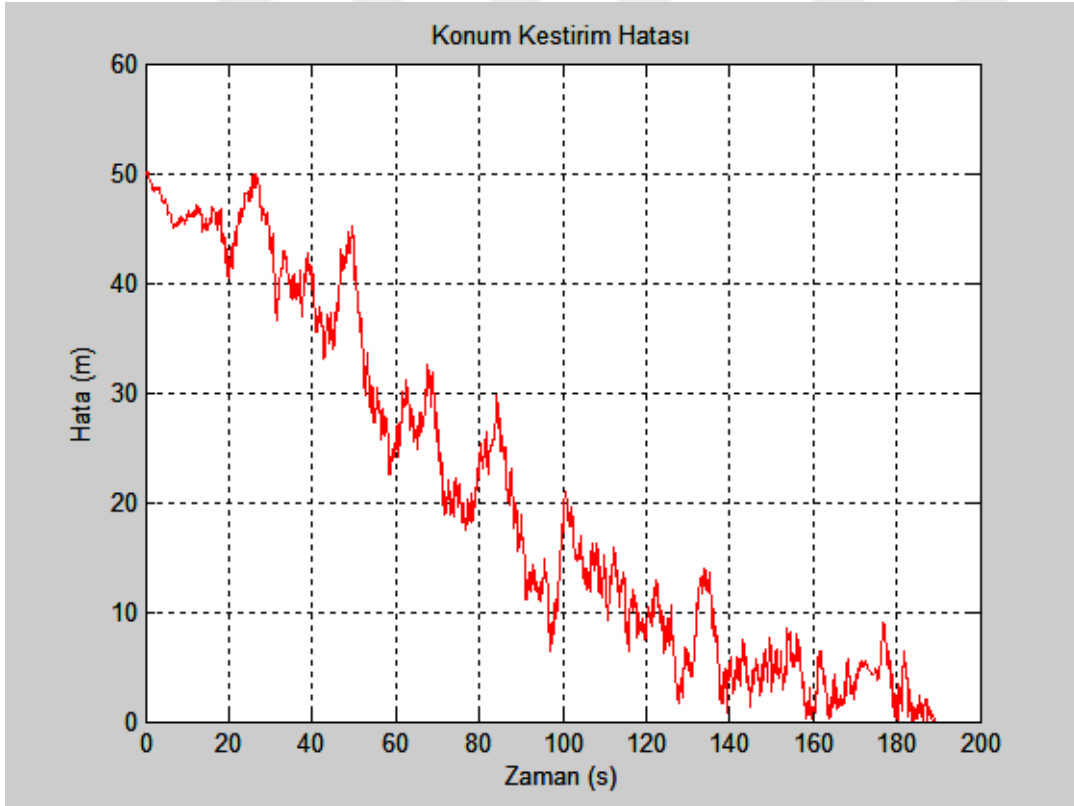
20 knots sabit hız ile hareket eden hedef gemiye karşı yapılan atışlar sonucunda ulaşılan önleme mesafeleri grafikler üzerinde gösterilmiştir. Bu grafiklerde, simülasyon sonucunda beklendiği şekilde  $\delta_1(t)$  fonksiyonu ile hedef kestirimi daha iyi yapılmıştır. Fakat  $\delta_1(t)$  fonksiyonu kullanıldığı zaman, torpido dairesel hareket yaparak hedefe yaklaştığı için, bazı durumlarda torpido – hedef geometrisi (özellikle torpidonun hedefe yaklaştığı anlarda), torpidonun nispeten yüksek manevra (0.3g) yapmasını gerektirmektedir. Torpidonun yüksek manevra kabiliyeti yoksa hedefi kaçırma riski vardır. Ayrıca hedefe en hızlı ulaşmayı sağlayan manevraları yaptıran fonksiyon ise  $\delta_8(t)$  fonksiyonudur.  $\delta_2(t)$  ve  $\delta_6(t)$  fonksiyonları hedefe hem yandan hem de arkadan yapılan atışlarda en iyi ıskalama mesafesini vermiştir. Hedefe önden yapılan atışlarda,  $\delta_5(t)$  ve  $\delta_6(t)$  fonksiyonları en iyi ıskalama mesafesini vermiştir.

#### **4.2.3. Sabit Hedefe Önleme**

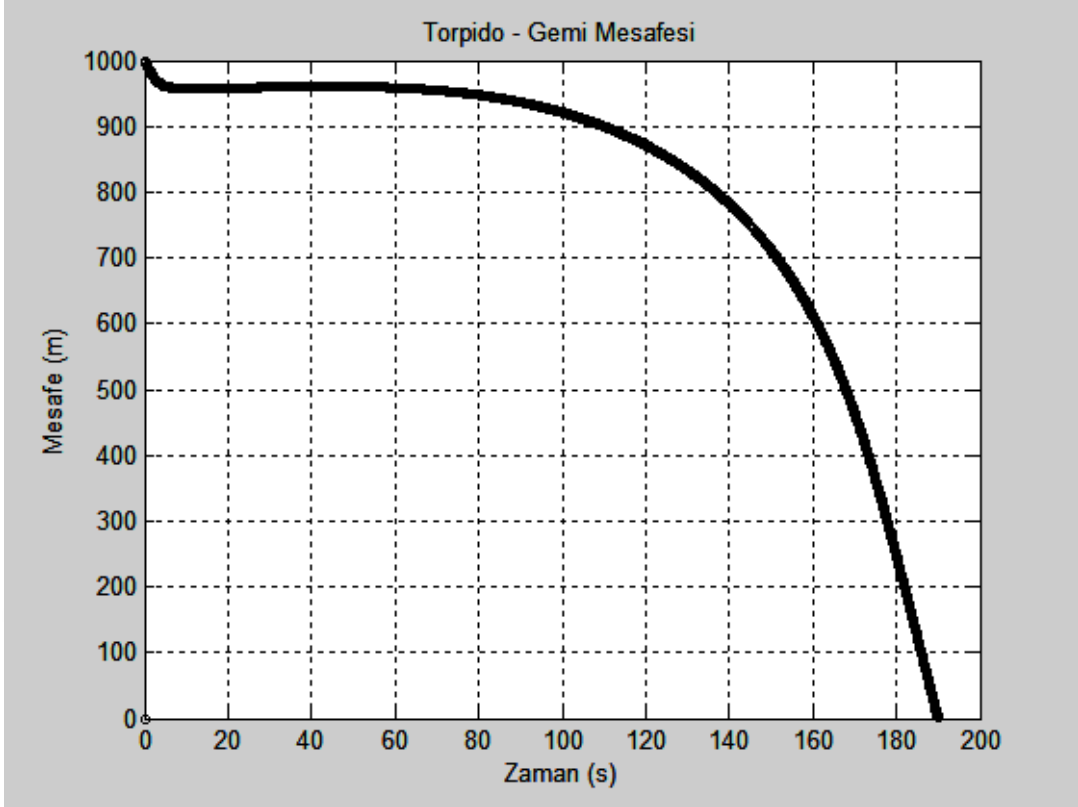
Bu simülasyonda sabit bir hedef gemi senaryosu hazırlanmıştır. Gemiden 1 km uzaktaki bir noktadan gemiye doğru 50 knots sabit hızla bir torpido fırlatılmıştır. Durum kestirimine başlangıç değeri olarak hedef geminin y yönünde 50 metre uzağı verilmiştir. Tüm  $\delta(t)$  fonksiyonları ile simülasyon yapılmıştır.



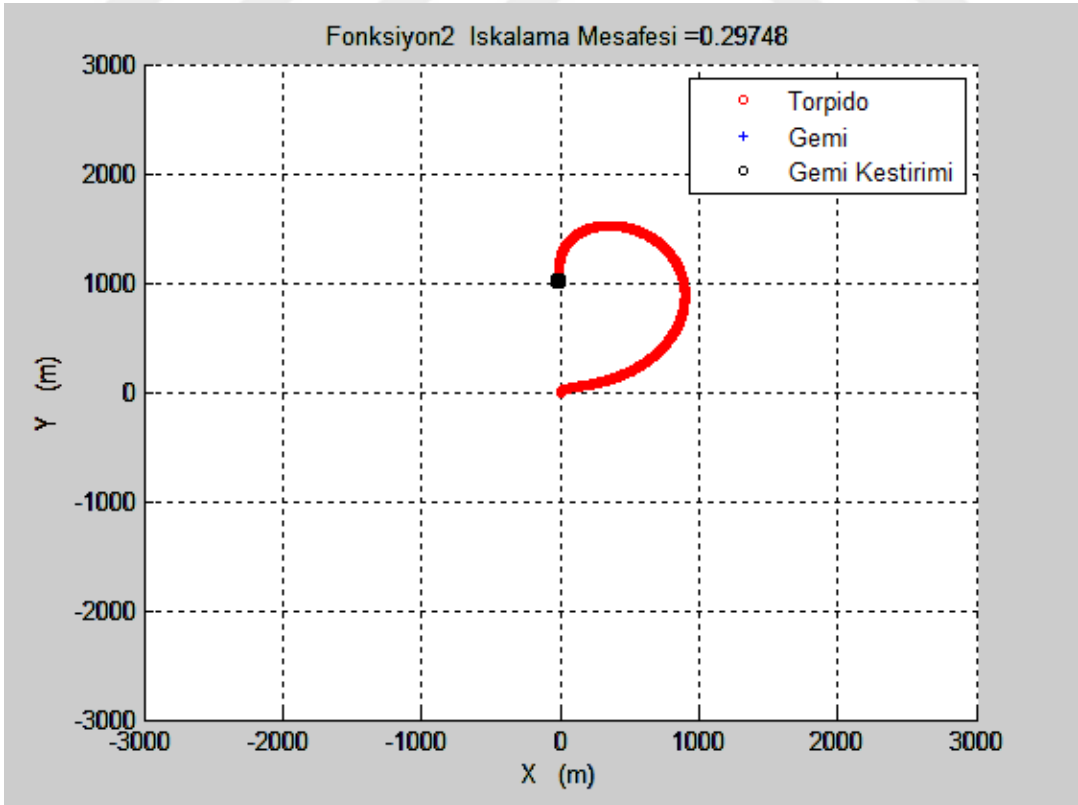
Şekil 88 Delta 1 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önleme



Şekil 89 Delta 1 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önlemede hata-zaman grafiği

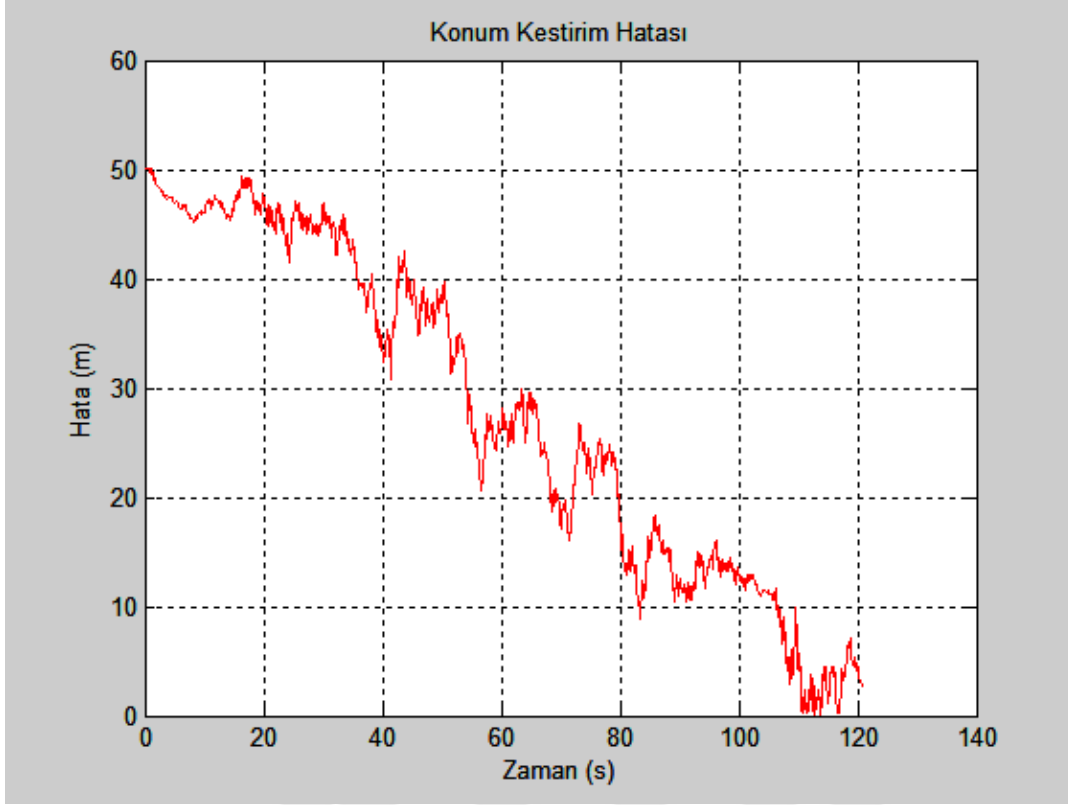


Şekil 90 Delta 1 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önlmede torpido-gemi mesafesi grafiği

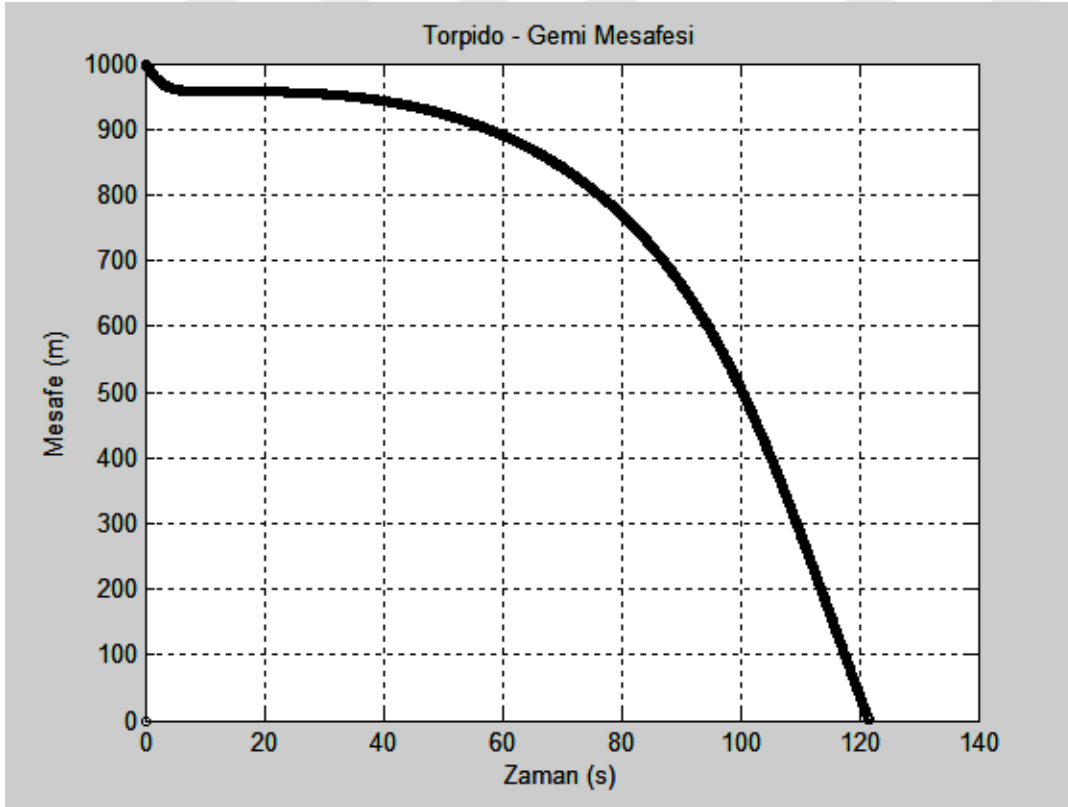


Şekil 91 Delta 2 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önleme

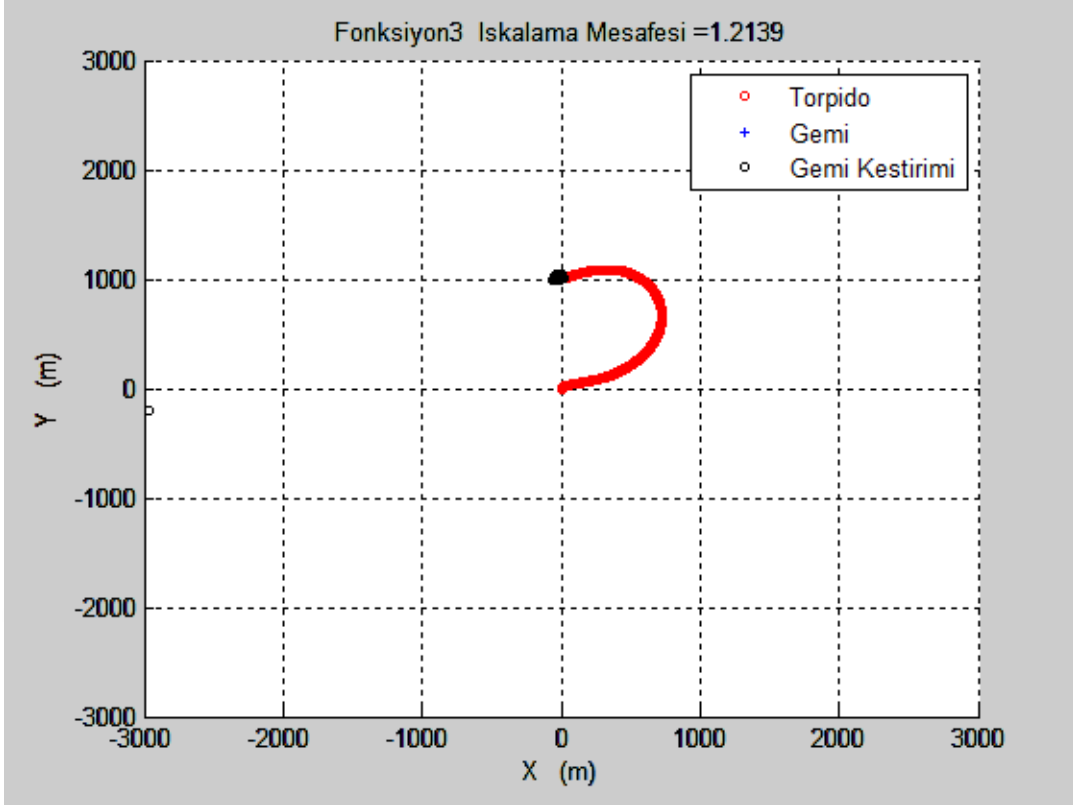




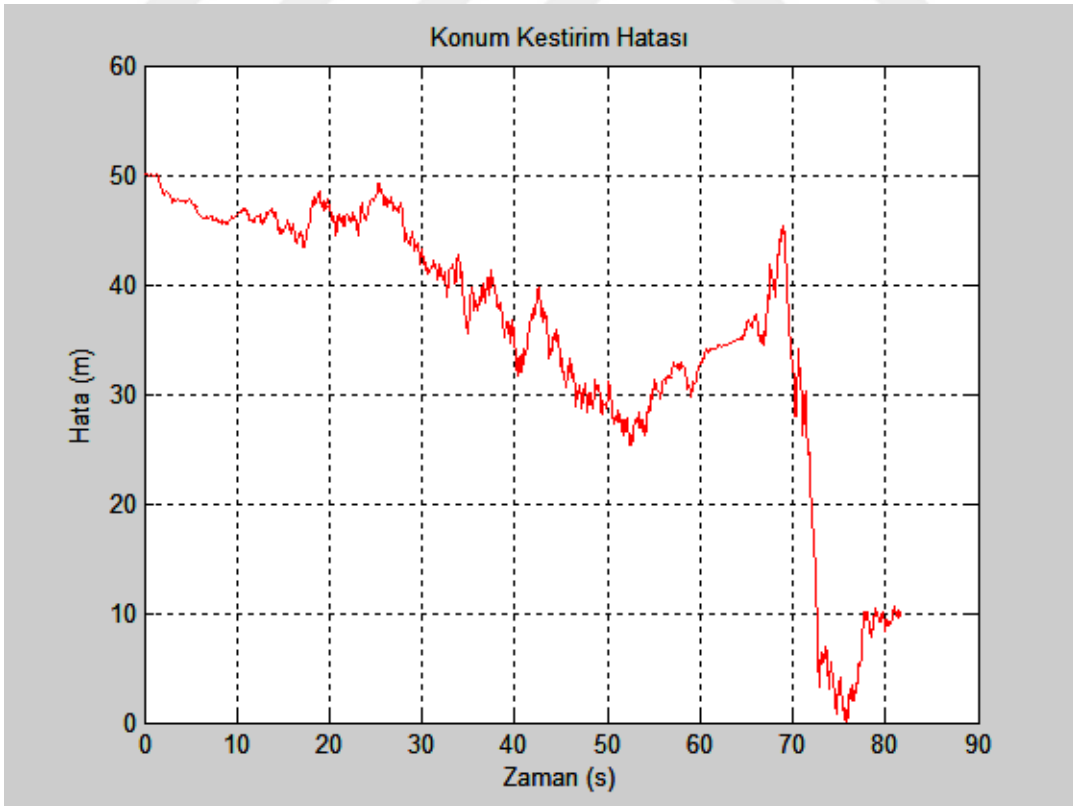
Şekil 92 Delta 2 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önlemede hata-zaman grafiği



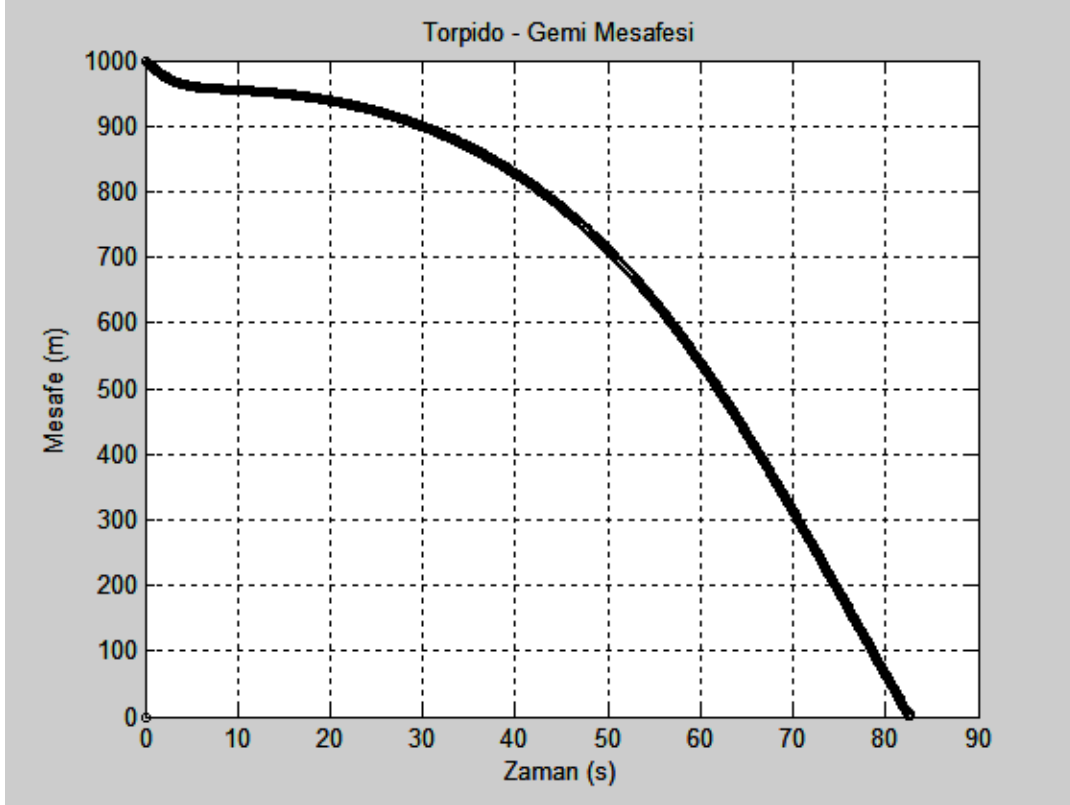
Şekil 93 Delta 2 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önlemede torpido-gemi mesafesi grafiği



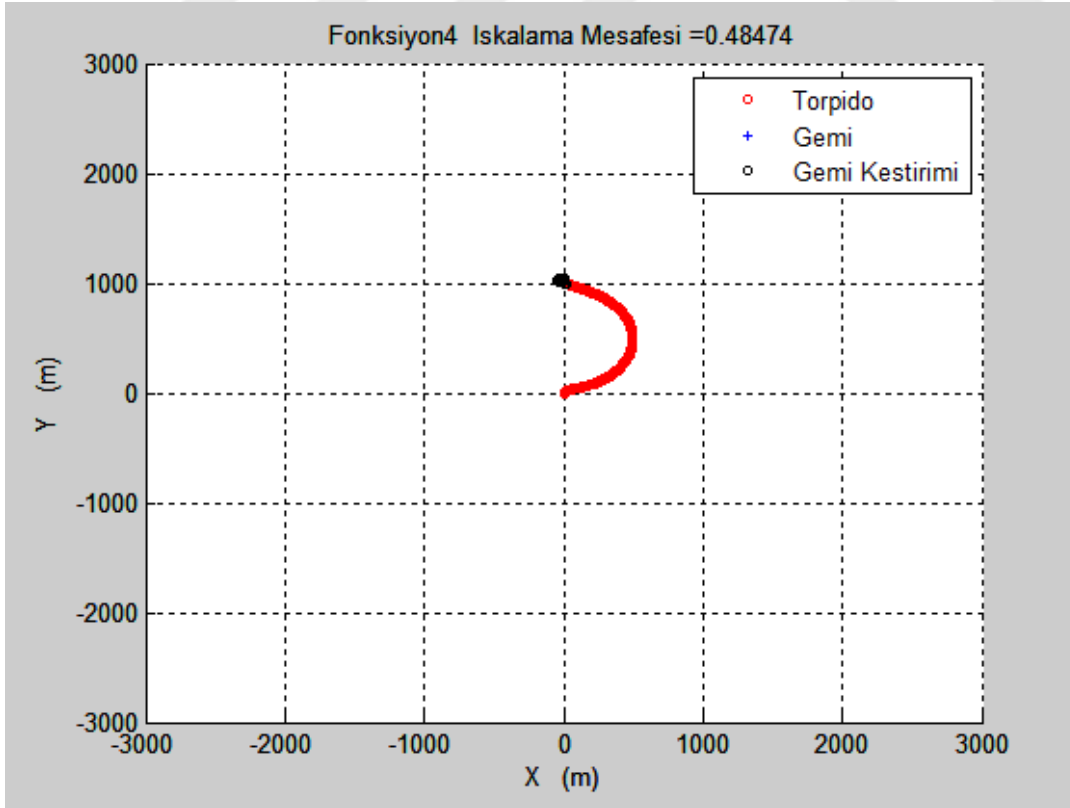
Şekil 94 Delta 3 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önleme



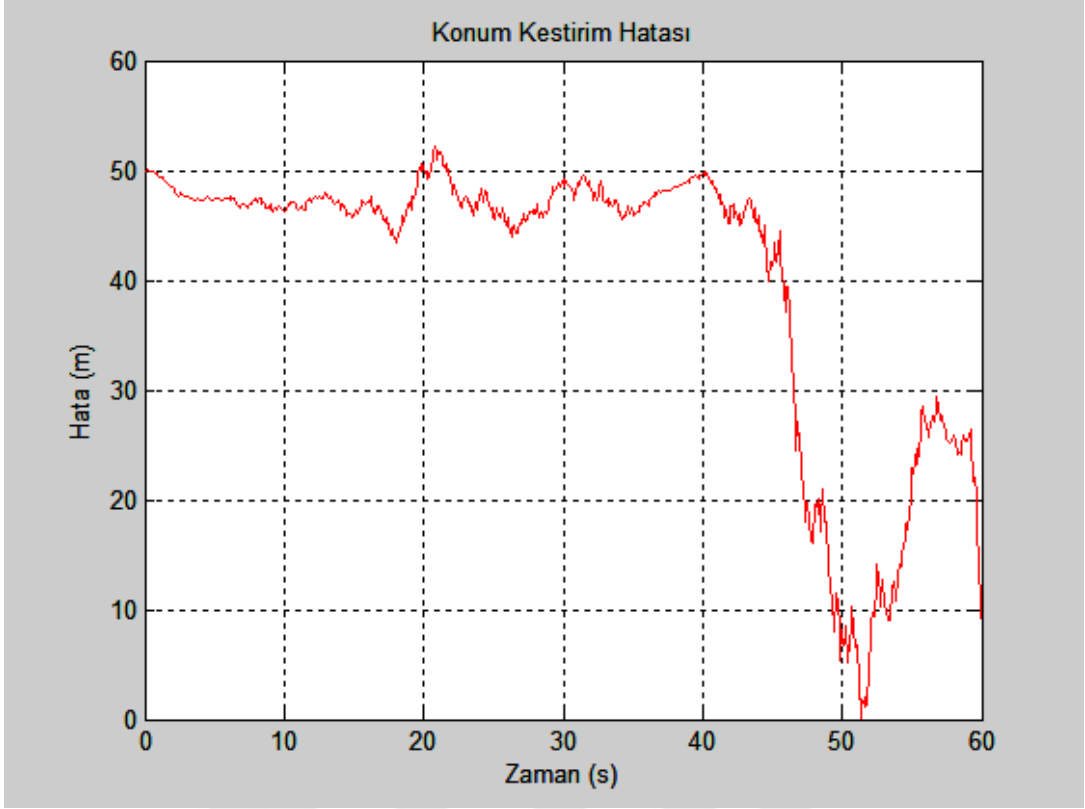
Şekil 95 Delta 3 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önlemede hata-zaman grafiği



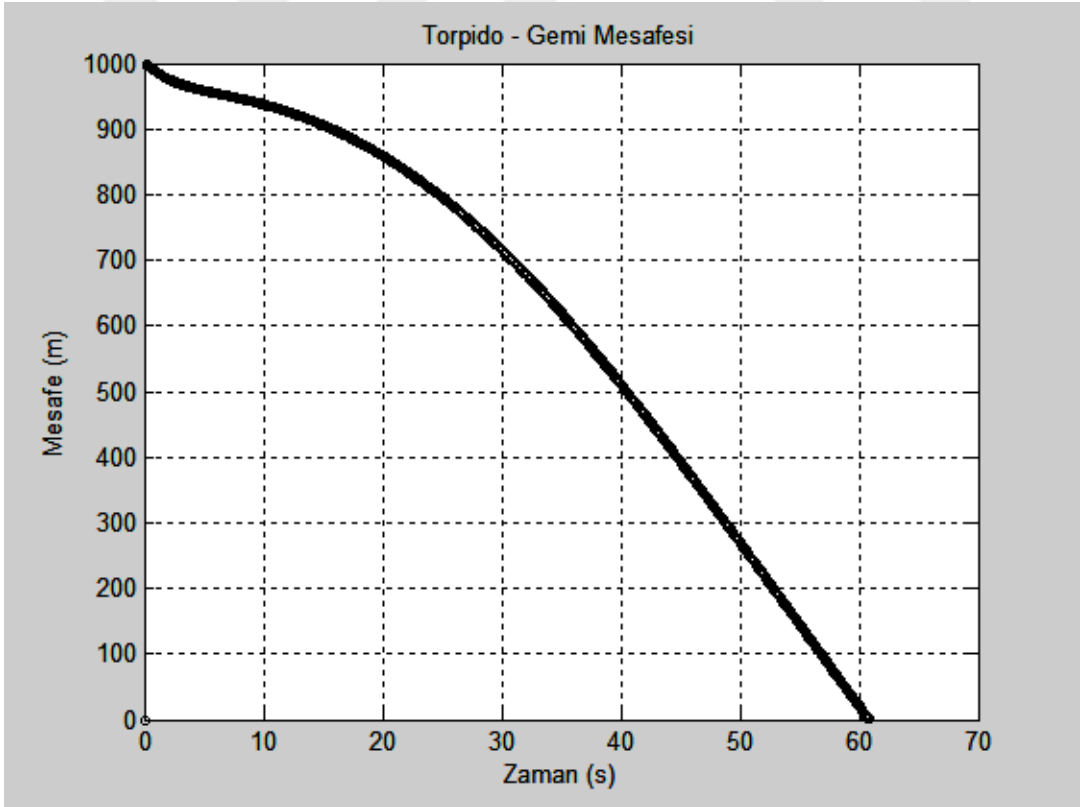
Şekil 96 Delta 3 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önlemede torpido-gemi mesafesi grafiği



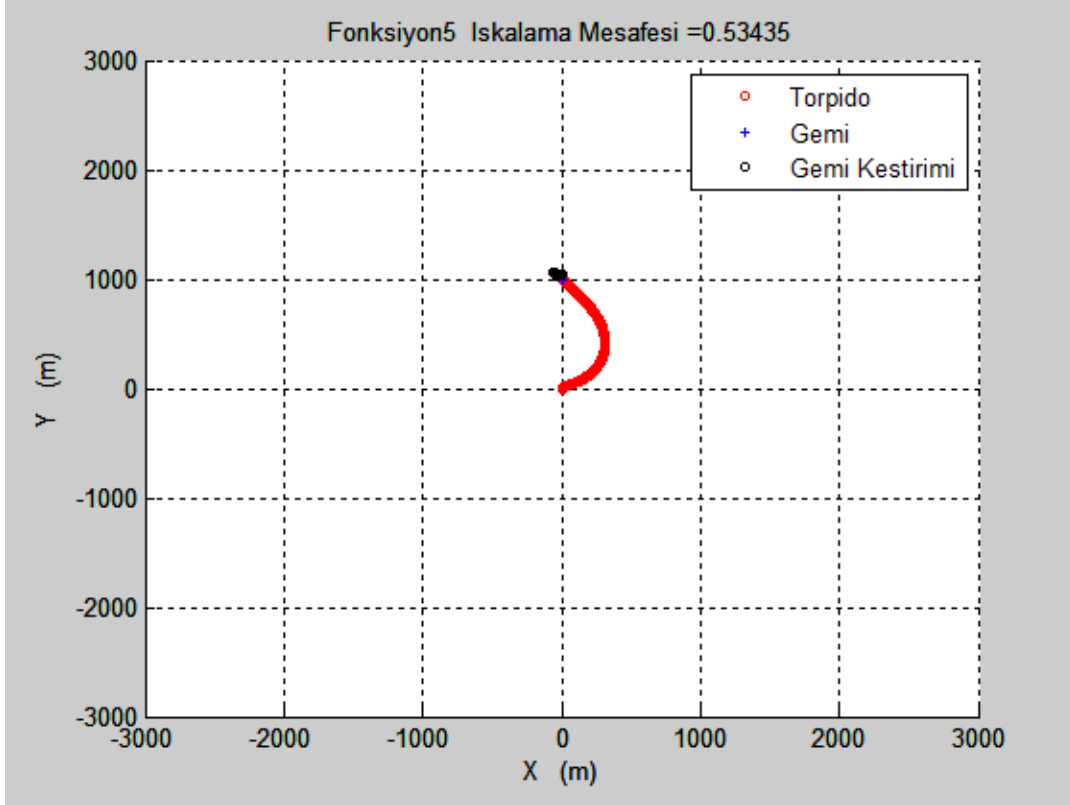
Şekil 97 Delta 4 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önleme



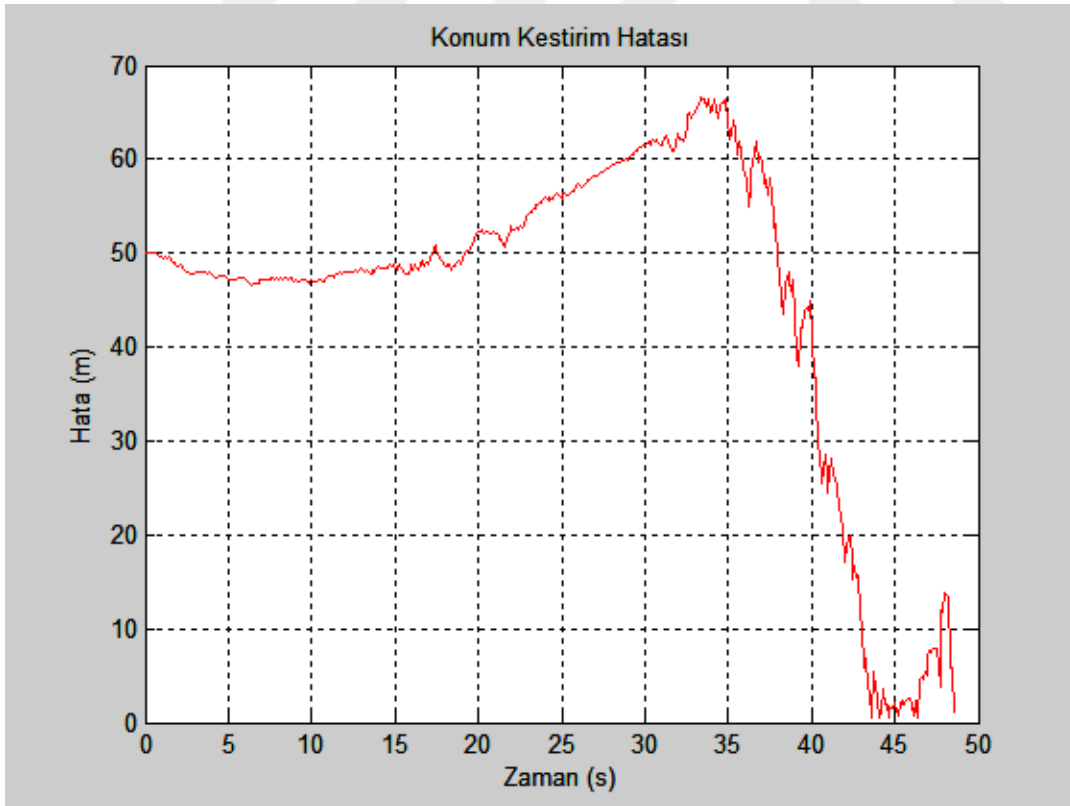
Şekil 98 Delta 4 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önlmede hata-zaman grafiği



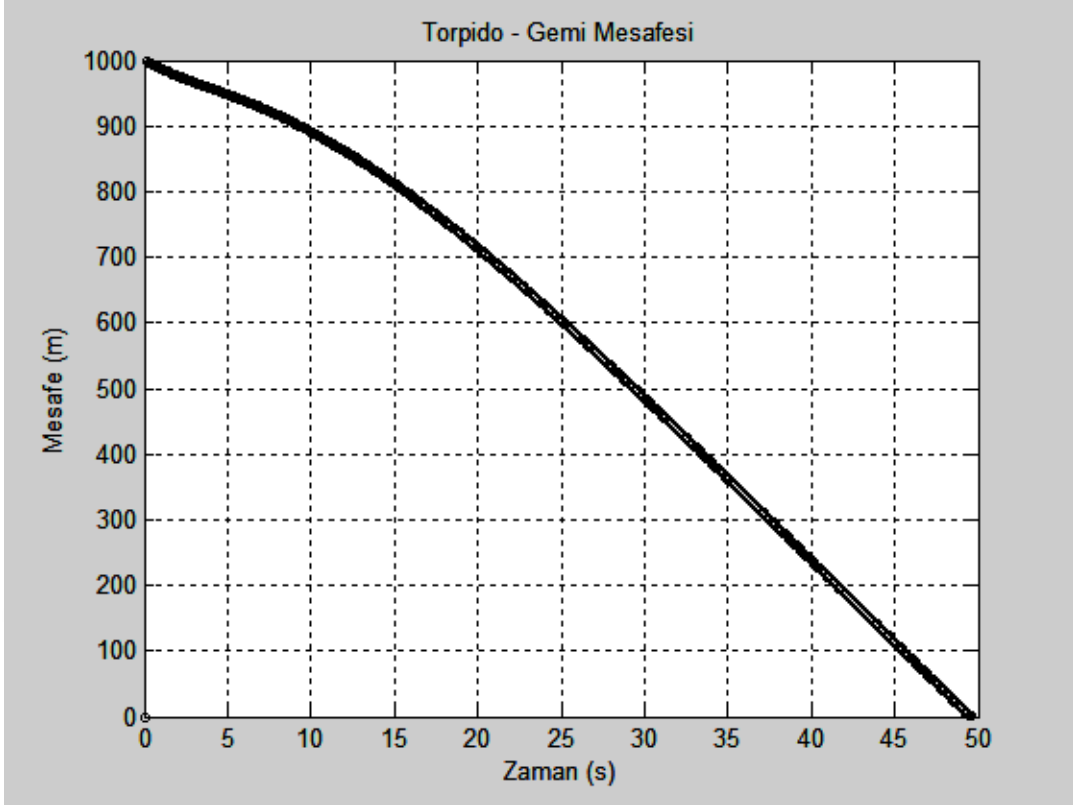
Şekil 99 Delta 4 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önlmede torpido-gemi mesafesi grafiği



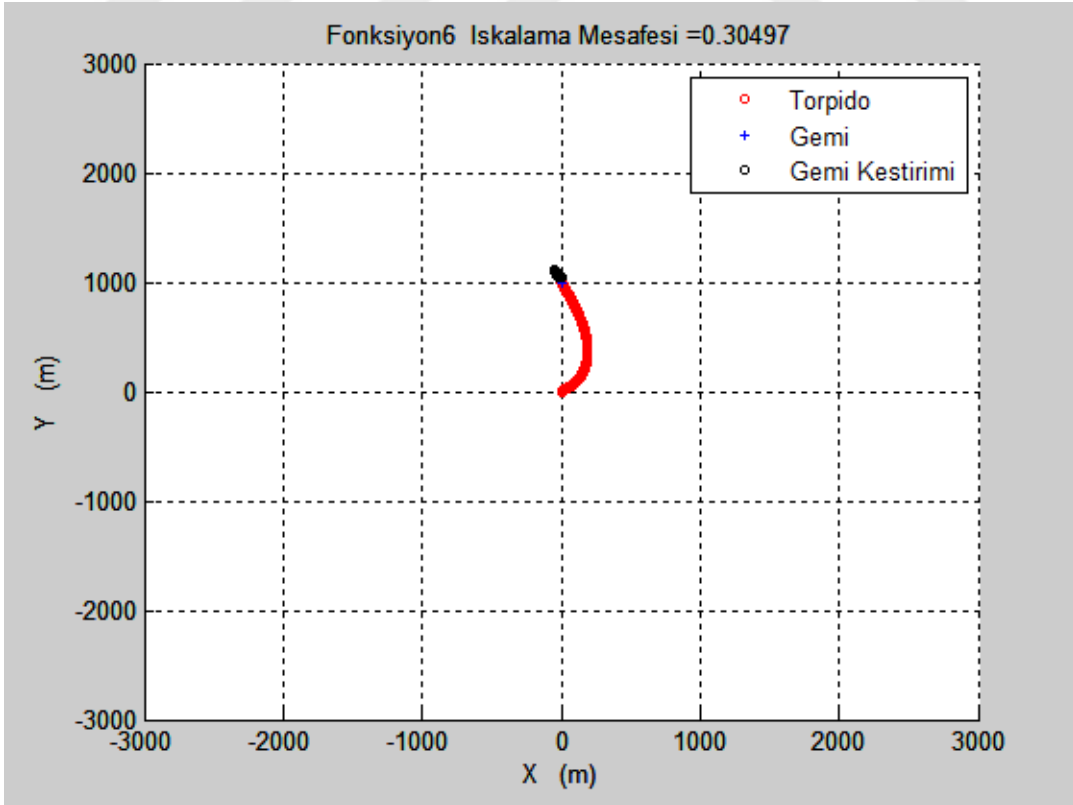
Şekil 100 Delta 5 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önleme



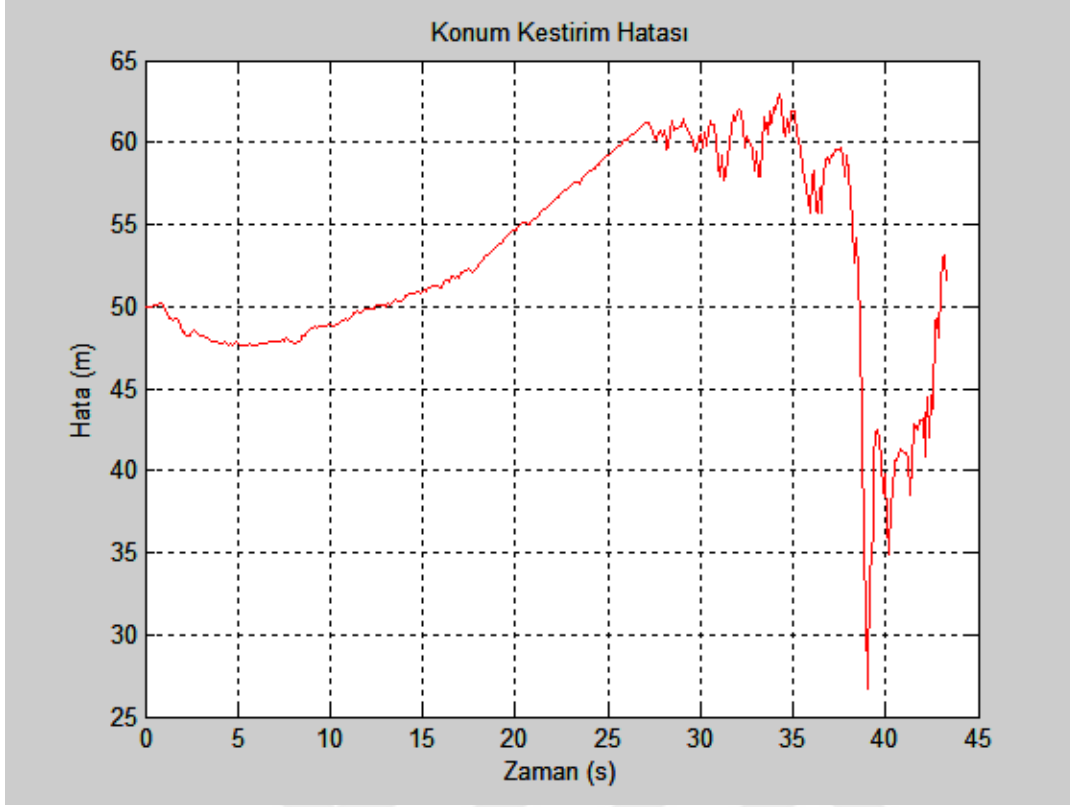
Şekil 101 Delta 5 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önlemede hata-zaman grafiği



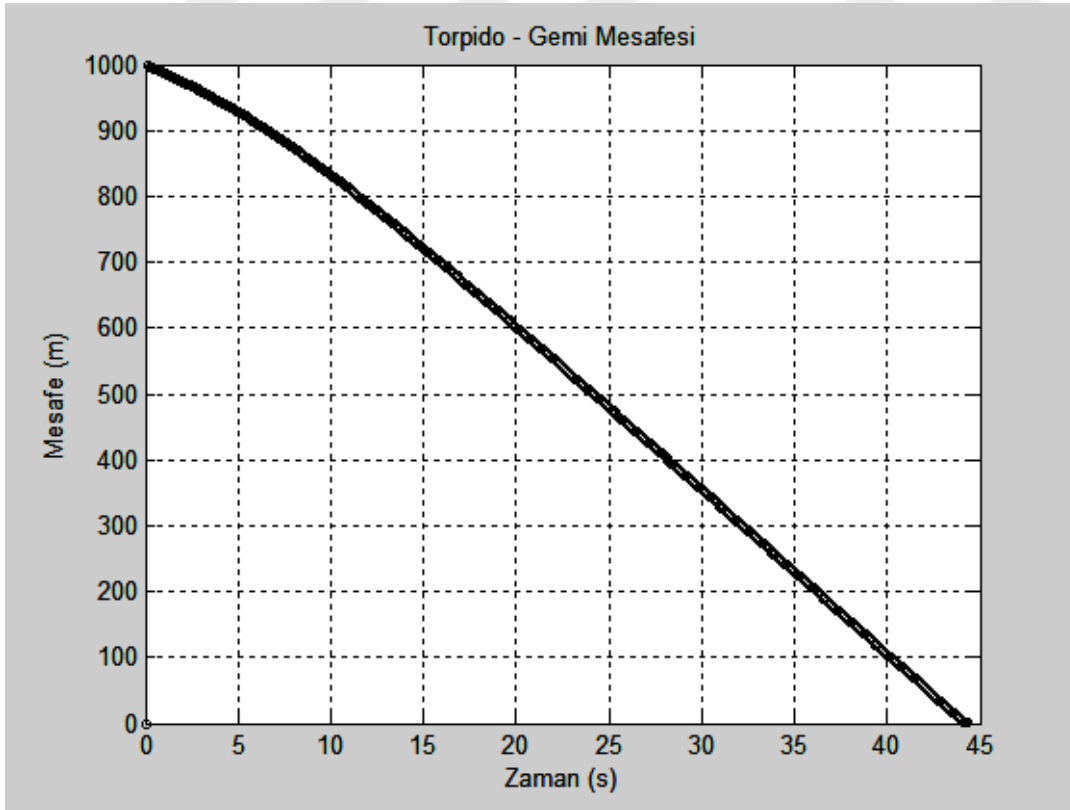
Şekil 102 Delta 5 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önlmede torpido-gemi mesafesi grafiği



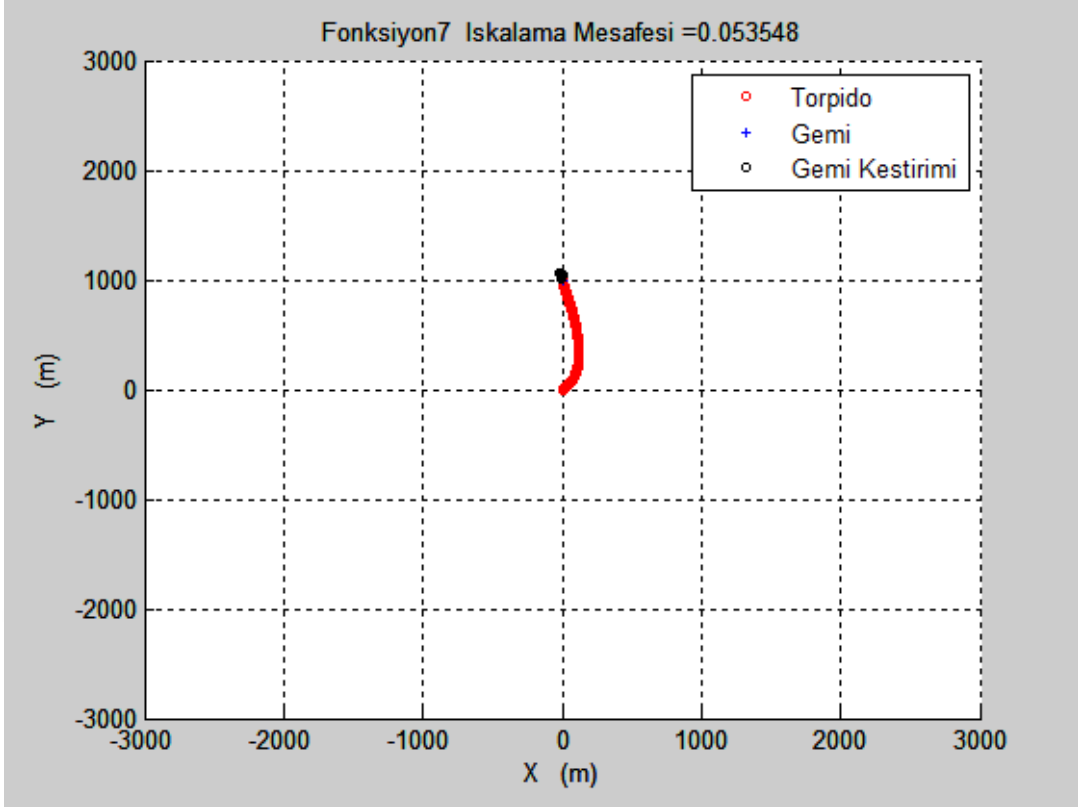
Şekil 103 Delta 6 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önleme



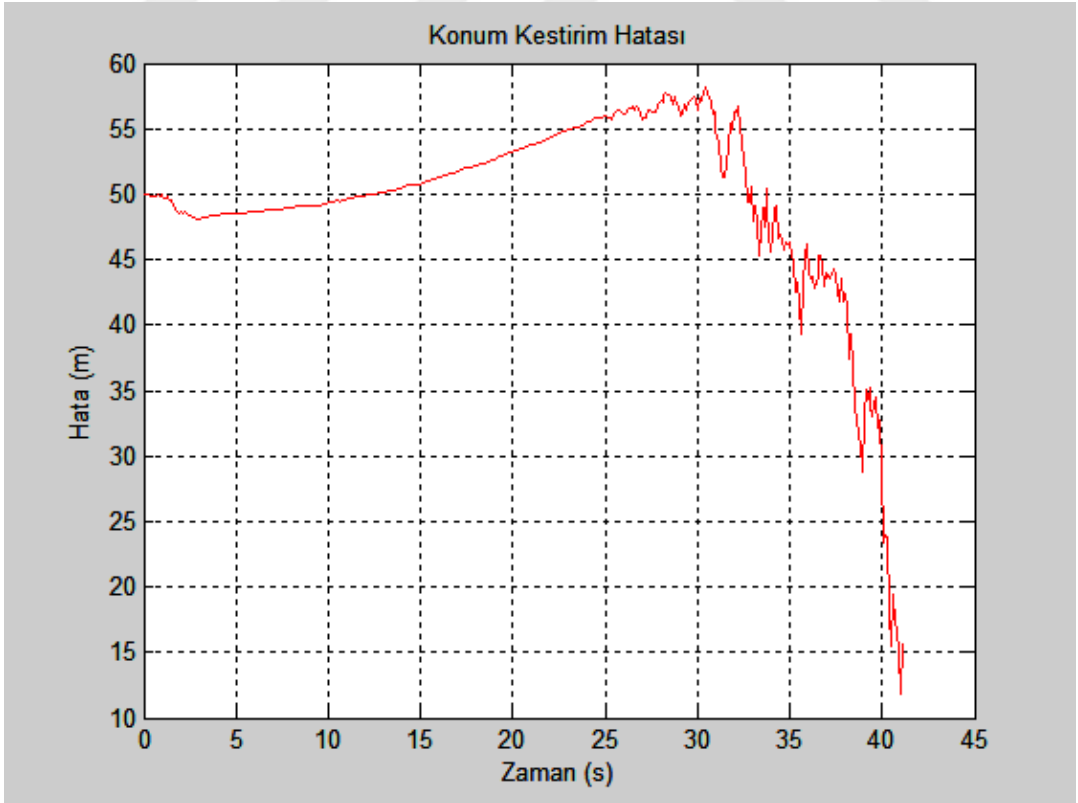
Şekil 104 Delta 6 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önlemede hata-zaman grafiği



Şekil 105 Delta 6 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önlemede torpido-gemi mesafesi grafiği

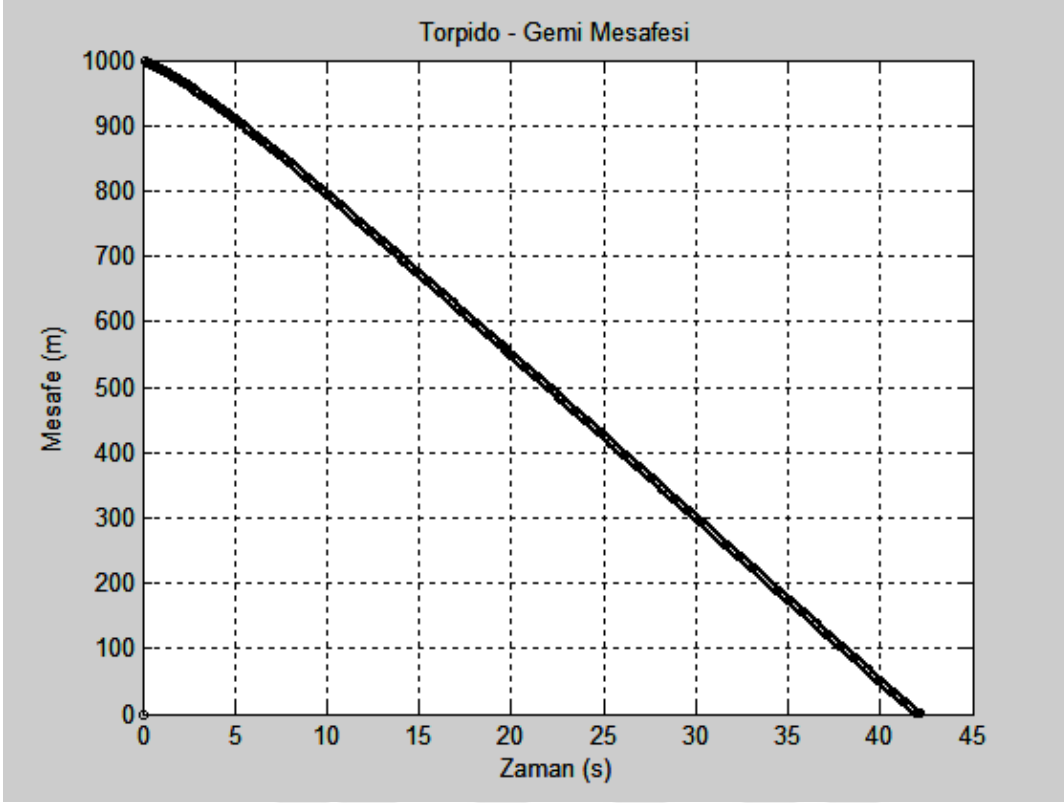


Şekil 106 Delta 7 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önleme

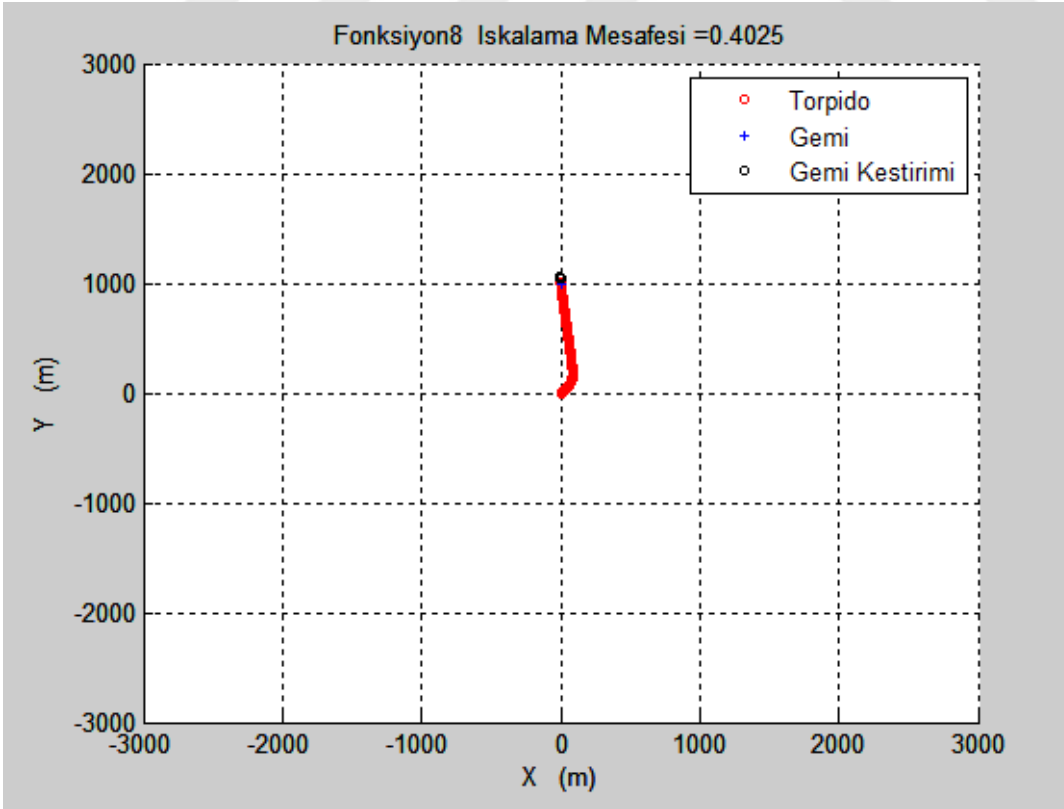


Şekil 107 Delta 7 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önlemede hata-zaman grafiği

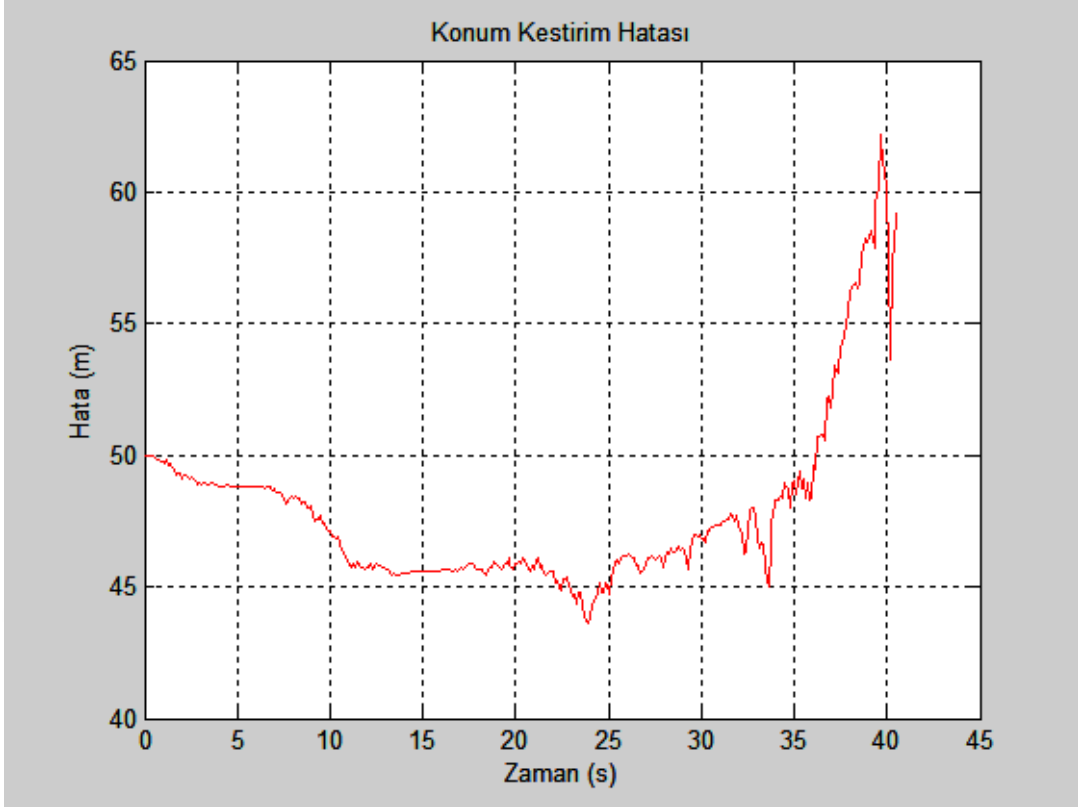




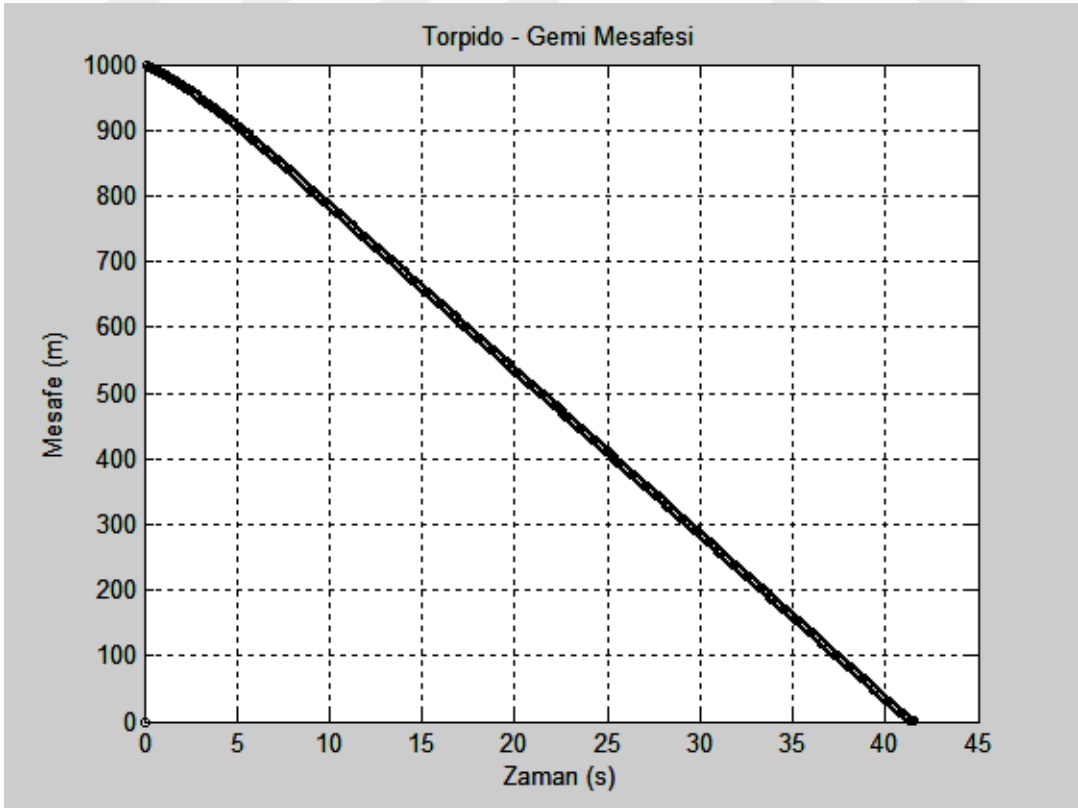
Şekil 108 Delta 7 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önlemede torpedo-gemi mesafesi grafiği



Şekil 109 Delta 8 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önleme



Şekil 110 Delta 8 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önlemede hata-zaman grafiği



Şekil 111 Delta 8 ağırlıklandırma fonksiyonu ile sabit hedefe önlemede torpido-gemi mesafesi grafiği

Hedef kestirim grafikleri incelendikten sonra, torpidonun sabit hedefe atıldığı durumda kullanılan  $\delta(t)$  fonksiyonlarına göre Monte Carlo simülasyonları sonucu oluşan ıskalama mesafesi değerlerinin çizelgesi aşağıdadır.

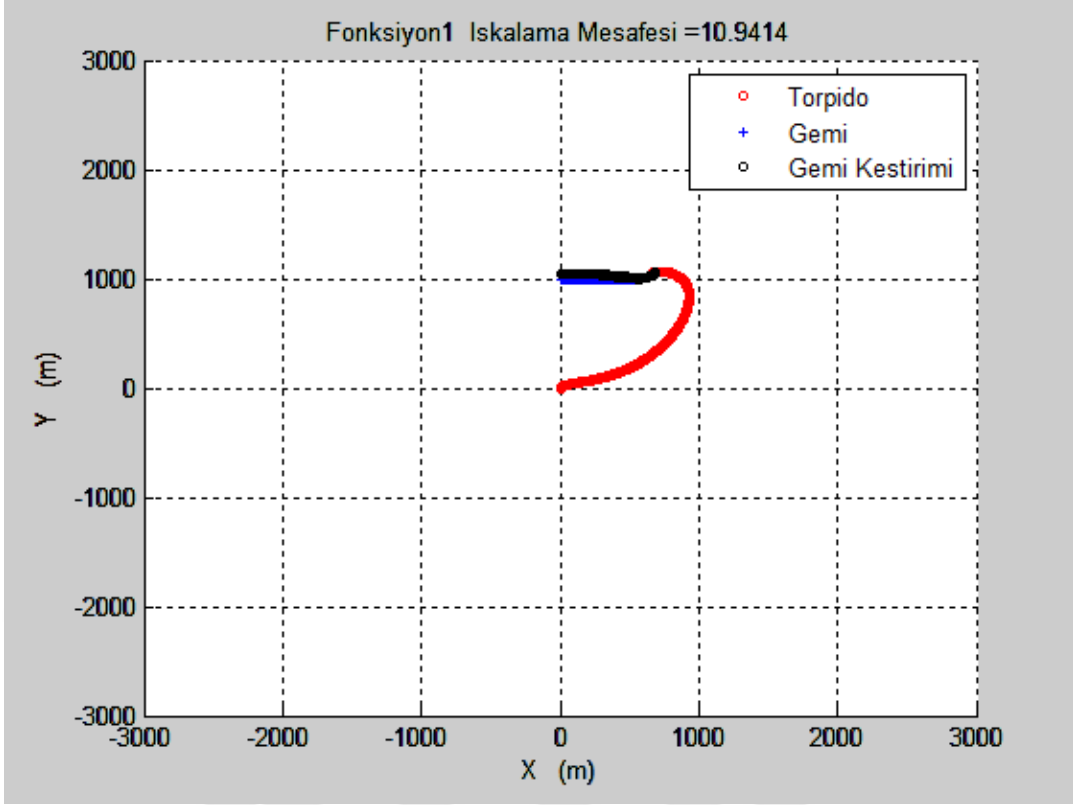
Çizelge 5 Sabit hedefe atışta oluşan ıskalama mesafeleri ve önleme zamanları

Fonksiyon	Önleme Zamanı (sn)	İskalama Mesafesi (m)
$\delta_1(t)$	188.5	0.67
$\delta_2(t)$	109.6	0.51
$\delta_3(t)$	82.4	0.92
$\delta_4(t)$	60.9	0.8
$\delta_5(t)$	49.6	0.55
$\delta_6(t)$	44.3	0.27
$\delta_7(t)$	42.1	0.05
$\delta_8(t)$	41.5	0.4

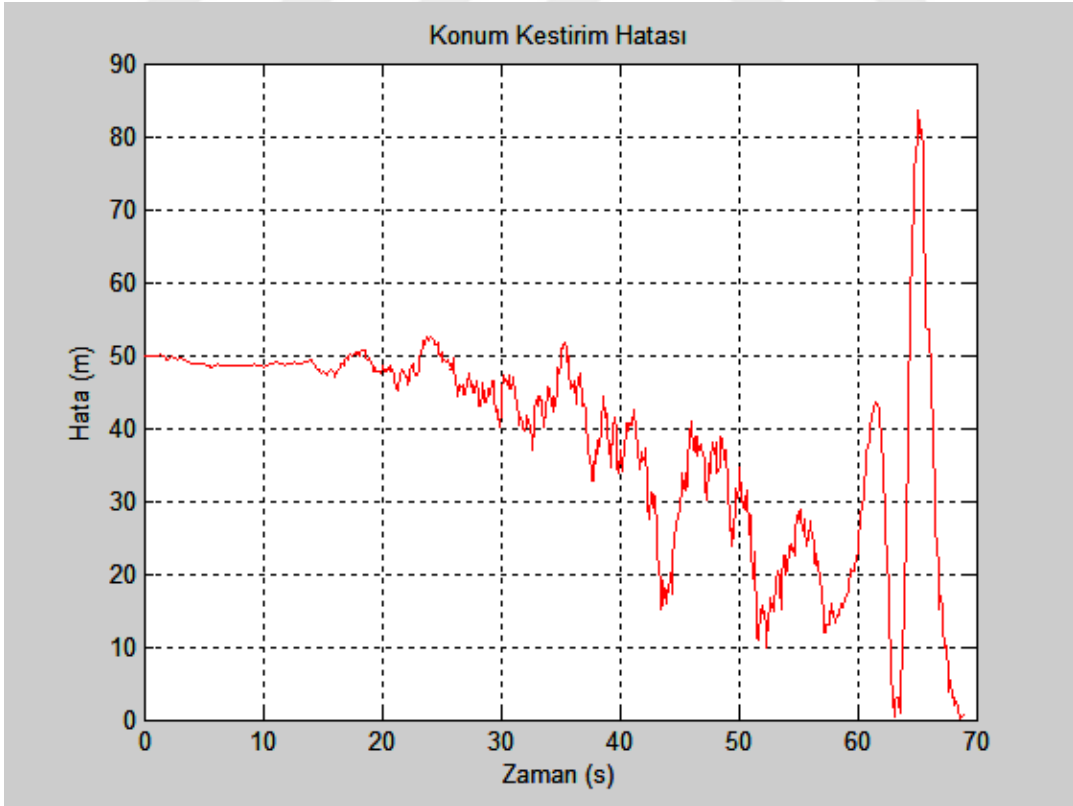
Bu çizelgeden de anlaşılacağı üzere tüm ağırlıklandırma fonksiyonları ile hedefe önleme yapılabildiği görülmüştür. Hedef noktasal olarak alındığı için ıskalama mesafeleri küçük olmaktadır. Kestirim ivmesine ağırlık verilen senaryoda hedefe daha uzun sürede önleme yapıldığı, önleme ivmesine ağırlık verilen senaryoda daha kısa sürede önleme yapıldığı anlaşılmıştır. Pasif hedef takibinde torpido manevra yapmadığı zaman kestirim hatasının arttığı hata-zaman grafiklerinde gözlemlenmiştir.  $\delta_1(t)$  fonksiyonun kullanıldığı durumda torpidonun hareketi, beklendiği gibi hedef durum kestirimini en iyi şekilde yapabilmek amacıyla hedef etrafında daire çizmeye başlamıştır. Simülasyon zamanı ilerledikçe  $a_n$  ivmesi de torpidoya etki etmeye başlamış ve torpido hedefe doğru yönelmiştir.

#### 4.2.4. İvmeli Hareket Yapan Hedefe Yandan Atış Yapılarak Önleme

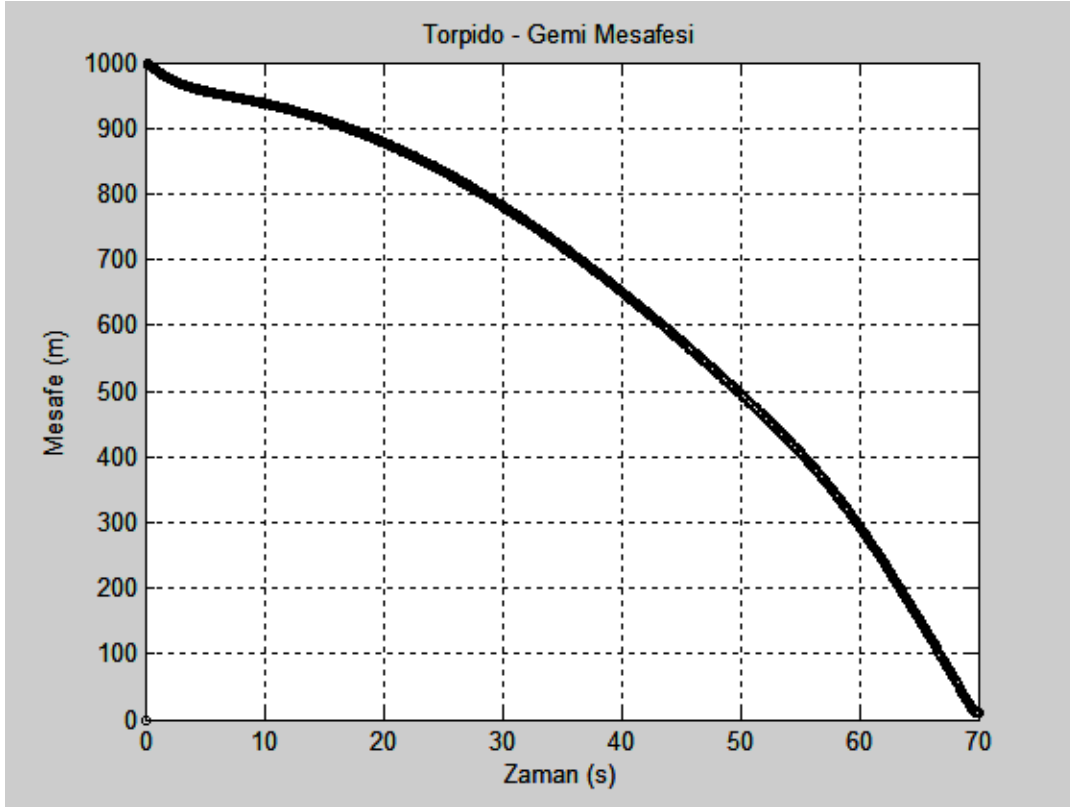
Bu simülasyonda ilk başta 20 knots sabit hızla manevrasız giden, önleme anına 10 saniye kala 0.1g manevra yapan bir gemi senaryosu hazırlanmıştır. Gemiden 1 km uzaktaki bir noktadan gemiye doğru 50 knots sabit hızla bir torpido fırlatılmıştır. Durum kestirimine başlangıç değeri olarak hedef geminin y yönünde 50 metre uzağı verilmiştir. Tüm  $\delta(t)$  fonksiyonları ile simülasyon yapılmıştır. Bu fonksiyonlar kullanılarak yapılan simülasyonlarda kayıt altına alınan ıskalama mesafeleri aşağıdaki şekilde görülebilir.



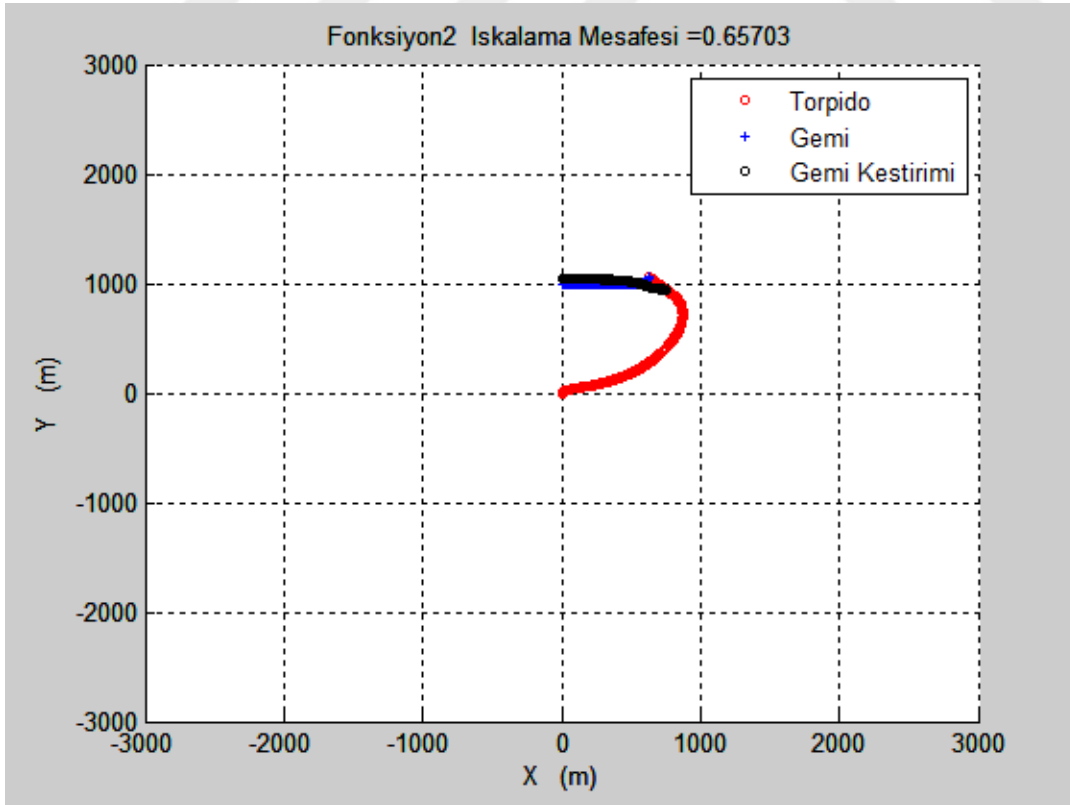
Şekil 112 Delta 1 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önleme



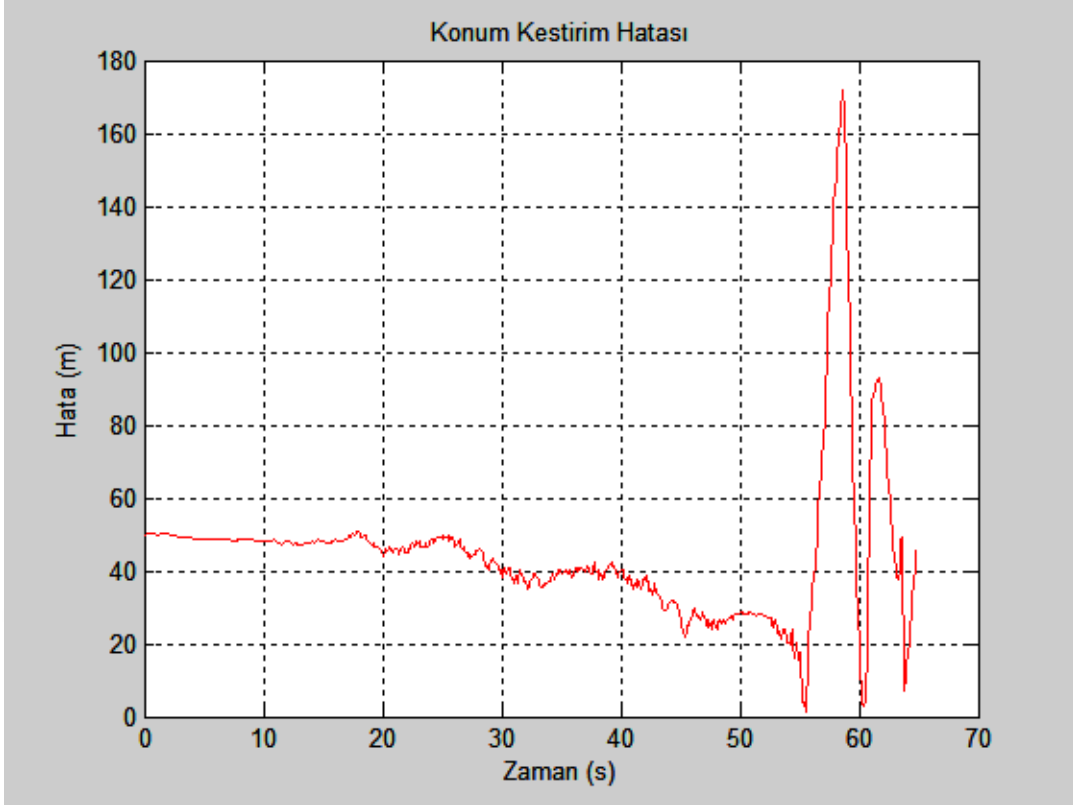
Şekil 113 Delta 1 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önlemede hata-zaman grafiği



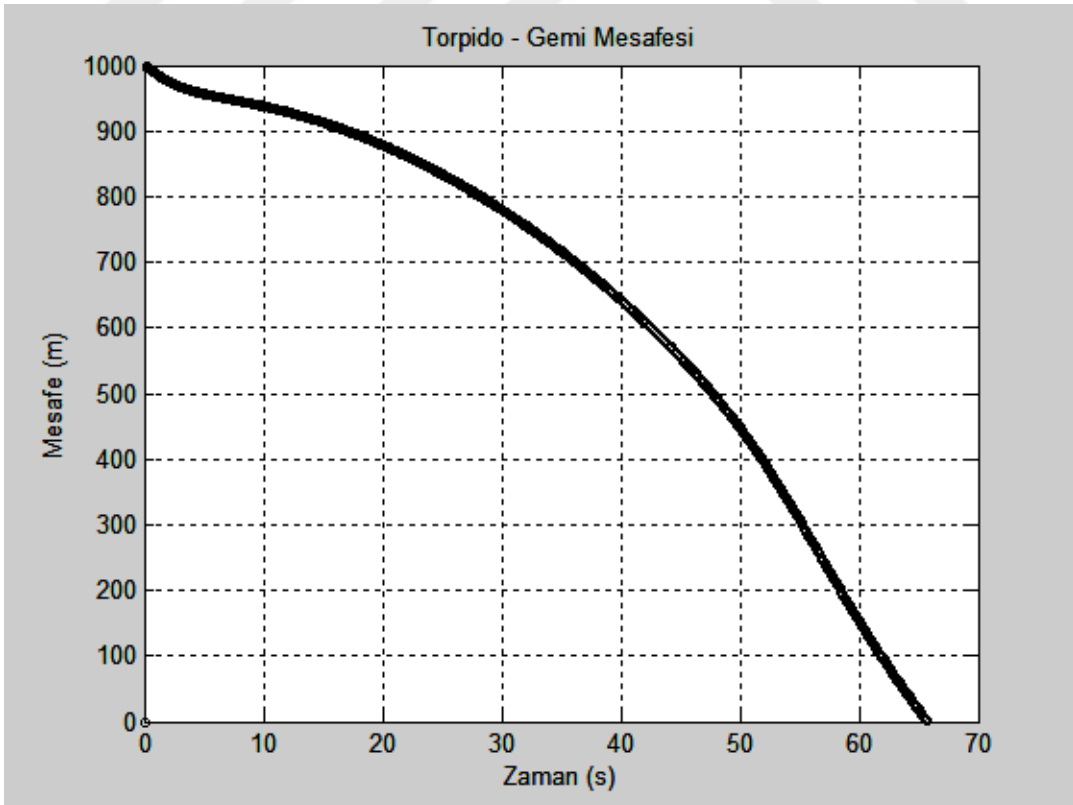
Şekil 114 Delta 1 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önlende torpido-gemi mesafesi grafiği



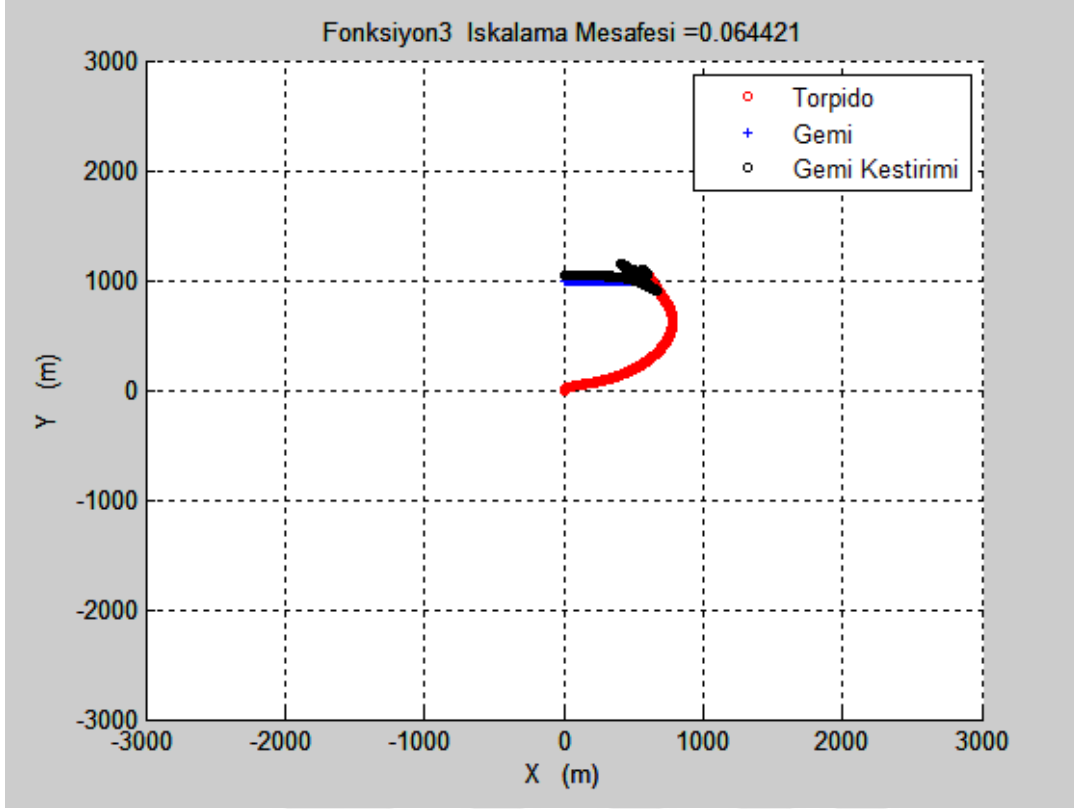
Şekil 115 Delta 2 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önleme



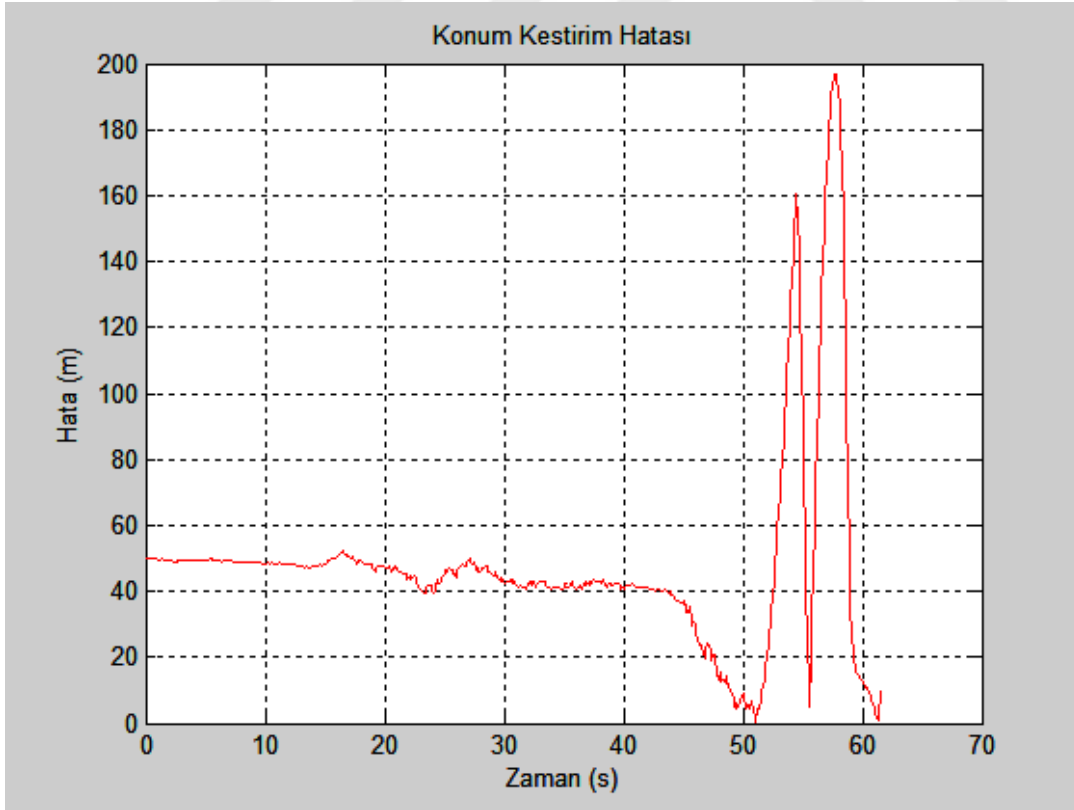
Şekil 116 Delta 2 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önlemede hata-zaman grafiği



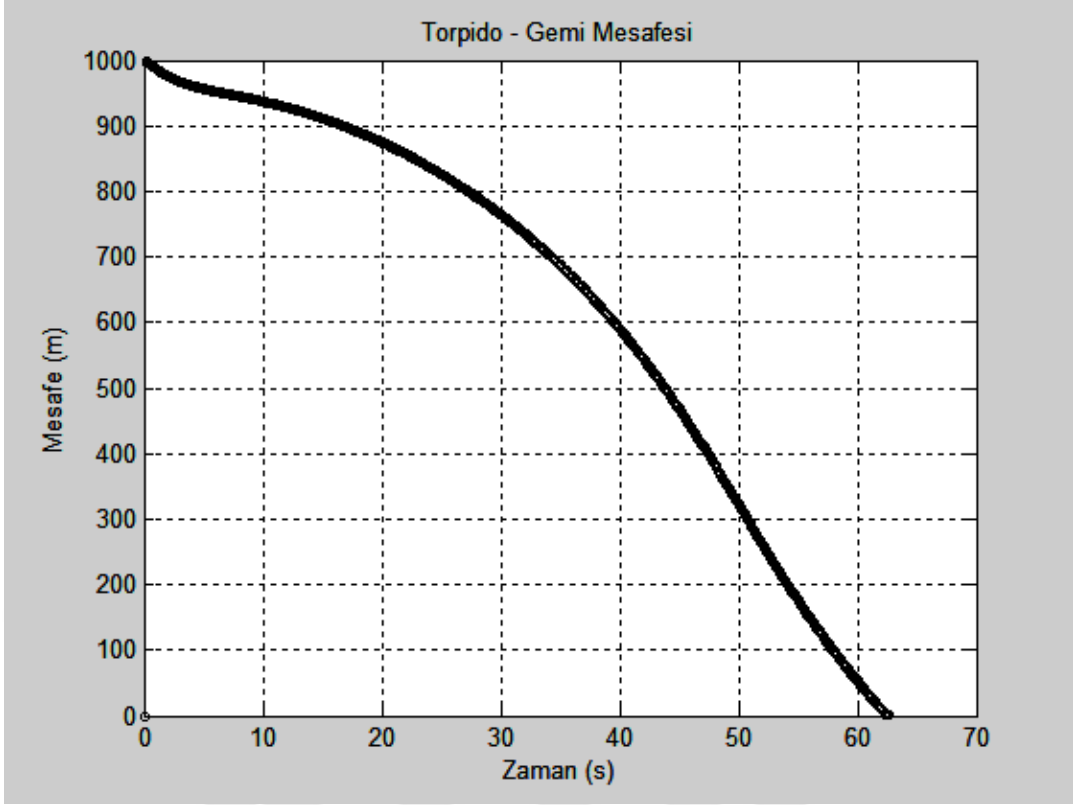
Şekil 117 Delta 2 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önlemede torpido-gemi mesafesi grafiği



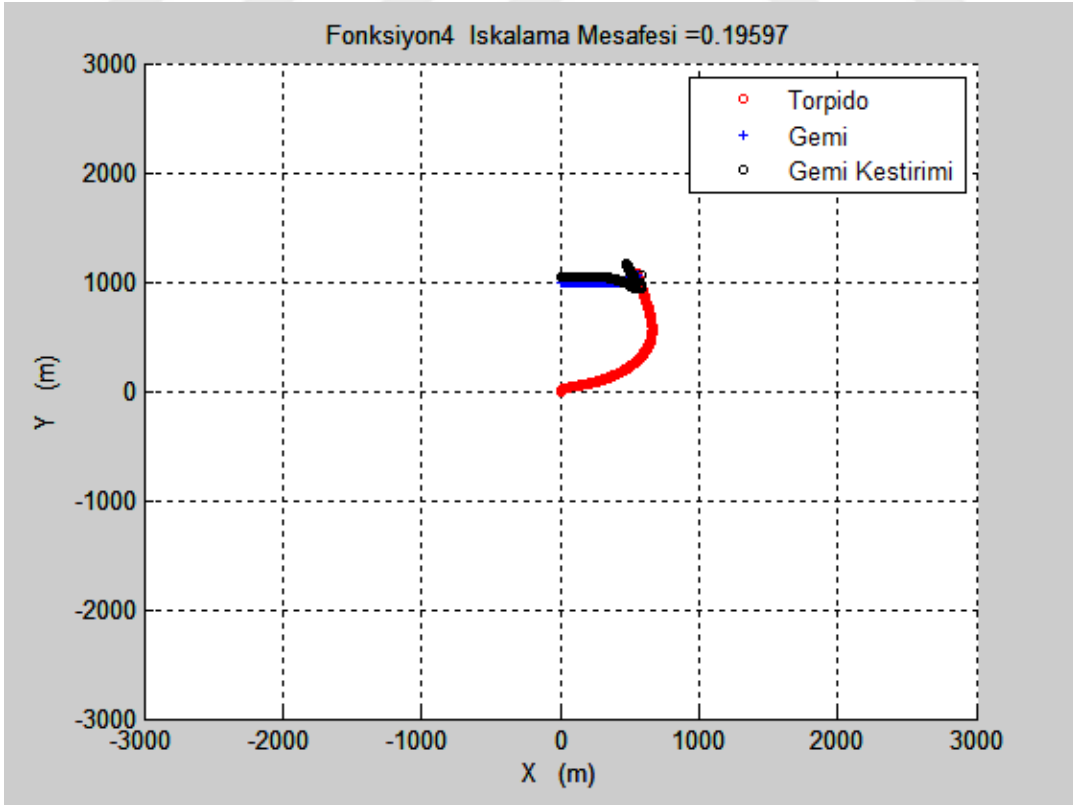
Şekil 118 Delta 3 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önleme



Şekil 119 Delta 3 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önlemede hata-zaman grafiği

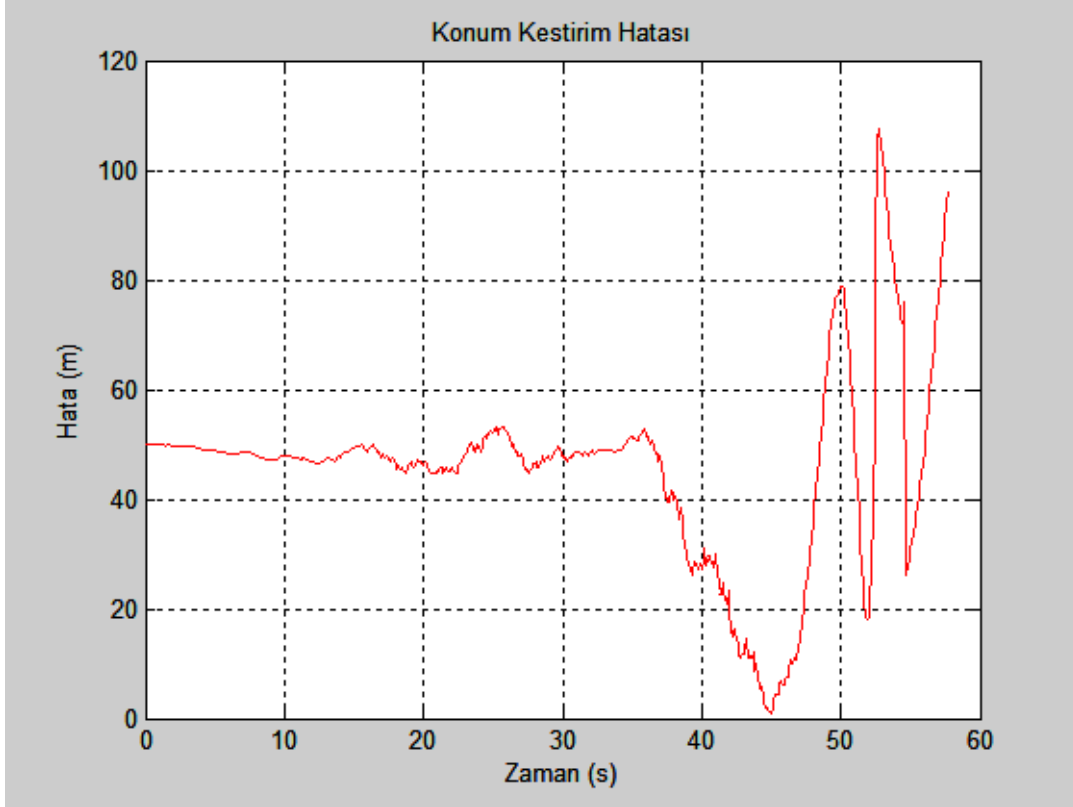


Şekil 120 Delta 3 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önlemede torpido-gemi mesafesi grafiği

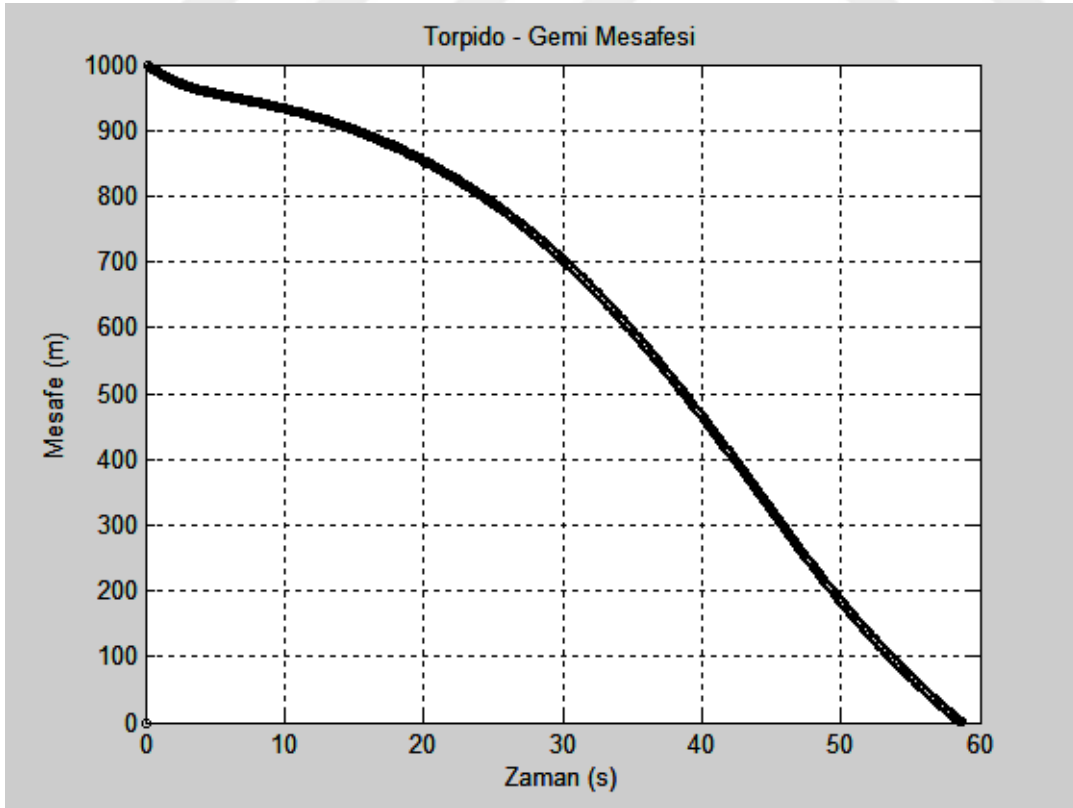


Şekil 121 Delta 4 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önleme

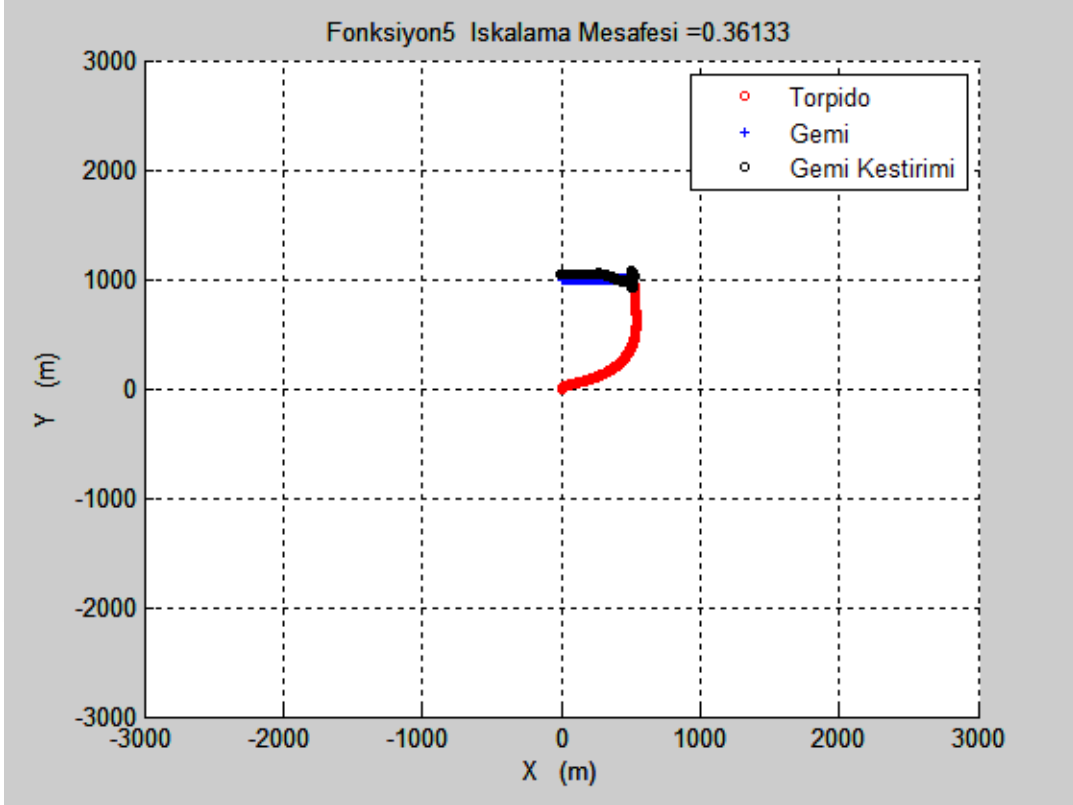




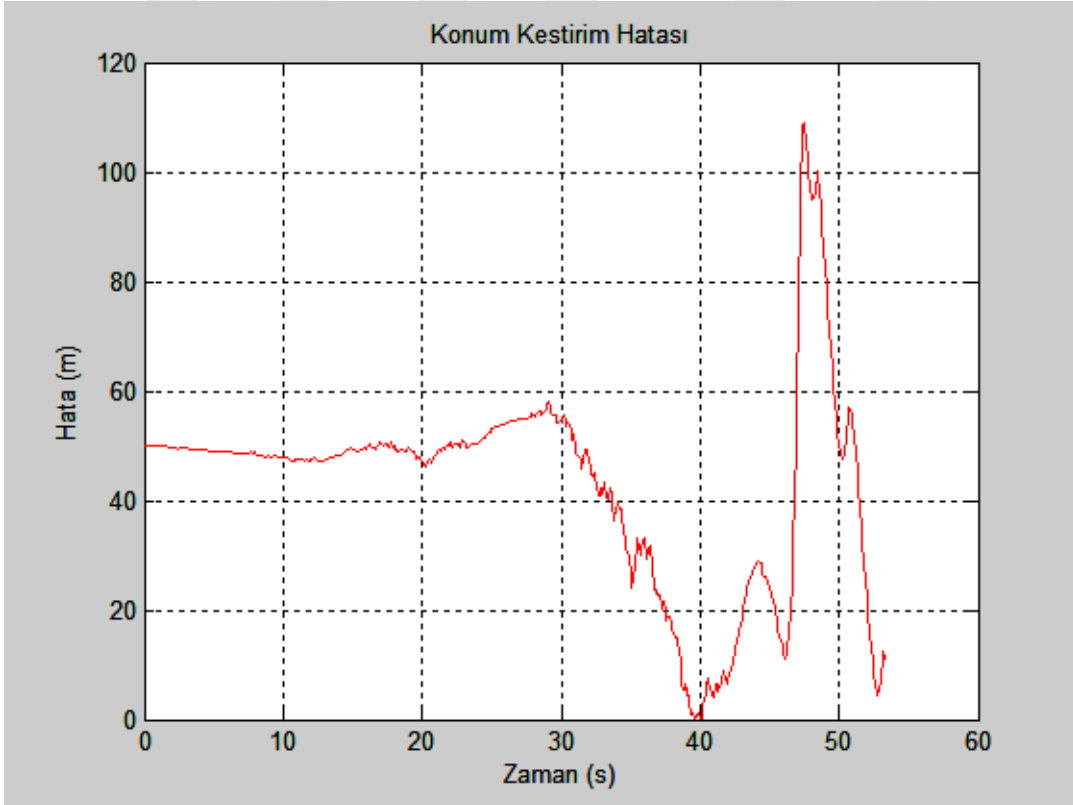
Şekil 122 Delta 4 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önlmede hata-zaman grafiği



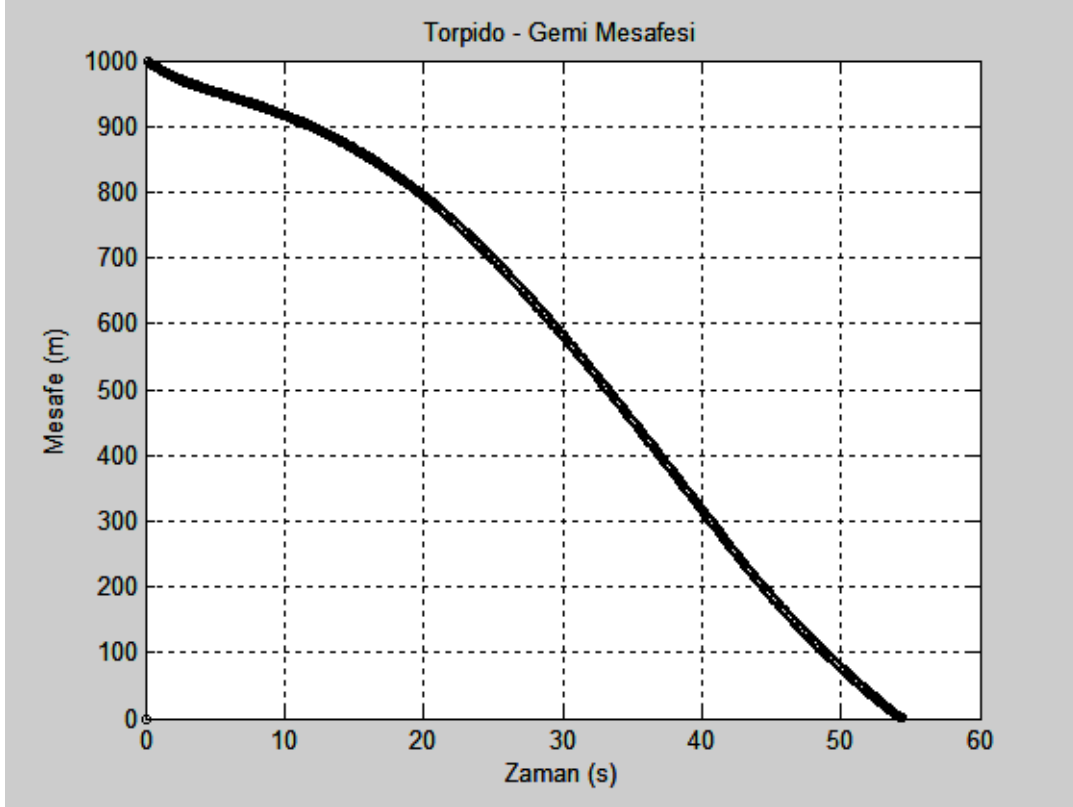
Şekil 123 Delta 4 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önlmede torpido-gemi mesafesi grafiği



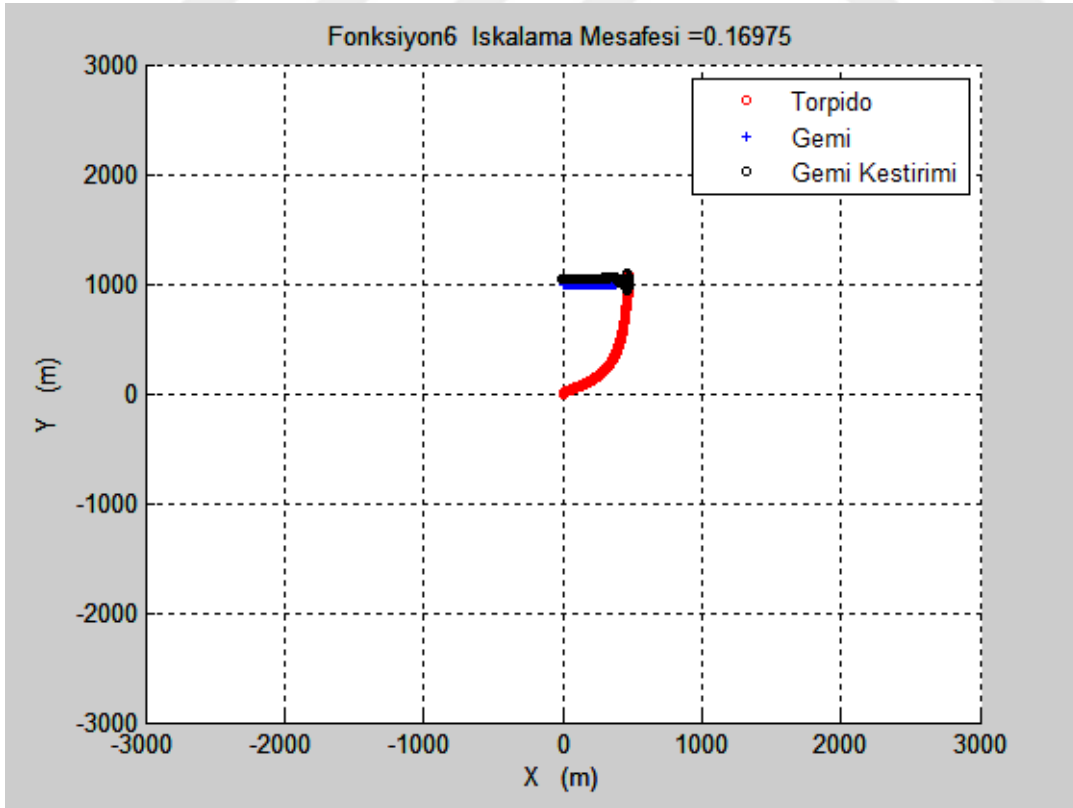
Şekil 124 Delta 5 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önleme



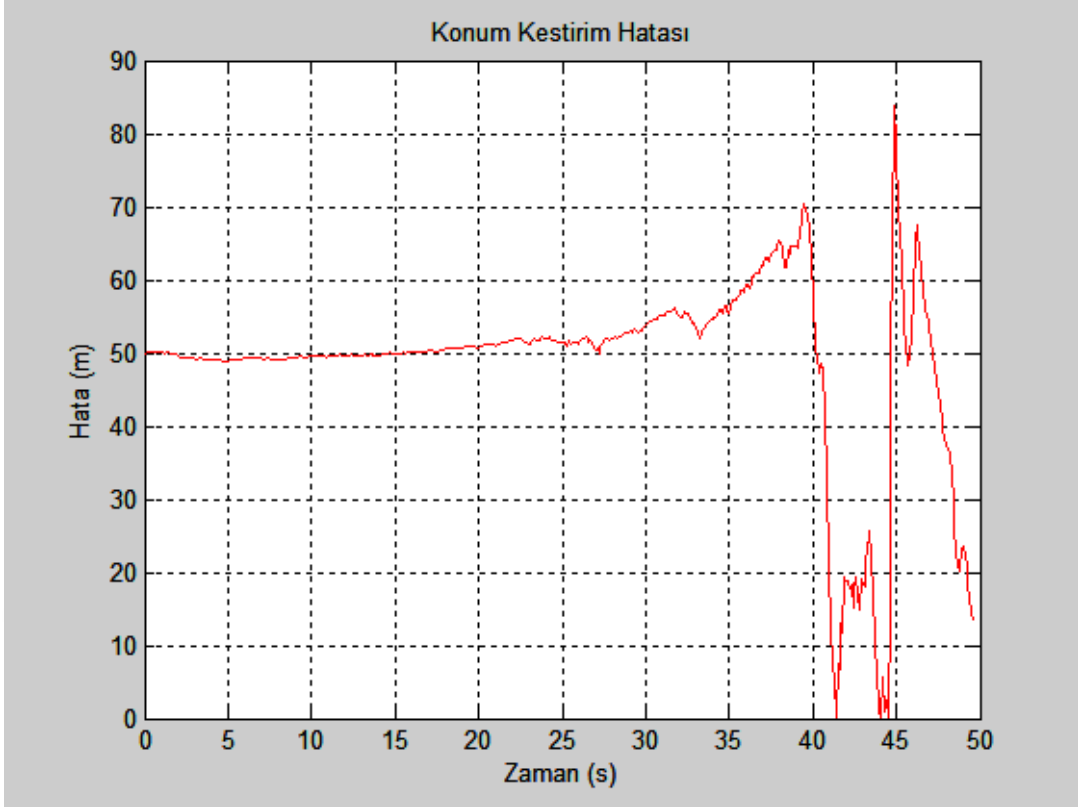
Şekil 125 Delta 5 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önlemede hata-zaman grafiği



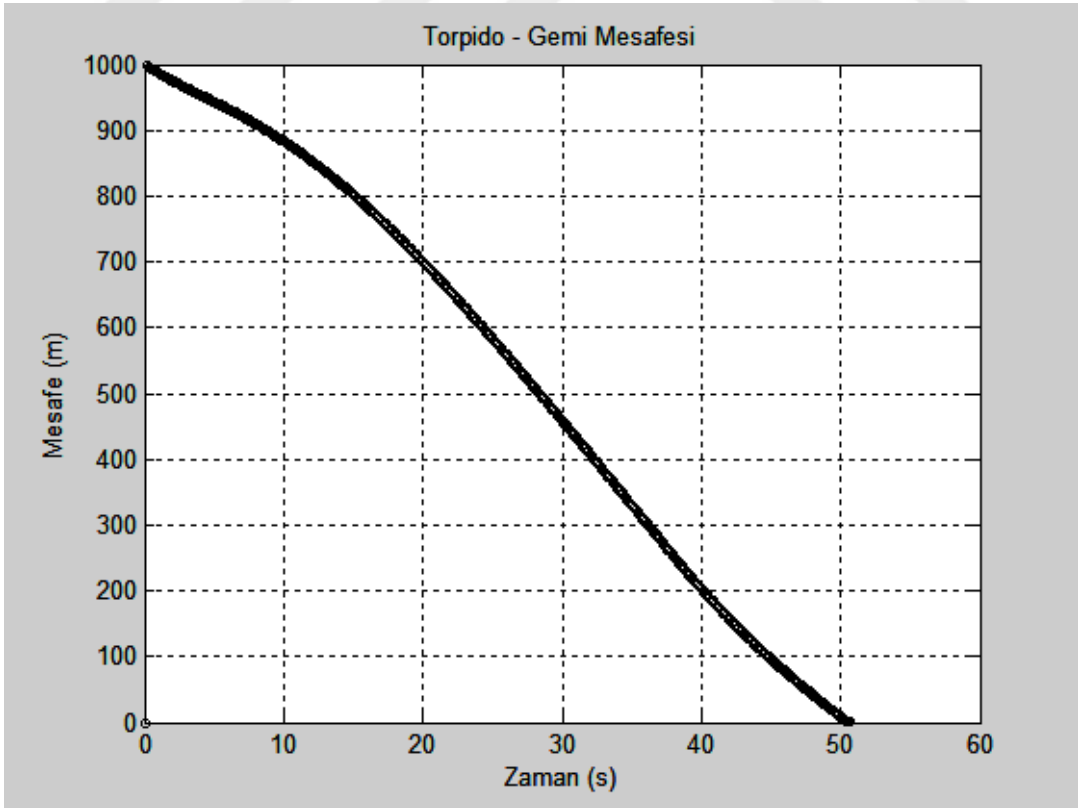
Şekil 126 Delta 5 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önlemde torpido-gemi mesafesi grafiği



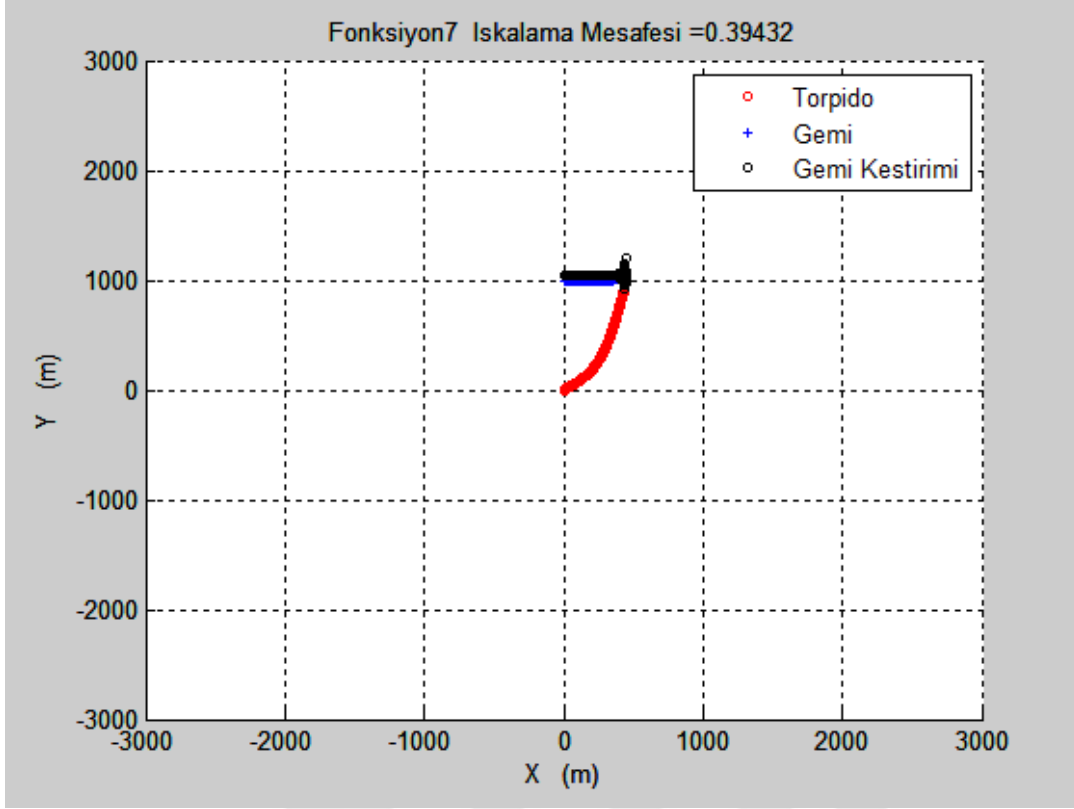
Şekil 127 Delta 6 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önleme



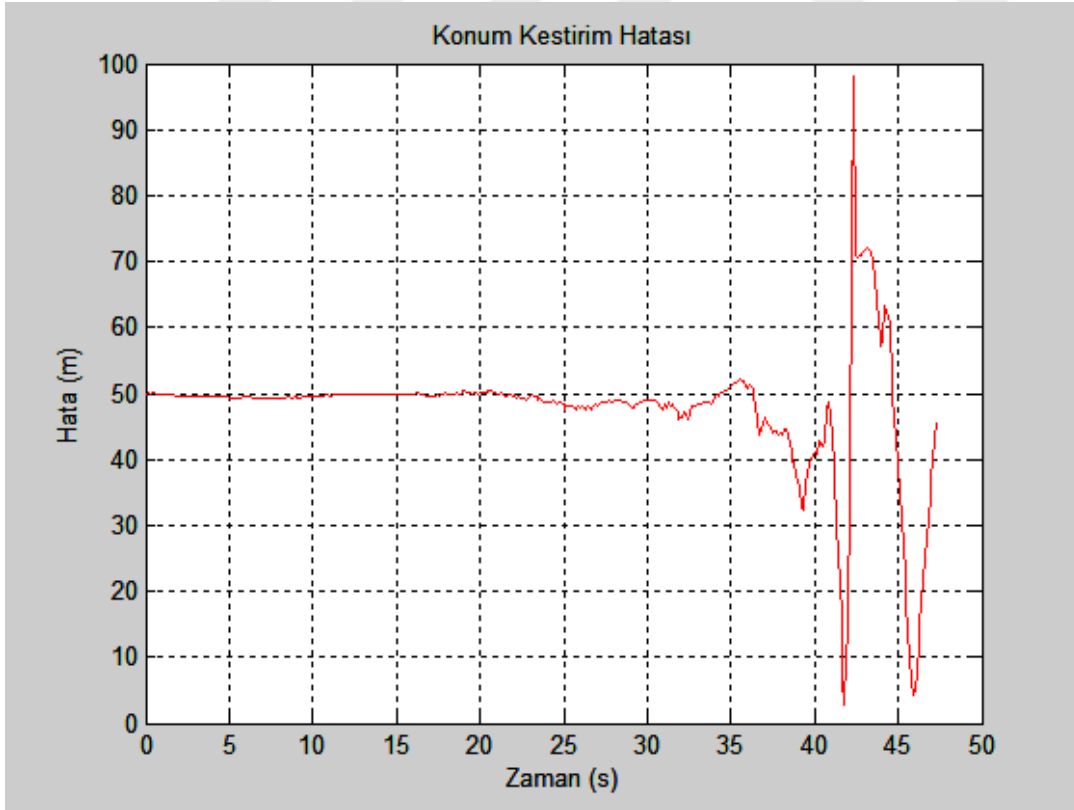
Şekil 128 Delta 6 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önlemede hata-zaman grafiği



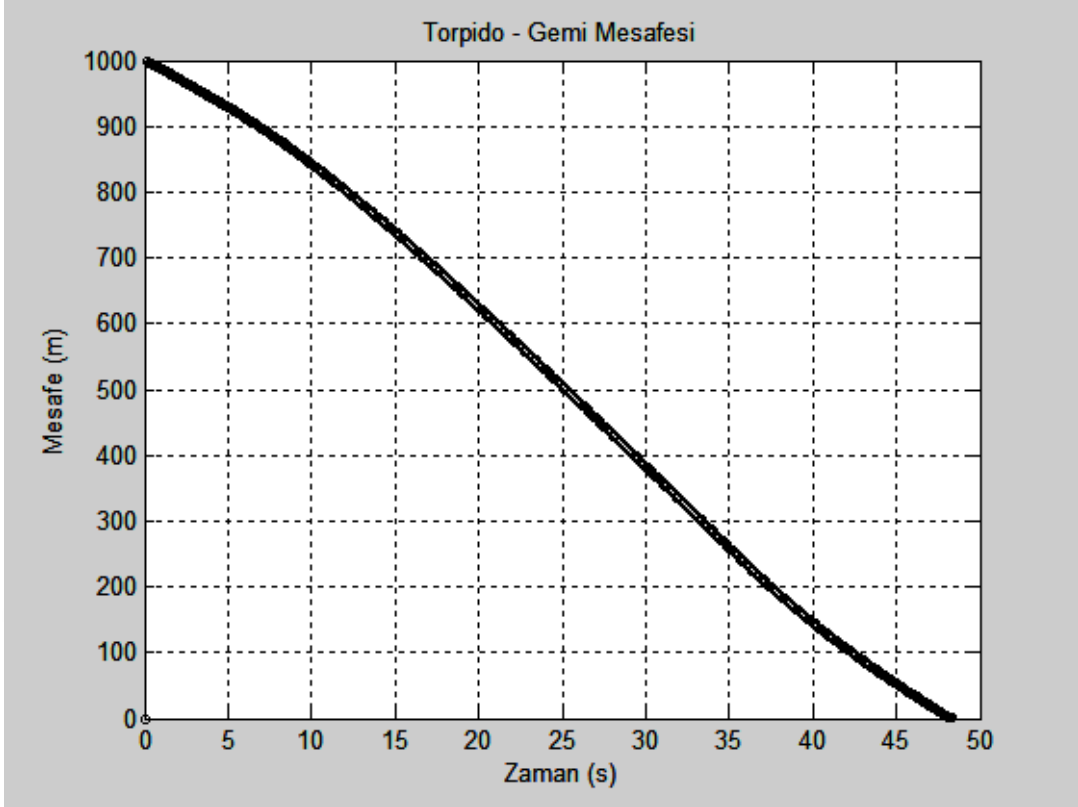
Şekil 129 Delta 6 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önlemede torpedo-gemi mesafesi grafiği



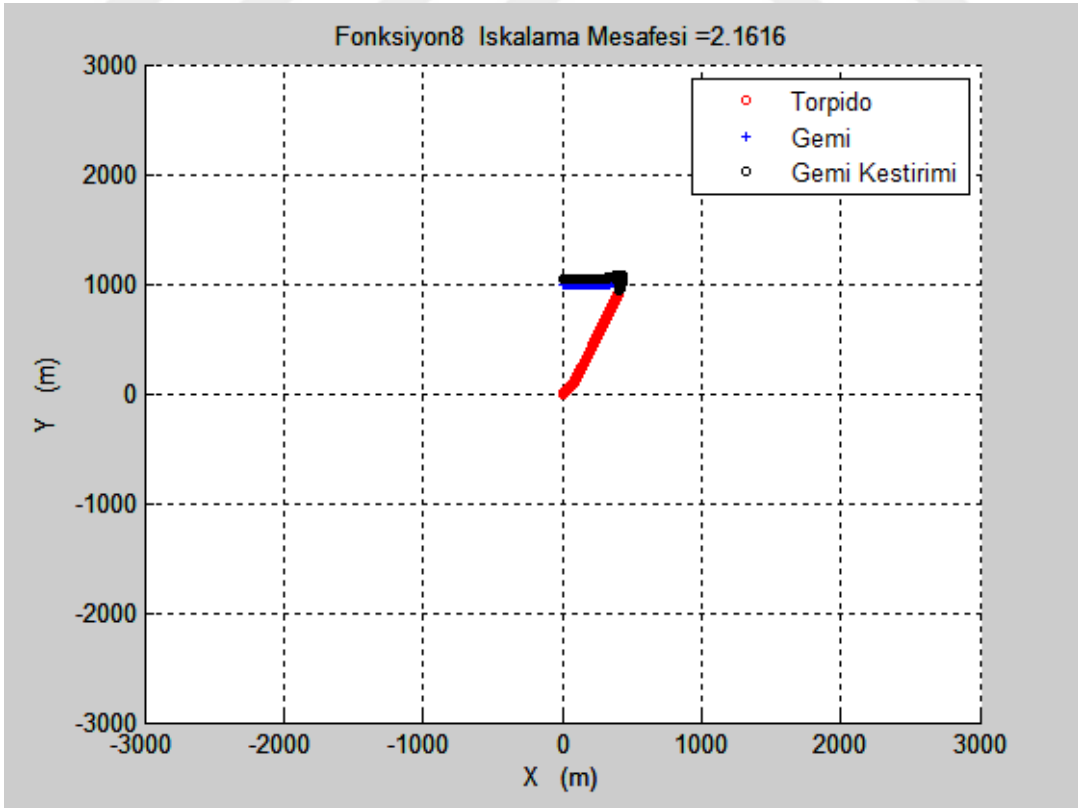
Şekil 130 Delta 7 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önleme



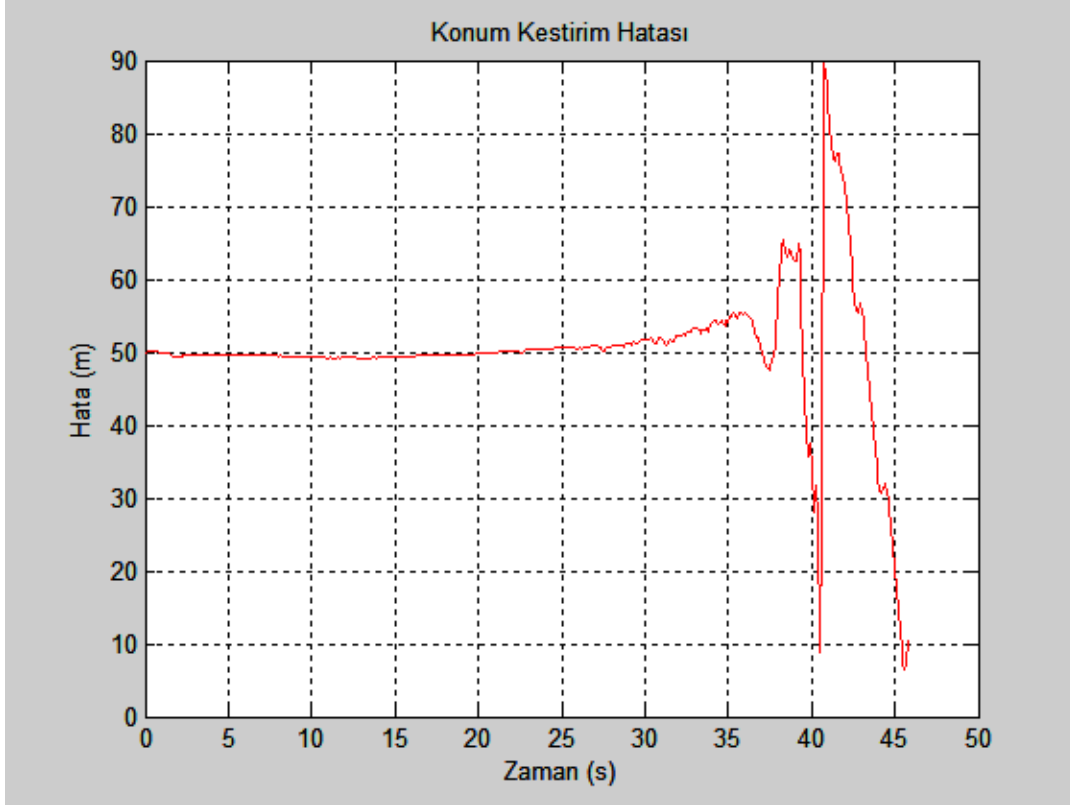
Şekil 131 Delta 7 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önlemede hata-zaman grafiği



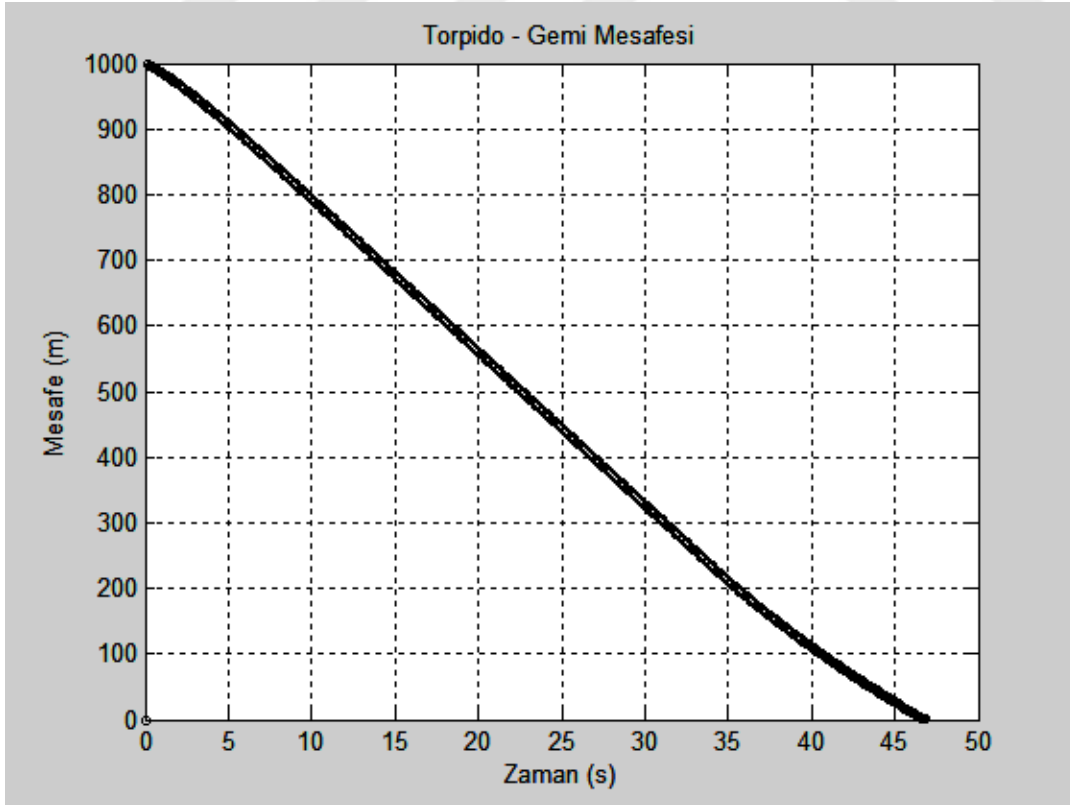
Şekil 132 Delta 7 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önlemede torpido-gemi mesafesi grafiği



Şekil 133 Delta 8 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önleme



Şekil 134 Delta 8 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önlemede hata-zaman grafiği



Şekil 135 Delta 8 ağırlıklandırma fonksiyonu ile ivmeli hedefe yandan atışla önlemede torpido-gemi mesafesi grafiği

Hedef kestirim grafikleri incelendikten sonra, torpidonun ivmeli hedefe yandan atıldığı durumda kullanılan  $\delta(t)$  fonksiyonlarına göre Monte Carlo simülasyonları sonucu oluşan ıskalama mesafesi değerlerinin çizelgesi aşağıdadır.

Çizelge 6 İvmeli hedefe yandan atışta oluşan ıskalama mesafeleri ve önleme zamanları

Fonksiyon	Önleme Zamanı (sn)	İskalama Mesafesi (m)
$\delta_1(t)$	70	10.85
$\delta_2(t)$	65.8	0.72
$\delta_3(t)$	62.6	0.24
$\delta_4(t)$	58.7	0.36
$\delta_5(t)$	54.4	0.45
$\delta_6(t)$	50.6	0.23
$\delta_7(t)$	48.3	0.41
$\delta_8(t)$	46.7	0.68

Bu çizelgeden de anlaşılacağı üzere  $\delta_1(t)$  ağırlıklandırma fonksiyonu hariç diğer tüm ağırlıklandırma fonksiyonları ile hedefe önleme yapılabildiği görülmüştür. Hedef noktasal olarak alındığı için ıskalama mesafeleri küçük olmaktadır. Kestirim ivmesine ağırlık verilen senaryoda hedefe daha uzun sürede önleme yapıldığı, önleme ivmesine ağırlık verilen senaryoda daha kısa sürede önleme yapıldığı anlaşılmıştır. Pasif hedef takibinde torpido manevra yapmadığı ve hedefin de ivmeli hareket yaptığı zaman kestirim hatasının arttığı hata-zaman grafiklerinde gözlemlenmiştir.  $\delta_1(t)$  fonksiyonunun ıskalama mesafesinin büyük çıkmasının sebebi hedef kestirimine oldukça çok ağırlık verdiği için zamanında önleme yapamamasıdır.

### 4.3. Sabit ve Kestirilmiş Yaklaşma Hızının Oransal Seyir Güdümüne Etkisi

Daha önce bölüm 4.1'de yapılan çalışmalarda iki boyutta pasif takip yöntemlerini kullanarak hedefin konumunu ve hızını kestirmeye çalışmıştık. Elde edilen bu bilgiler ışığında, bölüm 4.2'de ise yeni bir yaklaşım geliştirilerek aynı anda hem hedefin konumunu en iyi şekilde nasıl kestirebiliriz hem de hedefe doğru en iyi önlemeyi nasıl yaparız sorusunun cevabını bulmaya çalıştık. Bu çalışmalarda torpidonun kullandığı oransal seyir güdümü yönteminde kullanılan yaklaşma hızı  $v_c$  değeri; torpido-hedef geometrisi bloğunda torpido hızı ile kestirilen hedef hızı kullanılarak hesaplanmıştır.



Mevcut kullanılmakta olan torpidolarda bu hız genelde sabit alınmaktadır. Kestirilen yaklaşma hızının torpidonun güdümüne etkisini analiz etmek amacıyla; yaklaşma hızının  $v_c$  değeri hem yaklaşık ortalama değerinden (20 m/s) hem de hedef hızının kestiriminden faydalanılarak elde edilen değerden hesaplanmıştır. Farklı bu iki  $v_c$  değeri için farklı senaryolar koşulmuş ve bu senaryolar sonucunda elde edilen ıskalama mesafeleri çizelgelerde gösterilmiştir.

Bu yeni analiz çalışmasında oransal seyir güdüm ivmesi;

$$a_n = N V_c(\text{average}) \lambda', \text{ yaklaşık ortalama yaklaşma hızı,}$$

$$a_n = N V_c(\text{estimated}) \lambda', \text{ hedef hızı kestiriminden hesaplanan yaklaşma hızı,}$$

olmak üzere iki farklı şekilde hesaplanmıştır.

Bölüm 4.2'de geliştirilen yeni yaklaşımla, en iyi kestirim manevrası  $a_t$  ile en iyi güdüm manevrası  $a_n$  arasında eşitlik ( 49 ) kullanılarak bir bağlantı geliştirilmiş ve hedefin önlenmesini optimum seviyede sağlamaya çalışılmıştır. Yine aynı yaklaşımı koruyarak farklı senaryolarda farklı güdüm ivmesi hesaplama yöntemleri kullanılarak analiz yapılacaktır. Kullanılacak  $\delta(t)$  fonksiyonlarının iki farklı  $v_c$  değeri ile farklı senaryolardaki etkisi ve sonuçları gözlemlenerek bir sonuca varılmaya çalışılacaktır. Algoritma olarak daha önce bölüm 4.2.1.'de verilen algoritma kullanılacaktır. Sadece torpido güdümünde iki farklı yaklaşma hızı hesaplanarak aynı senaryolar üzerinde etkisi gözlenecektir.

### 4.3.1. Hareketli Hedefe Önden Atış

Doğuya doğru 20 knots sabit hızla giden bir hedef gemi simülasyona yerleştirilmiştir. Gemiden 1 km uzaktaki bir noktadan gemiye doğru 50 knots sabit hızla; geminin önünden torpido fırlatılmıştır. Torpido güdümünde kullanılan yaklaşma hızı 20 m/s olarak sabit alınmıştır. Durum kestirimi başlangıç değeri hedef geminin y yönünde 50 metre uzağı verilmiştir. Çarpışma anından 15 sn önce hedef gemi 0.1g ile manevra yaptırmıştır.

Torpidonun hedef geminin önünden fırlatıldığı durum için ortalama yaklaşma hızı kullanılarak simülasyon yapılmıştır. Aynı senaryo tekrar edilerek, torpido güdümünde kullanılan yaklaşma hızı hedef torpido geometrisi kullanılarak hedefin kestirilen

hızından hesaplanmıştır. Yapılan Monte Carlo simülasyonları sonucunda 8 farklı  $\delta(t)$  fonksiyonu için elde edilen ıskalama mesafesi çizelgesi aşağıdadır.

Çizelge 7 Farklı yaklaşma hızları için sabit hızlı hedefe önden atışta oluşan ıskalama mesafeleri ve önleme zamanları

Fonksiyon	Ortalama $v_c$		Kestirilmiş $v_c$	
	Önleme Zamanı (sn)	İskalama Mesafesi (m)	Önleme Zamanı (sn)	İskalama Mesafesi (m)
$\delta_1(t)$	84.3	624	81.6	254
$\delta_2(t)$	63.5	48.9	61.9	35.6
$\delta_3(t)$	42.81	1.3	42.7	1.02
$\delta_4(t)$	38.7	1.43	36.5	0.54
$\delta_5(t)$	35.8	1.42	34.1	0.36
$\delta_6(t)$	28.8	1.26	27.8	0.46
$\delta_7(t)$	27.5	1.0	27.2	0.91
$\delta_8(t)$	27	0.9	26.9	0.88

#### 4.3.2. Hareketli Hedefe Yandan Atış

Doğuya doğru 20 knots sabit hızla giden bir hedef gemi simülasyona yerleştirilmiştir. Gemiden 1 km uzaktaki bir noktadan gemiye doğru 50 knots sabit hızla; geminin sağ yanından torpido fırlatılmıştır. Torpido güdümünde kullanılan yaklaşma hızı 20 m/s olarak sabit alınmıştır. Durum kestirimi başlangıç değeri hedef geminin y yönünde 50 metre uzağı verilmiştir. Çarpışma anından 15 sn önce hedef gemi 0.1g ile manevra yaptırılmıştır.

Torpidonun hedef geminin yan tarafından fırlatıldığı durum için ortalama yaklaşma hızı kullanılarak simülasyon yapılmıştır. Aynı senaryo tekrar edilerek, torpido güdümünde kullanılan yaklaşma hızı hedef torpido geometrisi kullanılarak hedefin kestirilen hızından hesaplanmıştır. Yapılan Monte Carlo simülasyonları sonucunda 8 farklı  $\delta(t)$  fonksiyonu için elde edilen ıskalama mesafesi çizelgesi aşağıdadır.

Çizelge 8 Farklı yaklaşma hızları için sabit hızlı hedefe yandan atışta oluşan ıskalama mesafeleri ve önleme zamanları

Fonksiyon	Ortalama $v_c$		Kestirilmiş $v_c$	
	Önleme Zamanı (sn)	Iskalama Mesafesi (m)	Önleme Zamanı (sn)	Iskalama Mesafesi (m)
$\delta_1(t)$	74.6	13.04	72.7	0.68
$\delta_2(t)$	69.2	2.21	68.6	1.77
$\delta_3(t)$	66.2	2.32	66.2	2.06
$\delta_4(t)$	62.3	0.48	62.5	0.91
$\delta_5(t)$	57.8	0.94	58.2	0.7
$\delta_6(t)$	53.8	0.53	54.1	0.2
$\delta_7(t)$	51.5	0.98	51.5	0.51
$\delta_8(t)$	49.5	0.52	49.5	0.61

#### 4.4. Torpido Gerçek Limitlerinin Kullanılmasının Etkisi

İki boyutta pasif takip yöntemlerini kullanarak torpido-hedef geometrisinden kestirilmiş yaklaşma hızının bulunması ve bu hızın da oransal seyir güdümü yönteminde kullanılarak nihai oluşacak ıskalama mesafesine etkisi bölüm 4.3'de analiz edilmiştir. Analizleri gerçek sistem limitleri ve uygulamaları dahilinde yapmanın daha da gerçekçi sonuçlar vermesi beklenmektedir. Bu sebeple, Torpido arayıcı başlık gimbal limitleri tanımlanarak, hedefin daha gerçekçi takip edilmesi ve bu limitin ıskalama mesafesine olan etkisi analiz edilecektir. Daha sonra torpido, kestirilmiş yaklaşma hızını kullanarak hedefe belli bir mesafe kalana kadar güdümlenecek ve nihai fazda çarpışmaya çok az süre kala arayıcı başlığını kapatarak güdümünü kesecektir. Bu yaklaşımın özellikle gemi gibi büyük ve nispeten gürültülü platformlarda kullanılması oldukça makuldür. Çünkü nihai fazda torpido hedef geometrisi oldukça yakın olduğu için, algılanacak maksimum güce sahip sinyalin yönü anlık olarak değişebilmektedir. Bu da arayıcı başlığın oldukça salınımlı hareket etmesine sebep olup, torpidonun hedefine ulaşmasına engel olabilmektedir.

Bu iki yaklaşım mevcut oransal seyir güdüm yöntemine uyguladıktan sonra örnek senaryolar üzerinden gerekli analizler yapılacaktır. Daha önceki çalışmalarda, hedefin önlenmesini optimum seviyede sağlamak amacıyla, en iyi kestirim ivmesi  $a_t$  ile en iyi güdüm ivmesi  $a_n$  arasında eşitlik ( 49 ) kullanılarak geliştirilen bağlantı aynı şekilde

kullanılmaya devam edilecektir. Yine aynı yaklaşım korunarak farklı senaryolarda limitli gimbal ile hedefe önlemesi yapılmaya çalışılacaktır. Kullanılacak  $\delta(t)$  fonksiyonları, limitli gimbal değerleri ile farklı senaryolarda koşularak gimbal limitinin etkisi gözlenecektir. Bu senaryolarda oransal seyir güdümünde kestirilmiş hedef hızından hesaplanan yaklaşma hızı ve sabit yaklaşma hızı kullanılarak güdüm yapılacak ve bu iki yaklaşımın ıskalama mesafesine etkisi gözlenecektir.

Daha önce bölüm 4.2.1'de verilen algoritma kullanılmıştır. Sadece torpido arayıcı başlık gimballı  $60^\circ$  ile limitlenmiş, nihai güdüm fazında hedefe yaklaşık 250 metre kala güdüm sonlandırılmıştır. Güdüm algoritmasında kestirilen hedef hızından elde edilen yaklaşma hızı ile sabit yaklaşma hızı kullanılarak ıskalama mesafesi karşılaştırılması yapılacaktır. Böylelikle mümkün olduğunca gerçek şartlar simüle edilmiş olup, kestirilen hedef bilgisinin güdüme etkisi daha iyi anlaşılmış olacaktır.

#### **4.4.1. Hareketli Hedefe Önden Atış**

Doğuya doğru 20 knots sabit hızla giden bir hedef gemi simülasyona yerleştirilmiştir. Gemiden 3 km uzaktaki bir noktadan gemiye doğru 50 knots sabit hızla; geminin önünden torpido fırlatılmıştır. Torpido güdümünde kullanılan yaklaşma hızı 20 m/s olarak sabit alınmıştır. Durum kestirimi başlangıç değeri hedef geminin y yönünde 50 metre uzağı verilmiştir. Çarpışmaya 250 metre kala güdüm sonlandırılmıştır.

Torpidonun hedef geminin önünden fırlatıldığı durum için ortalama yaklaşma hızı kullanılarak simülasyon yapılmıştır. Aynı senaryo tekrar edilerek, torpido güdümünde kullanılan yaklaşma hızı hedef torpido geometrisi kullanılarak hedefin kestirilen hızından hesaplanmıştır. Tüm simülasyonlarda çarpışmaya 250 metre kala güdüm sonlandırılmıştır. Yapılan Monte Carlo simülasyonları sonucunda 8 farklı  $\delta(t)$  fonksiyonu için elde edilen ıskalama mesafesi çizelgesi aşağıdadır.

Çizelge 9 Farklı yaklaşma hızları için sabit hızlı hedefe önden atışta gerçekçi senaryolarda oluşan ıskalama mesafeleri ve önleme zamanları

Fonksiyon	Ortalama $v_c$		Kestirilmiş $v_c$	
	Önleme Zamanı (sn)	Iskalama Mesafesi (m)	Önleme Zamanı (sn)	Iskalama Mesafesi (m)
$\delta_1(t)$	421.4	8.9	93.5	3.12
$\delta_2(t)$	411.9	2.88	93.3	1.35
$\delta_3(t)$	95.2	5.05	89.0	1.33
$\delta_4(t)$	90.8	4.32	86.2	1.17
$\delta_5(t)$	87.3	1.18	85.8	1.69
$\delta_6(t)$	86.3	1.45	85.7	1.0
$\delta_7(t)$	85.9	1.24	85.6	1.12
$\delta_8(t)$	85.8	1.92	85.5	1.15

#### 4.4.2. Hareketli Hedefe Yandan Atış

Doğuya doğru 20 knots sabit hızla giden bir hedef gemi simülasyona yerleştirilmiştir. Gemiden 1 km uzaktaki bir noktadan gemiye doğru 50 knots sabit hızla; geminin sağ yanından torpido fırlatılmıştır. Torpido güdümünde kullanılan yaklaşma hızı 20 m/s olarak sabit alınmıştır. Durum kestirimi başlangıç değeri hedef geminin y yönünde 50 metre uzağı verilmiştir. Çarpışmaya 250 metre kala güdüm sonlandırılmıştır.

Torpidonun hedef geminin yanından fırlatıldığı durum için ortalama yaklaşma hızı kullanılarak simülasyon yapılmıştır. Aynı senaryo tekrar edilerek, torpido güdümünde kullanılan yaklaşma hızı hedef torpido geometrisi kullanılarak hedefin kestirilen hızından hesaplanmıştır. Tüm simülasyonlarda çarpışmaya 250 metre kala güdüm sonlandırılmıştır. Yapılan Monte Carlo simülasyonları sonucunda 8 farklı  $\delta(t)$  fonksiyonu için elde edilen ıskalama mesafesi çizelgesi aşağıdadır.

Çizelge 10 Farklı yaklaşma hızları için sabit hızlı hedefe yandan atışta gerçekçi senaryolarda oluşan ıskalama mesafeleri ve önleme zamanları

Fonksiyon	Ortalama $v_c$		Kestirilmiş $v_c$	
	Önleme Zamanı (sn)	İskalama Mesafesi (m)	Önleme Zamanı (sn)	İskalama Mesafesi (m)
$\delta_1(t)$	45.9	68.4	45.5	42.75
$\delta_2(t)$	45.5	43.2	44.4	3.23
$\delta_3(t)$	44.6	16.88	43.6	1.31
$\delta_4(t)$	43.6	4.34	43.5	2.14
$\delta_5(t)$	43.5	1.42	43.4	1.22
$\delta_6(t)$	43.4	1.84	43.4	1.14
$\delta_7(t)$	43.3	1.8	43.3	1.78
$\delta_8(t)$	43.2	1.93	43.2	1.71

#### 4.4.3. Hareketli Hedefe Arkadan Atış

Doğuya doğru 20 knots sabit hızla giden bir hedef gemi simülasyona yerleştirilmiştir. Gemiden 1 km uzaktaki bir noktadan gemiye doğru 50 knots sabit hızla; geminin arkasından torpido fırlatılmıştır. Torpido güdümünde kullanılan yaklaşma hızı 20 m/s olarak sabit alınmıştır. Durum kestirimi başlangıç değeri hedef geminin y yönünde 50 metre uzağı verilmiştir. Çarpışmaya 250 metre kala güdüm sonlandırılmıştır.

Torpidonun hedef geminin arkasından fırlatıldığı durum için ortalama yaklaşma hızı kullanılarak simülasyon yapılmıştır. Aynı senaryo tekrar edilerek, torpido güdümünde kullanılan yaklaşma hızı hedef torpido geometrisi kullanılarak hedefin kestirilen hızından hesaplanmıştır. Tüm simülasyonlarda çarpışmaya 250 metre kala güdüm sonlandırılmıştır. Yapılan Monte Carlo simülasyonları sonucunda 8 farklı  $\delta(t)$  fonksiyonu için elde edilen ıskalama mesafesi çizelgesi aşağıdadır.

Çizelge 11 Farklı yaklaşma hızları için sabit hızlı hedefe arkadan atışta gerçekçi senaryolarda oluşan ıskalama mesafeleri ve önleme zamanları

Fonksiyon	Ortalama $v_c$		Kestirilmiş $v_c$	
	Önleme Zamanı (sn)	Iskalama Mesafesi (m)	Önleme Zamanı (sn)	Iskalama Mesafesi (m)
$\delta_1(t)$	83.3	62.8	78.55	16.8
$\delta_2(t)$	78.2	34.3	75.4	7.3
$\delta_3(t)$	74.7	19.7	69.87	4.7
$\delta_4(t)$	69.1	13.1	66.8	0.9
$\delta_5(t)$	66.9	8.7	65.8	0.8
$\delta_6(t)$	65.8	5.7	65.2	0.65
$\delta_7(t)$	64.9	4.1	64.6	2.1
$\delta_8(t)$	64.7	0.9	64.5	0.8

## 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Tez kapsamında başlangıçta, pasif torpidoların kullandığı oransal seyir güdümü teorisi açıklanmıştır. Ardından doğrusal olan ve olmayan sistem modellemeleri, hareket modelleri ve Kalman filtresi hakkında kuramsal bilgiler verilmiştir. Daha sonraki kısımda pasif hedef takibinde iki farklı yöntem üzerinde durulmuştur. Bu bilgiler ışığında pasif hedef takibinden faydalanarak torpido güdümünde ıskalama mesafesi başarımını arttırmak için yeni bir hibrit güdüm yaklaşımı geliştirilmeye çalışılmıştır.

Verilen kuramsal bilgilerin ardından pasif hedef takibinde en iyi kestirimi yapabilmek için, gözetleyicinin yörüngesinin optimize edilmesi amacıyla simülasyonlar yapılmıştır. Genişletilmiş Kalman Filtresi ve Sözcü Ölçümlü Kalman Filtresi algoritmalarından faydalanarak yapılan pasif hedef takibi simülasyonlarında, en iyi kestirimi yapabilmek için ölçüm açısının ortogonal olduğu gösterilmiştir. Bu sonuç da, gözetleyicinin hareket doğrultusu ile hedeften alınan ölçüm doğrultusunun ilintisi ne kadar az ise, kestirimin kalitesinin o kadar yüksek olduğunu göstermiştir. Aynı simülasyonlarda ayrıca hedefin yerinin daha iyi kestirimi için gözetleyicinin manevra yapması gerektiği gözlemlenmiştir.

Bir sonraki kısımda, kestirilen yaklaşıma hızından hesaplanan  $a_n$  güdüm ivmesi ile en iyi kestirimi sağlayan  $a_t$  ivmesi kullanılarak farklı  $\delta(t)$  ağırlıklandırma fonksiyonlarına bağlı yeni bir  $a_c$  ivmesi hesaplanmıştır. Hesaplanan bu ivme torpidoya uygulanarak torpidonun hareketi gözlemlenmiştir.  $a_t$  ivmesinin ağırlığının fazla olduğu durumlarda torpido hedef etrafında daire çizerek en iyi kestirimi elde etmeye çalışmıştır. Fakat bu durumda torpidonun nispeten yüksek (0.3g) manevra kabiliyetine sahip olmasını gerektiren torpido - hedef geometrileri oluşmuştur.  $a_n$  güdüm ivmesinin ağırlığının fazla olduğu durumda ise torpido, hedef önleme noktasına doğru yönelmeye çalışmıştır. Tüm torpido - hedef senaryoları için Monte Carlo koşulları yapılmıştır. Bu koşullar sonucunda; sabit hızlı hedefe torpidonun arkadan atıldığı durumda  $\delta_4(t)$  ve  $\delta_6(t)$  fonksiyonları, yandan atıldığı durumda  $\delta_2(t)$  ve  $\delta_6(t)$  fonksiyonları, önden atıldığı durumda ise  $\delta_5(t)$  ve  $\delta_6(t)$  fonksiyonları en iyi ıskalama mesafesini vermiştir. Sabit hedefe yapılan atışlarda ise  $\delta_7(t)$  fonksiyonu en iyi ıskalama mesafesini vermiştir. Manevralı hedefe yapılan atışlarda da yine  $\delta_3(t)$  ve  $\delta_6(t)$  fonksiyonu en iyi ıskalama mesafesini vermiştir. Bir hedefe karşı yapılan torpido atışında, belirli bir manevra ile hedef durum kestirimi yapıp hedef-torpido yaklaşma hızı ( $v_c$ ) hesaplanmış ve oransal



seyir güdümüne girdi olarak verilmiştir. Bu yöntem sayesinde torpidonun başarımında artış olduğu gözlemlenmiştir. Simülasyonların tamamı incelendiğinde,  $\delta_6(t)$  fonksiyonu kullanılarak türetilen  $a_c$  ivmesi ile yapılan güdüm genelde daha başarılı sonuçlar vermektedir.

$$\delta_6(t) = 1/(T_{go}/t)^{1/4} \quad (50)$$

Daha sonra yapılan analiz çalışmalarında,  $a_n$  güdüm ivmesi farklı iki yaklaşma hızı hesabı kullanılarak (biri sabit ortalama hız, diğeri hedef kestiriminden hesaplanan hız) hesaplanmıştır. Hesaplanan  $a_n$  güdüm ivmesi ile en iyi kestirimi sağlayan  $a_t$  ivmesi kullanılarak farklı  $\delta(t)$  fonksiyonlarına bağlı yeni bir hibrit  $a_c$  ivmesi hesaplanmıştır. Hesaplanan bu ivme torpidoya uygulanmıştır. Hareketli hedefe önden ve yandan yapılan atışlarda çarpışma anına belirli bir süre kala hedef manevra yaptırılarak oluşan ıskalama mesafeleri gözlemlenmiştir. Bu simülasyonların Monte Carlo koşulları sonucunda, hedefe önden yapılan atışlarda; sabit yaklaşma hızlı güdüme sahip torpido, 8 farklı  $\delta(t)$  fonksiyonu için hedefe 6 isabetli vuruş sağlamıştır. Aynı senaryoda hedef kestiriminden hesaplanan yaklaşma hızlı güdüme sahip torpido, 8 farklı  $\delta(t)$  fonksiyonu için hedefe 6 isabetli vuruş sağlamıştır ve daha yakın ıskalama mesafesi değerleri elde edilmiştir. Diğer bir senaryoda ise hedefe yandan atış yapılmıştır. Sabit yaklaşma hızlı güdüme sahip torpido, 7 farklı  $\delta(t)$  fonksiyonu için hedefe isabet sağlamıştır. Aynı senaryoda hedef kestiriminden hesaplanan yaklaşma hızlı güdüme sahip torpido, 8 farklı  $\delta(t)$  fonksiyonu için hedefe isabet sağlamıştır ve çok daha küçük ıskalama mesafesi değerleri elde edilmiştir.

Nihai simülasyon çalışmalarında ise  $a_n$  güdüm ivmesi farklı iki yaklaşma hızı hesabı kullanılarak (biri sabit hız, diğeri hedef kestiriminden hesaplanan hız) hesaplanmıştır. Hesaplanan  $a_n$  güdüm ivmesi ve  $a_t$  ivmesi kullanılarak farklı  $\delta(t)$  fonksiyonlarına bağlı yeni bir  $a_c$  ivmesi hesaplanmıştır. Hesaplanan bu ivme hedefe 250 metre kalana kadar torpidoya uygulanmıştır. Hareketli hedefe önden, yandan ve arkadan yapılan atışlarda çarpışmaya 250 metre kala güdüm sonlandırılmıştır ve oluşan ıskalama mesafesi değerleri gözlemlenmiştir. Ayrıca pasif arayıcının gimbal açıları limitlenerek, daha gerçekçi bir pasif arayıcı karakteristiği elde edilmiştir. Bu simülasyonların Monte Carlo koşulları sonucunda, hedefe önden yapılan atışlarda; hedef kestiriminden hesaplanan yaklaşma hızlı güdüme sahip torpido simülasyonunda, sabit yaklaşma hızlı

güdüme sahip torpidoya göre daha başarılı ve daha yakın ıskalama mesafesi değerleri elde edilmiştir. Diğer senaryoda ise hedefe yandan atış yapılmıştır. Hedef kestiriminden hesaplanan yaklaşma hızlı güdüme sahip torpido senaryosunda 6 farklı  $\delta(t)$  fonksiyonu ile 2.5 metre altında ıskalama mesafesi başarımları sağlanmıştır. Sabit yaklaşma hızlı güdüme sahip torpido senaryosunda ise, 4 farklı  $\delta(t)$  fonksiyonu ile 2.5 metre altında ıskalama mesafesi başarımları sağlanmıştır. Nihai senaryoda ise hedefe arkadan atış yapılmıştır. Hedef kestiriminden hesaplanan yaklaşma hızlı güdüme sahip torpido senaryosunda 5 farklı  $\delta(t)$  fonksiyonu ile 2.5 metre altında ıskalama mesafesi başarımları sağlanmıştır. Sabit yaklaşma hızlı güdüme sahip torpido senaryosunda ise, tek  $\delta(t)$  fonksiyonu ile 2.5 metre altında ıskalama mesafesi başarımları sağlanmıştır. Böylece torpidonun gimbal açıları limitlenip hedefe 250 metre kala güdümün sonlandırıldığı gerçekçi senaryolarda hedef kestiriminden hesaplanan yaklaşma hızlı güdüme sahip torpido çok daha başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Hedef durum kestiriminden hesaplanan yaklaşma hızının torpido güdümünde kullanılmasının ıskalama mesafesi değeri açısından torpidoya avantaj sağladığı gösterilmiştir. Torpidonun ıskalama mesafesi başarımlarında artış olduğu gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, torpidonun kullanıldığı bir angajmanda, torpidonun ıskalama mesafesi başarımlarını etkileyen birçok faktör vardır. Bu faktörlerden biri de torpido güdümüne etki eden torpido-hedef yaklaşma hızıdır. Torpidonun uygun manevralar yapmasıyla, pasif arayıcı üzerinden alınan hedef ölçümleri kullanılarak hedef konum kestirimi yapılabilmektedir. Kestirilen hedeften hesaplanan torpido – hedef yaklaşma hızı torpido güdümünde kullanılarak torpidonun ıskalama mesafesi başarımlarını artırılabilir. Bu bağlamda torpidonun hedef önleminde kullanılmak üzere, hedef konum kestirim başarımlarını arttıran ivme ile yaklaşma hızından hesaplanan ivme birleştirilerek hibrit yeni bir güdüm manevrası önerilmektedir. Bu yeni hibrit güdüm modeliyle hem hedefin yerinin daha doğru tespiti hem de hedef önleminin başarımlarının artması sağlanmıştır. Bu yaklaşımın diğer pasif arayıcı başlığa sahip füzeler üzerinde de uygulanabileceği değerlendirilmektedir. Özellikle hızlı hedeflere atılan IR arayıcı başlığa sahip füzelerin de füze – hedef yaklaşma hızını doğru olarak elde etmesinin, hedef önleme başarımlarına olumlu katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

## 6. KAYNAKLAR

- [1] Pak, J.M., Woo, D.G., Ku, B., Hong, W., Ko, H., Lim, M.T., Target Search Method for a Torpedo to the Evading Ship Using Fuzzy Inference, ICROS-SICE International Joint Conference, Japan, 2009.
- [2] Karlsson, R., Gustafsson, F., Recursive Bayesian Estimation Bearings-only Applications, IEE Proceedings Radar, Sonar and Navigation, 2005.
- [3] Zarchan, P., Tactical and Strategic Missile Guidance, Vol. 157, Progress in Aeronautics and Astronautics, AIAA, Washington DC, 1994.
- [4] Farina, A., Target Tracking with Bearings-Only Measurements, Elsevier Signal Processing 78, 1999.
- [5] Nardone, S.C., Graham, M.L., A Closed-Form Solution to Bearings-Only Target Motion Analysis, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 22, No. 1, 1997.
- [6] Le Cadre, J.P., Jauffret, C., Discrete-Time Observability and Estimability Analysis for Bearings-Only Target Motion Analysis, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 33, No. 1, 1997.
- [7] Arulampalam, S., A Comparison of Recursive Style Angle-only Target Motion Analysis Algorithms, DSTO Electronics and Surveillance Research Laboratory, 2000.
- [8] Nardone, S.C., Aidala, V.J., Observability Criteria For Bearings-Only Target Motion Analysis, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. AES-17, No. 2, 1981.
- [9] Blackman, S., Popoli, R., Design and Analysis of Modern Tracking Systems, Artech House, Boston, 1999.
- [10] Bar-Shalom, Y., Rong Li, X., Kirubarajan, T., Estimation with Applications to Tracking and Navigation, John Wiley & Sons Inc., New York, 2001.

- [11] Aidala, V.J., Kalman Filter Behavior in Bearings-Only Tracking Applications, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1979.
- [12] Aidala, V.J., Hammel, S.E., Utilization of Modified Polar Coordinates for Bearings Only Tracking, IEEE Transactions on Automatic Control, Cilt 28, No. 3, 1983.
- [13] Peach, N., Bearings-only Tracking Using a Set of Range-parameterised Extended Kalman Filters, Proc. IEE: Control Theory Application, Vol. 142, No. 1, 1995.
- [14] Daum E., Nonlinear Filters Beyond the Kalman Filter, IEEE A&E Systems Magazine, Vol. 20, No. 8, 2005.
- [15] Wan, E.A., Merwe, R.V.D., The Unscented Kalman Filter for Nonlinear Estimation, in Proceeding of Symposium 2000 on Adaptive Systems for Signal Processing, Communications and Control, IEEE, Canada, 2000.
- [16] Mjelde A., A Homing Torpedo The Effect of The Tactical Situation and The torpedo Parameters on The Torpedo Effectiveness, Naval Postgraduate School, Monterey, California, 1977.
- [17] Ramanarasiah, N., K., Introduction to Torpedo Technology, Defence Research and Development Organisation, Ministry of Defence, GOVT of India, New Delhi, 1993.
- [18] Balakrishnan S.N., Tsourdos A., White B.A., Advances in Missile Guidance, Control and Estimation, CRC Press, NewYork, 2013.
- [19] Siouris, G.M., Missile Guidance and Control Systems, Springer-Verlag New York Inc., USA, 2004.
- [20] Yanushevsky, R., Modern Missile Guidance, CRC Press, Boca Raton, FL, 2008.
- [21] Mohan, S., R., Fundamentals of Guided Missiles, Defence Research and Development Organisation Ministry of Defence, India, 2016.

- [22] Lee, R., G., Guided Weapons, Brassey's Ltd, 3rd Edition, London, 1998.
- [23] Li, X.R., Jilkov, V.P., A Survey of Maneuvering Target Tracking: Dynamic Models, Proceedings of SPIE Conference on Signal and Data Processing of Small Targets, Orlando, FL, USA, 2000.
- [24] Bar-Shalom, Y., Li, X., Estimation and Tracking: Principles Techniques and Software, Artech House, Boston, 1993.
- [25] Tremois, O., Le Cadre, J.P., Target Motion Analysis with Multiple Arrays: Performance Analysis, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Cilt 32, No.3, 1996.
- [26] Maybeck, P.S., Stochastic Models, Estimation and Control, Academic Press, New York, 1979.
- [27] Haykin, S., Kalman Filtering and Neural Networks, John Wiley & Sons Inc., New York, 2001.
- [28] Lindgren, A.G., Gong, K.F., Position and Velocity Estimation via Bearing Observations, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. AES-14, No. 4, 1978.
- [29] Nardone, S.C., Lindgren, A.G., Gong, K.F., Fundamental Properties and Performance of Conventional Bearings-Only Target Motion Analysis, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. AC-29, No. 9, 1984.
- [30] Passerieux, J.M., Van Cappel, D., Optimal Observer Maneuver for Bearings-Only Tracking, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 34, No. 3, 1998.
- [31] Becker, K., An Efficient Method of Passive Emitter Location, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 28, No. 4, 1992.

[32] Hammel, S.E., Liu, P.T., Hilliard, E.J., Gong, K.F., Optimal Observer Motion for Localization with Bearing Measurements, Computers Math. Applic., Vol. 18, No. 1-3, Great Britain, 1988.





HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK ve ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 27/09/2019

Tez Başlığı / Konusu: PASİF TORPİDO GÜDÜMÜ İÇİN YENİ BİR YÖNTEM

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 118 sayfalık kısmına ilişkin, 23/09/2019 tarihinde tez danışmanım tarafından *Turnitin* adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 4 'tür.

Uygulanan filtrelemeler:

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

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

Gereğini saygılarımla arz ederim.

27.09.2019

*Turan*

Tarih ve İmza

Adı Soyadı: Turan TOPALOĞLU

Öğrenci No: N08122128

Anabilim Dalı: Elektrik ve Elektronik Mühendisliği

Programı: Elektrik ve Elektronik Mühendisliği

Statüsü:  Y.Lisans  Doktora  Bütünleşik Dr.

**DANIŞMAN ONAYI**

UYGUNDUR.

*Yakup Öz Kazanç*

Dr. Öğr. Üyesi Yakup ÖZKAZANÇ

(Unvan, Ad Soyad, İmza)

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Turan TOPALOĞLU  
Doğum yeri : Trabzon  
Doğum tarihi : 01.11.1985  
Medeni hali : Evli  
Yazışma adresi : Samsun 19 Mayıs cad. 261. Sok. N0:17/2 Eryaman  
ANKARA

Telefon : 05325965061  
Elektronik posta adresi : turan221@yahoo.com  
Yabancı dili : İngilizce

### EĞİTİM DURUMU

Lisans : Hacettepe Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik  
Mühendisliği, 2008

Yüksek Lisans : -

Doktora : -

### İş Tecrübesi

Havelsan A.Ş. (2008 – Devam Ediyor) : Sistem Mühendisi

Deneyim Alanları : Radar Takip Algoritmaları, Silah ve Füze Sistemleri

Modellemesi, Tersine Mühendislik, Taktik Çevre Ortam Modellemesi, Simülatör  
Altsistem Modellemesi.