



**SU ÜSTÜ DENİZ PLATFORMLARINA YÖNELİK FÜZE TEHDİTLERİ
İÇİN MAKİNE ÖĞRENMESİ VE AÇIKLANABİLİR YAPAY ZEKÂ
TEKNİKLERİYLE KARŞI TEDBİR GELİŞTİRİLMESİ**

Murat ERTOP

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2025

ETİK BEYAN

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

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Murat ERTOP

27/01/2025

SU ÜSTÜ DENİZ PLATFORMLARINA YÖNELİK FÜZE TEHDİTLERİ İÇİN
MAKİNE ÖĞRENMESİ VE AÇIKLANABİLİR YAPAY ZEKÂ TEKNİKLERİYLE
KARŞI TEDBİR GELİŞTİRİLMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Murat ERTOP

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2025

ÖZET

Günümüzde, deniz platformlarına tehdit oluşturan füzeler, özellikle kızılötesi (KÖ) veya Radyo Frekans (RF) güdümlü füze arayıcı teknolojilerindeki gelişmeler göz önüne alındığında önemli derecede tehlike oluşturmaktadır. Potansiyel füze tehditleri, gemilerin en gelişmiş savunma sistemleriyle donatılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu tehditler, platformları düşman kuvvetleri için açık hedefler haline getirmektedir. Bu durum, çeşitli tehditlere karşı koyabilen gelişmiş teknolojilere sahip yeni sistemlerin geliştirilmesine yol açmıştır. Mevcut karşı tedbirlerin etkin bir şekilde dağıtılması ve en optimal platform manevralarının belirlenmesi de kritik bir hale gelmiştir. Elektronik Harp (EH) çerçevesinde soft-kill karşı tedbir yöntemlerinden pasif mühimmat olan chaff ve flare mühimmatları, bu tehditlere karşı deniz platformlarından fırlatılabilir. Bu tez çalışmasında, makine öğrenimi ve yapay zekâ teknikleri kullanılarak radar ve kızılötesi güdümlü arayıcıları yanıltmak amaçlı karşı tedbir önlemlerin dağıtılması ve platform manevralarının gerçekleştirilmesi için etkili stratejilerin geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Karşı tedbir algoritmalarını içeren ticari bir simülâtör kullanarak, büyük ölçekli senaryoları temsil eden veri setleri oluşturulmuş ve toplanan veriler önerilen Çok Katmanlı Algılayıcı modeline göre eğitilmiştir. Bu model, hedef parametrelerini tahmin etmek için kullanılmıştır. Simülâtör; gemi füze ve chaff/flare decoy modellerini içermektedir. Gemi modeli ayrıca atıcı parametrelerini de içermektedir. Modelin başarısı, önceden belirlenmiş performans metrikleri aracılığıyla değerlendirilmiş ve sonuçlar açıklanabilir yapay zekâ kullanılarak şeffaf bir şekilde görselleştirilmiştir. Yazarlar, önerilen modelin daha da geliştirilebileceğini ve mevcut karşı önlem teknikleriyle entegre edilebileceğini düşünmektedir.

Bilim Kodu : 93438

Anahtar Kelimeler : Yapay zekâ, makine öğrenmesi, açıklanabilir yapay zekâ, çok katmanlı algılayıcı, elektronik harp, karşı tedbirler, su üstü deniz platformları, gemi karşıtı füzeler

Sayfa Adedi : 75

Danışman : Prof. Dr. Ali KARA

DEVELOPING COUNTERMEASURING AGAINST MISSILE THREATS FOR
SURFACE NAVAL PLATFORMS BY USING MACHINE LEARNING AND
EXPLAINABLE ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNIQUES

(M. Sc. Thesis)

Murat ERTOP

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2025

ABSTRACT

In modern times, missiles posing threats to naval platforms present a significant danger, particularly in light of advancements in infrared (IR) and radio frequency (RF)-guided missile seeker technologies. Potential missile threats necessitate the equipping of ships with the most advanced defense systems. These threats make platforms vulnerable, turning them into easy targets for enemy forces. As a result, the development of new systems with advanced technologies capable of countering various threats has become essential. The effective deployment of existing countermeasures and the identification of the most optimal platform maneuvers have also become critical. Within the framework of Electronic Warfare (EW), soft-kill countermeasure methods, such as passive munitions like chaffs and flares, can be launched from naval platforms to address these threats. This thesis aims to develop effective strategies for deploying countermeasures and executing platform maneuvers to deceive radar and infrared-guided seekers, using machine learning and artificial intelligence techniques. Using a commercial simulator that includes countermeasure algorithms, datasets representing large-scale scenarios have been created, and the collected data has been trained using the proposed Multilayer Perceptron (MLP) model. This model has been employed to predict target parameters. The simulator includes models for the ship, missile, and chaff/flare decoys. Additionally, the ship model also incorporates launcher parameters. The success of the model has been evaluated using predefined performance metrics, and the results have been visualized transparently using explainable artificial intelligence. The authors believe that the proposed model can be further improved and integrated with existing countermeasure techniques.

Science Code : 93438

Key Words : Artificial intelligence, machine learning, explainable artificial intelligence, multilayer perceptron, electronic warfare, countermeasures, surface naval platforms, anti-ship missiles

Page Number : 75

Supervisor : Prof. Dr. Ali KARA

TEŞEKKÜR

Tez sürecimin en başından en sonuna kadar ilgisini, bilgisini ve desteğini hiç eksik etmeyen danışmanım Saygıdeğer Prof. Dr. Ali KARA'ya çok teşekkür ederim. Ayrıca tecrübelerini aktaran ve çalışmalarına katkı sağlayan Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ali ÖTER hocama teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmakta olduğum kurumda beni teşvik eden, eğitim sürecimi destekleyen ve yol gösteren değerli yöneticilerime, arkadaşlarıma ve tüm ASELSAN ailesine teşekkürü borç bilirim.

Bana hep yüksek mühendis diye seslenerek beni gururlandıran canım dedem Hayati ÖZTÜRK'e ve tezimi bitirmem konusunda sözleriyle teşvik eden, gayretlendiren ve başarıyla sonuçlanmasında büyük katkısı olan canım dayım Dr. Mahmut ÖZTÜRK'e şükran ve minnetlerimi sunarım.

Beni yetiştirip büyüten, bugünlere getiren ve üzerimde çok emeği olan kıymetli anneme; ailemizin hukukçusu ve gözdesi, canım kardeşime; maddi manevi desteğiyle hep yanımda hissettiğim ve gurur duyduğum canım babam Burhan ERTOP'a tez sürecimdeki emeklerinden ötürü içtenlikle çok teşekkür ederim.

Sadece tez sürecimde değil hep hayatımda olan, altın kalbiyle bana eşlik eden ve varlığıyla güç kuvvet veren sevgili yol arkadaşım Sena SARIDEMİR'e başarımdaki emeklerinden ve sonsuz azminden dolayı tüm kalbimle çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ARAŞTIRMALAR.....	11
2.1. Elektronik Harp (EH).....	11
2.1.1. Elektronik destek (ED)	12
2.1.2. Elektronik taarruz (ET)	13
2.1.2. Elektronik koruma (EK).....	13
2.2. Pasif Mühimmatlar.....	15
2.2.1. Chaff	18
2.2.2. Flare	21
2.3. Gemi Karşıtı Füzeler.....	23
2.3.1. Güdüm sistemleri	25
2.3.2. Seyrüsefer (Navigasyon) sistemleri	28
3. MATERYAL VE METOT.....	31
3.1. Simülasyon.....	31
3.2. Veri Seti	35

	Sayfa
3.3. Modelleme	36
3.3.1. Yapay sinir ağları	39
3.3.2. Çok katmanlı algılayıcı (MLP)	43
4. DENEYSEL ÇALIŞMA VE BULGULAR.....	47
4.1. Deney Ortamı.....	47
4.2. Model Mimarisi	47
4.3. Model Parametreleri	48
4.4. Açıklanabilir Yapay Zekâ (XAI).....	50
4.5. Performans Metrikleri	51
4.6. Bulgular.....	55
5. TARTIŞMA.....	65
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	67
KAYNAKLAR	69
ÖZGEÇMİŞ	75

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Flare türlerinin karşılaştırması	23
Çizelge 2.2. Seyrüsefer ve güdüm sistemlerinin karşılaştırması	29
Çizelge 3.1. Senaryo girdi parametrelerine ait bilgiler	31
Çizelge 3.2. Senaryo çıktı parametrelerine ait bilgiler	34
Çizelge 3.3. Aktivasyon fonksiyonlarına ait bilgiler	42
Çizelge 4.1. Hedef çıktılara ait model parametreleri	48
Çizelge 4.2. Hedef parametrelerine ait performans metriklerin değerleri	55
Çizelge 4.3. Yapılan çalışmanın literatür ile karşılaştırması	66

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Rus Kh-22 füzesi tarafından vurulan ticaret gemisi MV Aya	1
Şekil 1.2. Pasif mühimmatla deniz ortamında füze yörüngesini şaşırtma	4
Şekil 1.3. Pasif mühimmatla hava ortamında füze yörüngesini şaşırtma	4
Şekil 2.1. Elektromanyetik spektrum.....	12
Şekil 2.2. Hard-kill ve soft-kill karşı tedbir örneği	15
Şekil 2.3. Chaff mühimmatı ile füzenin saptırılması	16
Şekil 2.4. Flare mühimmatı ile füzenin saptırılması	16
Şekil 2.5. Chaff tarafından köreltilmiş/karıştırılmış radar görüntüleri	19
Şekil 2.6. Örnek chaff kapsülleri ve bileşenleri	20
Şekil 2.7. Chaff parçalarının gösterimleri	20
Şekil 2.8. M206 ve MJU-7 A/B flare gösterimleri	22
Şekil 2.9. Radar güdüm tipleri	26
Şekil 2.10. KÖ ve RF güdüm gösterimi.....	27
Şekil 3.1. Gemi rotası ve gemi lançer konfigürasyonu.....	33
Şekil 3.2. Atım ve manevra senaryosu örneği	34
Şekil 3.3. Senaryo sonuçlarının çözüm bilgi dağılımı	35
Şekil 3.4. Problem çözümü için izlenen aşamalar	36
Şekil 3.5. Problem çözümü detaylı akış diyagramı	37
Şekil 3.6. Problem çözümü için yürütülen aşamaların adım adım akışı.....	38
Şekil 3.7. Yapay sinir ağı ile insan beyninin benzerliği	39
Şekil 3.8. Algılayıcı adı verilen tek katmanlı basit bir sinir ağı modeli	40
Şekil 3.9. Aktivasyon fonksiyonlarına ait grafikler	42
Şekil 3.10. İki gizli katmana sahip MLP yapısı	44

Şekil	Sayfa
Şekil 4.1. Örnek karmaşıklık (confusion) matrisi	52
Şekil 4.2. Iskalama mesafesi performans metrik grafikleri	56
Şekil 4.3. Iskalama mesafesi eğitim kaybı grafiği	56
Şekil 4.4. Tüp numarası performans metrik grafikleri.....	57
Şekil 4.5. Tüp numarası eğitim kaybı grafiği	57
Şekil 4.6. Gemi rotası performans metrik grafikleri	58
Şekil 4.7. Gemi rotası eğitim kaybı grafiği.....	58
Şekil 4.8. Gemi hızı performans metrik grafikleri.....	59
Şekil 4.9. Gemi hızı eğitim kaybı grafiği.....	59
Şekil 4.10. LIME ile ıskalama mesafesi tahmininin açıklanması	61
Şekil 4.11. LIME ile gemi rotası tahmininin açıklanması	61
Şekil 4.12. LIME ile gemi hızı tahmininin açıklanması	61
Şekil 4.13. LIME ile tüp numarası tahmininin açıklanması	62

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

cm	santimetre
D'_G	Manevra sonrası yeni gemi rotası
D_R	Rüzgâr Yönü
ft	feet
IM	Iskalama Mesafesi
I_T	Tehdit ID
inç	uzunluk ölçü birimi
km	kilometre
mil	ölçü birimi
mm	milimetre
N_T	Tüp Numarası
R_T	Tehdit Mesafesi
um/μm	mikromete
V_G	Gemi Hızı
V'_G	Manevra sonrası yeni gemi hızı
V_R	Rüzgâr Hızı
Θ_T	Tehdit Açısı
%	Yüzde

Kısaltmalar

Açıklamalar

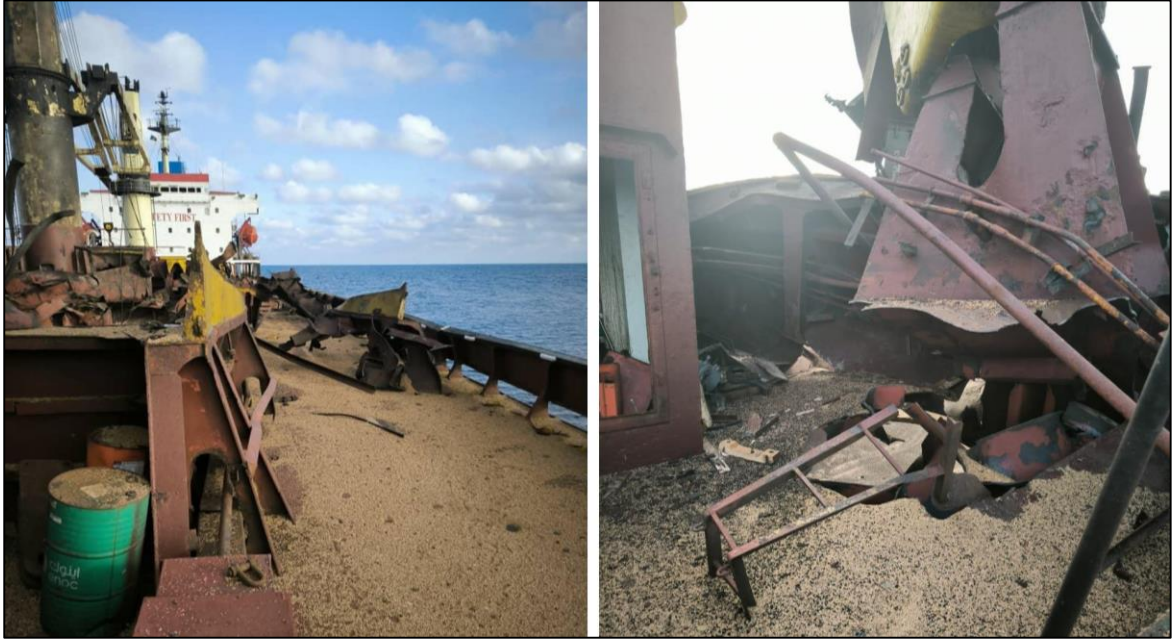
AI	Artificial Intelligence
ANN	Artificial Neural Network
ANS	Ataletsel Navigasyon Sistemi
ARM	Anti Radiation Missile
ED	Elektronik Destek
EH	Elektronik Harp

Kısaltmalar**Açıklamalar**

EK	Elektronik Koruma
EKT	Elektronik Karşı Tedbir
EM	Elektromanyetik
EMS	Elektromanyetik Spektrum
EO	Elektro Optik
ET	Elektronik Taarruz
EW	Elektronik Warfare
FİS	Füze İkaz Sistemi
GPS	Global Positioning System
IDE	Entegre Geliştirme Ortamı
INS	Inertial Navigation System
IIR	Imaging Infrared
IR	Infrared
KÖ	Kızılötesi
LIME	Local Interpretable Model-Agnostic Explanations
LİAS	Lazer İkaz Alıcı Sistemi
MAE	Mean Absolute Error
ML	Machine Learning
MLP	Multilayer Perceptron
MSE	Mean Square Error
MTV	Magnezyum Teflon Viton
RF	Radyo Frekansı
RİAS	Radar İkaz Alıcı Sistemi
RKA	Radar Kesit Alanı
RMSE	Root Mean Square Error
UV	Ultraviyole
XAI	Explainable Artificial Intelligence

1. GİRİŞ

Gelişmekte olan füze tehditleri, gemilerin en üst düzey savunma sistemleriyle donatılmasını zorunlu hale getirmiştir. Bir görev esnasında veya savaş ortamında en tehlikeli durum geminin füze tarafından vurulmasıdır. Şekil 1.1’de gösterilen yakın tarihte yaşanan olay bu tehditlerin ciddiyetini göstermektedir.



Şekil 1.1. Rus Kh-22 füzesi tarafından vurulan ticaret gemisi MV Aya [1]

Neredeyse her ülke, envanterinde yeterli miktarda gemi-karşıtı füze bulundurmakta ve operasyon sırasında kullanmaktan çekinmemektedir. Uluslararası alanda aktif faaliyet gösteren terörist grupların da bu füzelere sahip olma olasılığı ve operasyonların genellikle kıyıya yakın bölgelerde yapılması, gemi-karşıtı füzelere karşı, karşı tedbir stratejilerinin geliştirilmesini kaçınılmaz hale getirmiştir. Bu durum, farklı tehditlere karşı önlem almayı sağlayan yeni teknolojiye sahip sistemlerin ortaya çıkmasını beraberinde getirmiştir. Dünya genelinde farklı firmalar tarafından benzer amaçlara hizmet eden ürünler üretilmekte ve geliştirilmeye devam edilmektedir. Rheinmetall, THALES, SAAB, TERMA, Elbit Systems, Leonardo, BAE Systems ve Bharat Dynamics Limited firmalarının farklı amaçlara hizmet eden ürün katalogları bu durumu yansıtmaktadır [2-9].

Bir savaş gemisi için radar kesit alanı (RKA), kızılötesi (KÖ) iz, ultraviyole (UV) iz ve görünür banttaki iz yönetimi hayatta kalmayı belirlemede oldukça önemlidir [10, 11]. RKA, bir cismin radar tarafından ne kadar algılanma potansiyeli olduğunu ifade etmektedir. KÖ iz ise kızılötesi bantta tespit edilebilme ölçütüdür yani o bantta yaptığı ışımaya anlamına gelir. Diğer bantlardaki iz kavramı da aynı şekilde tarif edilmektedir. Yapılan çalışmalarda bunların önemi vurgulanmış ve düşük izin operasyonel faydaları ele alınmıştır [12]. İz yönetiminin geminin hayatta kalmasına katkısı ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Bununla birlikte, düşük iz için gereksinim belirtmenin zorlukları belirtilmiştir. Diğer yandan, büyük bir hedef geminin kaçınma manevraları, füzelerin izleme şemaları, rüzgâr hızı ve yönü de dahil olmak üzere angajman ortamları ile ilgili olarak gemideki pasif tip aldatma sistemlerinin (chaff ve flare gibi) operasyonel performansına odaklanılmıştır [11]. Chaff ve flare karşı tedbir atma sistemlerinin varlığı ve etkin kullanımı bir gemi için operasyonel performansı etkileyen önemli bir faktördür. Yapay zekâ (ing. AI: Artificial Intelligence) ile elektronik harp (EW) düşünülerek bir Deniz Muharebe Yönetim Sistemi için bir mimari sunulmuştur. Etkili bir füze savunmasına, hedef gemi izleri de dahil olmak üzere katkıda bulunan parametreler gözlemlenmiştir. Ayrıca füze tehdidine kısa sürede uygulanacak karşı tedbir kararından önce dikkate alınması gereken unsurlar vurgulanmıştır. Başka bir çalışmada, KÖ iz azaltma önlemlerinin aldatma etkinliği üzerindeki etkisini angajman simülasyonları kullanarak değerlendirmek için bir metodoloji sunulmaktadır [13]. Platform KÖ izi, sabit olmayan koşullara göre önemli ölçüde değişebilen dinamik bir özelliktir. Azaltılmış KÖ ize sahip bir platformdan atılan karşı tedbir mühimmatlarının başarı şansının daha fazla olacağı vurgusu da yapılmaktadır. Yani hedef geminin sahip olduğu izler karşı tedbirlerin performansını belirleme de önemli bir faktördür. KÖ iz azaltma çalışmaları yapıldığı gibi aynı amaçla gemi RKA değerini azaltmaya yönelik çalışmalar da literatürde yer almaktadır. Gemi yüzeyinin uygun malzemeyle kaplanması sonucu RKA değerinin azaldığı yapılan bir çalışmada gözlemlenmiştir [14]. Bu çalışmada, RKA optimizasyonu için genetik algoritma kullanılmıştır. Bu tarz düşük gemi RKA tasarımlarının operasyonel faydaları da farklı bir çalışmada ele alınmıştır [15]. Temel RKA teorisi ve simülasyonu, genel RKA yönetimi tekniklerini kavramak için tartışılmıştır.

Arayıcı başlık alanındaki teknolojik gelişmeler, gemilerin elektronik karşı tedbir sistemlerinin etkinliğini önemli ölçüde azaltmıştır. Dayanıklı aldatma taktikleri ve etkinlikleri artırmak üzerine birçok analiz çalışması yapılmış ve bunlardan bazıları bu tez çalışmasında seçilmiştir [16-18]. Bu sistemlerin etkinliğini değerlendirmek amacıyla yapılan

bir çalışma, değerlendirme çerçevesi ve önerilen yöntemin etkinliğini gösteren bir senaryo sunmaktadır [19]. Ancak daha sofistike KÖ/RF arayıcı başlıklara sahip füzelerle mücadele etmek için özgün ve yenilikçi stratejiler geliştirmek kritik öneme sahiptir. Aktif sahte hedef kullanımıyla bir hava platformunun hayatta kalma kabiliyetinin geliştirilebildiği gösterilmiştir [20]. Çalışmadaki analizlere dayanarak, aktif sahte hedefin optimal parametreleri ve platformun taktiksel yönetimi belirlenebilmektedir. Yapılan NATO çalışmasında, ortak bir Elektro-optik (EO)/KÖ gemi karşıtı füze angajman senaryolarının belirlenmesi ve her üyenin kendi simülasyon aracıyla bu senaryoları denemesi amaçlanmıştır [21]. Farklı arayıcı başlıklara karşı modelleme metodolojileri ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Her ülke kendi önerdiği karşı tedbir stratejisini de paylaşmıştır.

Her ne kadar farklı tarzda aldatıcı uygulamaları olsa da karşı tedbir olarak chaff/flare atma sistemleri günümüzde halen yaygın olarak tercih edilmektedir [22-25]. Bu sistemlerinin gemilerde yer alması ve etkili bir şekilde kullanılması son derece önemlidir. Çatışma anında, karşılıklı gerginliğin artmasına sebebiyet vermemek adına angajman kuralları sıkı bir şekilde kısıtlanmış olsa da bu sistemlerin gerekliliği yadsınamaz [26]. Yumuşak öldürme (ing. soft-kill) yöntemi olarak bilinen bu pasif karşı tedbir sistemleri, Şekil 1.2’de ve Şekil 1.3’te görüldüğü üzere füzeleri manipüle ederek yörüngesini saptırmayı sağlamaktadır. Terminolojide buna "yanıltma" veya "kilit kırma" denilmektedir. Şekillere bakıldığında bu tekniğin hem deniz hem de hava platformlarında uygulanabildiği görülmektedir. Bu sistemlerin en büyük avantajı, sert öldürme (ing. hard-kill) yöntemlerine başvurmadan tehditleri bertaraf edebilmeleridir, bu da her zaman angajman kurallarına uygun olarak chaff/flare kullanımını sağlar [27]. Füzelere karşı atılacak karşı tedbirlerin türü, füzenin arayıcı başlık türüne göre belirlenir. Radyo frekansı (RF) güdümlü füzelere karşı chaff, elektro optik ve kızılötesi (EO/KÖ) güdümlü füzelere karşı flare kullanılır; her iki tür güdüme sahip füzelere karşı ise hibrit mühimmat kullanılmaktadır.



Şekil 1.2. Pasif mühimmatla deniz ortamında füze yörüngesini şaşırtma [28]



Şekil 1.3. Pasif mühimmatla hava ortamında füze yörüngesini şaşırtma [29]

Geçmişten günümüze bu mühimmatların etkin kullanımına yönelik farklı araçlarla birçok simülasyon çalışması yapılmıştır. Bir hedefi, denizden sıyırma ve aktif radar güdümüyle izleyen bir füzeye karşı aldatma etkinliği değerlendirmeleri için bir angajman senaryosu

tabanlı simülasyon programı geliştirilmiştir [10]. Geliştirilen simülasyon modelinde gerçekçi olması açısından tehdit, decoy ve gemi parametreleri dikkate alınmıştır. Geminin füzeyle karşı aldatma etkisi bu çalışmada sayısal verilerle desteklenmektedir. Hedef gemi ile aldatıcı decoy arasındaki RKA seviyesi farkı ile isabet olasılığı arasındaki ilişki de paylaşılmıştır. Buna benzer yapılan diğer bir simülasyon çalışmasında da tehdit, decoy ve gemi modellemesine ilaveten fırlatıcı modellemesi de eklenmiştir [30]. EO/KÖ karşı tedbir performansını iyileştirmek adına azimut ve yüksekliği ayarlanabilen bir fırlatıcı modeli tercih edilmiştir. Chaff/flare ürün yelpazesi geniş olan Chemring firmasının geliştirdiği karşı tedbir benzetim aracı olan “CounterSIM” ile KÖ görüntüleme arayıcılarına sahip gemi karşıtı füzelere karşı EO/KÖ karşı tedbir etkinliği incelenmiştir [31]. Bu fırlatıcı yapısının sağladığı faydalar ve “CounterSIM” aracının oldukça yetenekli olduğu belirtilmiştir. Bu simülasyon aracındaki gemi ve decoy modelleri başka bir çalışmada kullanılarak görseller elde edilmiştir [18]. Bu görsellerle gemi ve decoy ayrımı yapmayı sağlayan bir sinir ağı geliştirilmiş ve IR görüntülemeli füze modeli tasarlanmıştır. Füze modelinin karşı tedbirlere dirençli olduğu fakat decoy bulut yoğunluklarının azaltılarak gemiye daha fazla benzetilmesi sonucunda karşı tedbir etkinliğinin arttığı gösterilmiştir.

Füzelere karşı en uygun karşı tedbir stratejisinin en kısa sürede belirlenmesi de ayrı bir öneme sahiptir. Terminal fazında olan tipik bir gemi karşıtı füze angajman senaryosunda geminin kendini savunması için tepki süresi genellikle 90 saniyedir [32]. Yapay zekâ teknolojisi ile senaryo tabanlı testler yapılarak bu tepkilerin doğruluğu artırılabilir ve bu sistemlerin etkinliği geliştirilebilir. Makine öğrenimi (ing. ML: Machine Learning) modelleriyle RF tehditlere karşı gemilerden chaff fırlatma çözümü elde edilen bir çalışma mevcuttur [27]. Çok Katmanlı Algılayıcı (ing. MLP: Multilayer Perceptron) ve Destek Vektör Makinesi (ing. SVM: Support Vector Machine) modelleri kullanılarak “atım çözümü (ing. solution)”, “ıskalama mesafesi (ing. miss distance)”, “hücredeki zaman (ing. % time in cell)” ve “başarı olasılığı (ing. probability of success > 0,8)” hedef parametreleri elde edilmiştir. En iyi performans MLP modelinde elde edilmiştir. Atım çözümü ve başarı olasılığı parametre tahmini sınıflandırma problemi olarak ele alınırken; diğer parametrelerin tahmini regresyon problemi olarak düşünülmüştür. Diğer çalışmalarda da RF füze tehditlerine karşı deniz platformunun korumasını artırmak için yapay zekâ tabanlı bir aldatıcı dağıtım sistemi tasarlanmıştır [23, 24]. Burada kullanılan drone’lar decoy olarak bahsedilmektedir. Farklı bir çalışmada da elektronik savaş ortamlarında tehdit tespiti, sınıflandırması ve tehditlere karşı alternatif karşı önlemlerin seçiminin otonom karar alabilen

bir yöntem sunulmuştur [33]. Karşı tedbir olarak chaff/flare, RF karıştırma ve KÖ karıştırma seçimi incelenmiştir. Oluşturulan komuta kontrol yapısının simüle edilmiş elektronik savaş ortamlarında tehditleri tespit etme, sınıflandırma ve bunlara yönelik karşı önlemler seçme yetenekleri gösterilmiştir. Tehditler Gauss ve üstel dağılımlar kullanılarak oluşturulmuştur. Bunların eğitimi bayes sınıflandırıcı (ing. bayesian classifier), karar ağacı (ing. decision tree) (C4.5) ve MLP modelleriyle yapılmıştır. Radar sensör tehditlerinde bayes sınıflandırıcı; lazer sensör tehditlerinde karar ağacı (C4.5) modeli en iyi performansı göstermiştir. Yapılan çalışmalar yapay zekânın bu alanda kullanımını destekler ve gelecek çalışmalara umut verici niteliktedir.

Tehditlere karşı verilen tepkilerin etkinliğini belirleyen bir başka unsur da atım sisteminin bulunduğu konumdur. Doğru yere konuşlandırılmayan bir sistem tarafından yapılan atımlar istenilen sonuçları vermeyebilir. Geminin hayatta kalma kabiliyetini artırmak için torpido tehditlerine karşı tekli ve çoklu decoy dağıtım stratejileri tartışılmıştır [34]. Yapılan çalışmada yazarlar, aynı yönlü ve zikzak konuşlandırma yöntemlerini ele almıştır. Çoklu mühimmat atımının, zikzak dağıtım stratejisi ile daha üstün performans gösterdiği kanıtlanmıştır. Diğer benzer bir çalışmada da yüzey tabanlı bir radarı Anti Radyasyon Füzesi (ing. ARM: Anti Radiation Missile) tehdidinden korumak için seçilen decoy'ların konuşlandırma sorunu ele alınmıştır [35]. Stokastik bir simülasyon modeli ve “Çok Amaçlı Sıralama ve Seçim (ing. Multi-Objective Ranking and Selection)” yöntemi kullanılarak sorun çözülmüştür. Konuşlandırma için uygun yer belirlemeden önce en uygun sistemi seçmek de kritiktir. İspanyol donanması, F-110 programı kapsamında torpidolara karşı en iyi aldatma sistemini 2022 yılında seçmek istedi. Deniz Kuvvetleri Komutanlığı'nın belirlediği yönergelere göre “Analitik Hiyerarşi Süreci (ing. AHP: Analytical Hierarchy Process)” yöntemi uygulandı ve hiçbir aldatma sistemi daha üstün çıkmadı. Bunun sonucunda torpidolara karşı yeni firkateynlerde kullanılacak, en iyi aldatıcının belirlenme sorunu ele alınmıştır [36]. “Nesnelliğin Ötesinde Belirsizliğin Grafik Ölçüm Yöntemi (ing. GMUBO: Graphic Measurement Method of Uncertainty Beyond Objectivity)” adlı yeni bir yaklaşım sergilenmiştir. Bu sayede belirsizlik nicelleştirilerek daha iyi yönetilmiştir.

Karşı tedbir olarak belirlenen atım çözümünün yanı sıra, geminin atım sonrası yapacağı hareketler de kritik bir rol oynamaktadır. Atılan mühimmatın etkin bir şekilde gelen füzeyi saptırması için geminin doğru manevraları yapması gerekmektedir. Bu da çözüm sürecinin önemli bir parçasıdır. En uygun yere konuşlandırılmış atıcılarla manevralı ve manevrasız

yapılan karşı tedbir atımları yapılan çalışmada karşılaştırılmış ve manevranın etkisi bariz gözlemlenmiştir [34].

Bu tez çalışmasında, karşı tedbir hesaplama algoritmasına sahip özel bir simülâtör sayesinde optimize edilmiş veriler kullanılarak MLP tabanlı yapay zekâ modelinin eğitilmesi sonucunda hem KÖ hem de RF güdümlü deniz karşıtı füzelere karşı en optimal karşı tedbir atım ve manevra çözümlerinin bulunması amaçlanmaktadır. Oluşturulacak makine öğrenmesi modeli, tehdidi bertaraf etmek için atılması gereken mühimmat için en uygun tüp numarası kararı verebilecektir. Beraberinde, geminin sahip olması gereken yeni rota ve hız bilgileri de elde edilebilecektir. Bulunması hedeflenen gemi rota ve hız bilgisi manevra çözümü kapsamında değerlendirilmektedir. Ayrıca uygulanan karşı tedbir stratejisi sonucunda yörüngesi değişen füze tehdidinin gemiye en yakın geçtiği mesafe bilgisi anlamına gelen ıskalama mesafesi değeri de modelin çıktıları arasındadır. Bu parametre karşı tedbir olarak atılan mühimmatın ne kadar etkin olduğunu ifade etmektedir. Değerin büyüklüğü ile karşı tedbir performansı doğru orantılıdır diyebiliriz. En son elde edilen çıktıları, model performansını ve karşı tedbir etkinliğini yorumlamak amaçlı açıklanabilir yapay zekâ dalından yararlanılmıştır. Alternatif çözümlerin de olabileceğini bu teknik sayesinde görsel analizlerle şeffaf bir şekilde yansıtmak bu çalışmanın faydaları arasındadır. Kullanıcı açısından yorumlanabilirliği kolaylaştıracak bu yöntem değerlendirilecek ve avantajları paylaşılacaktır. Yapay zekâ ve açıklanabilir yapay zekânın elektronik harp konseptine uyarlanabileceğinin sunulacak sonuçlar ile kanıtlanması hedeflenmektedir.

Yapay zekâ kullanımının, gemilerde elektronik karşı tedbir etkinliğinin artmasında umut vadettiği gösterilmektedir. Bu çalışmada bahsedilen decoy kavramı karşı tedbir mühimmatları olan chaff ve flare'i temsil etmektedir.

Problem durumu/Konunun tanımı

Her geçen gün gelişmekte olan füze teknolojileri operasyon ortamında var olan platformlar açısından ciddi anlamda tehdit unsuru haline gelmiştir. Füzelerin elde edilebilirliği ve taşıdığı harp başlıklarının etkisi düşünüldüğünde platformlar her an tetikte ve endişeli şekilde hareket etmektedir. Tehditlerin gelişmesiyle karşı tedbirlerin önemi de günümüzde aynı oranda artmaktadır. Platformların korunma ihtiyacına yönelik alınan önlemlerin

yetersiz kaldığı senaryolar mevcut olabilir. Var olan karşı tedbir mühimmatlarının etkin bir şekilde kullanılması ve en uygun platform manevrasının belirlenmesi kritik bir hal almıştır.

Araştırmanın amacı

Yapılan tez çalışmasındaki amaç, simüle edilmiş gerçekçi tehdit angajman senaryo verilerinin tasarlanan makine öğrenmesi modelinin eğitilmesi sonucunda deniz platformlarında karşı tedbir atım stratejisinin ve platform manevrasının en doğru şekilde belirlenmesini sağlamaktır. Atım bilgisi, hangi atıcının hangi tüpünden atım yapılması gerektiğini; manevra bilgisi ise atım sonrasında veya atım anında geminin sahip olması gerektiği sürat ve rotayı kapsamaktadır. Platformların kendini daha güvende hissetmesini amaçlayan bu çalışma karşı tedbirlerin daha faydalı kullanılarak envanter kontrolünün yapılmasına da olanak sağlamaktadır.

Araştırmanın önemi

Elektronik harp alanında karşı tedbirlere yönelik literatürde kısıtlı çalışmanın olması yapılan çalışmanın kritik bir öneme sahip olmasını da beraberinde getirmiştir. Günümüzde gelişmekte olan füze teknolojilerine yönelik karşı önlemlerin alınması ve bu faaliyetlerin geliştirilmesi platformlar açısından çok önemlidir. Yapılan tez çalışmasında popüler bir kavram olan yapay zekânın elektronik harp konseptine uyarlanabildiğinin gösterilmesi de ayrı bir önem taşımaktadır. Yapay zekâ teknolojisinin katabileceği hız ve doğruluk gibi faydalar sayesinde karşı tedbirlerin verimliliğinin artması hedeflenmektedir. Karşı tedbir atım kararının yanında platform manevra bilgisinin elde edilmesi de bu ve buna benzer çalışmalar açısından değerlidir. Bu tez çalışmasının operasyonel sahada kullanılabilirliğinin yüksek olması ve geliştirilmeye açık olması literatürde kendine önemli bir yer edinmesini sağlamaktadır. Literatüre yapacağı katkılar düşünüldüğünde bu çalışmanın geleceğe olumlu yansımalar yapacağı ve tercih edilecek bir uygulama haline gelebileceği düşünülmektedir.

Sınırlılıklar

Bu tez çalışması ASELSAN Akademi kapsamında yapılmıştır. Kullanılan veri setinin gizliliğinden dolayı paylaşımı yapılamamaktadır. İş ortamının dışına verilerin çıkarılması uygun olmadığından yapılan çalışmalar sadece iş yerinde gerçekleştirilebilmiştir. Bu

ortamın bazı imkânlarla getirmiş olduğu kısıtlamalar mevcuttur. Bu durumlar yürütülen tez süreci boyunca zaman açısından bazen zorluklara sebebiyet vermiştir. Zaman yönetim planlaması yapılmıştır.

Toplamda 6 bölümden oluşan tezin organizasyonel akışı şu şekildedir. Bölüm 1’de problem tanımı, araştırmanın amacı, önemi ve literatürde yapılan benzer çalışmaların aktarılması yer almaktadır. Bölüm 2’de çalışma öncesinde sahip olunması gereken ön bilgilerin ve literatürdeki kavramların aktarımı yapılmaktadır. Tez çalışma sürecinde kullanılan materyal ve metotların tanımı, terimlerin açıklanması ve deneysel süreç öncesi yapılan hazırlıklar Bölüm 3’te bahsedilmiştir. Bölüm 4’te karar verilen uygun metot kullanılarak geliştirilen yapay zekâ modeli hakkında detaylı bilgiler verilmiş; deney ortamı, deneysel çalışmalar ve elde edilen bulgular grafiklerle desteklenerek ayrıntılarıyla paylaşılmıştır. Bu bölümün devamı olan Bölüm 5’te tartışma başlığına yer verilmiş. Son olarak, Bölüm 6’da tüm yapılan çalışmanın çıkarımları hakkında bilgi verilmiş ve gelecek çalışma önerileriyle birlikte sonuçlar aktarılmıştır. Gelecek çalışmaların konusuna da ayrıca değinilmiştir.

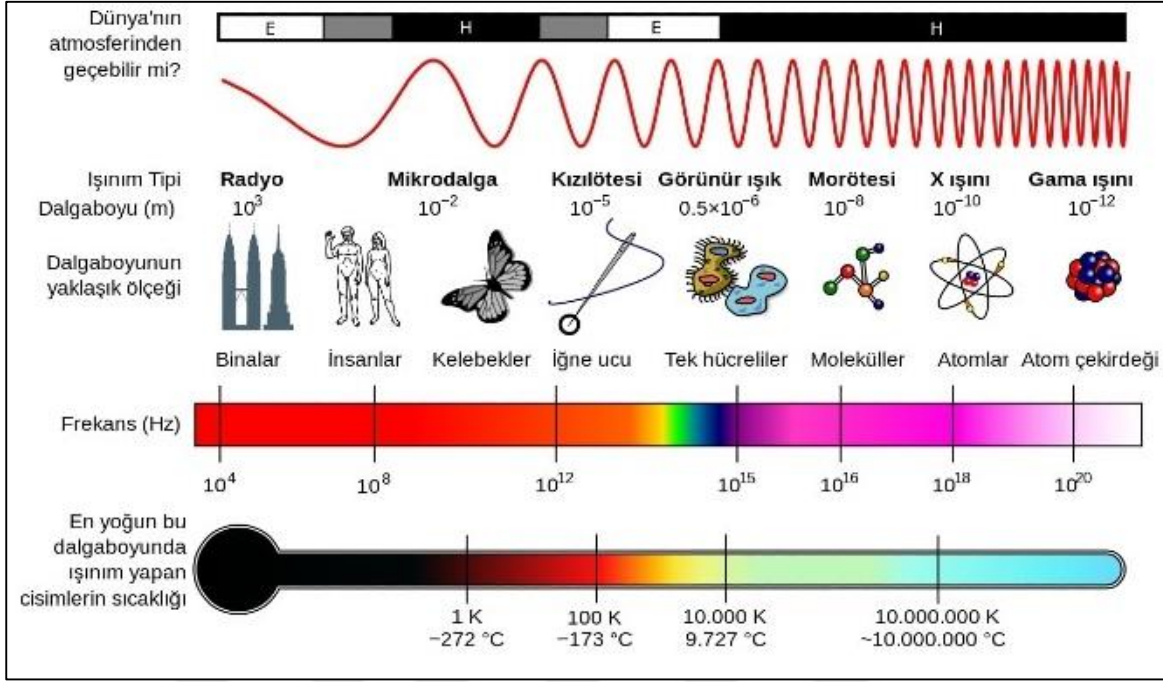


2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ARAŞTIRMALAR

2.1. Elektronik Harp (EH)

Elektronik Harp (EH), modern savaş ortamında kendi elektronik sistemlerinin korunmasını sağlamak, tehdit unsurlarına ait elektronik sistemlerini etkisizleştirmek ve bu sistemlerden bilgi elde etmek amacıyla gerçekleştirilen bir savaş türüdür. EH, insanlı veya insansız sistemler aracılığıyla kara, hava, deniz ya da uzaydan gerçekleştirilebilir ve iletişim, radar veya diğer askeri ve sivil varlıkları hedef alabilir. Bu kapsamda, modern savaş alanında hem saldırı hem de savunma amaçlı kritik bir rol üstlenir.

EH, askeri ve istihbarat görevlerini gerçekleştirmek için elektromanyetik spektrum (EMS) veya yönlendirilmiş enerji ile entegre siber yeteneklerin kullanılması olarak da ifade edilmektedir. EMS, operasyonel bölgede iyi yönetilmesi gereken bir kaynaktır. Bu yöntem EMS'yi düşmanın kullanmasını engelleme, kandırarak veya istismar ederek kontrol altına alma ve dost kuvvetlerin spektrumu kullanma faaliyetlerini içermektedir. Düşman unsurlarına ait iletişim sistemlerini, radar sistemlerini ve füze arayıcı başlıklarını engelleme, aldatma veya bozma sayesinde dost unsurların güvenliği artmış ve operasyonel avantaj sağlanmış olur. Şekil 2.1'de görüldüğü üzere EMS; radyo dalgaları, mikrodalgalar, milimetre dalgaları, kızılötesi, görünür ışık, morötesi ışık ve gama ışınlarını kapsamaktadır. Bir askeri kuvvet, tüm bu spektrumu ve siber etkileri ne kadar iyi kullanır ve yönetirse, düşman unsurlarını o kadar başarılı bir şekilde önleyebilir ve saldırılara elektronik olarak yanıt verebilir.



Şekil 2.1. Elektromanyetik spektrum [37]

Pasif olarak durumsal farkındalık sağlamaktan, düşman iletişimlerini veya tehditlerini tespit edip aktif olarak devre dışı bırakmaya kadar uzanan EH; Elektronik Destek (ED), Elektronik Taarruz (ET) ve Elektronik Koruma (EK) olmak üzere üç temel kategoriden oluşmaktadır. Bir gemi platformu bu üç yeteneğe sahip olmalıdır.

Bu bölümde elektronik harbin alt başlıkları, pasif soft-kill karşı tedbir yöntemi olarak kullanılan chaff/flare mühimmatları, füze arayıcı başlık teknolojileri ve gemi karşıtı füzeler açıklanmaktadır.

2.1.1. Elektronik destek (ED)

Elektromanyetik spektrumun algılanmasını ve yorumlanmasını içermektedir. Elektromanyetik (EM) enerjinin kaynaklarını tespit etmek, durdurmak, tanımlamak, yerini belirlemek ve/veya izlemek için yapılan eylemler ED'nin sorumluluğudur. Düşman iletişim ve radar sistemlerini analiz etmeye, istihbarat toplamaya ve durum farkındalığı artırmaya yönelik faaliyetlerin bütünü bu kapsamda değerlendirilmektedir. Radar İkaz Alıcı Sistemleri (RİAS), Lazer İkaz Alıcı Sistemleri (LİAS) ve Füze İkaz Sistemleri (FİS) kullanılarak tehdit unsurların EMS'de algılanması sağlanır.

2.1.2. Elektronik taarruz (ET)

Düşman elektronik sistemlerini bozmak veya etkisiz hale getirmek amacıyla yapılan saldırıların tümünü kapsamaktadır. Elektromanyetik veya yönlendirilmiş enerji silahlarının stratejik kullanımıyla düşman kuvvetlerin elektronik altyapılarına veya tesislerine saldırılır. Düşmanın muharebe kabiliyetini bozma, etkisiz hale getirme veya yok etme amacı taşır. İletişim sistemleri, radar sistemleri, güdümlü füzeler veya bombalar üzerinde gerçekleştirilebilen bu eylem jamming yani “karıştırma” olarak adlandırılmaktadır. Ayrıca sahte sinyaller gönderme (spoofing) de bu konseptte örnek verilebilir.

2.1.3. Elektronik koruma (EK)

Sahip olunan elektronik sistemlerin düşman unsurlarına karşı korumayı hedefleyen yöntemlerdir. Dost kuvvetlerin muharebe yeteneklerini, ekipmanlarını, tesislerini ve personelini etkisiz hale getirebilecek veya ortadan kaldıracabilecek elektronik taarruzların (ET) etkilerine karşı korumayı içerir. Bu sebeple, düşman kuvvetlerin ET’sine karşı koyma yeteneği olarak da bilinmektedir. Savunma amaçlı kullanılan karşı tedbir sistemleri bu kategoride değerlendirilmektedir ve gemi platformu açısından büyük bir öneme sahiptir. Karşı tedbir kabiliyeti yüksek olan gemiler operasyonel bölgede avantajlı konumda olurlar.

Kendini koruma sistemleri ve elektronik karşı tedbirler, giderek daha da karmaşık hale gelen günümüz modern savaş ortamlarında, kara, hava ve deniz araçlarını ve mürettebatı korumak amacıyla tasarlanmıştır. Gelen tehditleri bozarak ve etkisiz hale getirerek etkili bir savunma kalkanı oluşturmaktadırlar. Bu yüksek derecede özelleştirilebilir teknolojiler, sadece askeri platformların değil, aynı zamanda havaalanları gibi stratejik sivil yapıların korunmasında da hayati öneme sahiptir. Bu sistemler, tehdit algılama, karşı tedbir uygulama ve güvenliğin sağlanması süreçlerinde kritik bir rol oynar.

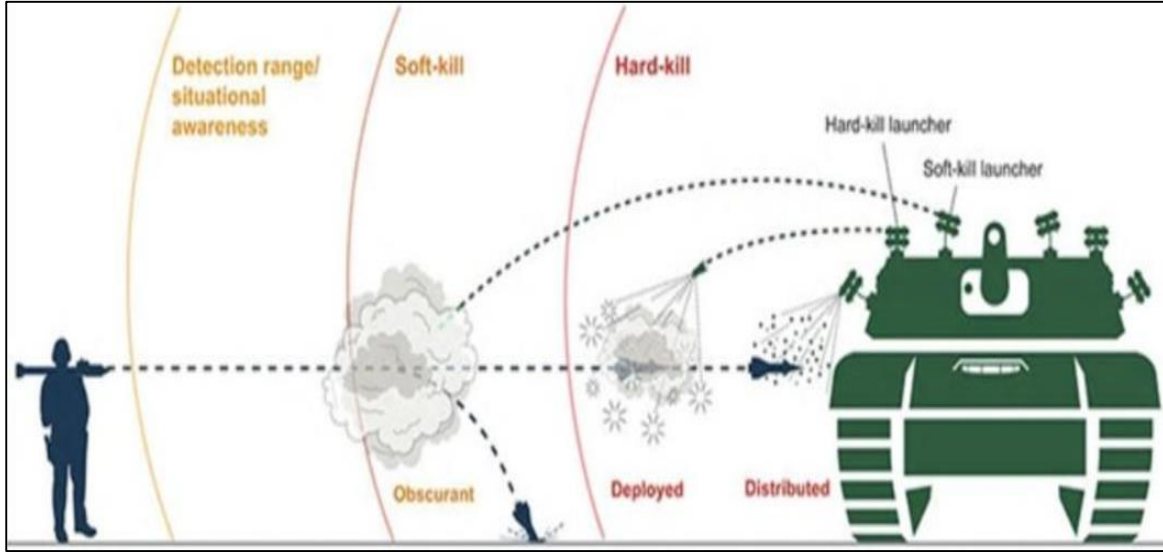
Genellikle füze tehditlerini etkisiz hale getirmek için uygulanan platform savunma yöntemleri temel olarak iki başlıkta incelenebilir. Bunlar alt başlıklarda açıklanan hard-kill ve soft-kill’dir.

Hard-kill savunma

Gelen bir tehdit füzusunün fiziksel olarak vurularak imha edilmesini amaçlayan ve bu sayede onun zırhı delme yeteneğini sınırlayan karşı önlemlere hard-kill aktif koruma önlemleri denir. Hard-kill önlemleri, genellikle korunan platforma çok yakın mesafeden tehdit edici füzelere veya diğer mühimmatlara kinetik enerji silahları, füzeler ya da yakın patlamalar yoluyla saldırı yapar. Bunlar sayesinde tehdidin yok edilmesi hedeflenmektedir. Hard-kill hem saldırı hem de savunma amaçlı uygulanmaktadır. Bir füzusunün anti-füze sistemiyle havada vurulması veya füze fırlatma aracının vurulması hard-kill örneği olarak verilebilir.

Soft-kill savunma

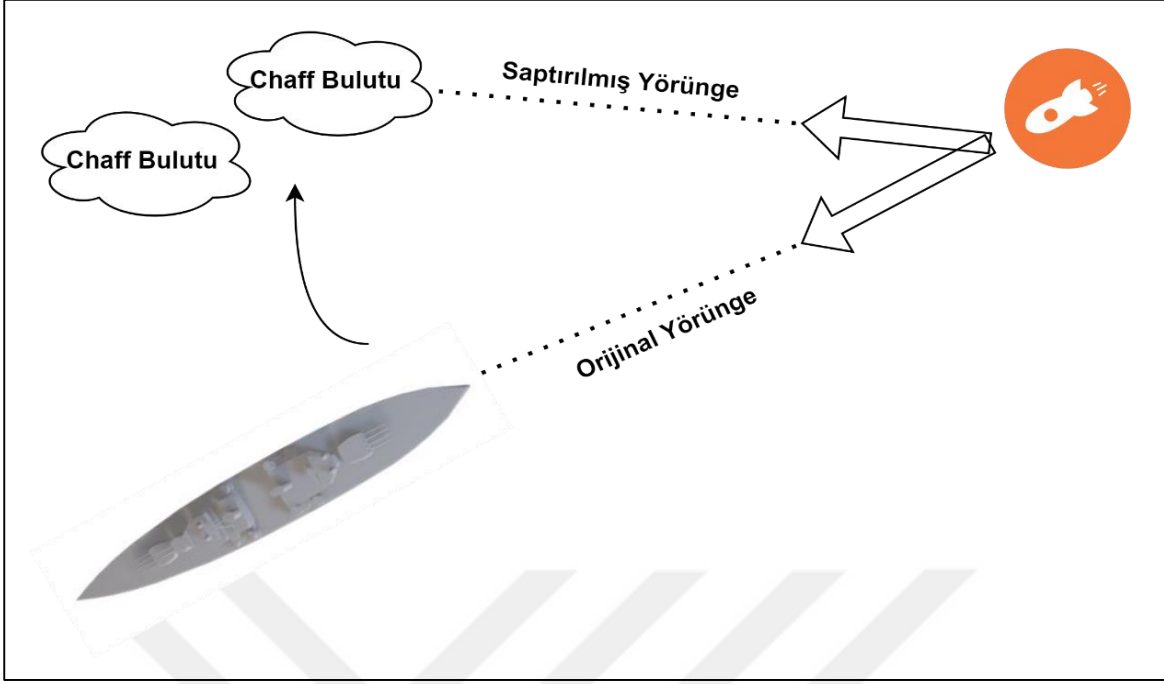
Gelen güdümlü bir tehdidin güdümünü bozmayı veya güdümlü bir tehdide karşı platformun gizlenmesini amaçlayan karşı tedbirlere soft-kill koruma tedbirleri denir. Güdümlü silah tehditlerini yok etmeden etkisiz hale getirmek amaçlanmaktadır. Bu yöntem aktif ve pasif olmak üzere iki alt başlıkta ele alınmaktadır. Hedefi yanıltan veya radar sinyallerini etkisiz hale getiren Elektronik Karşı Tedbir (EKT) olan jamming, aldatıcı sinyaller (spoofing) ve haberleşme karıştırma ile atılabilir ve çekilebilir sahte hedefler aktif soft-kill yöntemleri kapsamındadır. Chaff ve flare mühimmatları, radar emici kaplamalar ile radar kesit alanı azaltma, KÖ iz azaltma ve görünmezlik çalışmaları da pasif soft-kill yöntemlerine örnektir. Bu tez çalışmasında pasif soft-kill yöntemi olarak değerlendirilen operasyonel sahada oyun değiştirici özelliğe sahip olan chaff ve flare karşı tedbir mühimmatlarının etkin kullanılması ele alınmaktadır. Bir geminin chaff ve flare karşı tedbir atma sistemine sahip olması kadar o sistemi etkili kullanılması da çok önemlidir. Bu sistemler savunma mekanizmasının temel yapı taşlarıdır.



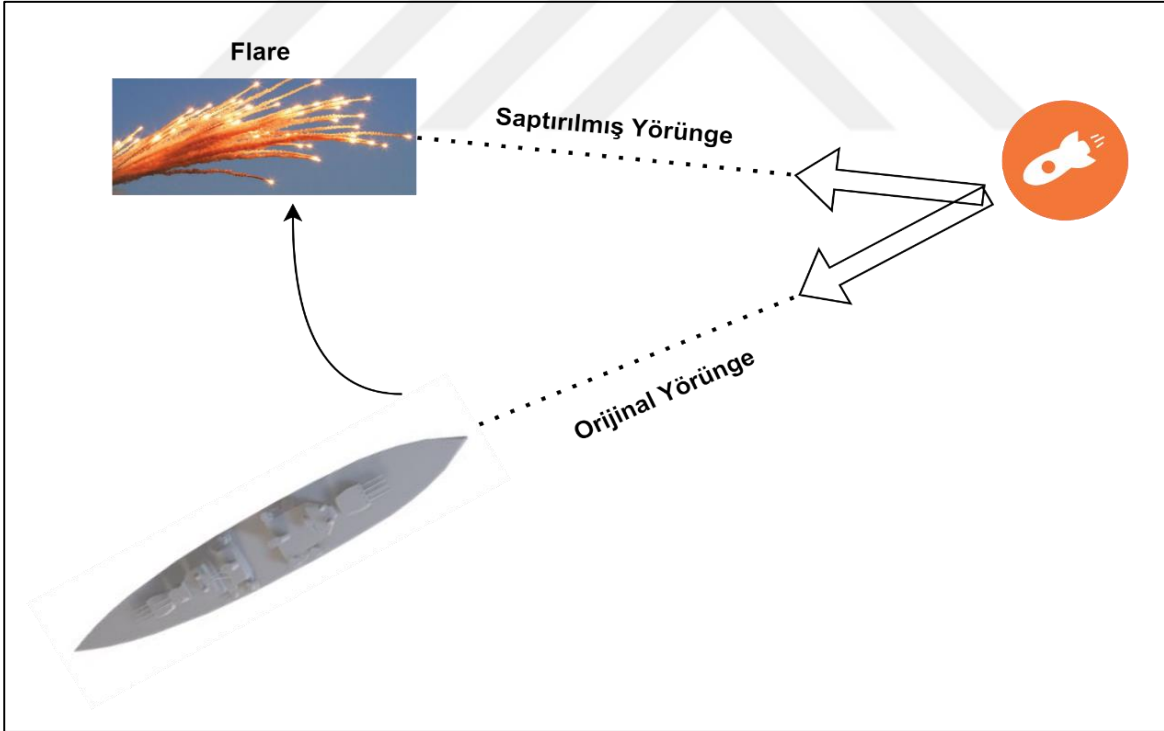
Şekil 2.2. Hard-kill ve soft-kill karşı tedbir örneği [38]

2.2. Pasif Mühimmatlar

Soft-kill yöntemi olarak bilinen pasif karşı tedbir mühimmatları günümüzde yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Tehdide karşı yakın mesafe gerekmeksizin etki gösterebilen bu mühimmatlar elektronik harp sahasında oyun değiştirici özelliğe sahiptir. Chaff, radar güdümlü füzeleri yanıltmayı sağlarken; flare, ısı güdümlü füzelere karşı kullanılmaktadır. Hedefe kilit atmış füzelerin arayıcı başlığını yanıltarak başka yere yönlendirmesini yani kilidin kırılmasını sağlarlar. Şekil 2.3 chaff, Şekil 2.4 flare mühimmatı için bu durumu göstermektedir. Hava ve deniz platformlarında daha çok tercih edilmektedirler. Kara platformlarının kısıtlı manevra yeteneğine sahip olması bu mühimmatların kullanımına engel olabilmektedir. Bu mühimmatların karadaki benzer karşılığı sis mühimmatı olarak geçmektedir.



Şekil 2.3. Chaff mühimmatı ile füzenin saptırılması



Şekil 2.4. Flare mühimmatı ile füzenin saptırılması

Karşı tedbir etkinliğini belirleyen temel faktörler; yapılan platform manevrası, atılan mühimmatların tipi, atılan mühimmatların sayısı ve mühimmatların atıldığı konumdur. Bir flare atımının etkinliği, kullanılan ısı fişeği tipinin ve ısı fişeği atım zamanlarının doğru bir

şekilde belirlenmesine bağlıdır [39]. Bu ilişki, ısı fişeği tipi ve atım programlarının parametreleri “Hidden Markov Models (HMM)” kullanılarak belirlenmeye çalışılarak incelenmiştir. Bu model füzeyi en yüksek olasılıkla aldatabilmesi için kullanılması gereken uygun mühimmat tiplerinin ve bu mühimmatların atım zamanlarının belirlenmesini sağlamaktadır ve kullanılabilirliği öngörülmektedir. 3. nesil füzelere karşı bir helikopterin uygulayacağı pasif karşı tedbirlerin atım zamanına göre analizi Genetik Algoritma ile yapılmıştır [40]. Üretilen en iyi atım programlarının uygulanması sayesinde füzenin helikopteri vurması engellenmiş olup, helikopterin füze görüş alanından en uzak noktada çıkması da sağlanmıştır. Görüntülemeli KÖ (IIR) arayıcı başlıklarına karşı flare etkinliği de ayrı bir çalışmada incelenmiştir [41]. MTV tipi flare’ın IIR arama başlıklı füzelere karşı etkin olmadığı, onun yerine platform hareketini taklit eden kinematik flare veya platform IR imzasını taklit eden spektral flare kullanılması gerektiği anlaşılmıştır.

Remzi Akdağ ve D. Turgay Altılar’ın yaptığı çalışmada chaff’ın etkileri araştırılmış ve doğru manevrayla birlikte etkili yapılan chaff atımının platformu koruduğu simülasyonlarla gösterilmiştir [42]. Benzer diğer bir çalışmada da senaryolarda ve operasyon bölgesinde belirsiz olan koşullar dikkate alınarak manevralarla chaff ve flare karşı önlemlerinin birleştirildiği metodoloji geliştirilerek karşı tedbir optimizasyon problemi ele alınmıştır [43]. Genetik Programlama (ing. GP: Genetic programming) kullanmaya yönelik bir metodoloji geliştirilmiştir. Farklı karşı tedbirlerin elektronik harp ortamında karşılaştırması bir çalışmada yapılmıştır [44]. KÖ ve RF arayıcı başlık modellemeleri kullanılarak gerçek zamanlı tehditlere karşı aralarında chaff ve flare’ın da aralarında olduğu en iyi karşı tedbire karar vermek için otonom bir model mimarisi sunulmuştur. En uygun karşı önlemi belirlemek için, karşı önlemlerin uygulanması durumunda etkilerinin olasılıklarının modellenmesi yapılarak karar verilmiştir. Benzer bir çalışmada da EO/KÖ karşı tedbir uygulamalarındaki bilinen sonuçlardan faydalanılarak karşı tedbir sınıflandırması önerilmektedir [45]. Bu sınıflandırma ile gelecekteki zorluklar düşünülerek mevcut karşı tedbirler analiz edilmiştir.

Gelişmiş chaff kullanımına yönelik belirli bir karşı tedbir tekniği ile birlikte chaff RKA hesaplaması geçmişte yapılan çalışmalar arasındadır [46]. Bu çalışmayla aynı konseptte olan ilaveten etkili tipik chaff setlerinin karmaşık bilgisayar tabanlı simülasyonu ile karşı tedbir için gerekli chaff sayısının belirlenmesine yönelik çalışmada yapılmıştır [47]. KÖ imzaların

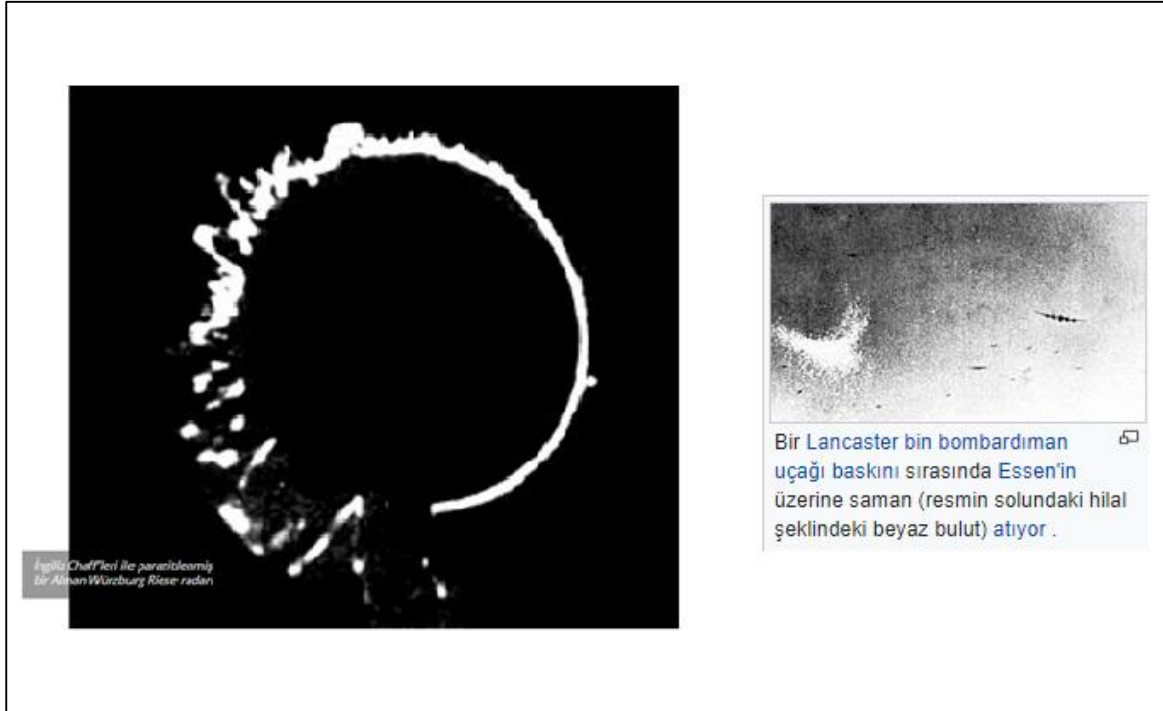
bastırılmasındaki önemleri sebebiyle flare da dâhil olmak üzere birçok KÖ karşı tedbir yöntemleri teknik açıdan incelenmiş ve analiz edilmiştir [48].

2.2.1. Chaff

İlk başta İngilizler tarafından “Pencere”, 2. Dünya Savaşı esnasında Alman Luftwaffe tarafından “Düppel” olarak isimlendirilen mühimmatın adı günümüzde “Chaff” olarak geçmektedir. Saman anlamına gelen chaff, radar güdümlü füze başlıklarını aldatmak/karıştırmak için kullanılan bir karşı tedbirdir. Günümüzde helikopter, uçak ve gemilerde tercih edilmektedir. Chaff bölmeleri, benzer boyut ve şekle sahip birkaç küçük metal parçadan oluşur ve bunların amacı, tehditler tarafından hedefe gönderilen radar sinyallerine karşılık yanlış geri dönüşler yaratmaktır. Radar dalgalarını yansıtarak füzenin kafasını karıştırır yani hedef RKA değerinden daha büyük bir RKA değeri oluşumu sağlar. Bu sayede hedefe manevra ve gizlenme şansı verir. Chaff mühimmatının boyutu ve şekli aldatmaya çalıştıkları radar dalga boyuna bağlıdır. Genellikle bir paketteki dipoller, tüm bir radar bandını veya birkaç radar bandını kapsayacak şekilde farklı uzunluklarda kesilir [47]. Chaff uzunlukları beklenen radar dalga boyunun yarısı kadar uzunluklara sahiptir. Bu mümkün olan en az miktarda malzeme kullanımını ve rezonansa girmeyi sağlar. Askeri gözetim ve izleme için baskın dalga boyları 3, 5 ve 10 cm olduğundan, standart saman uzunlukları 1,5, 2,5 ve 5 cm'dir [49].

Chaff'lar küçük alüminyum parçacıklar (alüminyum kaplı cam elyaflar), gümüş kaplı naylon fiberler, bakır nikel kaplı cam fiberler veya plastik parçalar içerebilir. B-52 bombardıman uçağı gibi bazı uçaklar tarafından folyo chaff hâlâ kullanılırken, bu tip chaff'ın üretimi durmuştur. A-10, F-15, F-16 ve F / A-18 gibi uçakların kullandığı chaff, alüminyum kaplı cam elyaflardan oluşmaktadır. Havada mümkün olduğunca uzun süre kalacak şekilde tasarlanan bu tipik chaff'ların çapı 1 mildir. Daha yeni tip olan “süper ince” chaff'lar 0,7 mil çapa sahiptir. En önemli özelliklerinden biri, hafif olması ve büyük miktarların taşınmasına imkân sağlamasıdır. Chaff'lar ortalama 3-5 milyon saman lifi içermektedir [50].

Hava platformlarında chaff, dikdörtgen şeklinde 1x1x8 ve 2x1x8 inç boyutunda olabilirken; silindirik yapıda 26 mm, 36 mm, 50 mm, 55 mm boyutlarında da olabilmektedir. Deniz platformlarındaki konfigürasyonu 130 mm silindirik şeklindedir.



Şekil 2.5. Chaff tarafından köreltilmiş/karıştırılmış radar görüntüleri [50]

Chaff bileşenleri

Günümüzde kullanılan chaff, 3 μm yüksek saflıkta alüminyum katmanla kaplanmış E tipi cam elyaflardan yapılmaktadır. Chaff liflerinin kalınlığı yaklaşık bir insan saçı (çap olarak yaklaşık 25 μm) kadar ve uzunluğu yaklaşık 0,8 ile 7,5 cm arasında değişmektedir. Fiberler (lifler) %60 silikat cam ve ~%40 alüminyumdur ve eser miktarda (<%1) silikon, demir, bakır, manganez, magnezyum, çinko, vanadyum ve titanyum içerir. Bunlara ilaveten, lifler bir lipit karışımı (stearik asit veya Neofat (stearik asit ve palmitik asit karışımı)) ile kaplanır [51]. Bu, chaff mühimmatının yerleştirilmesi sırasında topaklanmayı önlemek için kayganlaştırıcı görevi görmektedir. Alüminyum; elektriksel iletkenliği, düşük maliyeti, düşük ağırlığı ve dayanıklılığı nedeniyle chaff için tutarlı bir bileşen olmuştur. Tek bir chaff demeti, 8 inç uzunluğunda dikdörtgen bir tüp veya kartuştaki filamentlerden, plastik pistondan, yastıklı bir ara parçadan ve iki plastik uç kapaktan (1/8 inç kalınlığında, 1 inç x 1 inç veya 1 inç x 2 inç boyutunda) oluşur.

bırakılan chaff mühimmatlarının çoğu için 10 dakika ile 10 000 fitte salınan chaff için yaklaşık 10 saate kadardır [51].

Chaff fırlatma tekniği

Modern chaff mühimmatları piroteknik yöntemlerle fırlatılmaktadır. Piroteknik fırlatma, patlayıcı bir dürtü yükü tarafından üretilen sıcak gazları kullanır. Gazlar, küçük pistonu chaff dolu tüpten aşağı doğru iter. Küçük bir plastik uç kapağın çıkarılması ardından chaff lifleri gelir. Bu plastik uç uçağın içinde kalır.

2.2.2. Flare

Isı fişegi anlamına gelen flare terimi, KÖ arayıcı başlığa sahip füzeleri aldatmak için kullanılmaktadır. Flare'lar küçük magnezyum metal parçalarının yüksek ısılarla çıkarılarak havaya çoklu olarak atılması sonucu aktif olurlar. Böylece uçak ve helikopter motorlarının yüksek sıcaklığa sahip nozul çıkışları veya gemilerin baca sıcaklığı gibi yüksek ısılarla yönelen kızılötesi arayıcı başlıklar aldatılmaya çalışılır. Kendisi havalı bir karşı tedbir olmasından ötürü havacılık gösterisi yapan savaş jetleri tarafından da gösteri amaçlı kullanılır. Raf ömürleri yaklaşık 10 yıl, hizmet ömürleri ise 2 yıldır.

Hava platformlarında flare, dikdörtgen şeklinde 1x1x8 ve 2x1x8 inç boyutunda olabilirken; silindirik yapıda 26 mm, 36 mm, 50 mm, 55 mm boyutlarında da olabilmektedir. Deniz platformlarındaki konfigürasyonu 130 mm silindirik şeklindedir.

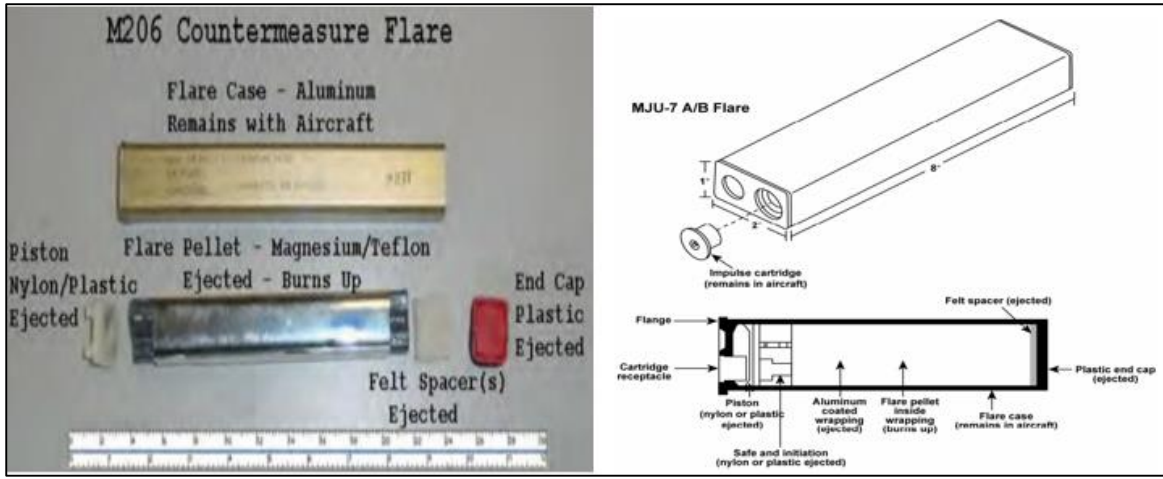
Flare'ın havadaki davranışı

Flare, tutuşturulduğunda 3,5 ila 5 saniye arasında 2 000 Fahrenheit derecede yanmaktadır. En etkin oldukları bu süre zarfında flare 200-400 feet yüksekliğine ulaşmış olur. Toplam yanma süreleri yaklaşık 10 saniyedir [54].

Flare bileşenleri

Flare, öncelikle dikdörtgen şekiller halinde kalıplanmış magnezyum ve teflon (politetrafloroetilen) karışımlarıdır. Tutuşmaya yardımcı olan aşağıdaki malzemeler için boyuna oluklar kullanılmaktadır:

1. İlk ateşleme malzemeleri: potasyum perklorat, bor tozu, magnezyum tozu, baryum kromat, Viton A veya Florel bağlayıcı
2. Acil ateş malzemeleri: magnezyum tozu, Teflon, Viton A veya Fluorel
3. Daldırma katı: magnezyum tozu, Teflon, Viton A veya Fluorel



Şekil 2.8. M206 ve MJU-7 A/B flare gösterimleri [55, 56]

Üst kısım (flare mühimmatının koyulduğu yerin üstü), hava akımına doğru bir pistonu, flare malzemesini ve uç kapağı iten sıcak gazlar üretmek için elektrikle etkinleştirilen piroteknik impulse kartuşuna (fişek) sahiptir. Bu fişek sayesinde ateşleme akımı oluşturulur ve flare platformdan fırlatılır. Flare, bir sürgü düzeneği ve bir başlatma peleti içerir. Bu pelet, fişek ile ateşlenir ve sıcak gazlar, sürgü düzeneğinden çıkarken parlamaya ulaşarak, bir yangın geçişini ortaya çıkarır.

Flare türleri

Piroteknik ve piroforik olmak üzere iki tür işaret fişegi vardır. Piroteknik işaret fişekleri oldukça görünür beyaz ışık ve duman üretir. Fırlatıldıklarında ateşlenen bu tür flare'lar füzenin arayıcılarının dikkatini dağıtmak ve kafasını karıştırmak için 5 ila 10 saniye boyunca

büyük miktarda kızılötesi enerji üretirler. Sönmeden önce yere düşmeleri durumunda yangına sebebiyet verebilirler. Geleneksel flare olarak adlandırılan Magnezyum Teflon Viton (MTV) flare'lar ve gelişmiş (spektral, kinematik ve aerodinamik) flare'lar bu gruba dâhildir. MTV tek bantta ışıma yaparken spektral birden fazla bantta ışıma yapabilmektedir. Aerodinamik flare platform hareketini taklit etmek amaçlı kanatçığa sahipken; kinematik flare hem kanatçığa hem de küçük roket motoruna sahiptir. Bu sayede platforma daha çok benzemektedir.

Piroforik işaret fişekleri, çok hızlı bir şekilde oksitlenen (paslanan), ısı üreten ve daha sonra paslanmış metal döküntü olarak yere düştükçe atmosferde soğuyan küçük folyo parçaları oldukları için çok daha az görünür. Piroforik temelli flare'lar piroteknik teknolojiye göre daha gizli olmalarıyla, yangın başlatma olasılıklarının daha düşük olmasıyla ve çift bantta arama yapabilen taşınabilir hava savunma sistemi olan MANPAD'lere karşı daha etkili bir spektral imza üretmeleri bakımından avantajlara sahiptir. Piroforik yakıtların alevleri, yaklaşık bir metreden daha az olan MTV alevlerine kıyasla birkaç metre boyutuna da ulaşabilir. Özel Malzeme Tuzakları sınıfına ait olan flare'lar bu gruba dâhildir.

Çizelge 2.1. Flare türlerinin karşılaştırması

Özellik	Piroforik Flare	Piroteknik Flare
Tutuşma Mekanizması	Hava ile temasta otomatik tutuşma	Harici bir ateşleme kaynağı ile tutuşma
Kullanım Alanı	Füze yanıtma (askeri)	Gece görüşü, yer tespiti, aydınlatma, füze yanıtma (Askeri ve sivil)
Malzeme	Piroforik metaller (ör. demir sülfür)	Yanıcı metaller ve oksitleyiciler
Avantaj/Dezavantaj	Hızlı ve kendiliğinden reaksiyon/kısa süreli yanma	Kontrollü ve daha uzun süreli yanma/harici ateşlenme

2.3. Gemi Karşıtı Füzelere

Gemilere ve büyük botlara karşı kullanılmak üzere tasarlanmış güdümlü füzelere gemi savar füzesi denir. Ülkelerin kendilerine özgü geliştirdiği ve kullandığı gemi savar füzeleri vardır.

Bu füzelerin güdüm sistemleri, menzilleri, ağırlıkları, uzunlukları, hassaslıkları, hedef takibi, vuruş hata payları, atıldıkları platformlar/sistemler vb. gibi özellikleri farklılık göstermektedir. Gelişen teknolojiye, rekabet ortamından ve denizlere hâkimiyet kurmanın öneminden dolayı gün geçtikçe bu füzeler güçlenmiş ve gelişmiştir. Tespit edilip önlenmesi güç olan bu füzeler deniz savunma sistemleri için zorluklar teşkil etmektedir. Bu yüzden karşı tedbir sistemleri de kendini yenilemek zorunda kalmıştır. Optik karşı tedbirlerin tarihini özetleyen ve sürekli gelişen füze tehditlerine karşı koymak için ortaya çıkan karşı tedbir teknolojisindeki gelişmeleri KÖ arayıcılarına sahip füzelerle birlikte ayrıntılarıyla anlatan çalışmalar bu durumu özetlemektedir [36, 57, 58]. Gemiden, karadan, kara aracından, denizaltıdan, uçaktan ve helikopterden olmak üzere çeşitli silah sistemlerinden fırlatılabilmektedirler. Uygun olan durumlarda “yüzeyden yüze füze” kavramı da tercih edilmektedir. Çok uzun menzile (~250 km) sahip gemi savar füzeler genellikle gemi savar seyir füzeleri denilmektedir. Bazı ülkeler ayrıca benzersiz özellikler içeren gemi savar balistik füzeler geliştirmektedir. Denizdeki hareketli bir hedefe angajman gerçekleştirmeyi sağlayan güdüm sistemi, manevra kabiliyeti ve yüksek hız bu özellikler arasında bulunmaktadır. Bu füzelerin yüksek hızları, daha yavaş hareket eden seyir füzelerine veya diğer gemi savar füzelere kıyasla önlenmelerini daha zor hale getirdiğinden, deniz savunma sistemleri için önemli zorluklar teşkil etmektedir.

Çoğu gemi savar füzesi, radardan ve kızılötesi tespitlerden kaçınmak ve hedefe yaklaşırken vurulma olasılığını azaltmak için kullandıkları literatürde “sea-skimming” olarak geçen deniz sıyrma tekniğine sahiptir. Sahip olunan bu yetenek hızlı manevra kabiliyetini de beraberinde getirmektedir. Tespit edilmelerini önlemek için bu füzelerden mümkün olan en erken zamanda su yüzeyine yakın hareket etmeleri beklenmektedir. Bu özelliğe sahip gemi savar füzeler, pratik olarak elde edilebilecek en alçaktan uçmaya çalışırlar. Bu mesafe neredeyse her zaman 2 metreye (6 ft) yakın ve sıklıkla 50 metrenin (150 ft) altındadır. Saldırı altındayken, denizden geçen füzeler bir savaş gemisi tarafından ancak ufukta görüldükten sonra (gemiden yaklaşık 28 ila 46 km uzakta) tespit edebilir ve bu da yaklaşık 25 ila 60 saniyelik bir uyarı süresi sağlar [59]. Ufkun altında kalma süresini artıran tespit edilme menzilini azaltan bu durum, hem füzelerin tespit edilmesinin zor olduğu hem de füze tehdidinin fark edilmesinden sonra uygulanacak karşı tedbir karar süresinin çok az olduğu anlamına gelmektedir. Bu özelliğin getirdiği bahsedilen tüm bu avantajların yanında dezavantajlar da mevcuttur. Hava koşulları, hırçın dalgalar, yazılım hataları vb. sebeplerden ötürü füze su çarpması ve fazla maliyet bunlara örnek verilebilir. Ayrıca hedefi bulma

zorluğunu da artırmaktadır. Çünkü hedefin füzeyi tespit etmesini engelleyen çoğu prensip füzenin de hedefi tespit etmesini engellemektedir. Bu tekniğin uygulanabilirliği ve başarısı arayıcı başlığın gelişmişliğine, füze radar kesit alanı ve kızılötesi izine göre değişmektedir.

Füzeler, hedefin konumunu belirlemek ve takip etmek için güdüm sistemleri ve seyrüsefer (navigasyon) sistemlerini kullanırlar. Seyrüsefer sistemleri, füzenin "nerede olduğunu ve nereye gitmesi gerektiğini" belirlerken, güdüm sistemleri bu bilgiyi kullanarak füzenin "nasıl gideceğini ve doğru rotada kalmasını" sağlar. Bu iki sistem genellikle entegre bir şekilde çalışır; seyrüsefer sistemleri olmadan güdüm sistemleri etkili şekilde çalışamaz. Genellikle ataletsel güdüm ve aktif radar güdüm birçok gemi savar füzelerinde bir arada kullanılır. Diğer taraftan, bir geminin yaydığı ısıyı takip etmek için kızılötesi güdüm kullananlar da vardır. Gemi karşıtı füzeler RF ve KÖ güdümü ayrı ayrı kullanabilirken her iki güdüm sistemini bir arada da kullanabilmektedir. Ayrıca gemi savar füzelerin tüm yol boyunca bir kablo yardımıyla radyo komutuyla yönlendirilmesi de mümkündür.

2.3.1. Güdüm sistemleri

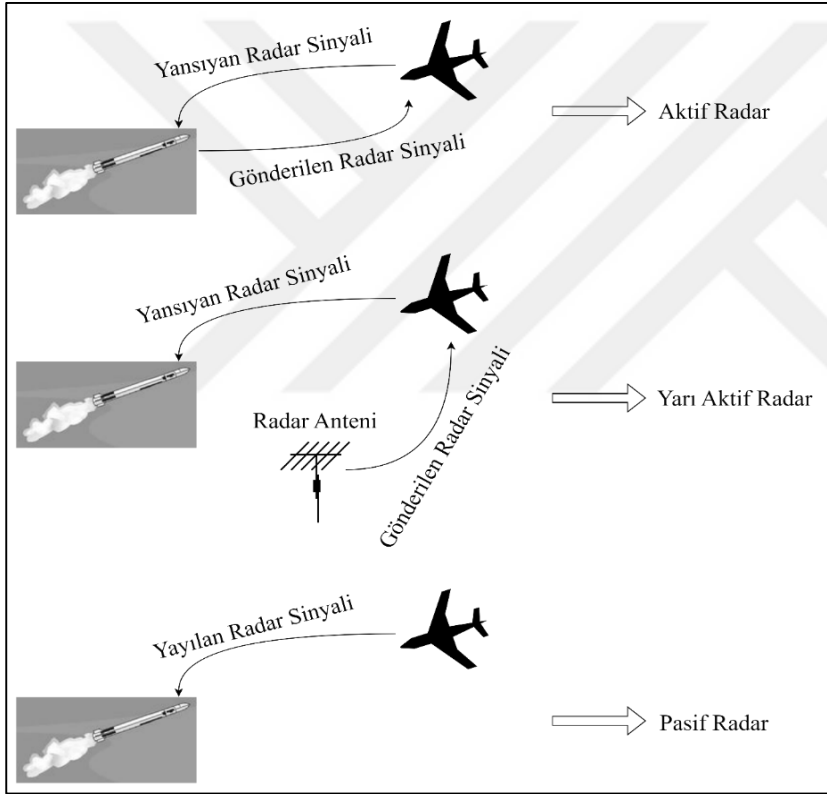
Gemi savar füzeler hedef takip güdümü (ing. homing guidance), komuta güdüm ve atalet güdüm sistemlerine sahip olabilmektedir. Hedef takip güdümü RF ve KÖ güdümlerini içermektedir. RF güdümlü füzeler radar sinyallerini takip ederken, KÖ güdümlü füzeler ısıyı takip etmektedir. Her güdüm isteminin kendine ait avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır.

Hedef takip güdümü

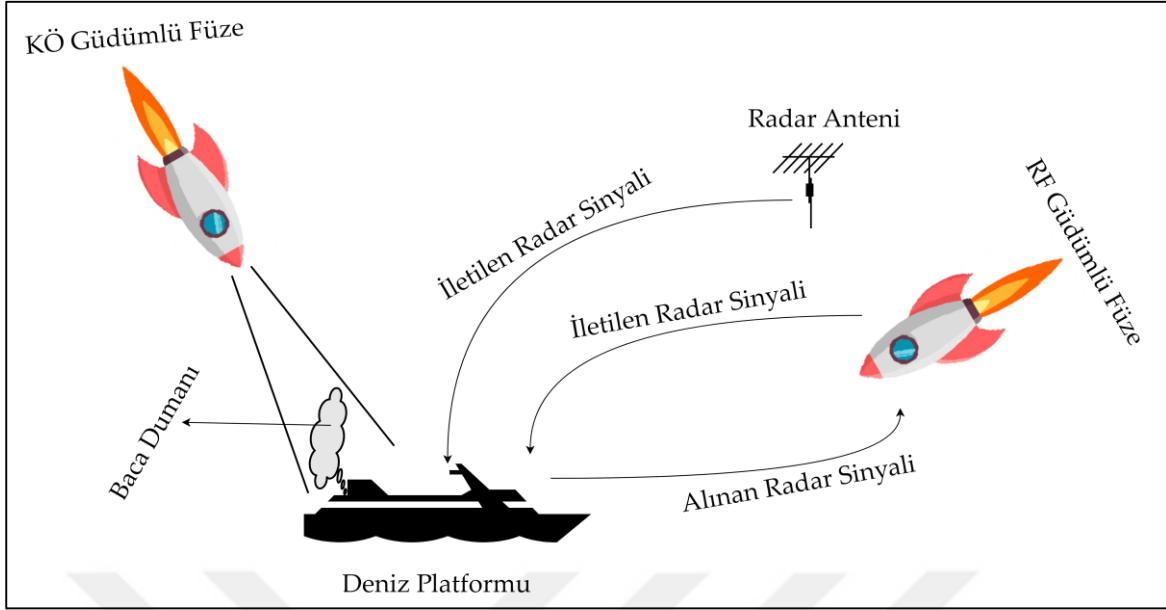
Hedef takip güdümü, füzenin kendi sensörlerini kullanarak hedefi tespit ettiği ve takip ettiği bir güdüm çeşididir. Füze, hedefe doğru bağımsız bir şekilde yönelir. Karmaşık ve modern füzeler de tercih edilmektedir. Aktif, yarı aktif ve pasif olmak üzere üç alt kategoriye ayrılmaktadır.

Radarlar elektromanyetik (radyo frekansı) sinyalleri gönderip, geri yansıyan sinyalleri toplayarak hedef tespiti yaparlar. Tam olarak aynı bu şekilde füzelerin kendi yayımladıkları radar sinyalleriyle hedefi tespit etmelerine aktif güdüm denilmektedir. Gemi savar füzelerde en çok tercih edilen güdüm yöntemidir. Füzenin, harici bir kaynak tarafından hedefe

gönderilen sinyallerin yansımasını takip ettiği güdüm yapısı da yarı aktif güdümdür. Harici radar göndericisinden hedefe radar sinyalinin gönderilmesi yoluyla füzenin yansıyan sinyalleri toplayarak takip etmesi yarı aktif radar güdümüne örnek verilebilirken; lazer işaretleyici tarafından hedefe tutulan lazer ışımının yansımasını füzenin takip etmesi lazer güdümüne örnektir. Bu da yarı aktif güdümün alt başlığıdır. Hedef üzerine gönderilen hiçbir sinyal olmaksızın hedefin kendi yaydığı enerji (radyo sinyali, ısı) ve ses dalgalarının algılanıp takip edilmesi pasif güdüm tipidir. Dış etmenler (atmosfer, güneş, nozul, vb.) tarafından hedef üzerinde oluşan kızılötesi ışımaların algılanıp takip edildiği kızılötesi güdüm sistemi de bu kategoridedir.



Şekil 2.9. Radar güdüm tipleri



Şekil 2.10. KÖ ve RF güdüm gösterimi

Komuta güdüm

Füzenin harici sistem veya bir operatör tarafından dışardan sürekli komutlar verilmesi sonucu füzenin takip ve kontrol edildiği güdüm yöntemidir. Bu takip ve kontrol, fırlatma bölgesinde operatör veya harici sistem tarafından radar, optik aletler veya füzede yer alan kamera sayesinde aktarılan televizyon görüntülerinden biriyle gerçekleşir. Komuta güdüm sistemlerinin önemli görülen avantajlarından biri, füzenin üzerinde çok az sayıda güdüm ekipmanı bulundurmasıdır. Kontrol sistemi ve füze arasında sürekli veri bağlantısı mevcuttur. Füzeye tüm komutlar veri bağı linki üzerinden iletilmektedir. Kontrol sistemine iletilen füzenin anlık pozisyonları, harici sistem veya operatör tarafından düzeltilerek füzeye iletimi sağlanır. Eski nesil füzelerde ve basit angajman senaryolarında sıklıkla kullanılmaktadır. Füze üzerinde yer alan sensörlerin varlığından ve gelişiminden sonra bu tip güdüm kullanımı azalmıştır.

Atalet güdüm sistemi

Atalet güdüm sistemi, füzenin içindeki ivmeölçerler ve jiroskoplar yardımıyla hareket ve yön bilgilerini kullanarak füzeyi hedefe yönlendiren bir sistemdir. İvmeölçerler doğrusal hareketleri jiroskoplar ise açısal hareketleri ölçmektedir. Ölçülen verilerin kullanımı ile füzenin konumu, yönü ve hızı sürekli olarak hesaplanmaktadır. Belirlenen rotanın dışına

çıkıldığında atalet sistemi komutlar göndererek düzeltmeler yapar ve füzenin rotaya oturması sağlanmış olur. Bu düzeltme işlemini yaparken küresel konumlandırma sistemi (ing. GPS: Global Positioning System) ile birlikte çalışır ve hataları minimuma indirir. Bu güdüm sistemi harici sinyallere ihtiyaç duymadığından karıştırma gibi elektronik karşı tedbirlere karşı dirençlidir.

2.3.2. Seyrüsefer (Navigasyon) sistemleri

Seyrüsefer (navigasyon) sistemleri ile güdüm sistemleri birbirine bağlı kavramlardır. Füzenin konumunu ve hedefin yerini tespit edip bu bilgilerin güdüm sistemine iletilmesinden sorumlu sistemlerdir. Yani füze için uygun rotanın hesaplanmasında rol alırlar. Güdüm sistemlerine yardımcı olan bu sistemler ataletsel navigasyon sistemi (ing. INS: Inertial Navigation System), küresel konumlandırma sistemi (ing. GPS: Global Positioning System), radar altimetre ve barometrik altimetre olmak üzere dört alt başlık altında toplanmaktadır.

Ataletsel navigasyon sistemi (INS)

INS, jireskopları ve ivmeölçerleri kullanarak elde edilen hız, konum ve ivme verilerini işleyerek füzenin yönlendirilmesini sağlayan sistemdir. Ayrıca Bölüm 2.3.1’de de anlatıldığı üzere güdüm sistemi olarak da geçmektedir. INS sisteminde ivmeölçerler x, y ve z eksenlerinde füzenin hızındaki değişiklikleri ölçmektedir. Jiroskoplar tarafından ise yine x, y ve z eksenlerinde referans yöne göre yönelme açıları ve yönelme hızları ölçülmektedir. Elde edilen bu veriler sistemin işlem biriminde işlenir ve uçuş sisteminin bir parçası olan navigasyon birimine aktarılır. Navigasyon birimi ise ateşlemeden önce füzeye yüklenmiş rota ve uzaklık bilgileri ışığında uçuş bilgisayarına yer-yön bilgisi sağlar. INS sistemleri 3 adet ivmeölçer ve 3 adet jiroskop içermektedir.

Küresel konumlandırma sistemi (GPS)

GPS, bilindiği üzere küresel konumlandırma sistemidir. Uydulardan alınan sinyallerle konum ve yön tespiti yapılmasını sağladığından uydu tabanlı radyonavigasyon sistemi olarak tariflenmektedir. Temel çalışma prensibi, Dünya yörüngesi üzerinde bulunan uydu

ağını kullanarak yeryüzündeki herhangi bir konumu uydular arasındaki mesafeyi ölçerek, kesin olarak belirlemek üzerinedir.

Radar altimetre

Füzenin uçtuğu arazi veya deniz yüzeyine göre eş zamanlı olarak irtifasının hesaplanmasını sağlayan seyrüsefer sistemine radar ya da radyo altimetre denilmektedir. Yeryüzüne gönderilen radyo dalgalarının geri toplanma süresine dayalı olarak füzenin irtifası hesaplanmaktadır.

Barometrik altimetre

Barometrik altimetre de füze içerisinde yer alan barometrik sensörlerden alınan atmosfer basınç değerlerine göre füzenin irtifasını belirlemektedir. Barometrik altimetreler füzelerin sadece deniz seviyesine göre olan irtifasını çıktı olarak üretirler.

Çizelge 2.2. Seyrüsefer ve güdüm sistemlerinin karşılaştırması

Özellik	Seyrüsefer Sistemi	Güdüm Sistemi
Amaç	Füzenin konumunu ve rotasını belirlemek	Füze hareketini kontrol etmek ve yönlendirmek
Girdi Parametresi	Harita, GPS, radar verileri	Seyrüsefer ve sensör verileri
Çıktı Parametresi	Konum, hız, yön ve rota bilgileri	Yönlendirme komutları (ör. kanat açısı)



3. MATERYAL VE METOT

Materyal ve metot bölümünde, makine öğrenmesi yöntemi kullanarak deniz platformlarında yapay zekâ ile karşı tedbir belirlemek için bu çalışma kapsamında kullanılan veri setlerinin elde edilme ve hedeflenen parametrelerin bulunmasına ilişkin modelleme süreci hakkında bilgi verilecektir.

3.1. Simülasyon

Bir platforma füze saldırısı gerçekleştiği zaman çözüm için çok kısıtlı zaman vardır. Operasyon esnasında çözüm bulmakla vakit kaybetmemek için daha önceden elde edilmiş çözümleri kullanmak platforma zaman kazandıracaktır. Bu sebeple, olabilecek tüm senaryolar önceden düşünülmeli ve bunlara yönelik simülasyonlar yapılarak veriler toplanmalıdır. İdeal durum her ne kadar bunu işaret etse de operasyon esnasında karar verilmesini gerektiren senaryolar da oluşabilmektedir.

Bu amaç dahilinde Çizelge 3.1’de yer alan girdi parametreleri ve değerleri kullanılarak bir dizi angajman senaryosu belirlenmiş ve karşı tedbir hesaplama algoritması içeren bir simülâtörde bu senaryolar koşturulmuştur.

Çizelge 3.1. Senaryo girdi parametrelerine ait bilgiler

Girdi Parametresi	Değer Aralığı	Birim
Tehdit ID (I_T)	[1:1:6]	-
Tehdit Mesafesi (R_T)	0: bilinmiyor, 1: biliniyor	-
Tehdit Açısı (Θ_T)	[0:10:360)	derece
Gemi Hızı (V_G)	[10:5:20)	knot
Rüzgar Hızı (V_R)	[3:5:25)	knot
Rüzgar Yönü (D_R)	[0:20:360)	derece

Simülâtör, gemi modeli, decoy modeli ve füze modeli olmak üzere arka planda üç farklı model ile çalışmaktadır. Gemi modelinde gemi fiziksel ölçüleri, atıcı sayıları ve konumları,

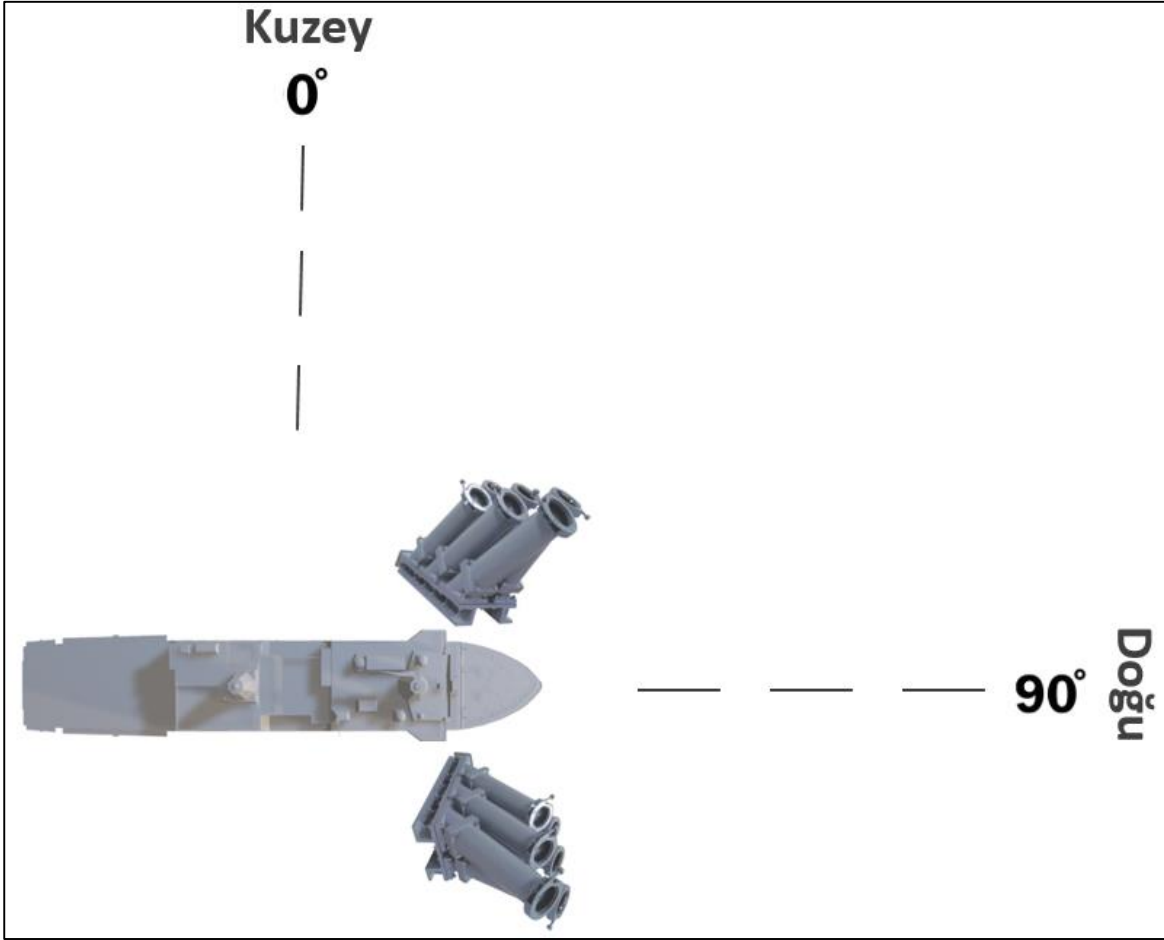
atıcılardaki tüplerin açıları ve gemi RKA değeri olmak üzere gemiye ait bilgiler; decoy modelinde chaff ve flare mühimmatlarına ait bilgiler; füze modelinde ise olası tehdit unsurlarına ait arayıcı başlık tipi olmak üzere detaylı bilgiler bulunmaktadır. Bu simülatör ile elde edilecek verilerin eğitilmesi sonucu oluşacak yapay zekâ modelinin, bu üç modelin görevlerini yerine getirmesi amaçlanmaktadır.

Bu üç model dışında, her bir olası simülasyon senaryosu, Çizelge 3.1’de belirtilen parametreleri kapsamaktadır. Çevreler faktörler de angajman senaryosunun gidişatını etkilemektedir. Rüzgâr atılan decoy’lar üzerinde etki oluşturan önemli bir faktördür. Rüzgâr yönü doğrultusunda atılan bir chaff, platformdan daha kolay ve hızlı uzaklaştırılabilir. Bu da füzenin hedeften sapmasına yardımcı olacaktır.

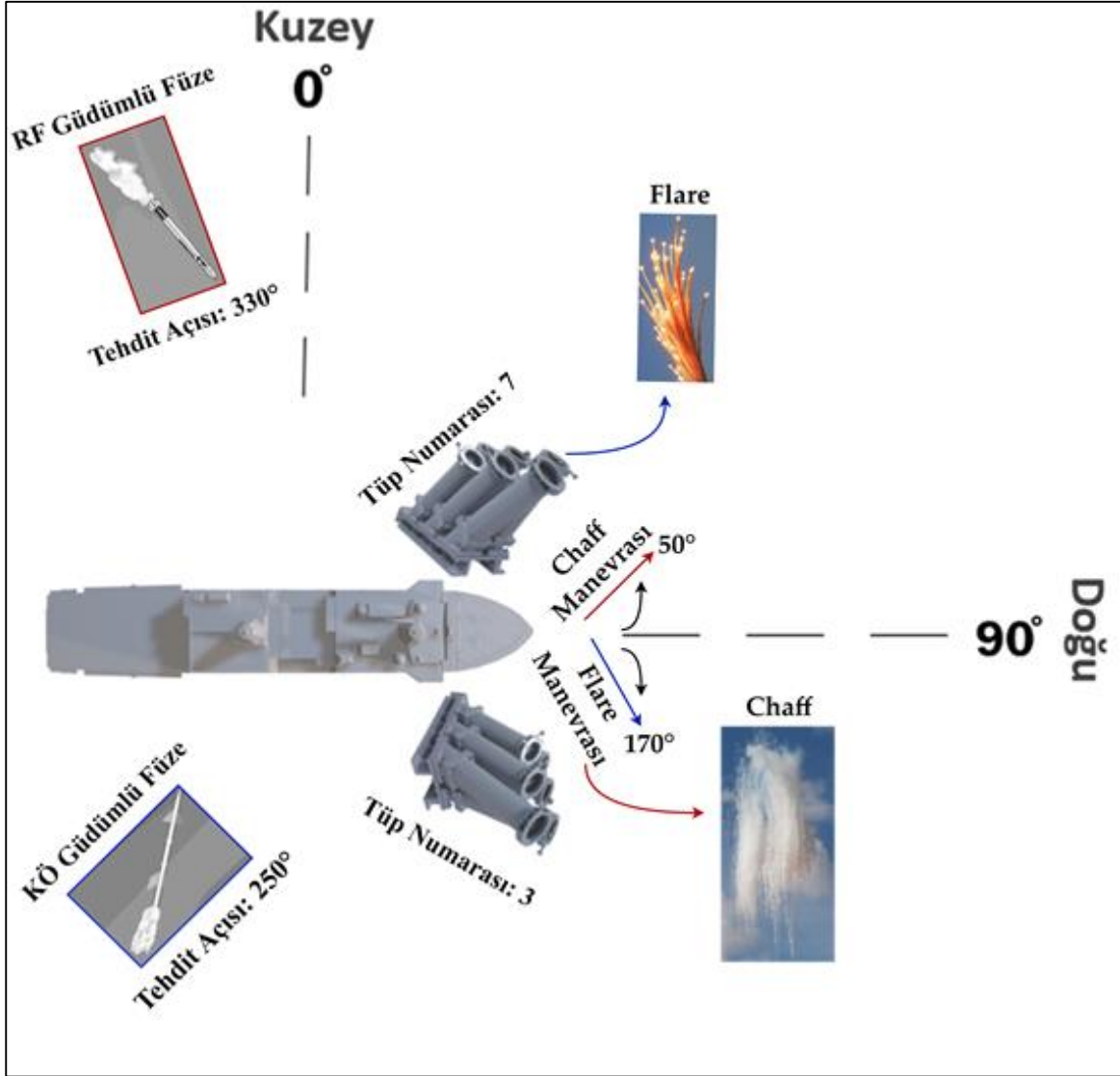
Kullanılan üç model ve bahsedilen diğer etmenler bir araya gelerek etkileşime girer. Füzenin yanılmasını sağlayacak karşı tedbir stratejini üretirler. KÖ arayıcı başlıklı füzeler için platformun KÖ imzasından daha yüksek bir sıcaklıktaki flare mühimmatı yanılmayı sağlarken; RF güdümlü füzeler için platform radar kesit alanından (RKA) daha büyük ve yoğun bir chaff bulutu yanılmayı sağlamaktadır. Karşı tedbir atım ve platform manevra çözümlerini akışta anlatılan modellerin ve tüm parametrelerin yerine makine öğrenme modelinin üstlenmesi beklenmektedir.

Simülasyonda koşulan senaryolarda KÖ ve RF güdüme sahip altı farklı tehdit ele alınmıştır. Tehditler platform eksenini 360° kapsayacak şekilde kurgulanmıştır. Hassas bir şekilde tüm açılar dâhil edilmese de artış aralıkları 10° olacak şekilde az belirlenmiştir. Tehdit açısı değişken unsur olduğundan gemi rotası doğu yönünde olacak şekilde 90°’de sabit tutulmuştur.

Senaryolarda ele alınan gemi platformu, sağ ve sol önde olmak üzere iki adet atıcıya sahiptir. Her atıcının altı adet tüp içerdiği düşünüldüğünde, karşı tedbir atımının yapılabileceği toplam on iki tane tüp mevcuttur. İlk altı tüp sağ önde, diğer altı tüp sol önde yer almaktadır. Atıcıların platform üzerindeki yerleşimleri ve senaryolar kapsamındaki gemi rotası gösterimi Şekil 3.1’de yer almaktadır. Şekil 3.2’de ise örnek bir chaff/flare senaryo betimlemesi yapılmaktadır. Farklı açılardan gelen RF ve KÖ güdümlü füze tehditlerine karşı yapılan chaff/flare atım yönleri, tüp numaraları ve gemi manevrası gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Gemi rotası ve gemi lançer konfigürasyonu



Şekil 3.2. Atım ve manevra senaryosu örneği

Simülasyon koşulları sonucunda elde edilen senaryo çıktı parametreleri Çizelge 3.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 3.2. Senaryo çıktı parametrelerine ait bilgiler

Çıktı Parametresi	Birim
Iskalama Mesafesi (IM)	metre
Gemi Rotası (D' _G)	derece
Gemi Hızı (V' _G)	knot
Tüp Numarası (N _T)	-

3.2. Veri Seti

Belirlenen senaryoların simülasyon ortamında koşturulması sonucunda 77 760 tane veri toplanmıştır. O anki angajman ortamı değerlendirildiğinde her senaryoya karşın çözüm oluşmayabilir. Şekil 3.3'te yer alan çözüm var ve çözüm yok bilgisini içeren veri dağılımı grafiği istatistiksel olarak incelendiğinde koşturulan senaryoların çoğuna çözüm bulunarak 74 197 tane çözüme sahip senaryonun elde edildiği gürölmektedir. Simülasyon sonucunda elde edilen bu veri sayısı makine öğrenmesi için gayet yeterlidir.

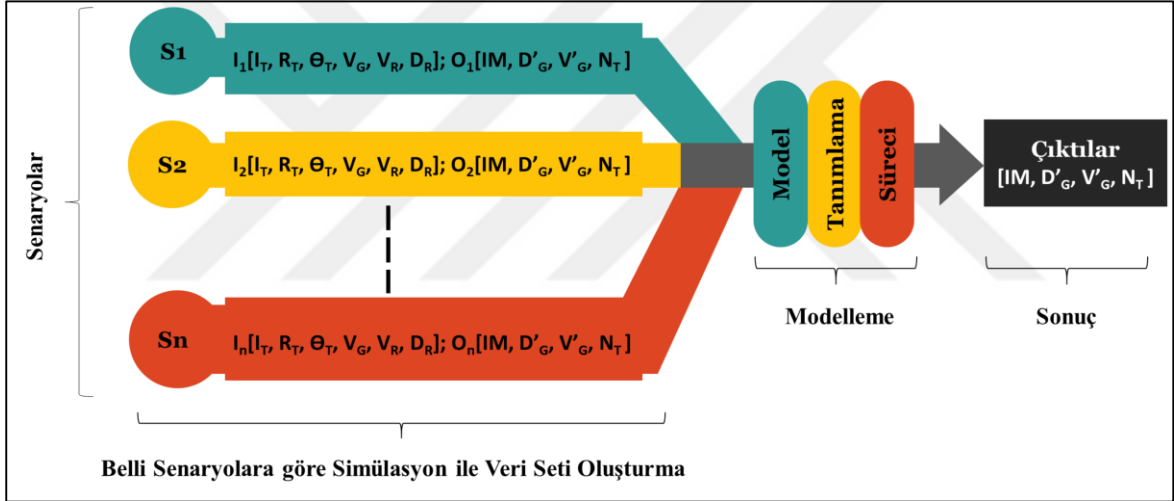


Şekil 3.3. Senaryo sonuçlarının çözüm bilgi dağılımı

Çizelge 3.1'de gsterilen girdi parametreleri kullanılarak izelge 3.2'deki hedef değerlerin bulunması makine öğrenmesi algoritmasıyla mümkün olacaktır. Girdi parametreleri ve onlara karşılık oluşan çıktı parametrelerin kullanımıyla makine öğrenme modeli oluşturulacaktır. Modelin buradaki görevi, simülatörün bulduğu çıktı parametre değerlerini daha doğru ve hızlı Şekilde elde etmeyi sağlamaktır. Bölüm 3.3'te, elde edilen mevcut veri setini kullanarak yapılan modellemenin aşamaları hakkında bilgi verilmektedir.

3.3. Modelleme

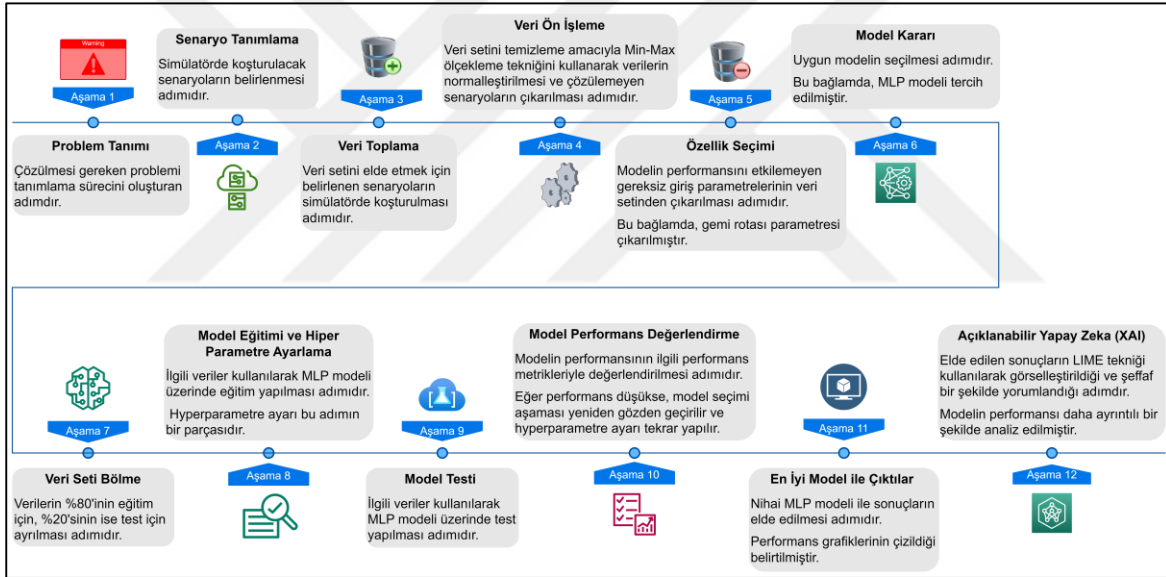
Tehdit karşısındaki bir geminin en hızlı şekilde kaçış tedbir atım ve manevra kararı vermesini sağlayan makine öğrenme modelini oluşturmak, bu çalışmanın amacını ortaya koymaktadır. Bu tez çalışması kapsamında bahsedilen problemin çözümü için makine öğrenme modeli olan Çok Katmanlı Algılayıcı (ing. MLP: Multilayer Perceptron) yapısı tercih edilmiştir. MLP, sınıflandırma ve regresyon problemlerinde yaygın olarak kullanılan bir makine öğrenimi modelidir [60, 61]. Bu kavram ve bu kavramın temelini oluşturan yapay sinir ağları hakkında alt başlıklarda bilgi verilmiştir. Simülasyon ve veri seti oluşturulduktan sonra gerekli modelleme yapılarak istenilen hedef parametrelerin tahmin edilmesi sağlanmış olacaktır. Tüm sürecin akış diyagramı Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Problem çözümü için izlenen aşamalar

Problem tanımından istenilen çıktılarının bulunması sürecini özellikle de modellemenin yapıldığı aşamayı biraz daha detaylı inceleyebileceğimiz akış diyagramı da Şekil 3.5'te verilmiştir.

%20'si test için ayrılmıştır. Veriler hazır hale geldikten sonra uygun bir model seçilerek model üzerinde ilgili verilerle eğitim yapılmıştır. Seçilen MLP mimarisinde, her hedeflenen çıktı parametresi için katmanlar ve katmandaki nöronların uygun yapılandırması seçilmiştir. Performansın en iyi ölçüsü, en az sayıda katman ve nörona sahip olandır çünkü bu durum model çalışma hızını da olumlu yönde etkilemektedir. Performans açısından uygun parametreler belirlenerek tahminler yapılmıştır. Tahminler sonucunda doğruluk az veya hata fazla ise karar verilen modele tekrar dönülerek inceleme yapılmıştır, model parametreleri gözden geçirilmiştir. Yapılan tahminlerde istenilen performans elde edilmesiyle nihai model oluşmuş ve ihtiyaç duyulan hedef parametreler elde edilmiştir. Veri ön işleme aşamasından sonraki süreç Şekil 3.5'te yer alan sağ taraftaki diyagram ile daha detaylı bir şekilde gösterilmiştir.



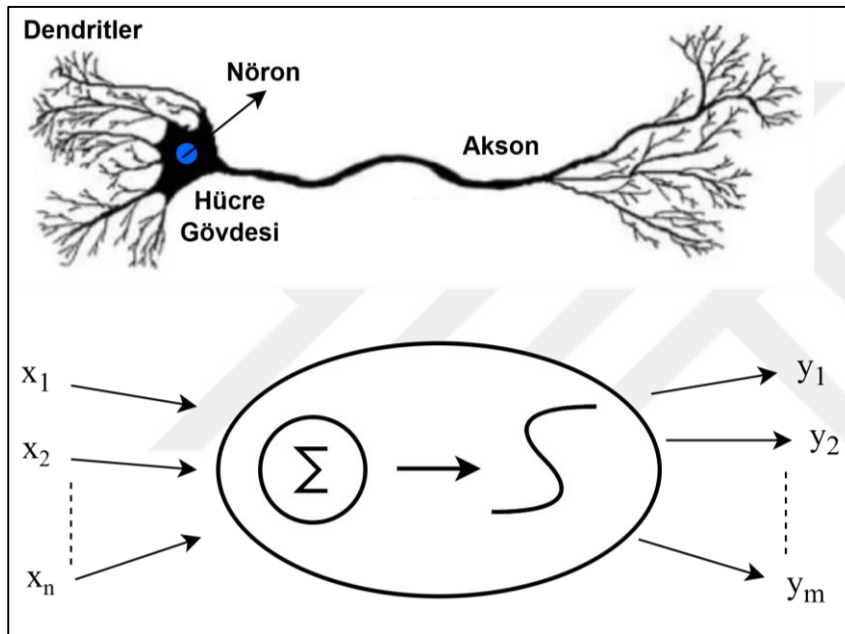
Şekil 3.6. Problem çözümü için yürütülen aşamaların adım adım akışı

Şekil 3.5'te sunulan aşamalar, Şekil 3.6'da adım adım ayrıntılı olarak ele alınmış ve her adımda gerçekleştirilen işlemler detaylandırılmıştır. Tüm süreç, başlangıçtan sona kadar ayrıntılı bir şekilde açıklanacak şekilde kapsamlı bir şekilde özetlenmiştir.

MLP mimarisinin detaylarına yer veren çalışma örneği bulunmakta ve bir sonraki alt başlıklarda kısaca değinilmektedir [62]. Ayrıca, MLP kavramı ve bu kavramın temelini oluşturan yapay sinir ağları hakkında alt başlıklarda detaylı bilgiler verilmiştir.

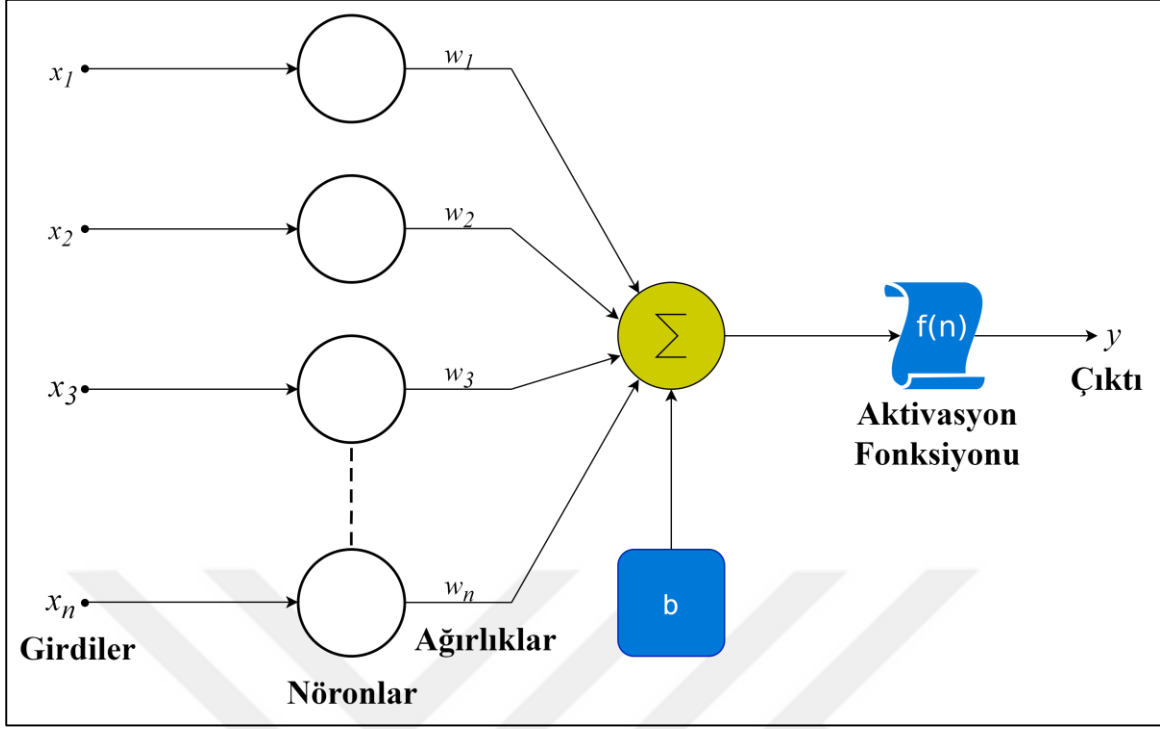
3.3.1. Yapay sinir ağı (ANN)

Yapay sinir ağı (ing. ANN: Artificial Neural Network), insan beynindeki sinir hücrelerinin çalışmasından, bilgi işleme teknolojisinden esinlenilerek geliştirilmiş bir yapıdır. İnsan beyninin özelliği olan öğrenme mekanizmasının basit düzeyde adeta simüle edilmiş hali olarak karşımıza çıkmaktadır. Yapay sinir ağı, insan beyni gibi girdiler, işlemler, çıktılardan oluşmaktadır. Beyin sinir ağ yapısı ile yapay zekâ sistemi arasındaki benzerlik Şekil 3.7’de yer almaktadır.



Şekil 3.7. Yapay sinir ağı ile insan beyninin benzerliği

Bu sinir ağı özellikle makine öğrenmesi olmak üzere yapay zekânın önemli bir parçasıdır. Giriş ve çıkış değerleri arasındaki karmaşık ilişkileri modellemek amacıyla kullanılmaktadır. Bir sinir ağı, katmanlar halinde düzenlenmiş birbirine bağlı birimler içerir. Bu birimler nöron olarak adlandırılmaktadır. Giriş sinyallerini alan her bir nöron, bir aktivasyon fonksiyonu aracılığıyla bu sinyaller üzerinde işlem yapar ve sonuçları ağıdaki diğer nöronlara iletmek üzere çıkış sinyali olarak üretir [63]. Girdi ve çıktı olmak üzere Şekil 3.8’de görülen iki katmana sahip en basit sinir ağ yapılarına "algılayıcı (ing. perceptron)" adı verilmektedir. Algılayıcı, derin öğrenmenin temel yapı taşlarından biri olarak kabul edilir ve günümüzdeki çok katmanlı sinir ağlarının temelini oluşturmaktadır. Gizli katmana sahip olmamalarından ve eğitilebilecek tek bir yapay sinir hücresinden oluşmasından dolayı tek katmanlı sinir ağı olarak ifade edilmektedirler.



Şekil 3.8. Algılayıcı adı verilen tek katmanlı basit bir sinir ağı modeli

Birden fazla girdi alabilen algılayıcı bunlardan tek bir çıktı üretir. Ağırlıklarıyla çarpılan girdilerle lineer kombinasyon oluşturulur. Ardından, bu kombinasyona opsiyonel olan ön yargı (ing. bias) değeri eklenir. Bu değer öğrenmeyi güçlendirmek ve aktivasyon eşliğini belirlemek için kullanılmaktadır. Son aşamada, genellikle doğrusal olmayan bir aktivasyon fonksiyonu aracılığıyla çıkış elde edilir. Bu sayede çıktı hesaplanmış olur. Tek katmana sahip algılayıcı için bahsedilen döngüyü özetleyen formül şu şekildedir:

$$y = f(\sum_{i=1}^n w_i x_i + b) \quad (3.2)$$

Bu formülde n , girdi sayısını; w , her nörona ait ağırlıkları (her girdinin önemi); x , girdileri; b , bias değerini; f ise aktivasyon fonksiyonunu temsil etmektedir. Bunlar birleşerek çıktı değeri olan y 'yi oluşturmaktadır. Eğer, tek katmanlı bu yapı için birden fazla çıktı varsa şu şekilde ifade edilmektedir:

$$y_k = f(\sum_{i=1}^n w_{k,i} x_i + b_k), \forall k \in 1, 2, \dots, m \quad (3.3)$$

Buradaki tek değişen parametre çıktı sayısıdır. Hangi çıktı olduğu k ile gösterilirken; kaç tane çıktı olduğu da m ile gösterilmektedir.

Yapay sinir ağlarında kullanılan aktivasyon fonksiyonları ve özellikleri alt başlıkta açıklanmıştır.

Aktivasyon fonksiyonları

Önemli bir parametre olan aktivasyon fonksiyonları için genel olarak logistic/sigmoid, relu, tanh, softmax, identity/linear ve step kullanılmaktadır. Bu fonksiyonların matematiksel formülleri sırasıyla şu şekilde ifade edilmektedir:

$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad (3.4)$$

$$f(x) = \max(0, x) \quad (3.5)$$

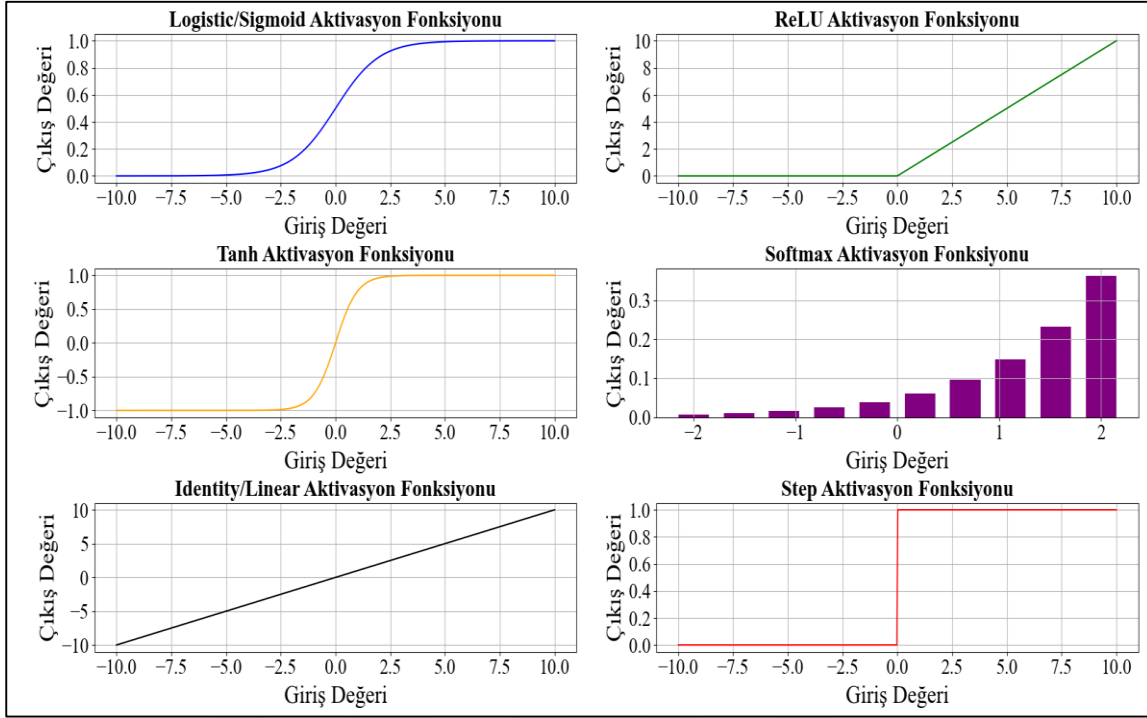
$$f(x) = \tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (3.6)$$

$$f(z_k) = \frac{e^{z_k}}{\sum_{j=1}^m e^{z_j}} \quad (3.7)$$

$$f(x) = x \quad (3.8)$$

$$f(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (3.9)$$

Verilen bu formüllere karşılık her bir aktivasyon fonksiyonlarına ait çizdirilen grafikler Şekil 3.9'da yer almaktadır.



Şekil 3.9. Aktivasyon fonksiyonlarına ait grafikler

Bu fonksiyonlar hakkında kullanım alanları ve amaçlarına yönelik genel bilgiler Çizelge 3.3'te sunulmaktadır.

Çizelge 3.3. Aktivasyon fonksiyonlarına ait bilgiler

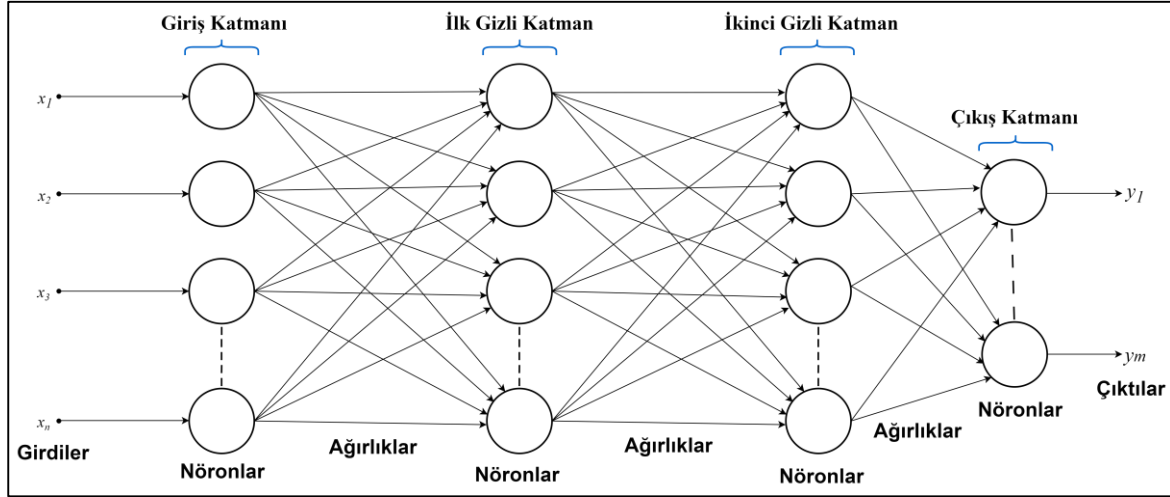
Aktivasyon Fonksiyonu	Görev ve Özellikleri
Logistic/Sigmoid	İkili sınıflandırma problemlerinde kullanılır, girdi değerlerine karşılık çıktı değerini 0 ile 1 arasında üretir. Doğrusal olmayan bir fonksiyon olması sebebiyle çok tercih edilir.
ReLU	Pozitif girdileri olduğu gibi alırken, negatif değerleri sıfırlayan bir fonksiyondur. Güçlü ve verimli olması sebebiyle yaygın kullanım alanına sahiptir.
Tanh	Genellikle gizli katmanlarda tercih edilen bu fonksiyon girdi değerlerine karşılık çıktı değerlerini -1 ile 1 arasında üretir. Sigmoid fonksiyonuna benzerdir.
Softmax	Çok sınıflı sınıflandırma problemlerinde kullanılır. Tüm çıktılarının toplamını 1 yapacak şekilde normalize eder.

Çizelge 3.3. (devam) Aktivasyon fonksiyonlarına ait bilgiler

Identity/Linear	Girdiyi olduğu gibi çıktı olarak verir. Çıktı ve girdi arasında doğrusal bir ilişki vardır. Doğrusal olmayan problemlerin çözümünde tercih edilmez.
Step	Gelen değerin belirli bir eşik değerin altında ya da üstünde olmasına göre çıktıyı 0 veya 1 olarak üretir. Genellikle tek katmanlı sinir ağlarında kullanılmaktadır.

3.3.2. Çok katmanlı algılayıcı (MLP)

Tek katmanlı algılayıcı için eşleştirme yapabilme kapasitesinin sınırlı sayıda olması sebebiyle daha fazla tercih edilen çok katmanlı sinir ağları geliştirilmiştir. Günümüzde giderek daha popüler hale gelen bu sinir ağları Çok Katmanlı Algılayıcı (ing. MLP: Multilayer Perceptron) olarak adlandırılmaktadır [64]. Makine öğrenmesinden derin öğrenmeye geçiş sürecinde arada kalmış olan bir modeldir. Derin öğrenmenin başlangıcı da diyebiliriz. Veriler yalnızca girişten çıkışa tek bir yönde iletiildiği için MLP, ileri beslemeli bir sinir ağıdır. MLP, birden fazla katman kullanarak ilişkileri daha derinlemesine öğrenme yeteneğine sahiptir. Bu da daha karmaşık problemlerin çözümüne olanak tanımaktadır. Tek katmanlı algılayıcı ile doğrusal problemler ele alınırken; geliştirilen bu yapı ile doğrusal olmayan problemlerin çözümüne imkân sağlanmaktadır. MLP yapısı; en az bir gizli katman olmak üzere giriş, gizli ve çıkış katmanlarından oluşmaktadır (bkz. Şekil 3.10). Doğrusal olmayan problemleri çözüme yeteneği gizli katmanların eklenmesi ile kazandırılmıştır [63]. Gizli katmanlar birleştirilerek toplam katman sayısı artırılabilir. İşlemler, her katmanda adım adım gerçekleştirilmektedir. Katmanlardaki nöron sayıları farklılık gösterebildiği gibi; katmanlar arasındaki ağırlık değerleri, bias değerleri ve aktivasyon fonksiyonları da farklılık gösterebilmektedir. Tüm bunlar, modelin karmaşıklığını ve performansını etkileyen parametrelerdir.



Şekil 3.10. İki gizli katmana sahip MLP yapısı

Veriler yalnızca bir yönde iletiildiği için, ileri beslemeli bir yapay sinir ağı olan MLP, en az üç düğüm katmanından oluşmaktadır (bkz. Şekil 3.10). Bu yapı, birbirine bağlı nöronlardan oluşan birçok katmandan meydana gelmektedir. Bu nöronlar, insan beyindeki karmaşık verileri öğrenmek ve anlamlı tahminlerde bulunmak için kullanılan nöronlara benzer şekilde modellenmiştir (bkz. Şekil 3.7).

MLP'nin çalışma mantığı genel olarak şu şekilde özetlenmektedir:

1. **Giriş Katmanı:** Giriş katmanı, verilerdeki bir özellik veya giriş değişkenine karşılık gelen bir veya birden fazla düğümden oluşur. Giriş verileri bu katmana iletilir ve her düğüm, giriş değerlerinin ağırlıklı toplamını hesaplar.
2. **Gizli Katmanlar:** Gizli katmandaki her düğüm, önceki katmandaki tüm düğümlerden gelen girdileri alır ve bu girdilerin ağırlıklı toplamını hesaplar. Hesaplanan değer, bir aktivasyon fonksiyonu aracılığıyla işlenerek düğümün çıktısını oluşturur. Toplam katman sayısı gizli katmanların eklenmesiyle artırılabilir.
3. **Çıkış Katmanı:** Son gizli katmandan gelen çıktılar, çıktı katmanına iletilir. Bu katmanda her düğüm, girdilerin ağırlıklı toplamını hesaplar ve elde edilen sonuçlar bir aktivasyon fonksiyonundan geçirilerek nihai tahmin veya çıktı elde edilir.

Bahsedilen bu akışı matematiksel olarak ifade etmemiz gerekirse; “Eş. 3.2” ve “Eş. 3.3”te yer alan tek katmanlı yapıdaki formülden yola çıkılarak gizli katmanlar ve çıkış katmanı için formülleri de şu şekilde elde edebiliriz.

$$h_1 = f_1(W_1x + b_1) \quad (3.10)$$

$$h_2 = f_2(W_2 h_1 + b_2) \quad (3.11)$$

$$y = f_{out}(W_3 h_2 + b_3) \quad (3.12)$$

Burada h_1 ve h_2 sırasıyla iki gizli katmandaki nöronların çıkış vektörlerini; W_1 , W_2 ve W_3 giriş katmanından başlamak üzere çıkış katmanına kadar olan katmanlar arası ağırlık matrislerini; b_1 , b_2 ve b_3 her katmandaki nöronların çıktılarının hesaplanmasında kullanılan bias vektörlerini; f_1 , f_2 ve f_{out} sırayla gizli katmanlarda ve çıkışta kullanılan aktivasyon fonksiyonlarını ifade etmektedir. Modelin başlangıç verisi olan x ise giriş değerlerini temsil etmektedir. Bu değerler ağa girdiğinde model tarafından hiç dokunulmadan ilk olarak giriş katmanından geçirilir. Giriş katmanında özel bir işlem yapılmaz; sadece veriler bir sonraki katman olan gizli katmana iletilir. Gizli katmandaki nöronlar, veriler üzerinde çeşitli işlemler gerçekleştirir ve ardından bu işlenmiş veriler, varsa bir sonraki gizli katmana aktarılır. Son olarak, veriler çıktı katmanına iletilerek nihai çıktı oluşturulur. “Eş. 3.10”, “Eş. 3.11” ve “Eş. 3.12” bir araya getirildiğinde bu nihai çıktıları içeren vektör şu şekilde gösterilebilir:

$$y = f_{out}(W_3 f_2(W_2 f_1(W_1 x + b_1) + b_2) + b_3) \quad (3.13)$$

Tüm bu süreç ve her bir adım ayrı ayrı düşünüldüğünde MLP yapısının amacını, eğitim setindeki giriş verileri ile çıktı değişkenleri arasındaki temel ilişkiyi öğrenmek ve doğru tahminler yapabilmek olarak söyleyebiliriz.



4. DENEYSEL ÇALIŞMA VE BULGULAR

Bu başlıkta tez çalışmasında her çıktı parametresine özgü tasarlanan MLP modellerinin yapısı, parametreleri, performans değerlendirme metrikleri, kullanılan deney ortamı açıklanmakta ve elde edilen deneysel sonuçlar paylaşılmaktadır.

4.1. Deney Ortamı

Tez çalışmasında geliştirilen modelin eğitimi elde edilen veri setleriyle Python programlama dili üzerinde Scikit-learn makine öğrenimi kütüphanesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Anaconda içerisinde yer alan Spyder ve Jupyter Notebook entegre geliştirme ortamları (IDE) kullanılmıştır. Veri analizi ve bilimsel hesaplamalar için NumPy ve Pandas kütüphaneleri tercih edilmiştir.

4.2. Model Mimarisi

Bu çalışmada, karmaşık problemleri çözmek için geliştirilen makine öğrenimi modellerinden biri olan MLP modeli kullanılmıştır. Oluşturulan veri seti altı farklı girdi ve dört farklı çıktı parametre içeriğine sahiptir. Yani ele alınan problemde hesaplanması gereken dört farklı parametremiz vardır. Çoklu çıktıya sahip olduğundan tahmin edilmesi hedeflenen her bir çıktı parametresi ayrı ayrı ele alınmıştır. Her bir parametre ayrı ayrı değerlendirilmiş ve farklı yapıda modeller oluşturulmuştur. Kullanılan modellerin performans ve hız açısından uygun olması da bu çalışmanın önemli bir aşamasını oluşturduğundan model seçiminde bu da dikkate alınmıştır. Bu şekilde en uygun yöntemin belirlenmesi sağlanmıştır.

Senaryoları koşturmadan önce çıktı parametrelerinin alabileceği değerlerin bilinmesi sınıflandırma problemini işaret ederken; çıktı değerinin belirsiz oluşu regresyon problemi olduğunun göstergesidir. Bu doğrultuda değerlendirildiğinde; Iskalama mesafesinin bulunması, gemi rotası ve gemi hızı kararının verilmesi için regresyon modeli tercih edilirken; tüp numarasını belirlemek için sınıflandırma modeli kullanılmıştır.

4.3. Model Parametreleri

Hedef çıktılarının tahmin edilmesinde kullanılan sınıflandırma ve regresyon modelleri oluşturulurken modele özgü parametreler belirlenmiştir. Bu belirleme yapılırken kod üzerinde denemeler yapılmış, ayarlanabilen parametreler farklı kombinasyonlarda denenmiştir. Nihayetinde her bir çıktı için performans kriteri göz önünde bulundurulmuştur. Çizelge 4.1’de tüm çıktılara ait kullanılan model parametreleri yer almaktadır.

Çizelge 4.1. Hedef çıktılara ait model parametreleri

Hedef Çıktı	Gizli Katman Nöron Sayısı	Aktivasyon Fonksiyonu	Çözücü	Maksimum İterasyon	Epok Sayısı
Iskalama Mesafesi (IM)	(500, 450, 400)	tanh	adam	529	10
Gemi Rotası (D _G)	(500, 450, 400)	tanh	adam	420	10
Gemi Hızı (V _G)	(512, 256, 128)	relu	adam	495	10
Tüp Numarası (N _T)	(450, 350, 250)	relu	adam	591	10

Model tasarımında yer alan bu parametrelere ilişkin detaylı bilgiler alt başlıklarda verilmektedir.

Gizli katman

Giriş ve çıkış katmanları arasında olan bu katman verilerin karmaşık ilişkilerinin öğrenilmesini sağlayan katmanlardır. Gelen veriyi işleyerek çıktı katmana aktarırlar. Model doğruluğunu artıran faktörlerdir. Bu tez çalışmasında 3 gizli katmanlı bir model yapısı tasarlanarak geliştirilmiştir.

Nöron

Katmanlarda yer alan bilgilerin alınması, işlenmesi ve diğer nörona aktarılmasını sağlayan birimlerdir. Beyin hücrelerinin çalışma mantığından esinlenilerek kurgulanmışlardır. Sinir ağları içinde hesaplamalar yaparak verilerin öğrenilmesinde rol alırlar. Yapılan tez

çalışmasında her gizli katmanda kullanılan nöron sayıları birbirinden farklıdır ve performans açısından verimin yüksek olabileceği şekilde kurgulanmıştır.

Aktivasyon fonksiyonu

Yapay sinir ağındaki nöronların çıktılarını belirlemeye yarayan matematiksel fonksiyonlardır. Nöronun çıktısı, girdilerden gelen değerlerin toplamının hesaplanmasıyla bulunmaktadır. Bu fonksiyon sayesinde elde edilen toplama sonucunun nasıl bir değişimden geçmesi gerektiğine karar verilmektedir. Nöronların aldığı girdi değerlerine doğrusal olmayan dönüşümler uygulanması sayesinde örüntülerin ve karmaşık ilişkilerin öğrenilmesi sağlanır.

Bu çalışmada ıskalama mesafesi ve gemi rotası hesaplamasında gizli katmanda tanh aktivasyon fonksiyonu kullanılırken; gemi hızı ve tüp numarası bulunmasında relu aktivasyon fonksiyonu tercih edilmiştir. Çıkış katmanlarında softmax aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır. Bunlar ve diğer aktivasyon fonksiyonlarına ait detaylı bilgiler Bölüm 3.3.1’de mevcuttur.

Çözücü

Adı üstünde çözücü (ing. solver) olan bu kavram, matematiksel problemlerin çözümünde kullanılan yöntem ve algoritmalarıdır. Kayıp fonksiyonunu minimize ederek model performansını artırmak ana amacıdır. Çözücüler sayesinde her iterasyonda ağırlık ve bias değerleri güncellenmektedir. Bu da modelin daha iyi tahminler yapabilmesini sağlamaktadır. Özellikle eğitim aşamasında kullanılmaktadırlar. Bu çalışma kapsamında en popüler çözücü olan adam kullanılmıştır.

Maksimum iterasyon

Algoritmanın ne kadar çalışacağını ifade eden bir kavramdır. Model, eğitim sırasında öğrenmeye maksimum iterasyon sayısına ulaşılan kadar devam eder. Eğitim sürecinde ağırlıkların kaç kez güncelleneceğine de bu değer karar verir. Maksimum iterasyon sayısına ulaşılmadan kayıp fonksiyonunda veya performans metriklerinde istenilen optimizasyon sağlanmış olursa model eğitimi erken sonlanabilir. Bu sebeple algoritmanın yetersiz

çalışması sonucunda yetersiz öğrenme veya gereğinden fazla çalışarak aşırı öğrenme olmasını önlemek için bu parametrenin ideal bir şekilde ayarlanması önemlidir. Bu ayarlama çıkan performans ve kayıp grafikleri gözlemlenerek yapılmıştır. Her model için farklı değerlere karar verilmiştir. Bu karar verilirken grafiklerin oturmuş olması baz alınmıştır.

Epok sayısı

Eğitim verisinin model tarafından kaç kez kullanılması gerektiğini belirten bir sayıdır. Model tarafından eğitim verilerinin üzerinden bir kez geçilerek öğrenmenin sağlanması bir epokun tamamlandığını göstermektedir. Her epokta farklı eğitim seti model tarafından işlenmekte ve ağırlıklar güncellenmektedir. Modelin birden fazla fit edilmesini ve her fit edilme sonucunda farklı bir test verisiyle performans hesaplanmasını sağlamaktadır. Yani ortalama performansı ölçmek için kullanılan bir parametredir. Bu sayının artmasıyla daha iyi bir öğrenme süreci başlar ve daha iyi tahminler yapılabilir. Maksimum iterasyon sayısına benzer şekilde ne çok fazla ne de az olması tercih edilmez. Az olması yetersiz öğrenme, çok olması da aşırı öğrenme problemine yol açmaktadır. Bu parametrenin ayarlanması çıkan performans ve kayıp grafikleri incelenerek yapılmıştır ve 10 değeri uygun bulunmuştur. Bu karar verilirken grafiklerin oturmuş olması dikkate alınmıştır. Epok sayısı for döngüsü ile ayarlanarak modele verilmiştir.

4.4. Açıklanabilir Yapay Zekâ (XAI)

Modellerin performansı, açıklanabilir yapay zekâ (ing. XAI: Explainable Artificial Intelligence) yöntemlerinden biri olan Local Interpretable Model-Agnostic Explanations (LIME) kullanılarak yorumlanmıştır. XAI, modellerin karar verme süreçlerini kolayca okunabilir ve anlaşılır hale getirmeyi amaçlayan bir yapay zekâ alt alanıdır, böylece performans değerlendirmesi yapılabilir. XAI, yapay zekâ modellerinin karar verme süreçlerinin arkasındaki mantığı açıklamak için kullanılan bir yaklaşımdır ve belirli kararların nasıl ve neden alındığını anlamamıza yardımcı olur. Sonuç olarak, yapay zekânın aldığı kararlar daha şeffaf hale gelir ve insanlar, yapay zekâ sistemlerini daha iyi anlayabilir. Bu, sonuçların geliştirilmesine, anlaşılmasına ve yorumlanmasına yardımcı olan bir süreçtir.

XAI algoritmaları kullanarak, yapay zekâ modellerinin çıktı değerleri, girdi değerlerine göre sayısal veya görsel olarak açıklanır. Çeşitli XAI modelleri arasında en yaygın kullanılan

yöntem LIME'dır. Bu yöntem, karmaşık yapay zekâ modellerinin nasıl kararlar aldığını anlamamıza ve güvenilirliklerini değerlendirmemize olanak tanır [65, 66]. LIME modeli, yapay zekâ kararlarının şeffaflığına odaklanır ve yorumlanabilirliğini artırır. Bu modelde, yapay zekâyâ beslenen giriş verilerinin çıkış verilerini nasıl değiştirdiği izlenerek bir açıklama sağlanır. LIME, modelden bağımsız olarak çalışır, örnek veri üzerinde bozulmalar yapar ve yeni örnekler üretir. Bu, orijinal modelin kararlarına benzer tahminler yaparak değişkenlerin tahminler üzerindeki etkisini gösterir [66, 67].

4.5. Performans Metrikleri

Bu bölümde elde edilen sonuçların yorumlanmasını sağlayan performans metriklerinden bahsedilmektedir. Performans metrikleri, modelin başarı seviyesini ölçmemizi sağlayan kavramları ifade etmektedir. Tahmin etmeye çalıştığımız parametre değerine ne kadar yakın veya uzak olduğumuzu değerlendirebilmek amacıyla bu metriklere başvurulmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında regresyon modeli için kullanılan performans ölçütleri, R^2 , Ortalama Mutlak Hata (ing. MAE: Mean Absolute Error) ve Kök Ortalama Kare Hata (ing. RMSE: Root Mean Square Error) olarak belirlenmiştir. Sınıflandırma modelinde ise, temel ölçütler olarak doğruluk (ing. accuracy), F1 skor (ing. F1 score), duyarlılık (ing. recall) ve kesinlik (ing. precision) kullanılmaktadır. Ayrıca hem regresyon hem de sınıflandırma modelinde eğitim sırasındaki hatayı gösteren kayıp fonksiyonu grafiğinden de yararlanılmıştır. Bunlara ilaveten XAI-LIME tekniği kullanımı da model performanslarını ölçmek amaçlı tercih edilmiştir. Problem çözümündeki verimin ölçülmesi için bu performans metriklerinin kullanılması uygun görülmüştür. Kullanılan performans metrikleri ve bunlar dışında kalan metrikler hakkında genel bilgilendirme alt başlıklarda yer almaktadır.

Öncelikle sınıflandırma problemlerinde kullanılan performans metriklerinden bahsedeceğiz.

Karmaşıklık matrisi

Karmaşıklık matrisi (ing. confusion matrix), sınıflandırma problemlerinde kullanılan bir matristir. Sınıflandırma sonuçlarının özet bir şekilde sunulmasını sağlar. Sınıflandırma için tanımlanan performans metrikleri bu matristeki elemanların kullanılmasıyla elde edilmiştir

[68, 69]. Barındırdığı elemanlar doğru pozitif (ing. TP: True Positive), yanlış pozitif (ing. FP: False Positive), yanlış negatif (ing. FN: False Negative) ve doğru negatif (ing. TN: True Negative) olarak sıralanabilir. TP pozitif tahminlerin doğru olduğunu, FP pozitif tahminlerin yanlış olduğunu, FN negatif tahminlerin yanlış olduğunu ve TN negatif tahminlerin doğru olduğunu ifade etmektedir.

		Gerçek Değerler	
		Pozitif (1)	Negatif (0)
Tahmin Değerleri	Pozitif (1)	TP	FP
	Negatif (0)	FN	TN

Şekil 4.1. Örnek karmaşıklık (confusion) matrisi

Doğruluk

Yapılan tüm tahminlerin doğru olma oranını yani doğru sınıflandırılma oranının ifade etmektedir. Yüksek çıkması performansla doğru orantılıdır. Matematiksel formülü de şu şekildedir:

$$\text{Doğruluk} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (4.1)$$

Duyarlılık

Pozitif değerleri doğru tahmin etme ihtimalini yani doğru sınıflandırmaların doğru tahmin edilme olasılığını yansıtmaktadır. Performans açısından yüksek çıkması iyidir. Matematiksel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$Duyarluluk = \frac{TP}{TP + FN} \quad (4.2)$$

Kesinlik

Pozitif olarak belirlenen değerlerin ne kadar doğru olduğunu yani doğru sınıflandırmaların ne kadar doğru olduğunu ölçmeye yarayan metriktir. Yüksek değere ne kadar sahipse o kadar iyidir. Matematik formülüne dökülmüş hali,

$$Kesinlik = \frac{TP}{TP + FP} \quad (4.3)$$

şeklindedir.

F1 Skor

Precision ve recall metriklerinin bir arada değerlendirildiği kavramdır. Precision ve recall değerlerinin harmonik ortalamasıdır. Ne kadar yüksek değer elde edilirse o kadar performanslı model elde edildiği anlamına gelmektedir. Dengeli bir precision ve recall istenilirse bu metrik ile değerlendirme yapılmalıdır. Bu metriğin formülü ise,

$$F1\ Skor = \frac{2 * Kesinlik * Duyarluluk}{Kesinlik + Duyarluluk} \quad (4.4)$$

olarak verilmektedir.

Şimdi de regresyon problemlerinde tercih edilen performans metriklerini açıklayacağız.

R²

Modelin ne kadar iyi bir performansa sahip olduğunu gösteren bir metriktir. 1'e ne kadar yakınsa performans o kadar yüksektir. Bu metriğin formülü,

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=0}^n (y_i(\text{gerçek}) - y_i(\text{tahmin}))^2}{\sum_{i=0}^n (y_i(\text{gerçek}) - y(\text{ortalama}))^2} \quad (4.5)$$

şeklinde verilmektedir. Denklemden yer alan n , veri boyutunu; $y_i(\text{gerçek})$, veride yer alan gerçek değeri; $y_i(\text{tahmin})$, tahmin edilmiş ilgili çıktı değerini; $y(\text{ortalama})$ ise veride yer alan ilgili çıktının ortalama değerini ifade etmektedir. Aşağıda yer alan diğer performans metrikleri için de bu tanımlamalar geçerlidir.

MAE

Tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki farkların mutlak ortalamasını ölçen bir metriktir. Hatayı ifade ettiğinden düşük olması tercih edilir, tahmin edilen değer aralığına göre yüzde olarak değerlendirilmesi daha uygundur. MAE,

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n |y_i(\text{gerçek}) - y_i(\text{tahmin})| \quad (4.6)$$

olarak hesaplanmaktadır.

MSE

Hataların karelerinin ortalamasını ölçen bir metriktir. Tahmini değerler ile gerçek değer arasındaki ortalama karesel fark olarak da ifade edilmektedir. Düşük değere sahip olması o kadar az hataya sahip anlamına gelmektedir. Tahmin edilen değer dağılımı da göz önünde bulundurulmalıdır. MSE'nin matematiksel ifade edilişi şu şekildedir:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (y_i(\text{gerçek}) - y_i(\text{tahmin}))^2 \quad (4.7)$$

RMSE

MSE'nin karekökü alınmış halidir. Bu sayede hatanın daha küçük ifade edilmesini sağlar. Model tarafından tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki ortalama farkın ölçümünü yansıtır. Modelin hedef değerleri ne kadar iyi tahmin edebildiğine dair bir izlenim yapmayı sağlar. Tahmin edilen parametrenin aldığı değer aralığına kıyaslanarak yüzde olarak bakılması daha uygundur. RMSE,

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (y_i(\text{gerçek}) - y_i(\text{tahmin}))^2} \quad (4.8)$$

şeklinde matematiksel formüle sahiptir.

4.6. Bulgular

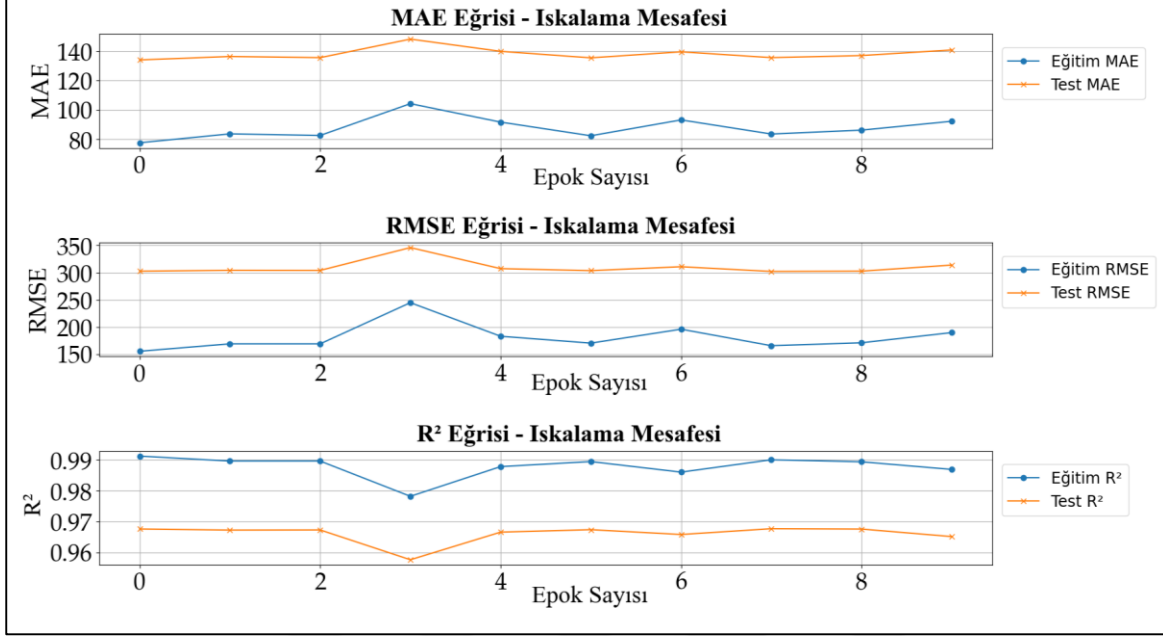
Yapılan tez çalışmasında performansı artırmaya yönelik birçok deneme yapılmıştır. Bu denemeler sonucunda her çıktı için geliştirilen modelleri değerlendirmek üzere performans metriklerinden yararlanılmıştır. Nihai regresyon ve sınıflandırma modellerinde elde edilen performans metrik değerleri Çizelge 4.2’de verilmektedir.

Çizelge 4.2. Hedef parametrelerine ait performans metriklerin değerleri

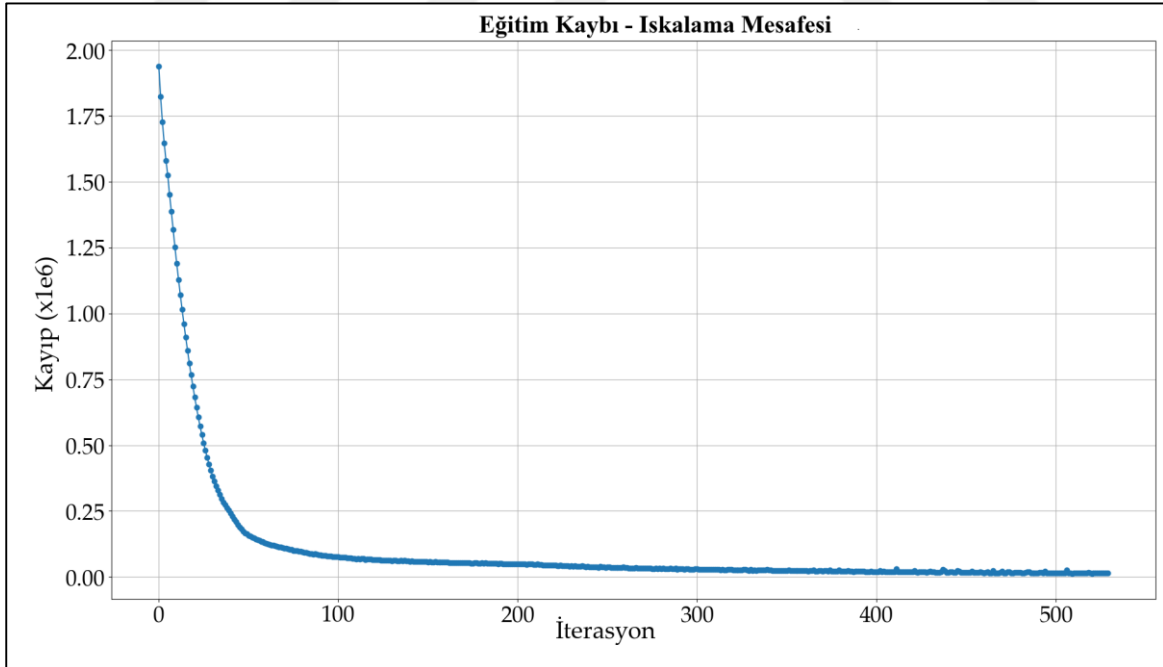
Hedef Parametre Performans Metriği	Iskalama Mesafesi (IM)	Gemi Rotası (D'G)	Gemi Hızı (V'G)	Tüp Numarası (N _T)
R ²	0,9660	0,6551	0,6671	-
MAE	138,3707	26,0161	1,0180	-
RMSE	309,7109	47,8120	1,9629	-
Doğruluk	-	-	-	%76,54
F1 Skor	-	-	-	%76,47
Kesinlik	-	-	-	%76,55
Duyarlılık	-	-	-	%76,54
Eğitim Kaybı	0,013736	304,1513	1,0960	0,2212

Performans metriklerine ve kayıp fonksiyonuna ait grafikler aşağıda sunulmaktadır. Çizelge 4.2’de yer alan performans metrikleri baz alınarak grafikler çizdirilmiştir. Kayıp fonksiyonu için de eğitim aşaması dikkate alınmıştır. Kayıp fonksiyonu hem regresyon hem de sınıflandırma problemleri için baz alınabilecek bir performans metriğidir. Şekil 4.2 ve Şekil 4.3 ıskalama mesafesi, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5 tüp numarası grafiklerini göstermektedir. Şekil

4.6 ve Şekil 4.7 gemi rotası, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9 gemi hızı olmak üzere platform manevra bilgilerine ait grafikleri sunmaktadır.



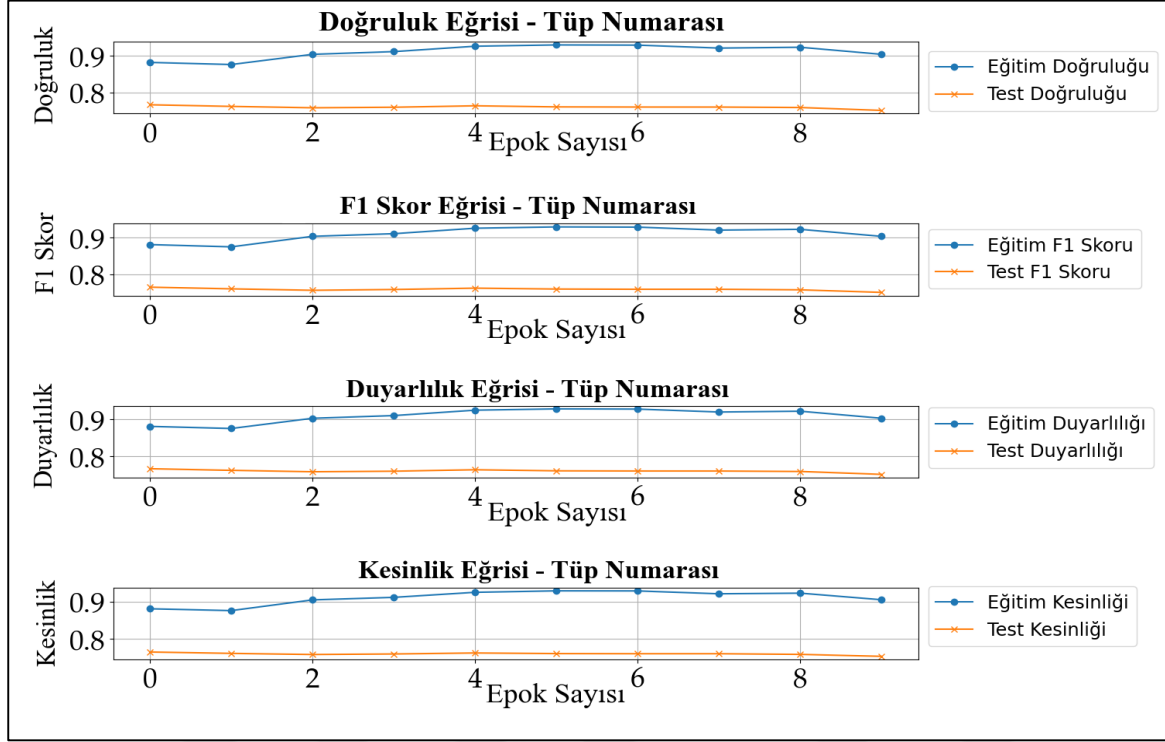
Şekil 4.2. Iskalama mesafesi performans metrik grafikleri



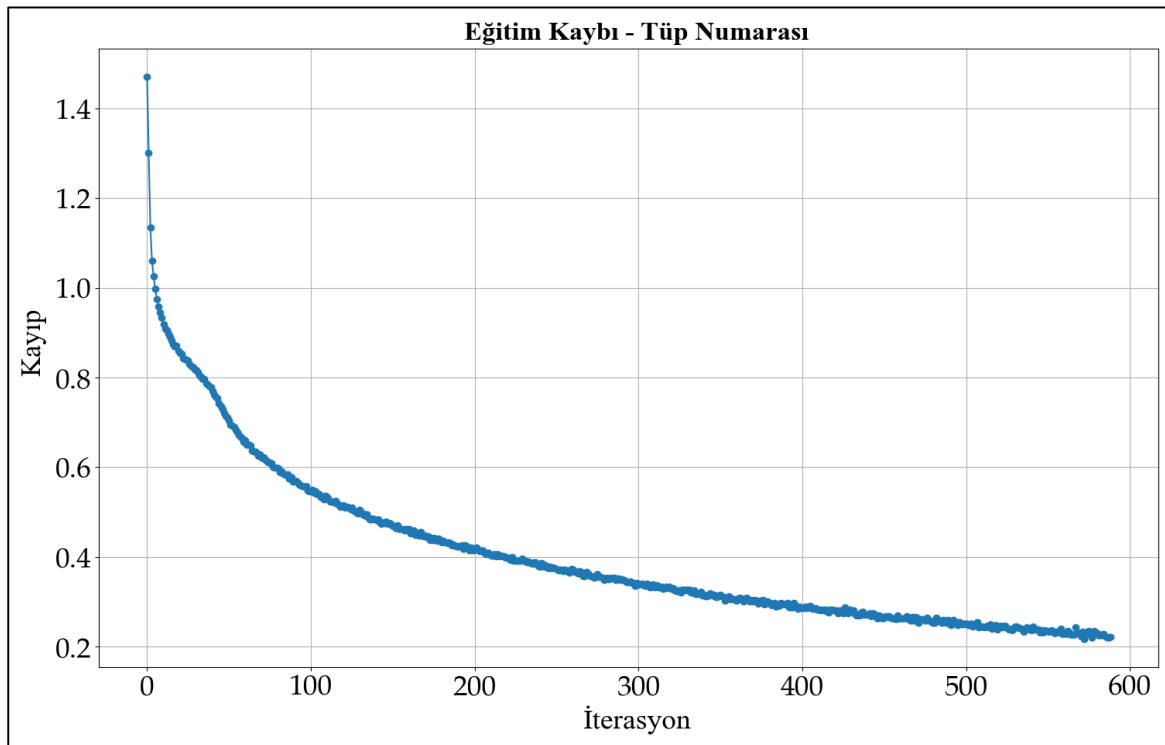
Şekil 4.3. Iskalama mesafesi eğitim kaybı grafiği

Operasyon ortamında angajman anında kritik bir parametre olan ıskalama mesafesi tahmini için ciddi bir başarıml sağlandığını özellikle vurgulayabiliriz. R² grafiğinin 1'e çok yakın

oluşu ve eğitim kayıp fonksiyonunun zamanla hızlı azalarak sabitlenmesi bu durumun göstergesidir.

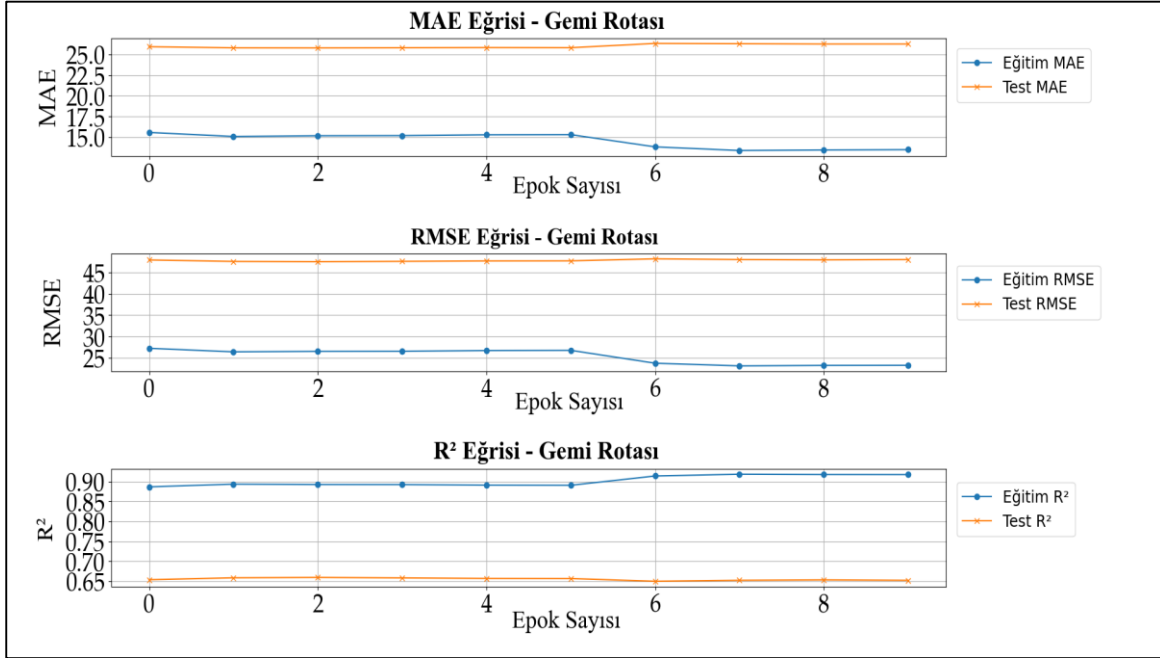


Şekil 4.4. Tüp numarası performans metrik grafikleri

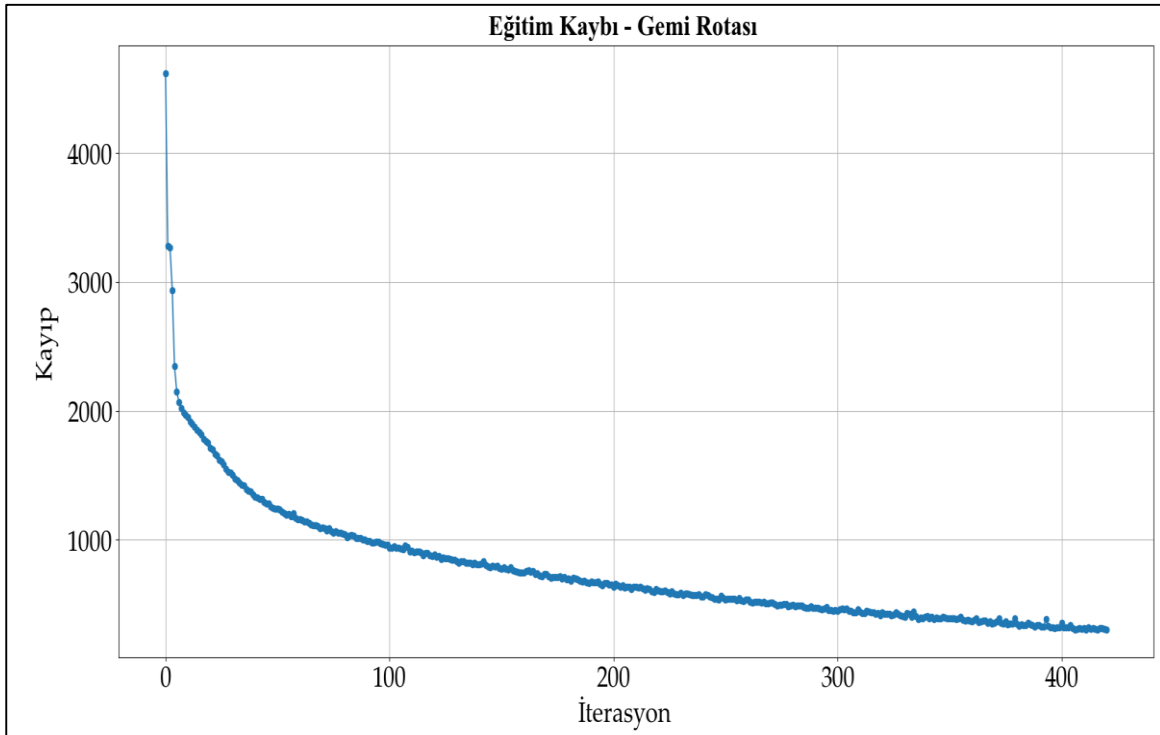


Şekil 4.5. Tüp numarası eğitim kaybı grafiği

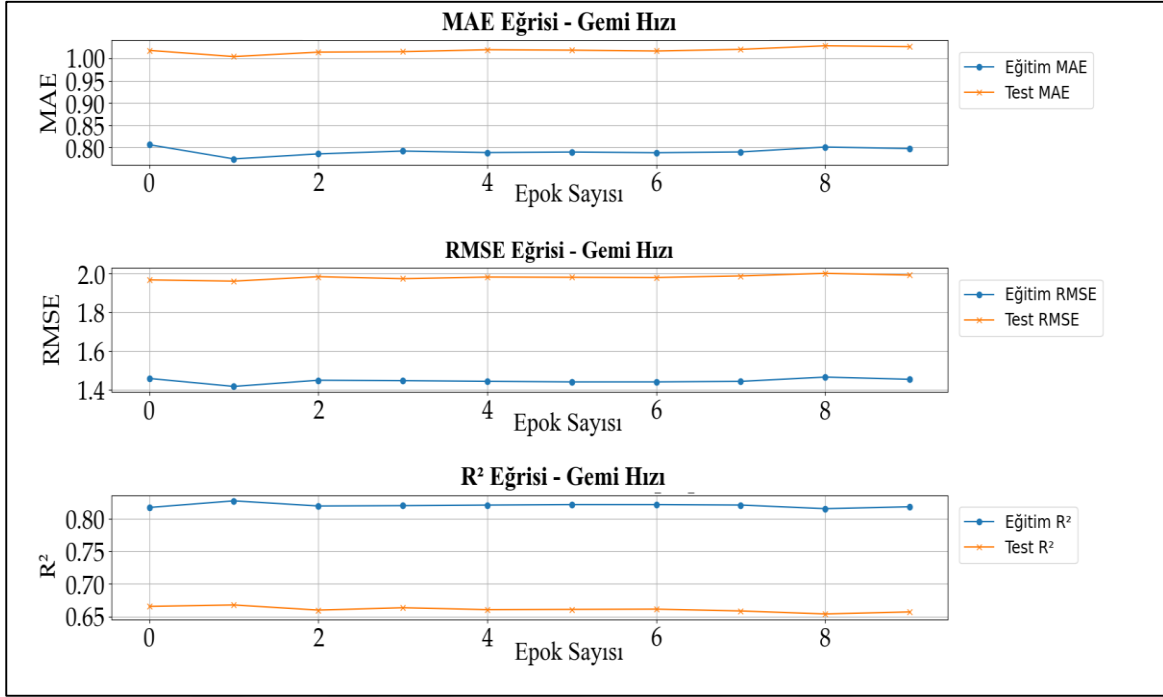
Karşı tedbir atımının yapılacağı tüp numarası tahmini için %80'e yakın bir başarı elde edilmiştir. Bu oran yapay zekâ bilimi açısından başarılı demek için gayet yeterlidir. Eğitim kaybındaki hızlı azalma, modelin test aşamasındaki verimliliği olarak yansımaktadır.



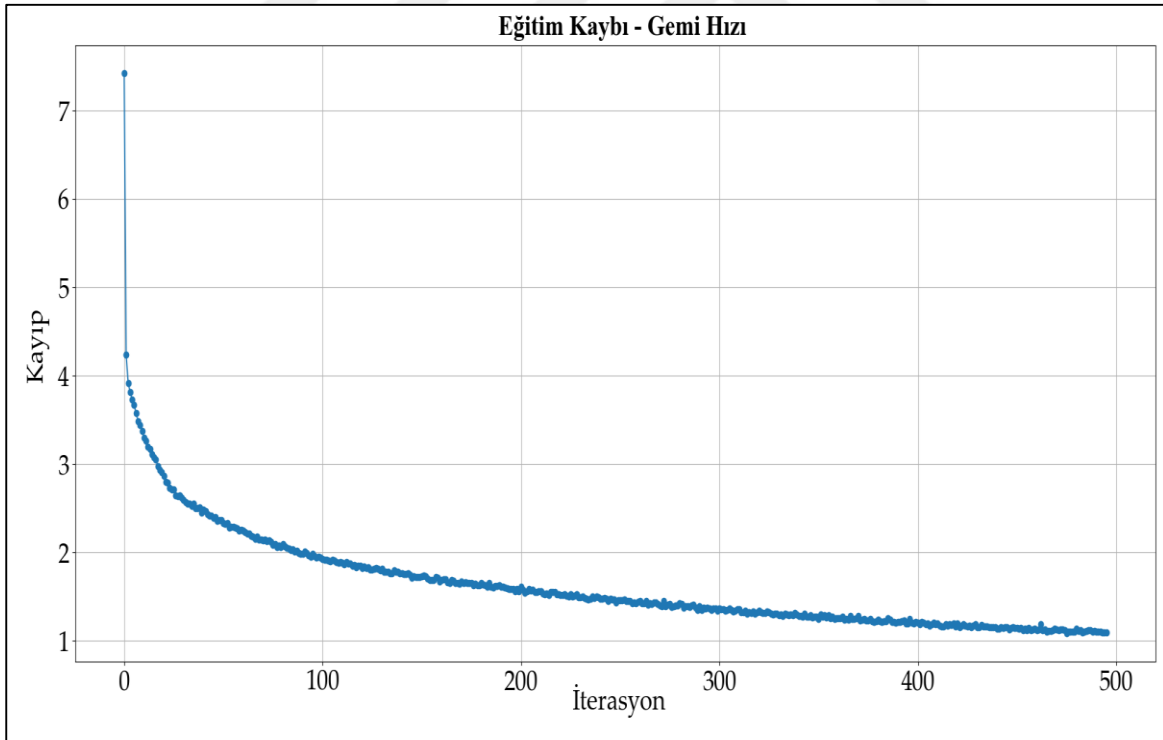
Şekil 4.6. Gemi rotası performans metrik grafikleri



Şekil 4.7. Gemi rotası eğitim kaybı grafiği



Şekil 4.8. Gemi hızı performans metrik grafikleri



Şekil 4.9. Gemi hızı eğitim kaybı grafiği

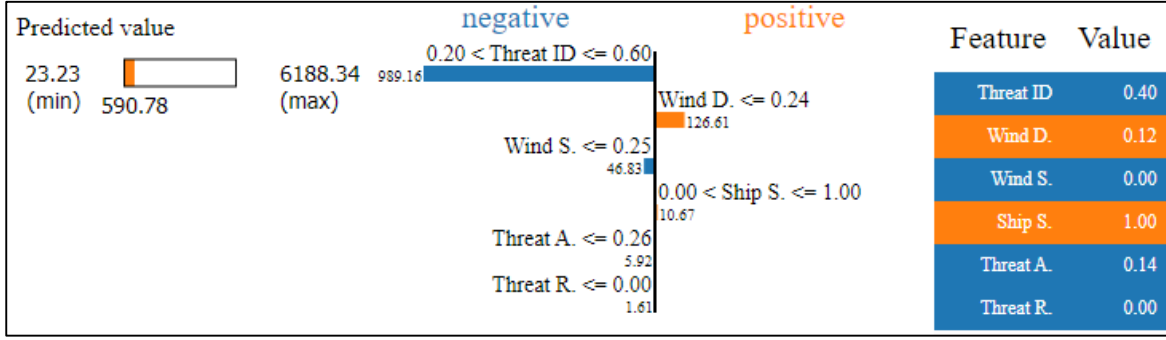
Gemi rota ve gemi hızı bilgilerini içeren manevra çözümleri diğer parametrelere oranla daha az başarıya sahiptir fakat geliştirilmeye açık olduğunun da altı çizilmektedir. Hiper parametrelerin daha iyi belirlenmesiyle eğitim kaybında daha fazla düşüş ile sabitlenme

sağlanabilir. Bu da modele iyileşme olarak yansiyabilir. Veri seti oluşturma sürecinde belirlenen senaryo girdi parametrelerinin çözünürlüğünün artırılmasıyla ya da ilave parametrelerin eklenmesiyle de model performansında daha başarılı sonuçların elde edilebileceği değerlendirilmektedir.

Bölüm 1’de bahsedilen sınırlılıklar düşünülerek grafikler incelendiğinde genel olarak başarı elde edildiği görülmektedir. Eğitim sırasındaki kayıp fonksiyonlarının zamanla hızlı bir şekilde azalması ve sabitlenmesi başarının göstergesidir. Grafiklerin belli değerde sabitlenmesi modelin doyuma ulaştığını göstermektedir. Eğitim kaybı ile test kaybı arasında doğrudan bir ilişki bulunurken, bu kayıplar ile model performansı arasında ters bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir. Eğitimde kayıp ne kadar az ise test sırasında da bu durum yansır ve o kadar az olur. Önem sırasına göre değerlendirildiğinde ıskalama mesafesi ve tüp numarası tahmini için model kullanılabilirliğinin yüksek olduğu söylenebilir. Manevra çözümü tahminlerindeki performans diğer çıktılara göre daha düşük olmasına rağmen, bu performansın çok düşük olmadığı belirtilmelidir. Daha fazla çalışma ile bu alan geliştirilebilir ve model daha kullanışlı hale getirilebilir. Genel hatlarıyla tüm yapı ele alındığında yapay zekânın elektronik harp sahasında savunma amaçlı fayda sağlayacak şekilde kullanılabilirliği kanıtlanmıştır. Geliştirilen model sayesinde hızlı bir şekilde çözüm kararı verilerek gemilerin güvenliği sağlanabilir.

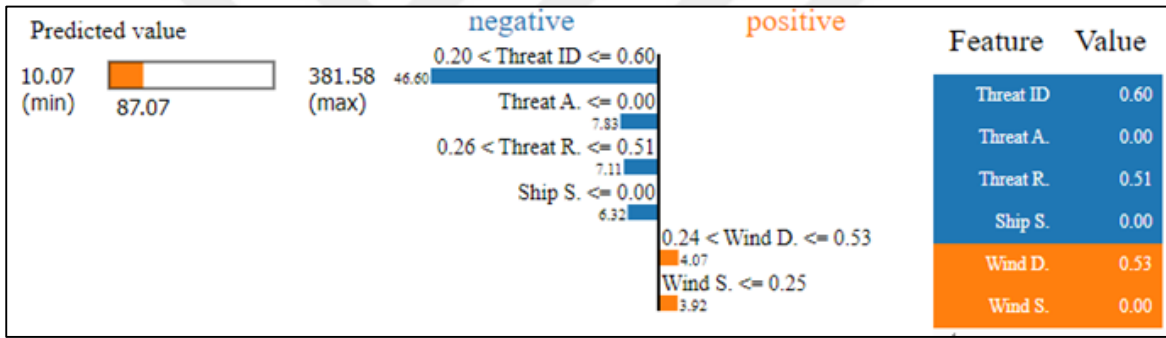
Regresyon modelinin her bir çıktı parametresi için XAI-LIME yöntemi kullanılarak örnek bir senaryo için verilen model kararları Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Regresyon modelinin tahmin ettiği çıktı parametrelerine pozitif ve negatif yönde katkıda bulunan giriş parametreleri ve ne derecede katkı sağladığı ile modelin minimum ve maksimum tahmin aralıkları görselleştirilerek sunulmuştur. Tahmini negatif yönde azaltan ve pozitif yönde artıran etkiler ile bu etkilerin dereceleri, şekillerin orta kısmında gösterilmektedir.

Sınıflandırma modelinin her bir çıktı parametresi için XAI-LIME yöntemi kullanılarak örnek bir senaryo için alınan kararlar Şekil 4.13’te gösterilmiştir. Sınıflandırma modelinin tahmin edebileceği sınıflar için temsili olasılık değerleri elde edilmiş ve her bir giriş parametresinin tahmin edilen sınıflar üzerindeki etkisinin yönü gözlemlenmiştir. Bu analizde özellikler için ölçeklendirilmiş değerler kullanılmıştır.



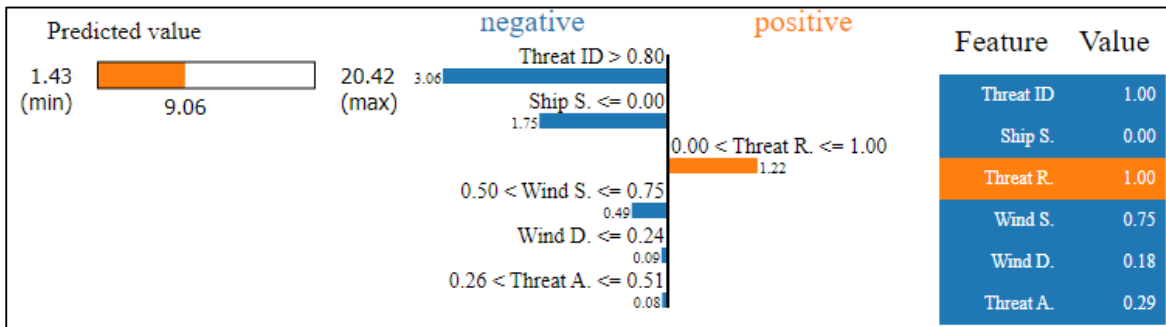
Şekil 4.10. LIME ile ıskalama mesafesi tahmininin açıklanması

Şekil 4.10'da gösterilen örnek senaryoda, gerçek değeri 582 olan kaçış mesafesi için tahmin edilen değer 590,78'dir. Hata marjı, modelin performansına yansımaktadır. Her bir senaryodaki hata marjlarının birleşimi, modelin genel performansını ortaya koymaktadır.



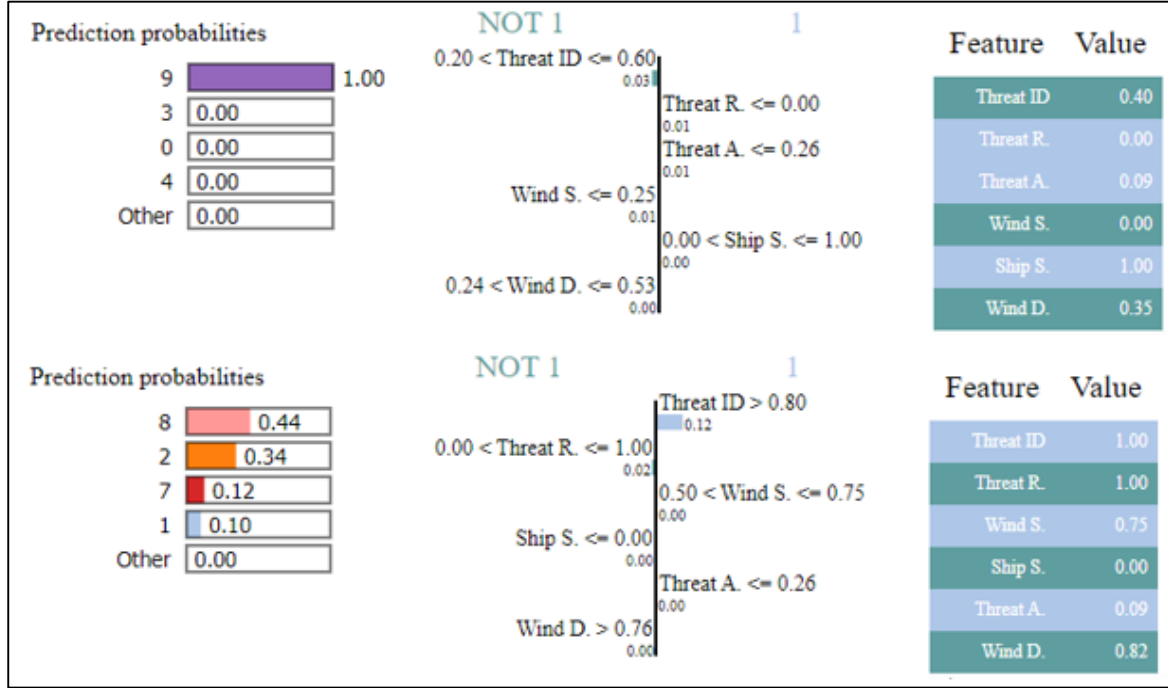
Şekil 4.11. LIME ile gemi rotası tahmininin açıklanması

Şekil 4.11'de gösterilen örnek senaryoda, gerçek değeri 90,03 olan gemi rotası için tahmin edilen değer 87,07'dir. Negatif etkilerin pozitif olanlardan daha baskın olduğu görülse de, tahminin küçük bir hata ile doğru sonuca yaklaştığı gözlemlenmektedir.



Şekil 4.12. LIME ile gemi hızı tahmininin açıklanması

Şekil 4.12'de gösterilen örnek senaryoda, gerçek değeri 9 olan gemi hızı için tahmin edilen değer 9,06'dır. Bu örnekte, modelin performansını belirleyen hata marjının oldukça düşük olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 4.13. LIME ile tüp numarası tahmininin açıklanması

Şekil 4.13'teki ilk örnek senaryoda, gerçek değeri 9 olan tüp numarası için tahmin edilen değer 9'dur. 9 değeri için tahmin olasılığı %100 olarak görülmektedir. Şekil 4.13'teki ikinci örnek senaryoda ise, olası sınıflar için olasılık oranları birbirine yakın olmasına rağmen gerçek değer olan 8'e en yüksek olasılık değeri (%44) atanmıştır. Tüp seçim kararlarına bakıldığında bu senaryolar özelinde %100 başarı sağlandığı görülmektedir.

XAI sayesinde kullanılacak alternatif tüp numaraları da görülmektedir. 8 numaralı tüpte veya o tüpteki mühimmatta sorun olması durumunda ikinci seçenek olarak kullanılacak tüp numarasının 2 numaralı tüp olduğunu, devamında ise 7 ve 1 olduğunu söyleyebiliriz. Veri setini elde ettiğimiz simülasyon de aynı bu şekilde alternatif çözümler sunmaktadır. Simülasyonun sahip olduğu bu yeteneğin yapay zekâ modeline de kazandırıldığını LIME tekniği ile görebilmekteyiz. Farklı bir bakışı ile değerlendirme yaparsak; en yüksek olasılığa sahip birden fazla tüpten çoklu atımlar gerçekleştirilerek etkinliği daha yüksek çözümler elde edilebilir. Yani tasarlanan model ve bu yöntem mühimmat etkinliği değerlendirme amaçlı da kullanılabilir. Atım yapılabilecek tüp numaraları, operasyonel ortamda

sunulabilecek ve kullanıcıya fayda sağlayabilecek nitelikte bilgilerdir. XAI ile elde edilen figürler incelendiğinde, modelin başarıları görselleştirilerek gözlemlenmektedir.





5. TARTIŞMA

Bu çalışma, gelecekteki araştırmalar için öncü bir referans olarak hizmet edecek olup, Yapay zekânın Elektronik Harp alanındaki potansiyel uygulamalarını göstermektedir. Karşı tedbirlere yönelik literatürde kısıtlı çalışmanın olması yapılan çalışmanın kritik bir öneme sahip olmasını da beraberinde getirmiştir. Günümüzde gelişmekte olan füze teknolojilerine yönelik karşı önlemlerin alınması ve bu faaliyetlerin geliştirilmesi platformlar açısından büyük bir öneme sahiptir. Yapay zekânın gelişen füze arayıcı teknolojilerine karşı olumlu sonuçlar sağlayabileceği bu çalışmayla gösterilmiştir. Yapay zekâ teknolojisinin katabileceği hız ve doğruluk gibi faydalar sayesinde karşı tedbirlerin verimliliğinin artması hedeflenmektedir. Karşı tedbir atım kararının yanında platform manevra bilgisinin elde edilmesi de bu ve buna benzer çalışmalar açısından değerlidir.

Yapılan çalışmada popüler bir kavram olan yapay zekânın savunma konseptine uyarlanabildiğinin gösterilmesi de ayrı bir önem taşımaktadır. Bu çalışmanın operasyonel sahada kullanılabilirliğinin yüksek olması ve geliştirilmeye açık olması literatürde kendine önemli bir yer edinmesini sağlamaktadır. Literatüre yapacağı katkılar düşünüldüğünde bu çalışmanın geleceğe olumlu yansımalar yapabileceği ve tercih edilecek bir uygulama haline gelebileceği düşünülmektedir. Yazarlar, önerilen modelin daha ileri düzeyde iyileştirilebileceğini ve mevcut karşı önlem yöntemleriyle birleştirilebileceğini düşünmektedir.

Bu çalışmaya benzer veya hizmet edebilecek literatürdeki geçmiş çalışmalar ile yapılan bu tez çalışmanın kıyaslanmasını sağlayan karşılaştırma tablosu Çizelge 4.3'te verilmektedir. Yapılan diğer çalışmalar da yapay zekâ kullanımını içeren karşı tedbir odaklı çalışmalardır. Çalışma [27] ile daha hassas hedef parametreler içermemiz dışında benzer bir kapsama sahip olduğumuzdan dolayı kullanılan model tipinin benzediğini ve tercih sebebi olduğunu görebilmekteyiz. Genel olarak hedef problemler ve amaçlar aynı olmadığından model türlerinde ve yapılarında farklılıklar mevcuttur. Modellerin başarısı için kullanılan performans metrikleri ve hiper parametrelerdeki farklılıklar da bu durumu açıklamaktadır. Bu tablo incelendiğinde, diğer çalışmalardan ayrıldığıımız ve konuyu ele aldığımız nokta ile literatürde farklı bir yerde olduğumuz görülmektedir. Karşılaştırılan çalışmalar da veri setlerine ait detaylara yer verilmemiştir.

Çizelge 4.3. Yapılan çalışmanın literatür ile karşılaştırması

Referans	Katman	Veri Seti	Model/Algoritma	Hiper Parametreler	Performans Metrikleri	
[24]	(256, 64, 256, 64)	Mevcut Değil	MATD3 (en iyi algoritma) MADDPG	Ajan Sayısı: 3 Maksimum bölüm sayısı: 15 000 Maksimum adım sayısı: 300 Önemli öğrenme oranı: 2e-3 Aktör öğrenme oranı: 2e-4 Deneyim tampon uzunluğu: 1e6 İndirim faktörü: 0,99 Mini parti boyutu: 128 Örnekleme zamanı: 0,1	Ödül Eğrisi Görev Başarma Oranı: %69	
[27]	Çözüm: (40, 35)	500 000	MLP (en iyi model)	Gizli Katman: Tansig	Çıktı Katmanı: Softmax	Doğruluk: %96,70
	Başarı Olasılığı > 0,8: (60)				Doğruluk: %93,82	
	Iskalama Mesafesi: (35, 30, 25)		SVM		Çıktı Katmanı: Identity/purelin	MSE: 1,42 yards ² R ² > 0,99
	Hücredeki Zaman (%): (35, 30, 25)					MSE: 0,0043 R ² : 0,91
[33]	Mevcut Değil	10 000	Bayesian Classifier	Mevcut Değil	Radar Performansı: %100 Lazer Performansı: %95,8	
			Decision Tree		Radar Performansı: %95 Lazer Performansı: %97,4	
			MLP		Radar Performansı: %98,3 Lazer Performansı: %95,8	
Mevcut Çalışma	Tüp Numarası: (450, 350, 250)	74 197	MLP	Epok: 10 Maksimum İterasyon: 591 Öğrenme Oranı: 0,001 Çözücü: Adam	Çıktı Katmanı: Softmax	Doğruluk: %76,54 F1 Skor: %76,47 Kesinlik: %76,55 Duyarlılık: %76,54 Eğitim Kaybı: 0,2212
	Gemi Hızı: (512, 256, 128)			Epok: 10 Maksimum İterasyon: 495 Öğrenme Oranı: 0,001 Çözücü: Adam	Gizli Katman: ReLU	MAE: 1,0180 RMSE: 1,9629 R ² : 0,6671 Eğitim Kaybı: 1,0960
	Gemi Rotası: (500, 450, 400)			Epok: 10 Maksimum İterasyon: 420 Öğrenme Oranı: 0,001 Çözücü: Adam	Çıktı Katmanı: Softmax	MAE: 26,0161 RMSE: 47,8120 R ² : 0,6551 Eğitim Kaybı: 304,1513
	Iskalama Mesafesi: (500, 450, 400)			Epok: 10 Maksimum İterasyon: 529 Öğrenme Oranı: 0,001 Çözücü: Adam	Gizli Katman: Tanh	MAE: 138,3707 RMSE: 309,7109 R ² : 0,9660 Eğitim Kaybı: 0,013736

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, gemilerde füze tehditlerine karşı alınan savunma önlemleri ve bu önlemlerin etkili bir şekilde uygulanabilmesi için geliştirilen yapay zekâ modeli üzerine odaklanılmıştır. Tasarlanan model mimarisi gemi platform modeli mevcut olduğu sürece tüm gemi türlerine uygulanabilmektedir. KÖ veya RF güdüm sistemi ayırımı yapılmaksızın çalışabilecek şekilde geliştirilen bu modelin her füze tehdidine karşı kullanılabilirliği mevcuttur. Tehditlere ait modellerin olması bunun için yeterlidir. Gemi platformlarına özel olarak yapılan bu çalışma hava ve kara platformlarına da rahatlıkla uygulanabilir bir model mimarisine sahiptir.

Karşı tedbir olarak sunulan çözüm elektronik harp ortamına performans açısından iyileştirmeler sağlamaktadır. Bu tasarım, gemi veya tehdit özelinde gerekli parametrelerle simülasyonlar yapıp eğitim sağlandıktan sonra gerçek zamanlı olarak atım sonucu ve manevra bilgisini sunmaktadır. Bu durum veri setinin elde edildiği simülatörün sahip olduğu modellerin, geliştirilen yapay zekâ modeli ile karşılanabildiğinin bir ispatıdır. Bir nevi modellerin özelliklerinin eğitim aşamasından sonra yapay zekâ modeline gömüldüğünü söyleyebiliriz. Daha önce literatürde yapılmış benzer çalışmalar olsa da kullanılan MLP parametreleri (gizli katman, nöron sayısı, aktivasyon fonksiyonu) açısından bu çalışma farklılık göstermektedir. Hassas değerler ve çok geniş değer aralığı olan parametreler üzerinde tahminler yapılması literatüre katkı sağlar niteliktedir. Bununla beraber, uygulanan yöntemin hem KÖ hem de RF güdümlü füzeler için tasarlanmış olması çalışmaya ekstra değer katmıştır.

Çıktı parametrelerinin yapısı, değer aralıkları ve belirliliği göz önünde bulundurularaktan var olan probleme sınıflandırma ve regresyon problemi olarak yaklaşım sağlanmıştır. İdeal modele ulaşma amacıyla her bir hedef çıktı için hiper parametre ayarlamaları yapılarak denemeler yapılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Ele alınan hedef çıktılara ait performanslar grafiklerle gösterilmiştir. Ayrıca MLP ile öğrenme sonucunda elde edilen sonuçların hangi verilerle elde edildiği, XAI ile şeffaf bir şekilde görselleştirilerek açıklanmıştır. Tüm senaryolar XAI ile incelendiğinde, giriş değerlerinin MLP ile yapılan tahminlere olan etkisi analiz edilebilir ve model performansını artırmak için yeni kararlar alınabilir, farklı senaryolar oluşturulabilir. Yedekliliği sağlamak adına alternatif tüp veya

mühimmat değerlendirmesinin kullanıcıya sunulmasının da XAI ile mümkün olacağı elde edilen görsellerden anlaşılmaktadır.

Gemi karşıtı füzeler için her ne kadar farklı çözümlerin uygulanabildiği görülse de pasif aldatıcıların rolü çok fazla ve kritiktir. Önemli olan doğru anda ve uygun açıdan atım yapabilmektir. Atım sonucunda, geminin sahip olması gereken konum ve hız manevrayı oluşturmaktadır. Manevranın karşı tedbir etkinliğine olumlu katkısı da tartışılmaz bir sonuçtur. Bu çalışmada hesaplanan değerler geminin hayatta kalma performansını artıran unsurlardır. Bu sebeple yapılan çalışma operasyonel bir perspektiften bakıldığında emniyeti artıran bir çalışma olmasından dolayı dikkat çekmektedir.

Sonuç olarak, teknolojik gelişmeler ve yapay zekâ destekli savunma stratejileri, gemilerin füze saldırılarına karşı hayatta kalma şansını artırmaktadır. AI kullanımının gemi savunma sistemlerinde performansta önemli bir iyileştirme sağladığı ve gelecekteki savunma stratejilerinin daha da geliştirilebileceği gösterilmiştir. Bu bağlamda, etkili savunma için doğru mühimmat seçimi, simülasyon tabanlı değerlendirmeler ve doğru manevra uygulamaları kritik öneme sahiptir. Gelecek çalışmalar açısından öncü olacak bu çalışma; Elektronik Harp ortamında yapay zekâ kullanılabilirliğini göstermektedir. Gelişen füze arayıcı başlık teknolojilerine karşı yapay zekânın pozitif sonuçlar sergilediği aşikârdır. Gerçekleştirilen çalışma, Elektronik Harp kavramının özellikle de savunma konseptinin ilerlemesine katkı sağlayacak ve gelecekteki araştırmalar için bir yol açacaktır. Daha doğru ve hızlı karşı tedbir kararları üretmek için, mühimmat etkinliği üzerine olan benzetim araçlarıyla yapay zekânın birleşmesi neticesinde çift kontrollü bir yapı tasarlanması geleceğin çalışma konularındandır. Bu tez çalışması, tarif edilen amaca hizmet edebilecek araştırmalar için öncü niteliğindedir.

KAYNAKLAR

1. İnternet: Türk Deniz Medya. MV Aya İsimli Gemi Karadeniz'de Vuruldu. URL: <https://web.archive.org/web/20250210180103/https://turkdeniz.com/mv-aya-isimli-gemi-karadenizde-vuruldu>, Son Erişim Tarihi: 10.02.2025.
2. İnternet: Rheinmetall. The Multi Ammunition Softkill System (MASS). URL: <https://web.archive.org/web/20231119095534/https://www.rheinmetall.com/Rheinmetall%20Group/brochure-download/Protection-Systems/B145e1023-MASS-naval-multi-ammunition-softkill-system.pdf>, Son Erişim Tarihi: 19.11.2023.
3. İnternet: Thales Group. Defensive Aids. URL: <https://web.archive.org/web/20250208140254/https://www.thalesgroup.com/en/defensive-aids>, Son Erişim Tarihi: 08.02.2025.
4. İnternet: Saab Inc. Countermeasures Dispenser Systems. Electronic Warfare Countermeasure Dispensing Systems (CMDS). URL: <https://web.archive.org/web/20250208140335/https://www.saab.com/products/countermeasure-dispensing-systems>, Son Erişim Tarihi: 08.02.2025.
5. İnternet: Terma. Advanced Countermeasures Dispenser System (ACMDS). URL: <https://web.archive.org/web/20250208140400/https://www.terma.com/products/avionics/countermeasures/>, Son Erişim Tarihi: 08.02.2025.
6. İnternet: Elbit Systems Ltd. Countermeasures Dispensing Systems. URL: <https://web.archive.org/web/20250208141216/https://elbitsystems.com/product/countermeasures-dispensing-systems/>, Erişim Tarihi: Son Erişim Tarihi: 08.02.2025.
7. İnternet: Leonardo Electronics. BriteCloud DRFM (Digital RF Memory) Countermeasure. The BriteCloud Expendable Active Decoy (EAD). URL: <https://web.archive.org/web/20250208141123/https://electronics.leonardo.com/en/products/britecloud-3>, Son Erişim Tarihi: 08.02.2025.
8. İnternet: BAE Systems Inc. ALE-47 Airborne Countermeasures Dispenser System. URL: <https://web.archive.org/web/20250208141136/https://www.baesystems.com/en-us/product/ale47-airborne-countermeasures-dispenser-system>, Son Erişim Tarihi: 08.02.2025.
9. İnternet: Bharat Dynamics Limited. Countermeasure Dispensing System (CMDS). URL: <https://web.archive.org/web/20250208141502/https://bdl-india.in/cmds>, Son Erişim Tarihi: 08.02.2025.
10. Kim, K. (2021). Engagement-Scenario-Based Decoy-Effect Simulation Against an Anti-ship Missile Considering Radar Cross Section and Evasive Maneuvers of Naval Ships. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 35(3), 238–246.
11. Rudd-Orthner, R.N.M. and Pesare, V. (2023), A Naval Combat Management System (CMS) Architecture to enable Cognitive Electronic Warfare in Platform Protection, *Rudd Software Ltd*, doi: 10.13140/RG.2.2.31979.00809.

12. Galle, L. F. and Witberg, R. R. (2000). Operational analysis for stating naval low observability requirements. *2000 SMI Defence Conferences*, London, 1-23.
13. Veerman, H., Schleijsen, R., Brettschneider, A. and Amram, R. (2020). Ship signature management to increase infrared countermeasure effectiveness. *Technologies for Optical Countermeasures XVII; and High-Power Lasers: Technology and Systems, Platforms, Effects IV*, 11539(1), 5-20.
14. Sun, H. Q., Li, W. B., An, Z. H., Chen, H. T., Cao, T., He, S. Y. and Zha, W. (2018). Optimization Design of Ship RCS Reduction Based On Genetic Algorithm. *2018 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES)*, Beijing, 1-2.
15. Galle, L. F., Heemskerk, E. J. and van Ewijk, L. J. (1999). Naval Radar Signature Management. *1999 SMI Defence Conferences*, London, 1-17.
16. Tan, T. H. (1996). *Effectiveness of off-board active decoys against anti-shiping missiles*, M. Sc. Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, California.
17. Kerins, W. J. (1993). Analysis of towed decoys. *IEEE transactions on aerospace and electronic systems*, 29(4), 1222-1227.
18. Gray, G. J., Aouf, N., Richardson, M., Butters, B. and Walmsley, R. (2013). Countermeasure effectiveness against an intelligent imaging infrared anti-ship missile. *Optical Engineering*, 52(2), 026401-026401.
19. Choi, S., Kwon, O. J., Oh, H. and Shin, D. (2020). Method for effectiveness assessment of electronic warfare systems in cyberspace. *Symmetry*, 12(12), 2107-2122.
20. Rim, J.-W. and Koh, I.-S. (2019). Survivability simulation of airborne platform with expendable active decoy countering RF missile. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 56(1), 196-207.
21. İnternet: Final Report of SCI Task Group 224. (2018). EO and IR Countermeasures Against Anti-Ship Missile. *NATO STO Technical Report (TR-SCI-224-Part-I)*. URL: <https://web.archive.org/web/20250208163015/https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD1062456.pdf>, Son Erişim Tarihi: 08.02.2025.
22. Jeong, J., Yu, B., Kim, T., Kim, S., Suk, J. and Oh, H. (2017). Maritime application of ducted-fan flight array system: Decoy for anti-ship missile. *2017 Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (RED-UAS)*, 72-77.
23. Bildik, E., Tsourdos, A., Perrusquía, A. and Inalhan, G. (2024). Swarm decoys deployment for missile deceive using multi-agent reinforcement learning. *2024 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Greece, 256-263.
24. Bildik, E., Tsourdos, A., Perrusquía, A. and Inalhan, G. (2024). Decoys deployment for missile interception: A multi-agent reinforcement learning approach. *Aerospace*, 11(8), 684-701.

25. Wu, Z., Luo, Y. and Hu, S. (2024). Optimization of jamming formation of USV offboard active decoy clusters based on an improved PSO algorithm. *Defence Technology*, 32(7), 529-540.
26. Lord, R. J. (2006). Advances in Anti Ship Missile Protection - Naval Countermeasures. *Pacific 2006 International Maritime Conference*. Sydney, Pacific 2006 International Maritime Conference Managers, 291-300.
27. Touza, R., Martínez Torres, J., Álvarez, M. and Roca, J. (2022). Obtaining anti-missile decoy launch solution from a ship using machine learning techniques. *International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence*, 7(4), 163-170.
28. İnternet: Hindustan Times. India News. IAF. Navy tie-up with DRDO to acquire chaff to shield warships fighter aircraft. Hindustan Times. URL: <https://web.archive.org/web/20250208165417/https://www.hindustantimes.com/india-news/iaf-navy-tie-up-with-drdo-to-acquire-chaff-to-shield-warships-fighter-aircraft-101650542423730.html>, Son Erişim Tarihi: 08.02.2025.
29. İnternet: Airpra. Discover the best of chaff and flare in aerial defence. URL: <https://web.archive.org/web/20250208170036/https://airpra.com/discover-the-best-of-chaff-and-flare-in-aerial-defence/>, Son Erişim Tarihi: 08.02.2025.
30. Butters, B., Nicholls, E., Walmsley, R. and Ayling, R. (2011). Infrared decoy and obscurant modelling and simulation for ship protection. *Proc. SPIE, Technologies for Optical Countermeasures VIII*, 8187(13), 151-177.
31. İnternet: Chemring Chemring Group PLC. Countermeasures and Energetics. URL: <https://web.archive.org/web/20250208171141/https://www.chemring.com/what-we-do/countermeasures-and-energetics>, Son Erişim Tarihi: 08.02.2025.
32. Lakshmi, E. V., Sastry, N. N. and Rao, B. P. (2011). Optimum active decoy deployment for effective deception of missile radars. *Proceedings of 2011 IEEE CIE International Conference on Radar*, Chengdu, 1, 234-237.
33. Kang, S., Park, H., Noh, S., Park, S. R., Kim, K., Lyu, S. and Kim, S. (2009). Autonomously deciding countermeasures against threats in electronic warfare settings. *2009 International Conference on Complex, Intelligent and Software Intensive Systems*, Fukuoka, 177-184.
34. Akhil, K. R., Ghose, D. and Rao, S. K. (2008). Optimizing deployment of multiple decoys to enhance ship survivability. *2008 American Control Conference*, Seattle, WA, 1812-1817.
35. Mattila, V., Virtanen, K., Muttillainen, L., Jylhä, J. and Väisänen, V. (2014). Optimizing locations of decoys for protecting surface-based radar against anti-radiation missile with multi-objective ranking and selection. *Proceedings of the Winter Simulation Conference 2014*, Savannah, GA, 2319-2330.

36. Carreño, R. M., Martínez, J. and Bouza, J. B. (2019). An Approach for Integrating Uncertainty When Selecting an Anti-Torpedo Decoy in Brand New Warships. *Mathematical and Computational Applications*, 24(1), 5-18.
37. İnternet: Türkiye Uzay Ajansı. Dalgalar ve Elektromanyetik Tayf (Spektrum). URL: <https://web.archive.org/web/20250208202339/https://tua.gov.tr/tr/blog/havacilik-ve-teknoloji/dalgalar-ve-elektromanyetik-tayf-spektrum>, Son Erişim Tarihi: 08.02.2025.
38. İnternet: Defeating Modern Armor and Protection Systems - Scientific Figure on ResearchGate. Hard-kill and Soft-kill Countermeasures. URL: https://web.archive.org/web/20250208222836/https://www.researchgate.net/figure/Principle-of-active-protection-systems-visualized-for-hard-and-soft-kill-effectors-4_fig1_338411502, Son Erişim Tarihi: 08.02.2025.
39. Şahingil, M. C. and Yurttaş, R. (2012). The determination of flare launching programs to use against pulse width modulating guided missile seekers via hidden Markov models. *2012 20th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, Mugla, 1-4.
40. Yurttaş, R. and Ergöz, K. (2018). Optimization of passive electronic countermeasures techniques against infrared missiles with genetic algorithm. *2018 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, Izmir, 1-4.
41. Yurttaş, R. and Leblebicioğlu, K. (2013). The flare effectiveness against imaging infrared seekers. *2013 21st Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, Haspolat, 1-4.
42. Akdağ, R. and Altılar, D. T. (2009). Evaluation of fighter evasive maneuvers combined with chaff utilization against proportional navigation missiles. *SCSC'09: Proceedings of the 2009 Summer Computer Simulation Conference*, Istanbul, 103-109.
43. Moore, F. W. (2002). A methodology for missile countermeasures optimization under uncertainty. *Evolutionary Computation*, 10(2), 129-149.
44. Park, S. R. and Noh, S. (2010). Optimal decision-making of countermeasures by estimating their expected utilities. *IEICE transactions on information and systems*, 93(3), 560-568.
45. Livada, B. and Perić, D. (2020). EO/IR imaging systems countermeasures and camouflage: capabilities and new technological challenges. *Proc. SPIE, Target and Background Signatures VI, SPIE Security + Defence 2020*, Edingburgh, 11536, 88-100.
46. Žák, J., Vach, M. and Dvořáček, F. (2016, September). Advanced Chaff usage in modern EW. *2016 IEEE Radar Methods and Systems Workshop (RMSW)*, Kiev, 56-59.
47. Žák, J., Vach, M. and Žák, J. (2020). Simulation of dipole reflectors' electric field and RCS in limited open space. *IET Radar, Sonar and Navigation*, 14(2), 200-206.

48. Chopra, K. N. (2018). Analysis and modeling of IR signatures by optoelectronic techniques and countermeasures—a technical tutorial and review. *Latin-American Journal of Physics Education*, 12(3), 2-11.
49. Zrnić, D. S. and Ryzhkov, A. V. (2004). Polarimetric properties of chaff. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 21(7), 1017-1024.
50. İnternet: Wikipedia Free Encyclopedia. Chaff (countermeasure). URL: [https://web.archive.org/web/20250208233034/https://en.wikipedia.org/wiki/Chaff_\(countermeasure\)](https://web.archive.org/web/20250208233034/https://en.wikipedia.org/wiki/Chaff_(countermeasure)), Son Erişim Tarihi: 08.02.2025.
51. İnternet: Farrell, R. E. and Siciliano, S. D. (2004). *Environmental Effects of Radio Frequency (RF) Chaff Released during Military Training Exercises: A Review of the Literature* (Technical Report). Government of Newfoundland and Labrador. URL: <https://web.archive.org/web/20250208220900/https://www.gov.nl.ca/ecc/files/env-assessment-projects-y2004-1159-environmental-effects-of-radio-frequency-chaff.pdf>, Son Erişim Tarihi: 08.02.2025.
52. Wilson, C. L., Arfsten, D. P. and Spargo, B. J. (2001). Human and Environmental Health Issues Related to Use of Radio Frequency Chaff. *Navy Medicine*, 92(5), 12-15.
53. İnternet: Basics about Aerodynamics and Avionics. (2016). URL: <https://web.archive.org/web/20250208224309/https://basicsaboutaerodynamicsandavionics.wordpress.com/2016/03/>, Son Erişim Tarihi: 08.02.2025.
54. İnternet: Final Programmatic Environmental Assessment for Testing and Training with Defensive Countermeasures. Air Force. (2023). URL: https://web.archive.org/web/20240522171337/https://www.airforcechaffandflareprogrammatic.com/documents/Clean_Final%20PEA_Chaff-Flare_Dec%202023_wFONSI_reducedsize.pdf, Son Erişim Tarihi: 22.05.2024.
55. İnternet: Arizona Regional Airspace EIS. Environmental Impact Statement for Special Use Airspace Optimization. Factsheet: Chaff and Flares. URL: <https://web.archive.org/web/20221005075137/https://www.arizonaregionalairspaceeis.com/media/is2jlkub/chaff-and-flare-factsheet-final.pdf>, Son Erişim Tarihi: 05.10.2022.
56. İnternet: U.S. Army. Appendix B Characteristics and Analysis of Flares. F-22A Beddown Environmental Assessment. Army Environmental Center. URL: <https://web.archive.org/web/20250208230640/https://www.arlis.org/docs/vol1/70155012/70155012appB.pdf>, Son Erişim Tarihi: 08.02.2025.
57. Withey, M. D. (2010). Infrared countermeasure flares. *The Imaging Science Journal*, 58(5), 295-299.
58. Titterton, D. H. (2004). A review of the development of optical countermeasures. *Proc. SPIE, Technologies for Optical Countermeasures, European Symposium on Optics and Photonics for Defence and Security 2004*, London, 5615, 1-15.

59. İnternet: Wikipedia Free Encyclopedia. Sea Skimming. URL: https://web.archive.org/web/20250208234633/https://en.wikipedia.org/wiki/Sea_skimming, Son Erişim Tarihi: 08.02.2025.
60. Ramchoun, H., Ghanou, Y., Ettaouil, M. and Janati Idrissi, M. A. (2016). Multilayer perceptron: Architecture optimization and training. *International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence (IJIMAI)*, 4(1), 26-30.
61. Ramchoun, H., Idrissi, M. J., Ghanou, Y. and Ettaouil, M. (2017). Multilayer Perceptron: Architecture Optimization and training with mixed activation functions. *BDCA'17: Proceedings of the 2nd international Conference on Big Data, Cloud and Applications*, Tetouan, 1-6.
62. Ruck, D. W., Rogers, S. K. and Kabrisky, M. (1990). Feature selection using a multilayer perceptron. *Journal of neural network computing*, 2(2), 40-48.
63. Popescu, M. C., Balas, V. E., Perescu-Popescu, L. and Mastorakis, N. (2009). Multilayer perceptron and neural networks. *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*, 8(7), 579-588.
64. Delashmit, W. H. and Manry, M. T. (2005). Recent developments in multilayer perceptron neural networks. *Proceedings of the seventh annual memphis area engineering and science conference (MAESC 2025)*, Memphis, Tennessee, 7, 33-47.
65. Dwivedi, R., Dave, D., Naik, H., Singhal, S., Omer, R., Patel, P., Qian, B., Wen, Z., Shah, T., Morgan, G. and Ranjan, R. (2023). Explainable AI (XAI): Core ideas, techniques, and solutions. *ACM Computing Surveys*, 55(9), 1-33.
66. Darias, J. M., Díaz-Agudo, B. and Recio-Garcia, J. A. (2021). A Systematic Review on Model-agnostic XAI Libraries. *ICCBR Workshops*, 3017(96), 28-39.
67. Sezer, S., Oter, A., Ersoz, B., Topcuoglu, C., Bulbul, H. İ., Sagioglu, S., Akin, M. and Yilmaz, G. (2024). Explainable artificial intelligence for LDL cholesterol prediction and classification. *Clinical Biochemistry*, 130(4), 110791-110797.
68. Campione, N. E. and Evans, D. C. (2020). The accuracy and precision of body mass estimation in non-avian dinosaurs. *Biological Reviews, Cambridge Philosophical Society*, 95(6), 1759-1797.
69. Öter, A. (2024). Automatic Detection of Epileptic Seizures from EEG Signals Using Artificial Intelligence Methods. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 12(1), 257-266.



Gazili olmak ayrıcalıktır