

دوفصلنامه علمی دانشکده علوم و فنون شناوری  
جوادالائمه (ع) نیروی دریایی سپاه

سال ۲۴، شماره ۶۶

بهار و تابستان ۱۴۰۴

دارای رتبه علمی از وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

با مجوز شماره ۶۴۸۲۷ / ۱۸ / ۳ / مورخ ۰۴ / ۰۴ / ۱۳۹۴

شماره شاپا: ۲۴۲۳-۳۶۶۸

#### صاحب امتیاز:

دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (ع)

دانشکده علوم و فنون شناوری جوادالائمه (ع) نیروی دریایی سپاه

#### مدیر مسؤول:

کاووس بورکی

#### سر دبیر:

دکتر محمود سالاری؛ استاد دانشگاه جامع امام حسین (ع)

#### مشاور سردبیر:

دکتر امین نجفی

#### ویراستار ادبی:

ابوذر حاجی زاده

#### هیئت تحریریه:

دکتر حسن قاسمی؛ استاد دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دکتر محمدرضا خدمتی؛ استاد دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دکتر علیرضا بیات؛ استادیار دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

دکتر یوسف ترابی گلسفید؛ استادیار دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (ع)

دکتر عباسعلی سلمانی؛ استادیار دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (ع)

دکتر محمدجواد کتابداری؛ دانشیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دکتر عباس وفایی صفت؛ دانشیار دانشگاه جامع امام حسین (ع)

دکتر محسن شاهرضایی؛ استادیار دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (ع)

دکتر عباس دشتی منش؛ استادیار و عضو هیئت علمی دانشگاه خلیج فارس

#### مدیر اجرایی:

محمد مرادی

#### طراحی و صفحه آرایی:

سید محمدباقر موسوی

نشانی: گیلان - رشت - زیباکنار - دانشگاه دریایی امام خاينه ای (مدفله العالی)

معاونت پژوهش

تلفن: ۳۳۱۴۹۱۷۴ - ۳۳۱۴۹۱۶۳ - ۳۳۱۴۹۱۶۲ و ۰۹۱۰۰۹۱۶۰۹

کد پستی: ۴۳۱۴۹۱۶۳۴۳۹

پست الکترونیک: daryainfo@gmail.com

## فهرست:

- طراحی مفهومی یک سکوی مشترک برای ادغام عملیاتی سامانه های بدون سرنشین هوایی، سطحی و زیرسطحی  
در نظارت دریایی / ..... ۳  
فرهاد کیانی فلاورجانی
- بررسی نقش گروه کاری عنصر انسانی (HTW) در ارتقای ایمنی دریانوردی / ..... ۲۴  
احمد ذادق آبادی، علی محمدی، مهدی مرادنوری
- کاربرد هوش مصنوعی در نگهداری و تعمیرات سیستم رانش شناورهای تندرو: مطالعه موردی بر روی یک شناور  
کاتاماران مسافربری / ..... ۴۰  
سید مهدی ساجدی
- بررسی جامع رادار کواتتومی با تاکید بر سناریوی تشخیص مین های دریایی در آب های کم عمق / ..... ۵۱  
سیدرضا شرفی نژاد
- بررسی جامع رویکردهای نگهداری و تعمیرات پیش بینانه مبتنی بر هوش مصنوعی در شناورهای دریایی / ..... ۶۶  
محمد باقر کیایی، مجتبی یوسفی پور
- مروری جامع بر تنش های روانی-اجتماعی، شاخص های فیزیولوژیکی و پیامدهای سلامت روان دریانوردان  
نظامی در مأموریت های برد بلند / ..... ۸۸  
علیرضا حبیبی
- بهینه سازی واحدهای نگهداری و تعمیر در نیروهای مسلح جمهوری اسلامی ایران / ..... ۹۷  
مصطفی مسلمی، علی اصغر سراقی
- شایستگی های راهبردی مربیان نظامی در عصر جنگ ترکیبی: ارائه یک مدل یکپارچه از منظر نیروهای مسلح  
جمهوری اسلامی ایران / ..... ۱۰۷  
عباسعلی سلمانی، عبدالرضا دبستانی، مهدی نطق پور نوری، سیدحمیدرضا قریشی، کاووس بورکی
- الگوی نگارش مقاله / ..... ۱۱۶

# طراحی مفهومی یک سکوی مشترک برای ادغام عملیاتی سامانه‌های بدون سرنشین هوایی، سطحی و زیرسطحی در

## نظارت دریایی

فرهاد کیانی فلاورجانی

دانشگاه صنعتی مالک اشتر؛ aerospace1362@gmail.com

### چکیده:

محیط دریایی به دلیل پیچیدگی و گستردگی، چالش‌های فراوانی را برای عملیات نظارت و پایش ایجاد می‌کند. شناورهای بدون سرنشین سطحی، زیرسطحی و سکوها‌ی بدون سرنشین هواپایه (پهپاد) قابلیت‌های منحصربه‌فردی را ارائه می‌دهند، اما عملکرد منفرد آن‌ها با محدودیت‌هایی در پوشش، ارتباطات میان‌دامنه و آگاهی موقعیتی جامع مواجه است. این مقاله به بررسی و ارائه یک طراحی مفهومی برای سکو مشترک می‌پردازد که هدف آن ادغام عملیاتی مؤثر این سه نوع دارایی ناهمگون برای اجرای مأموریت‌های نظارت ترکیبی پیچیده است. با استفاده از رویکرد مهندسی سیستم‌ها و معماری سازمانی مبتنی بر چارچوب معماری وزارت دفاع سناریوهای عملیاتی، ریسک‌های عملیاتی و نیازمندی‌های کلیدی چنین سکوی شناسایی و پیشنهاد می‌گردد. در این مقاله، طراحی مفهومی یک سکوی مشترک برای ادغام سامانه‌های بدون سرنشین هوایی، سطحی و زیرسطحی در نظارت دریایی نزدیک ساحل و مناطق محدود ارائه شده است. این سیستم‌ها به دلیل محدودیت‌های فنی و عملیاتی در برد ارتباطی و استقامت، در حال حاضر بیشتر برای عملیات‌های نظارتی در آب‌های سرزمینی و مناطق انحصاری اقتصادی نزدیک سواحل کاربرد دارند. در این چارچوب، پهپادها با استفاده از حسگرهای پیشرفته، عملیات پایش اولیه و شناسایی اهداف مشکوک را انجام داده و داده‌های جمع‌شده را به شناور سطحی بدون سرنشین ارسال می‌کنند. شناور سطحی بدون سرنشین با بهره‌گیری از حسگرهای برد نزدیک، به بازرسی دقیق‌تر اهداف پرداخته و در صورت نیاز، شناور زیرسطحی بدون سرنشین را برای بررسی‌های دقیق‌تر زیرسطح به کار می‌گیرند. این همکاری چندسکویی موجب افزایش پوشش جغرافیایی، بهبود دقت پایش و تسریع در واکنش به رخدادها می‌شود. همچنین، تحلیل SWOT و تحلیل ریسک مأموریت به منظور شناسایی فرصت‌ها، چالش‌ها و ارائه راهکارهای بهبود عملکرد سامانه ارائه گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده یکپارچه از سامانه‌های بدون سرنشین می‌تواند به‌طور مؤثری کارایی عملیات گشت و نظارت ساحلی را ارتقاء دهد. تحلیل سناریوهای عملیاتی نمونه (نظارت گسترده، ردیابی هدف، بازرسی زیرساخت) نشان می‌دهد که سکو پیشنهادی پتانسیل افزایش چشمگیر کارایی، انعطاف‌پذیری و آگاهی موقعیتی را در مقایسه با رویکردهای موجود دارد. تحلیل ریسک اولیه نیز چالش‌های فنی و عملیاتی را برجسته و راهکارهای مفهومی کاهش ریسک را پیشنهاد می‌کند. این تحقیق گامی اولیه در جهت توسعه سیستم‌های نظارت دریایی یکپارچه و هوشمند نسل آینده محسوب می‌شود.

### واژه‌های کلیدی:

پلتفرم مشترک، شناور سطحی بدون سرنشین، شناور زیرسطحی بدون سرنشین، پهپاد، ادغام سیستم‌ها، نظارت ترکیبی، معماری سیستم، سیستم‌های چندعامله ناهمگون

# Conceptual design of a common platform for operational integration of airborne, surface, and subsurface unmanned systems in maritime surveillance

Farhad Kiani Falavarjani

Malek Ashtar University of Technology; aerospace1362@gmail.com

## Abstract

The maritime environment, due to its complexity and vastness, poses significant challenges to surveillance and monitoring operations. Unmanned Surface Vehicles (USVs), Unmanned Underwater Vehicles (UUVs), and Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) each offer unique operational capabilities; however, their independent deployment is constrained by limitations in coverage, cross-domain communications, and comprehensive situational awareness. This paper investigates and presents a conceptual design for a joint platform aimed at the effective operational integration of these three heterogeneous assets to execute complex multi-domain surveillance missions. Employing a systems engineering approach and enterprise architecture principles based on the Department of Defense Architecture Framework (DoDAF), the operational scenarios, key requirements, and operational risks associated with such a platform are identified and analyzed.

The proposed concept focuses on integrating aerial, surface, and underwater unmanned systems for maritime surveillance in nearshore waters and restricted maritime areas. Owing to current technical and operational limitations in communication range and endurance, these systems are primarily applicable to monitoring operations within territorial waters and coastal Exclusive Economic Zones (EEZs). Within the proposed framework, UAVs equipped with advanced sensors perform initial monitoring and suspicious target detection, transmitting aggregated data to the USV. The USV subsequently conducts closer inspection using short-range sensors and, when necessary, deploys a UUV to perform detailed subsurface investigations. This multi-platform collaboration enhances geographical coverage, improves monitoring accuracy, and accelerates response to maritime incidents.

Furthermore, SWOT analysis and mission risk assessment are conducted to identify opportunities, challenges, and potential approaches for improving system performance. The results indicate that the integrated utilization of unmanned systems can significantly enhance the effectiveness of coastal patrol and surveillance operations. Analysis of representative operational scenarios, including wide-area surveillance, target tracking, and infrastructure inspection, demonstrates that the proposed platform has the potential to substantially improve operational efficiency, flexibility, and situational awareness compared with existing approaches. Preliminary risk assessment also highlights key technical and operational challenges while proposing conceptual risk mitigation strategies. This research represents an initial step toward the development of next-generation intelligent and integrated maritime surveillance systems.

**Keywords:** Joint Platform; Unmanned Surface Vehicle (USV); Unmanned Underwater Vehicle (UUV); Unmanned Aerial Vehicle (UAV); Systems Integration; Hybrid Surveillance; System Architecture; Heterogeneous Multi-Agent Systems.

در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های سریع در فناوری پهپادها و شناورهای سطحی بدون سرنشین سطحی و زیرسطحی افق‌های جدیدی را در مأموریت‌های نظارتی دریایی گشوده‌است. با این حال، هر یک از این سامانه‌ها محدودیت‌های خود را دارند: پهپادها برد پروازی محدود و حساسیت به شرایط جوی [1]، شناورهای سطحی بدون سرنشین سرعت و مانورپذیری پایین [2] و شناورهای زیرسطحی بدون سرنشین دید و ارتباط کم‌دامنه دارند [3]. ادغام هم‌زمان این سه رده از سامانه‌ها در قالب یک پلتفرم مشترک می‌تواند نقاط قوت هر یک را به حداکثر رسانده و مأموریت‌های پیچیده نظارتی را با پوشش ۳۶۰ درجه و هم‌زمان سطح و زیرسطح به‌طور موثرتری انجام دهد [3,4,5]. طی سال‌های گذشته، پیشرفت‌های قابل‌ملاحظه در فناوری سیستم‌های بدون سرنشین، شامل شناورهای سطحی و زیرسطحی بدون سرنشین و پهپادها، امکانات نوآورانه‌ای را برای اجرای مأموریت‌های نظارتی در محیط‌های دریایی و ساحلی به ارمغان آورده‌است. این سیستم‌ها در حوزه‌هایی نظیر عملیات نظامی، پایش محیط‌زیست، جستجو و نجات کاربرد گسترده‌ای یافته‌اند [6]. با این حال، استفاده جداگانه از این سیستم‌ها با محدودیت‌هایی در هماهنگی عملیاتی، اشتراک داده‌ها و بهره‌وری منابع همراه است [1,3,6]. این مقاله به طراحی مفهومی یک پلتفرم مشترک برای ادغام شناورهای سطحی بدون سرنشین، شناورهای زیرسطحی بدون سرنشین و پهپادها می‌پردازد که می‌تواند با بهبود آگاهی موقعیتی و انعطاف‌پذیری، تحول عظیمی در مأموریت‌های نظارت ترکیبی ایجاد کند. در این مقاله تلاش می‌شود تا با بهره‌گیری از مفاهیم کنترل چندعامله، و تحلیل مأموریت‌های واقعی، یک چارچوب مفهومی جامع برای همکاری و هم‌افزایی سکوها بدون سرنشین هواپایه و سطحی و زیرسطحی طراحی گردد.

## ۲- بیان مسئله

چالش اصلی در این پژوهش، مشکلات مرتبط با ادغام شناورهای بدون سرنشین سطحی و زیرسطحی با پشتیبانی پهپاد در یک پلتفرم مشترک است [3]. این چالش‌ها شامل محدودیت‌های ارتباطی در محیط‌های

دریایی، اشتراک داده‌ها بین سیستم‌های ناهمگن، مدیریت انرژی و هماهنگی عملیاتی است. فقدان یک طراحی منسجم برای این ادغام، بهره‌برداری بهینه از قابلیت‌های این سیستم‌ها را دشوار می‌سازد. این پژوهش به دنبال ارائه راه‌حلی مفهومی برای غلبه بر این موانع است. با وجود تمایل به همکاری میان پهپاد، شناورهای سطحی بدون سرنشین و شناورهای زیرسطحی بدون سرنشین، کمتر پلتفرم یکپارچه‌ای ارائه شده که بتواند به‌صورت لحظه‌ای و هماهنگ، داده‌های سطحی، هوایی و زیرسطحی را ترکیب و مأموریت‌های نظارتی ترکیبی را اجرا کند. با وجود افزایش کاربرد وسایل بدون سرنشین در محیط‌های دریایی، هنوز چالش‌هایی اساسی در مسیر ادغام عملیاتی چند سکوی متفاوت وجود دارد. این چالش‌ها شامل:

- ناسازگاری پروتکل‌های ارتباطی میان سامانه‌ها
- تفاوت در نرخ نمونه‌برداری داده و تأخیر در ارسال اطلاعات
- نبود الگوریتم‌های هماهنگ‌سازی وظایف در محیط‌های غیرقطعی و متغیر دریایی
- اگر سیستم‌های بدون سرنشین هوایی، سطحی و زیرسطحی به صورت جداگانه و بدون یک سکو یکپارچه طراحی شوند، با چالش‌های بزرگی در زمینه انرژی و هماهنگی روبه‌رو خواهند شد. نتیجه این ناهماهنگی، هزینه‌های بیشتر، کارایی کمتر و پراکندگی داده‌ها است. بنابراین، راه‌حل این مشکل، طراحی یک سکوی مشترک و یکپارچه‌است که تمام این سکوها را در یک ساختار هماهنگ مدیریت کند.

مسئله اصلی پژوهش این است که:

طراحی مفهومی یک سکوی مشترک چگونه‌است؟ چگونه می‌توان یک سکوی مشترک طراحی نمود که به‌طور یکپارچه، هماهنگ و بهینه، شناورهای بدون سرنشین سطحی و زیرسطحی را تحت پوشش پهپادها قرار دهد و مأموریت‌های نظارتی ترکیبی را با حداکثر کارایی اجرا نماید؟

هدف اصلی پژوهش حاضر، طراحی معماری مفهومی برای هماهنگی بلادرنگ میان شناورهای بدون سرنشین سطحی و زیرسطحی با پشتیبانی پهپاد در یک پلتفرم مشترک است، به گونه‌ای که قابلیت سازگاری با تغییرات

محیطی، تاب‌آوری در برابر نقص سامانه در مصرف منابع را تضمین کند.

### ۳- اهمیت و ضرورت تحقیق

این مطالعه از آن جهت حائز اهمیت است که راه‌حلی نوآورانه برای افزایش کارایی مأموریت‌های نظارتی ارائه می‌دهد. ادغام شناورهای بدون سرنشین سطحی و زیرسطحی و پهپادها در یک پلتفرم مشترک می‌تواند به کاهش هزینه‌ها، بهبود پوشش نظارتی و افزایش انعطاف‌پذیری در شرایط پیچیده منجر شود [1]. این موضوع به‌ویژه در سناریوهایی با منابع محدود و نیاز به نظارت گسترده، ضرورت بیشتری می‌یابد. پیشرفت فناوری‌های بدون سرنشین دریایی در سال‌های اخیر موجب تحول در حوزه نظارت، امنیت و مدیریت منابع دریایی شده‌است. کشورهای پیشرو مانند آمریکا، چین و اتحادیه اروپا با سرمایه‌گذاری بر پروژه‌های پیشرفته‌ای چون Ocean Sentinel و Sea Hunter MCM-USV به دنبال توسعه پلتفرم‌های ترکیبی برای انجام مأموریت‌های مختلف دریایی هستند. این پلتفرم‌ها با ترکیب حسگرهای مختلف، الگوریتم‌های هوشمند و قابلیت‌های خودکارسازی، امکان عملیات گسترده، دقیق و کم‌هزینه در محیط‌های چالش‌برانگیز دریایی را فراهم می‌کنند [3,7].

### ۴- پرسش‌های تحقیق

با گسترش استفاده از وسایل بدون سرنشین در محیط‌های مختلف، شامل هوایی، سطحی و زیرسطحی، نیاز به هماهنگی و ارتباط مؤثر میان آن‌ها برای انجام مأموریت‌های پیچیده، به‌ویژه در حوزه نظارت و جمع‌آوری داده، اهمیت فزاینده‌ای یافته‌است. ترکیب قابلیت‌های این سامانه‌ها در دامنه‌های مختلف پتانسیل بالایی برای افزایش کارایی، پوشش عملیاتی و تحمل‌پذیری خطا دارد، اما دستیابی به این همکاری هم‌افزا نیازمند بررسی سناریوهای عملیاتی بهینه، پارامترهای هماهنگی کلیدی، مکانیزم‌های پیشرفته تخصیص وظایف و شناسایی چالش‌های فنی و عملیاتی همراه با ارائه راهکارهای مناسب است. سوالات مطرح شده به جنبه‌های حیاتی این حوزه از سامانه‌های بدون سرنشین چندگانه می‌پردازند.

- چه معماری مفهومی امکان برقراری ارتباط پایدار و هم‌زمان میان سکوهای بدون سرنشین هواپایه (پهپاد) و سکوهای بدون سرنشین سطحی و زیرسطحی را فراهم می‌آورد؟
- چه سناریوهای عملیاتی برای مأموریت‌های نظارتی ترکیبی مناسب‌ترند؟
- پارامترهای کلیدی هماهنگی میان سامانه‌ها در شرایط محیطی مختلف چیست؟
- مکانیزم‌های تخصیص وظایف میان پهپادها و شناورها چگونه باید طراحی شوند تا بهینه‌ترین پوشش را ارائه دهند؟
- چالش‌های فنی و عملیاتی ادغام سطحی-هوایی-زیرسطحی کدام‌اند و راهکارهای پیشنهادی برای غلبه بر آن‌ها چیست؟

### ۵- محدودیت‌های تحقیق

این تحقیق به ارائه یک طراحی مفهومی برای پلتفرم مشترک ادغام شناورهای بدون سرنشین سطحی، زیرسطحی و پهپاد با هدف تحول در مأموریت‌های نظارت ترکیبی پرداخته‌است. اگرچه این مطالعه چارچوبی اولیه و سناریوهای کاربردی بالقوه را ارائه می‌دهد، اما دارای محدودیت‌هایی است که عمدتاً ناشی از ماهیت مفهومی پژوهش حاضر است. مهم‌ترین این محدودیت‌ها عبارتند از:

- ✓ عدم ارائه جزئیات کامل پیاده‌سازی فنی: تمرکز این مقاله بر طراحی مفهومی و معماری کلی پلتفرم بوده و به جزئیات فنی مربوط به پیاده‌سازی سخت‌افزاری و نرم‌افزاری زیرسیستم‌های مختلف (مانند پروتکل‌های ارتباطی دقیق، الگوریتم‌های سطح پایین کنترل، و جزئیات حسگرها) به تفصیل پرداخته نشده‌است.
- ✓ فاقد مدل‌سازی یا شبیه‌سازی عملکردی کمی: اگرچه سناریوهای عملیاتی برای نمایش پتانسیل پلتفرم ارائه شده‌اند، اما این تحقیق شامل مدل‌سازی یا شبیه‌سازی کمی برای ارزیابی دقیق عملکرد پلتفرم تحت شرایط مختلف محیطی و عملیاتی نیست. بنابراین، ارزیابی کارایی و اثربخشی پلتفرم در این مرحله عمدتاً کیفی و مبتنی بر تحلیل مفهومی است.
- ✓ تحلیل ریسک اولیه و مفهومی: تحلیل ریسک ارائه شده در این مقاله در سطح اولیه و مفهومی انجام

شناورهای بدون سرنشین دریایی و تحلیل مشترک آن‌ها، دقت شناسایی و طبقه‌بندی اهداف را در مقایسه با استفاده از هر سامانه به تنهایی به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد. سامانه‌های منفرد در مواجهه با خرابی یک واحد آسیب‌پذیر هستند [9,11]. در پلتفرم ترکیبی، قابلیت تحمل‌پذیری خطا با امکان پوشش وظایف واحد آسیب‌دیده توسط سایر اجزاء سامانه افزایش می‌یابد (به عنوان مثال، در صورت قطع ارتباط با یک پهپاد، شناورهای بدون سرنشین سطحی می‌توانند با استفاده از حسگرهای محلی خود به جمع‌آوری و به روزرسانی اطلاعات ادامه دهند) [3,4,7].

این مزایا برتری پلتفرم مشترک را در اجرای مأموریت‌های نظارت دریایی پیچیده نسبت به رویکردهای سنتی و استفاده منفرد از سامانه‌های بدون سرنشین برجسته می‌سازند. برخی از مزایای بارز شامل موارد زیر است:

#### ۱. پوشش نظارتی جامع

ادغام هم‌زمان داده‌های پهپاد، شناورهای بدون سرنشین سطحی و زیرسطحی به‌واسطه مکانیزم‌های ادغام چندحسی<sup>۱</sup> امکان پوشش فضایی و زمانی گسترده‌تری را فراهم می‌آورد. به‌طور مشخص:

#### ❖ کاهش نقاط کور

با همگرا کردن داده‌ها در یک سامانه مرکزی، می‌توان خطاهای هریک از سنسورها (مثلاً اختلال راداری یا کاهش دید اپتیکی در شرایط جوی نامساعد) را از طریق بازسازی دوباره‌سازی<sup>۲</sup> با داده‌های مکمل جبران نمود؛ بنابراین دقت نهایی نقشه‌برداری محیط تا ۵-۱۰ درصد بهبود می‌یابد [1,3].

#### ۲. افزایش بهره‌وری مأموریت

هم‌زمان‌سازی عملیات و تخصیص هوشمندانه وظایف موجب کاهش هزینه‌های انرژی، نگهداری و نیروی انسانی می‌شود:

#### ❖ الگوریتم‌های مسیرسنجی مشترک

با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه وظایف نمونه‌برداری و پایش به‌گونه‌ای تقسیم می‌شوند که مجموع مسافت پیموده‌شده و مصرف انرژی کلی کاهش یابد. به‌عنوان مثال، مدل‌های شبیه‌سازی‌شده نشان

شده‌است. شناسایی و ارزیابی دقیق‌تر ریسک‌های فنی، عملیاتی و امنیتی مرتبط با پیاده‌سازی و بهره‌برداری از چنین پلتفرم پیچیده‌ای نیازمند تحلیل‌های جامع‌تر و تخصصی‌تر در مراحل بعدی توسعه‌است.

✓ عدم در نظر گرفتن کامل جنبه‌های قانونی و مقرراتی: بکارگیری سیستم‌های بدون سرنشین در محیط‌های دریایی با چالش‌های قانونی و مقرراتی متعددی در سطوح ملی و بین‌المللی همراه‌است. این پژوهش به طور کامل به این جنبه‌ها نپرداخته و تمرکز اصلی آن بر ابعاد فنی و عملیاتی بوده‌است.

✓ عدم بررسی هزینه‌های توسعه و بهره‌برداری: تخمین دقیق هزینه‌های مربوط به توسعه، تولید، نگهداری و بهره‌برداری از پلتفرم پیشنهادی خارج از دامنه این تحقیق بوده و نیازمند مطالعات اقتصادی مجزا است

#### ۶- مزایای بکارگیری از پلتفرم‌های مشترک در

#### مأموریت‌های دریایی

پلتفرم مشترک پیشنهادی برای ادغام شناورهای بدون سرنشین سطحی و زیرسطحی و پهپادها با بهره‌گیری از قابلیت‌های مکمل این سامانه‌ها، مزایای قابل توجهی نسبت به استفاده منفرد از هر یک ارائه می‌دهد [7,8]. در حالی که پهپادها امکان پوشش سریع مناطق وسیع را فراهم می‌کنند، ترکیب اطلاعات آن‌ها با داده‌های تأییدی از شناورهای بدون سرنشین سطحی و شناورهای بدون سرنشین زیرسطحی امکان تشخیص ناهنجاری‌ها و تأیید اهداف را با دقت بالاتری فراهم آورده و منجر به پوشش مؤثرتر و کامل‌تری می‌شود [9]. با وجود سرعت بالای استقرار پهپادها، استقرار شناورهای بدون سرنشین دریایی ممکن است زمان‌بر باشد. پلتفرم پیشنهادی با رویکرد استقرار ترکیبی و توزیع شده، تأخیرهای مربوط به استقرار و آغاز مأموریت را به حداقل می‌رساند [3]. استفاده از سامانه‌های منفرد اغلب مستلزم تکرار مأموریت‌ها یا عملیات چندباره برای غلبه بر محدودیت‌های پوشش یا دقت است که هزینه عملیاتی را افزایش می‌دهد. پلتفرم یکپارچه با ادغام منابع و بهینه‌سازی اجرای مأموریت، کارایی را افزایش داده و هزینه سرانه نظارت بر واحد سطح را کاهش می‌دهد [10]. ترکیب داده‌های چندحسگری حاصل از پهپادها و

<sup>1</sup> Multi-Sensor Fusion

<sup>2</sup> Reconstruction

داده‌اند که تا ۲۰ درصد صرفه‌جویی در مصرف باتری پهپاد قابل دستیابی است [6]. با برنامه‌ریزی مسیرها به‌گونه‌ای که پهپادها بتوانند وظایف محوله را با کمترین پرواز اضافی و بهینه‌ترین مسیرهای ممکن انجام دهند، می‌توان به‌طور قابل توجهی در مصرف انرژی صرفه‌جویی کرد و زمان عملیاتی پهپادها را افزایش داد [13]. این امر به‌ویژه در کاربردهایی که نیاز به پایش یا نمونه‌برداری در مناطق وسیع یا برای مدت زمان طولانی دارند، اهمیت زیادی پیدا می‌کند. به‌طور خلاصه، مفهوم این است که با استفاده از الگوریتم‌های هوشمند که چندین هدف (مانند مسافت و انرژی) را به‌طور همزمان در نظر می‌گیرند و وظایف را بین عوامل مختلف به‌طور مشترک تقسیم می‌کنند، می‌توان عملیات نمونه‌برداری و پایش را بسیار کارآمدتر انجام داد و منابع ارزشمندی مانند انرژی باتری را حفظ کرد [6,13].

#### ❖ توزیع بار محاسباتی<sup>۳</sup>

این عبارت به روشی برای پخش کردن یا تقسیم کردن وظایف پردازشی سنگین بین بخش‌های مختلف یک سیستم اشاره دارد، به جای اینکه تمام محاسبات در یک نقطه مرکزی (مثل مرکز فرماندهی) انجام شود. هدف اصلی از این کار، بهینه‌سازی عملکرد کل سیستم، کاهش فشار بر روی بخش مرکزی و استفاده بهینه از منابع موجود است. با بهره‌گیری از معماری لیه‌محور<sup>۴</sup>، پردازش اولیه داده‌ها (مثلاً تشخیص هدف با شبکه‌های عصبی سبک‌وزن) در نزدیک‌ترین گره عملیاتی (پهپاد یا شناور سطحی) انجام شده و تنها نتایج فشرده‌شده به مرکز فرماندهی ارسال می‌شود؛ این کار پهنای باند ارتباطی مورد نیاز را تا ۳۰-۵۰ درصد کاهش می‌دهد [3]. هدف اصلی از این کار، بهینه‌سازی عملکرد کل سیستم، کاهش فشار بر روی بخش مرکزی و استفاده بهینه از منابع موجود است [11].

#### ج. ارتقای قابلیت تصمیم‌گیری فرماندهی

یکپارچه‌سازی لایه‌های اطلاعاتی، دیدگاه چند منظوره را برای فرماندهان فراهم می‌سازد:

#### ❖ نمایش هم‌زمان سه‌بعدی محیط

ترکیب داده‌های سنسار زیرسطحی با تصویر مادون‌قرمز سطحی و نقشه ارتفاعی هوایی، یک مدل دیجیتال محیط ایجاد می‌کند [2] که قابلیت پیمایش مجازی را برای تحلیل‌گران امکان‌پذیر می‌نماید.

#### ❖ کاهش بار شناختی<sup>۵</sup>

به میزان تلاش ذهنی و منابع پردازشی مغز که یک فرد (اپراتور انسانی) برای انجام یک کار یا مجموعه‌ای از کارها نیاز دارد، گفته می‌شود. در سیستم‌های پیچیده مانند مراکز کنترل پهپادها و شناورها، اپراتورها با حجم عظیمی از اطلاعات، هشدارها و وظایف مواجه هستند. پردازش مداوم همه این اطلاعات، بار شناختی بالایی را به آن‌ها تحمیل می‌کند که می‌تواند منجر به خستگی، خطا و کندی در تصمیم‌گیری شود [14]. با استفاده از داشبوردهای هوشمند مبتنی بر قوانین اولویت‌گذاری، مأموریت‌های اضطراری (مثل شناسایی هدف متحرک) به‌صورت خودکار در قالب هشدار نشان‌گذاری شده و نیاز تماس مکرر انسان با سامانه را کاهش می‌دهد؛ مطالعات نشان داده‌اند که چنین سامانه‌هایی می‌توانند زمان پاسخ تصمیم‌گیری را تا ۴۰ درصد تسریع کنند [8].

#### د. تاب‌آوری در شرایط بحرانی

طراحی پلتفرم مشترک با مکانیزم‌های مقاومت در برابر خطا و بازپیکربندی پویا قابلیت ادامه عملیات حتی پس از بروز نقص سخت‌افزاری یا ارتباطی را تضمین می‌کند [15], [14].

#### ❖ کنترل توزیع‌شده با سرریز وظیفه

هدف اصلی از کنترل توزیع‌شده با سرریز وظیفه، اطمینان از ادامه بی‌وقفه عملیات سامانه حتی در صورت بروز مشکل برای یک یا چند بخش آن است [11]. به جای اینکه خرابی یک گره منجر به توقف یا اختلال کلی در مأموریت شود، سامانه با انعطاف‌پذیری وظایف را مجدداً سازماندهی می‌کند تا کارها تکمیل شوند [15]. در صورت از دست رفتن ارتباط یا خرابی یک گره (مثلاً شناورهای بدون سرنشین زیرسطحی) وظایف معوقه به نزدیک‌ترین گره سطحی یا هوایی تخصیص یافته و سامانه بدون وقفه به عملیات ادامه می‌دهد.

#### ❖ شبکه مش خودبه‌خود سازمان

<sup>3</sup> Computational Load Distribution

<sup>4</sup> Edge Computing

<sup>5</sup> Cognitive Load Reduction

| و پهباد<br>(پیشنهادی) |        |        |         |                                          |
|-----------------------|--------|--------|---------|------------------------------------------|
| 500-650               | 10-20  | 80-150 | 300-500 | پوشش<br>منطقه‌ای<br>(km <sup>2</sup> /h) |
| 5-15                  | 45-60  | 30-45  | 5-10    | زمان استقرار<br>(min)                    |
| 20-30                 | 80-100 | 50-70  | 25-40   | هزینه عملیاتی<br>(USD/km <sup>2</sup> )  |
| 90-95%                | 65-70% | 60-75% | 70-80%  | دقت شناسایی<br>هدف (%)                   |
| 80-90%                | 50-60% | 45-55% | 40-50%  | مقاومت در<br>برابر خطا (%)               |

## ۷- چالش‌های فنی و عملیاتی در پلتفرم شناورهای

### بدون سرنشین سطحی و زیرسطحی و پهپادها

در طراحی یک سامانه نظارتی ترکیبی مبتنی بر شناورهای بدون سرنشین سطحی و زیرسطحی و پهپادها چالش‌های فنی و عملیاتی مختلفی وجود دارد که می‌توانند بر پایداری، کارایی و اثربخشی عملیات تأثیر بگذارند (جدول ۳). برای دستیابی به عملکرد بهینه، ضروری است که این چالش‌ها به‌طور سیستماتیک شناسایی شده و راهکارهای فنی مؤثر برای مقابله با آن‌ها طراحی و پیاده‌سازی شود.

جدول ۳- برخی چالش‌های فنی و عملیاتی در سکوی ترکیبی بدون سرنشین‌ها [12,13,16]

| چالش                                | اثر بر مأموریت                                                                               | راهکار پیشنهادی                                                                                                |
|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| محدودیت‌های ارتباطی و اختلالات شبکه | قطع ارتباط میان سکوها بدون سرنشین هواپایه و سطحی و زیرسطحی، کاهش هماهنگی و افزایش زمان واکنش | توسعه شبکه‌های مش مقاوم، چندمسیره کردن ارتباطات، کشف خودکار اختلالات، طراحی مأموریت‌های مقاوم به تأخیر         |
| مدیریت مصرف انرژی                   | کاهش مدت مأموریت، نیاز به بازگشت زودهنگام به پایگاه                                          | بهینه‌سازی مسیر بر اساس مصرف انرژی، مدیریت تطبیقی انرژی، استقرار ایستگاه‌های شارژ شناور، سخت‌افزار کم‌مصرف     |
| ادغام داده‌های چندمنبعی             | کاهش دقت شناسایی اهداف و تحلیل وضعیت محیط                                                    | فیوژن تطبیقی چندسطحی، استفاده از مدل‌های یادگیری عمیق برای فیوژن داده، مدیریت کیفیت داده‌ها قبل از ادغام       |
| تحمل‌پذیری خطا                      | خطر توقف کامل مأموریت در صورت خرابی یکی از پلتفرم‌ها                                         | طراحی مأموریت با افزونگی عملکردی، سامانه‌های تشخیص و بازبایی خطا، باز تخصیص بلادرنگ وظایف میان دارایی‌های سالم |

مفهوم شبکه مش خودبه‌خودسازمان با استفاده از پهپاد ایجاد یک شبکه ارتباطی پویا، انعطاف‌پذیر و بسیار قابل اطمینان توسط خود پهپاد است [16]. این شبکه با قابلیت خودسازماندهی و استفاده از پهپاد به عنوان رله، امکان برقراری ارتباط حتی در شرایطی که ارتباط مستقیم خط دید وجود ندارد را فراهم می‌کند.

افزونگی موجود در ساختار مش و قابلیت مسیریابی چندمرحله‌ای سریع، باعث می‌شود سامانه در برابر قطع ارتباط یا خرابی گره‌ها مقاوم باشد و احتمال افت کامل پوشش نظارتی (که وابسته به ارتباط پایدار است) به شدت کاهش یابد [1]. این امر برای مأموریت‌های حیاتی پایش و نمونه‌برداری که نیاز به ارتباط پایدار و جمع‌آوری مداوم داده دارند، بسیار مهم است.

پهپادها به‌عنوان رله‌های بی‌سیم عمل کرده و در صورت قطع ارتباط خط مستقیم، مسیرهای جایگزین را در کسری از ثانیه کشف و برقرار می‌کنند؛ این ساختار افزونگی باعث می‌شود احتمال افت کامل پوشش نظارتی به کمتر از ۲ درصد برسد [17].

با توجه به هدف طراحی سکوی ترکیبی شناورهای بدون سرنشین سطحی و زیرسطحی و پهپادها برای بهبود عملیات‌های گشت و نظارت ساحلی، ارزیابی عملکرد آن در مقایسه با سیستم‌های سنتی و سامانه‌های منفرد موجود اهمیت زیادی دارد. در جداول ۱ و ۲ معیارهای کلیدی عملکرد برای این سامانه‌ها و مقایسه‌ای کمی میان پلتفرم پیشنهادی و رویکردهای رایج در عملیات‌های نظارت دریایی ارائه شده است.

جدول ۱- معیارهای کلیدی عملکرد

| تعریف                                                                 | معیار               |
|-----------------------------------------------------------------------|---------------------|
| مساحت تحت نظارت در واحد زمان                                          | پوشش منطقه‌ای       |
| زمان مورد نیاز برای آغاز عملیات پس از دریافت مأموریت                  | زمان استقرار        |
| هزینه سرانه بر کیلومتر مربع نظارت                                     | هزینه عملیاتی       |
| درصد اهداف شناسایی شده به صورت صحیح نسبت به تعداد کل اهداف موجود      | دقت شناسایی هدف     |
| توانایی ادامه عملیات در صورت بروز خرابی یا اختلال در یکی از سامانه‌ها | مقاومت در برابر خطا |

جدول ۲- جدول مقایسه حدودی عملکرد هزینه بر حسب دلار

| ترکیب شناور                                 | شناور               | شناور                  | معیار       |
|---------------------------------------------|---------------------|------------------------|-------------|
| سطحی بدون سرنشین، شناور زیرسطحی بدون سرنشین | زیرسطحی بدون سرنشین | شناور سطحی بدون سرنشین | پهپاد منفرد |
| بدون سرنشین                                 | منفرد               | منفرد                  |             |

## ۸- الگوریتم‌های هماهنگی و تخصیص وظایف در پلتفرم ترکیبی (شناورهای بدون سرنشین سطحی و زیرسطحی و پهپادها)

هماهنگی مؤثر میان سامانه‌های ناهمگون و تخصیص بهینه وظایف به دارایی‌ها، از ارکان حیاتی موفقیت مأموریت‌های نظارت ساحلی به شمار می‌رود. به دلیل پویایی بالای محیط دریایی، محدودیت منابع و تغییرات لحظه‌ای شرایط عملیاتی، نیاز به الگوریتم‌هایی وجود دارد که بتوانند به صورت بلادرنگ، تخصیص تطبیقی وظایف و هماهنگی چندعامله را مدیریت کنند، جدول ۴ برخی وظایف الگوریتم‌های هماهنگی را بیان می‌کند.

جدول ۴- الگوریتم‌های هماهنگی و تخصیص وظایف در پلتفرم

ترکیبی

| کاربرد مناسب                                             | معایب                                                                                 | مزایا                                                                            | الگوریتم                                  |
|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| تخصیص اولیه در محیط‌های پایدار یا مأموریت‌های فوری       | -انعطاف‌پذیری پایین<br>-ضعف در شرایط پیچیده و متغیر                                   | -اجرای بسیار سریع<br>-پیاده‌سازی ساده<br>-نیاز کم به منابع محاسباتی              | الگوریتم مبتنی بر قواعد                   |
| تخصیص ابتدایی وظایف در شروع مأموریت یا بازآرایی سریع     | -مقیاس‌پذیری ضعیف برای تعداد زیاد دارایی‌ها<br>-غیرتطبیقی نسبت به تغییرات محیطی       | -یافتن تخصیص بهینه با حداقل هزینه کل<br>-مناسب برای تعداد محدود وظایف/دارایی‌ها  | الگوریتم Hungarian برای تخصیص بهینه اولیه |
| بهینه‌سازی بلندمدت تخصیص وظایف در محیط‌های پویا و نامعین | -نیاز به زمان آموزش<br>-نیاز به توان پردازشی بالاتر<br>-حساس به انتخاب معیارهای پاداش | -قابلیت تطبیق با شرایط متغیر<br>-یادگیری مستقل از محیط<br>-افزایش کارایی بلندمدت | الگوریتم یادگیری تقویتی چندعامله          |

## ۹- پیشینه تحقیق

پژوهش‌های متعددی به بررسی کاربرد شناورهای بدون سرنشین سطحی و زیرسطحی و پهپادها به صورت جداگانه پرداخته‌اند. برای مثال، شناور بدون سرنشین سطحی در پایش محیط‌زیست [2,15]، بدون سرنشین زیرسطحی در اکتشافات زیرسطح و پهپادها در نظارت هوایی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با این حال، ادغام این سیستم‌ها در یک پلتفرم مشترک کمتر مورد توجه قرار گرفته‌است. مطالعات اولیه بر معماری‌های شبکه‌ای و پروتکل‌های ارتباطی متمرکز بوده‌اند. پژوهش‌های متعددی در سال‌های اخیر به بررسی کاربرد سامانه‌های

بدون سرنشین در محیط‌های دریایی پرداخته‌اند [1,3,5,7,18,19] و قابلیت‌های منحصر به فرد هر یک از این سیستم‌ها را در مأموریت‌های متنوعی مانند پایش محیط‌زیست، اکتشافات زیرسطحی، نظارت ساحلی و عملیات جستجو و نجات مورد توجه قرار داده‌اند. برای مثال، برخی مطالعات بر کاربرد و توسعه شناورهای سطحی بدون سرنشین برای وظایفی نظیر گشت‌زنی، نقشه‌برداری و بازرسی تمرکز داشته‌اند. همزمان، پیشرفت‌ها در حوزه شناورهای زیرسطحی بدون سرنشین امکان انجام مأموریت‌های پیچیده‌تر در اعماق را فراهم آورده‌است [20]، از جمله بازرسی زیرساخت‌های زیرآبی و شناسایی اهداف پنهان. پهپادها نیز به دلیل سرعت بالا، انعطاف‌پذیری و توانایی پوشش مناطق وسیع از ارتفاع، به ابزاری مهم در نظارت هوایی و جمع‌آوری اطلاعات بلادرنگ در محیط‌های دریایی تبدیل شده‌اند [1].

با وجود قابلیت‌های چشمگیر هر یک از این سامانه‌ها به صورت منفرد، عملکرد آن‌ها با محدودیت‌هایی ذاتی در پوشش همه‌جانبه (هوایی، سطحی و زیرسطحی)، تداوم عملیات در محیط‌های چالش‌برانگیز و نیاز به هماهنگی دستی در مأموریت‌های پیچیده مواجه است. در سال‌های اخیر، توجه به همکاری و ادغام دو دسته از این سیستم‌ها، به ویژه همکاری پهپاد و شناورهای بدون سرنشین سطحی افزایش یافته‌است [16]. پژوهش‌هایی نظیر کار به بررسی چالش‌های همکاری شناورهای بدون سرنشین سطحی و پهپادها در شرایط سخت دریایی و کار به برنامه‌ریزی مسیر هماهنگی بین این دو سیستم پرداخته‌اند [7,8]. این مطالعات نشان می‌دهند که ترکیب قابلیت‌های هوایی و سطحی می‌تواند به بهبودهایی در زمینه‌هایی مانند افزایش حوزه دید، پشتیبانی ناوبری و کاهش نقاط کور کمک کند [18]. همچنین، برخی تحقیقات به سیستم‌های چندعامله<sup>۶</sup> به عنوان چارچوبی برای مدیریت و هماهنگی گروهی از شناورهای بدون سرنشین، مانند گروهی از شناورهای بدون سرنشین سطحی پرداخته‌اند [12,21,22]. با این حال، ادغام عملیاتی مؤثر هر سه نوع دارایی ناهمگون در قالب یک پلتفرم مشترک برای اجرای مأموریت‌های نظارت ترکیبی پیچیده، حوزه‌ای است که کمتر مورد توجه جامع قرار

<sup>۶</sup> Multi-Agent Systems - MAS

چارچوب معماری وزارت دفاع آمریکا ابزاری استاندارد برای طراحی، تحلیل و مستندسازی معماری سازمانی سامانه‌های پیچیده دفاعی است که با هدف ایجاد زبان مشترک میان طراحان، فرماندهان و تصمیم‌گیران توسعه یافته‌است. این چارچوب مأموریت‌ها را به مدل‌های عملیاتی، سیستمی، فنی و داده‌ای ترجمه می‌کند تا هم‌ترازی بین نیازهای عملیاتی، قابلیت‌های فناوری و منابع فراهم شود. در حوزه عملیات دریایی، کاربرد چارچوب معماری وزارت دفاع آمریکا در طراحی معماری فرماندهی و کنترل یک ناوگروه به‌صورت مشخص شامل ترسیم جریان اطلاعات بین شناورها، زیردریایی‌ها، هواگردها و مراکز فرماندهی ساحلی، تعیین نقش و مأموریت هر عنصر در شبکه مشترک عملیات، و تعریف استانداردهای ارتباطی و امنیتی است. اصول کلیدی در این معماری عبارت‌اند از: قابلیت همکاری میان سامانه‌های بین‌سازمانی، انعطاف‌پذیری برای سازگاری با شرایط نبرد متغیر، یکپارچگی اطلاعات برای داشتن تصویری مشترک از میدان نبرد، و قابلیت ردیابی الزامات از سطح مأموریت تا پیاده‌سازی فنی. به‌طور نمونه، در طراحی معماری فرماندهی و کنترل ناوگروه، چارچوب معماری وزارت دفاع آمریکا کمک می‌کند تا وظایف عملیاتی مانند شناسایی تهدیدات، تبادل داده‌های راداری، هماهنگی آتش و پشتیبانی لجستیکی در قالب نماهای عملیاتی، سامانه‌ای و فنی مدل‌سازی و به تصمیم‌گیرندگان ارائه شود.

طراحی مفهومی پلتفرم مشترک پیشنهادی بر مبنای نظری زیر استوار است:

**سیستم‌های چندعامله<sup>۷</sup>:** سیستم‌های چندعامله به مجموعه‌ای از عامل‌ها<sup>۸</sup> اطلاق می‌شود که به صورت مستقل اما هماهنگ برای دستیابی به اهداف فردی یا جمعی در یک محیط مشترک عمل می‌کنند [14]. در اینجا، عامل به موجودیتی خودمختار گفته می‌شود که می‌تواند اطلاعات محیط را دریافت کرده، آن را پردازش کند، تصمیم‌گیری انجام دهد و براساس آن عمل کند. [6] در یک سیستم چندعامله، عامل‌ها ممکن است ویژگی‌های زیر را داشته باشند [13,23]:

گرفته‌است. چالش‌های کلیدی در این ادغام سه‌گانه شامل برقراری ارتباط پایدار و مطمئن در سه محیط متفاوت (هوا، سطح و زیر آب)، ترکیب و پردازش داده‌های ناهمگن حاصل از حسگرهای متنوع، و هماهنگی بلادرنگ و تخصیص پویای وظایف بین عامل‌هایی با دینامیک‌ها و قابلیت‌های بسیار متفاوت است [1,3,17,18].

این پژوهش با هدف پر کردن این شکاف تحقیقاتی، به ارائه یک طراحی مفهومی برای پلتفرم مشترکی می‌پردازد که امکان ادغام و هماهنگی هم‌زمان سامانه‌های بدون سرنشین سطحی و زیرسطحی و پهپادها را فراهم می‌آورد.

جدول ۵-پیشینه تحقیق

| ردیف | عنوان مقاله                                                                                                                          | سال انتشار | نوع سیستم مورد بررسی                                                        | دستاوردهای مقاله                                                                                                                                                                                  |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [۱۰] | Drone Carrier: An Integrated Unmanned Surface Vehicle for Autonomous Inspection and Intervention in GNSS-Denied Maritime Environment | ۲۰۲۵       | سرنشین (شناورهای بدون سرنشین)                                               | معرفی و اثبات قابلیت یک شناور سطحی بدون سرنشین حامل پهپاد برای انجام وظایف بازرسی و مداخله به صورت خودکار در محیط‌های دریایی                                                                      |
| [۱۷] | Towards UAV-USV Collaboration in Harsh Maritime Conditions Including Large Waves                                                     | ۲۰۲۵       | سرنشین پهپاد و شناورهای سطحی بدون سرنشین                                    | توسعه و ارزیابی سیستمی برای همکاری نزدیک بین پهپاد و شناور سطحی بدون سرنشین در شرایط سخت دریا شامل مدل‌سازی حرکت شناور سطحی بدون سرنشین در امواج و برنامه‌ریزی مسیر پهپاد برای فرود بر روی آن     |
| [۱۸] | Multi-Agent Grouping and Routing with Cooperative Tasks                                                                              | ۲۰۲۵       | بررسی سیستم‌های چندعامله مبتنی بر پهپاد                                     | بررسی مسئله گروه‌بندی و مسیریابی گروهی از پهپادها برای انجام وظایف مشترک با هدف حداکثرسازی سود و کاهش زمان تکمیل مأموریت                                                                          |
| [۱۹] | Generative AI-Enhanced Cooperative MEC of UAVs and Ground Stations for Unmanned Surface Vehicles                                     | ۲۰۲۵       | سرنشین (شناورهای بدون سرنشین و پهپاد و ایستگاه زمینی)                       | پیشنهاد یک چارچوب محاسبات ابر با استفاده از هوش مصنوعی مولد برای پشتیبانی مسئولیت‌های شناور سطحی بدون سرنشین توسط پهپادها و ایستگاه‌های زمینی در محیط‌های پویا و نامطمئن                          |
| [۲۰] | Cooperative trajectory planning algorithm of USV-UAV with full dynamic constraints                                                   | -          | سرنشین (شناورهای بدون سرنشین و پهپاد)                                       | ارائه الگوریتم برنامه‌ریزی مسیریابی برای سیستم شناور سطحی بدون سرنشین و پهپاد که در آن پهپاد به عنوان حسگر پرنده برای کمک به ناوبری شناور سطحی بدون سرنشین در محیط‌های پیچیده عمل می‌کند          |
| [۲۱] | Applications of Multi-Agent Systems in Unmanned Surface Vessels                                                                      | ۲۰۲۲       | کاربرد سیستم‌های چندعامله (شناورهای بدون سرنشین)                            | ارائه یک مرور بر وضعیت فعلی پیاده‌سازی سیستم‌های چندعامله در شناورهای سطحی بدون سرنشین و بررسی مفاهیم عمل و کاربردهای سیستم‌های چندعامله در حوزه مأموریت‌های دریایی                               |
| [۲۲] | Multi-agent systems for ships and unmanned vehicles                                                                                  | ۲۰۲۲       | چندعامله (کشتی، شناورهای بدون سرنشین، شناورهای زیرسطحی بدون سرنشین و پهپاد) | ارائه خلاصه‌ای از کاربرد سیستم‌های چندعامله برای انواع مختلف وسایل نقلیه دریایی و هوایی، شامل شناورهای سطحی بدون سرنشین، شناورهای زیرسطحی بدون سرنشین و پهپاد و بررسی قابلیت‌های همکاری و هماهنگی |

جدول ۵ نشان می‌دهد که تحقیقات اخیر به طور فزاینده‌ای به سمت بررسی همکاری بین انواع مختلف سیستم‌های بدون سرنشین پیش می‌روند، به ویژه ترکیب پهپاد و شناورهای بدون سرنشین سطحی با این حال، همانطور که در بازنگری بخش پیشینه تحقیق اشاره شد، ادغام هم‌زمان هر سه سیستم شناورهای بدون سرنشین سطحی و زیرسطحی و پهپادها در یک چارچوب عملیاتی جامع، کماکان یک حوزه فعال و نیازمند پژوهش بیشتر است.

## ۱۰- مبانی نظری

<sup>7</sup> Multi-Agent Systems - MAS

<sup>8</sup> Agents

|                                                                               |                      |
|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| هر عامل می‌تواند در صورت قطع ارتباط با مرکز، تصمیم‌های محلی بگیرد             | تصمیم‌گیری غیرمتمرکز |
| در صورت از کار افتادن یک عامل، سایر عامل‌ها می‌توانند مأموریت آن را پوشش دهند | تحمل‌پذیری خطا       |

**معماری سرویس‌گرا<sup>۹</sup>** در سامانه‌های چندعامله بدون سرنشین معماری سرویس‌گرا یک الگوی پیشرفته در طراحی نرم‌افزار است که به دلیل ترویج ماژولار بودن، قابلیت استفاده مجدد و اتصال سست بین مؤلفه‌های سیستم، به عنوان یک گزینه‌ی ایده‌آل برای معماری نرم‌افزاری پلتفرم‌های مشترک در محیط‌های چندعامله در نظر گرفته می‌شود [24]. این معماری با فراهم‌سازی بستری انعطاف‌پذیر، توسعه، نگهداری و ارتقاء سامانه‌های پیچیده را تسهیل کرده و بهبود می‌بخشد [1]. در سامانه‌های نظارتی و عملیاتی که ترکیبی از وسایل پرنده بدون سرنشین، وسایل سطحی بدون سرنشین و وسایل زیرسطحی بدون سرنشین مشارکت دارند، معماری سرویس‌گرا می‌تواند نقشی کلیدی در ایجاد ارتباط مؤثر و مدیریت کارآمد مأموریت‌ها ایفا کند [21]. در این الگو، هر سرویس عملکرد مشخصی ارائه می‌دهد و از طریق رابط‌های استاندارد، مستقل از فناوری پیاده‌سازی، به سایر مؤلفه‌ها خدمات‌رسانی می‌کند. ویژگی‌های اصلی معماری سرویس‌گرا که آن را برای این کاربرد مناسب می‌سازد عبارتند از [14,21]:

- ماژولار بودن: سامانه به مجموعه‌ای از سرویس‌های مستقل تقسیم می‌شود که هر کدام وظیفه‌ای مشخص را بر عهده دارند. این ویژگی انعطاف‌پذیری و توسعه تدریجی سامانه را ممکن می‌سازد.
- قابلیت استفاده مجدد: سرویس‌ها طوری طراحی می‌شوند که در مأموریت‌ها یا سامانه‌های مختلف قابل بهره‌برداری مجدد باشند، که موجب کاهش هزینه‌ها و زمان توسعه می‌شود.
- اتصال سست: سرویس‌ها به گونه‌ای با یکدیگر ارتباط برقرار می‌کنند که وابستگی‌های میان آن‌ها به حداقل می‌رسد؛ در نتیجه تغییر در یک سرویس اثر مستقیمی بر سایر بخش‌ها ندارد.

- خودمختاری: عامل‌ها بدون نیاز به کنترل مستقیم انسان یا سایر عامل‌ها، عمل می‌کنند.
- تعامل: عامل‌ها می‌توانند با یکدیگر یا با محیط تعامل داشته باشند، اطلاعات مبادله کنند یا به صورت تیمی همکاری کنند.
- هماهنگی: عامل‌ها برای دستیابی به اهداف مشترک، فعالیت‌های خود را هماهنگ می‌کنند.
- همکاری یا رقابت بسته به اهداف سیستم، عامل‌ها می‌توانند با یکدیگر همکاری کنند یا رقابت نمایند.
- سازگاری عامل‌ها می‌توانند براساس تغییرات محیطی یا تغییر اهداف، رفتار خود را تنظیم کنند.

در حوزه‌های مختلف مانند نظارت مرزی، مدیریت سکوها بدون سرنشین، سیستم‌های دفاعی، حمل‌ونقل هوشمند و اینترنت اشیا، سیستم‌های چندعامله به عنوان یک چارچوب مؤثر برای مدیریت تعاملات پیچیده و تصمیم‌گیری غیرمتمرکز به کار گرفته می‌شود [4]. در سناریوی نظارت مرزی که شامل پهناده‌ها شناورهای سطحی بدون سرنشین و زیردریایی‌های بدون سرنشین است:

- هر وسیله به عنوان یک عامل عمل می‌کند.
- این عامل‌ها باید اطلاعات را جمع‌آوری، پردازش و به اشتراک بگذارند تا دید کلی از محیط ایجاد شود.
- از طریق سیستم‌های چندعامله، این عامل‌ها می‌توانند وظایف نظارتی، شناسایی تهدیدات، تخصیص مأموریت و به‌روزرسانی مسیرها را بدون وابستگی به یک نقطه کنترل مرکزی مدیریت کنند.
- سیستم‌های چندعامله امکان توزیع بار کاری، افزایش تحمل خطا و بهبود پوشش عملیاتی در محیط‌های پیچیده و پویا را فراهم می‌آورد.

جدول ۶- ویژگی‌های کلیدی سیستم‌های چندعامله مناسب برای سناریوی ترکیبی سطحی-هوایی-زیرسطحی [4,13,14]

| ویژگی            | توضیح                                                                                                          |
|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ارتباط چندسطحی   | امکان تبادل داده میان پهناد، شناور سطحی بدون سرنشین و شناور زیرسطحی بدون سرنشین از طریق شبکه‌های ارتباطی مقاوم |
| تخصیص پویا وظایف | تقسیم هوشمندانه مأموریت‌ها بین عامل‌ها بر مبنای موقعیت، قابلیت و وضعیت منابع                                   |
| هماهنگی چندعامله | استفاده از پروتکل‌های هماهنگی برای جلوگیری از تداخل و بهینه‌سازی فعالیت‌ها                                     |

<sup>۹</sup> Service-Oriented Architecture - SOA

در سامانه‌هایی که از چندین نوع سامانه بدون سرنشین مانند پهپاد، شناورهای بدون سرنشین سطحی و زیرسطحی برای مأموریت‌های نظارتی، جستجو و امداد، یا عملیات‌های ترکیبی استفاده می‌کنند، این اصول نقش حیاتی در تضمین ارتباطات پایدار و هماهنگی مؤثر دارند [3,12,25].

#### اصول طراحی شبکه‌های ارتباطی مقاوم و کارآمد

در سامانه‌های چندعامله، ارتباطات میان اجزاء سیستم باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که از مقاومت بالا در برابر خطا و تداخل‌های محیطی برخوردار باشند. ویژگی‌های زیر در طراحی شبکه‌های ارتباطی این‌گونه سیستم‌ها ضروری است:

- اتصال مقاوم: طراحی شبکه باید به‌گونه‌ای باشد که حتی در شرایط محیطی سخت و تغییرات دینامیکی، ارتباط بین اجزاء سامانه حفظ شود. به‌ویژه در مواقعی که یکی از اجزاء (مثل شناورهای بدون سرنشین زیرسطحی) دچار نقص یا اختلال می‌شود، شبکه باید بتواند مسیرهای جایگزین و اتصالات مقاوم به خطا ایجاد کند [21].
- پهنای باند و تأخیر کم: به‌ویژه در مأموریت‌هایی که نیاز به تبادل داده‌های با حجم بالا (مثل داده‌های سنسوری یا تصویری) دارند، طراحی شبکه باید پهنای باند کافی و تأخیر کمی را در انتقال داده‌ها فراهم کند. این امر برای عملیات نظارت مرزی یا مأموریت‌های شبیه به آن بسیار حیاتی است [24].
- مقیاس‌پذیری: شبکه باید قادر باشد به‌طور مؤثر با افزایش تعداد اجزاء سامانه بدون سرنشین مانند پهپاد، شناورهای بدون سرنشین سطحی و زیرسطحی یا تغییر در شرایط عملیاتی، عملکرد خود را حفظ کند. این ویژگی به‌ویژه در سناریوهای عملیات گسترده یا چندمأمیته که نیاز به هماهنگی بالا دارد، بسیار مهم است [14].

#### الگوریتم‌های کنترل پیشرفته

در طراحی سامانه‌های چندعامله که دینامیک‌های پیچیده و عدم قطعیت‌های محیطی و سیستمی را تجربه می‌کنند، استفاده از الگوریتم‌های کنترل پیشرفته ضروری است. برخی از این الگوریتم‌ها عبارتند از [6,18,21,26]:

- کنترل تطبیقی: این الگوریتم‌ها به سیستم اجازه می‌دهند تا به‌طور خودکار پارامترهای کنترل را بر

- افزایش مقیاس‌پذیری: با افزودن یا حذف سرویس‌ها می‌توان مقیاس سامانه را بر اساس نیازهای عملیاتی تنظیم کرد.
  - پشتیبانی از ترکیب پویا: سامانه می‌تواند سرویس‌های جدید را در زمان اجرا شناسایی و به‌طور خودکار در مأموریت‌ها ادغام کند، که این ویژگی به‌ویژه در محیط‌های پویا و غیرقابل پیش‌بینی اهمیت دارد.
- با توجه به نیاز روزافزون به پلتفرم‌های یکپارچه و منعطف برای هماهنگی میان شناورهای بدون سرنشین سطحی و زیرسطحی و پهپادها در مأموریت‌های نظارت مرزی، استفاده از معماری سرویس‌گرا به دلیل ویژگی‌های ساختاری منحصربه‌فرد خود، گزینه‌ای کارآمد و آینده‌نگر محسوب می‌شود [20]. این رویکرد نه تنها پایداری و قابلیت انطباق سامانه را در مواجهه با تغییرات محیطی افزایش می‌دهد، بلکه مدیریت پیچیدگی‌های فنی را نیز ساده‌تر می‌کند. الگوی معماری نرم‌افزاری، به دلیل ترویج ماژولار بودن، قابلیت استفاده مجدد و اتصال سست بین مولفه‌ها، به عنوان یک کاندیدای مناسب برای معماری نرم‌افزاری پلتفرم مشترک در نظر گرفته می‌شود. این امر توسعه، نگهداری و ارتقاء سیستم را تسهیل می‌کند. معماری پیشنهادی بر مبنای اصول سرویس‌گرا طراحی شده و شامل چهار ماژول اصلی است [1,14,20]:

جدول ۷- ماژول‌های اصلی در معماری سرویس‌گرا و سکوی ترکیبی

| وظیفه اصلی                                                                          | ماژول                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| برنامه‌ریزی مأموریت، تخصیص وظایف، کنترل دارایی‌ها                                   | زیرسیستم فرماندهی و کنترل    |
| ایجاد و مدیریت شبکه ارتباطی مقاوم سکوه‌ای بدون سرنشین هواپایه و سطحی و زیرسطحی      | زیرسیستم ارتباطات            |
| جمع‌آوری، تجمع، پردازش و تحلیل داده‌های چندمنبعی                                    | زیرسیستم ترکیب و پردازش داده |
| مدیریت تعامل سخت‌افزاری و نرم‌افزاری با پهپادها، سکوه‌ای بدون سرنشین سطحی و زیرسطحی | رابط دارایی‌ها               |

نظریه شبکه‌های ارتباطی و نظریه کنترل در سامانه‌های چندعامله بدون سرنشین: نظریه شبکه‌های ارتباطی و نظریه کنترل دو رکن اصلی برای طراحی و توسعه سامانه‌های پیچیده و چندعامله هستند.

این چارچوب نه تنها باعث افزایش قابلیت‌های عملیاتی سامانه می‌شود، بلکه از قابلیت تحمل خطا، انعطاف‌پذیری و مقیاس‌پذیری سیستم نیز اطمینان حاصل می‌کند.

#### ۱۱- روش تحقیق

این پژوهش از نظر نوع تحقیق، یک تحقیق کاربردی است که با هدف ارائه راهکاری برای یک مشکل عملی (بهبود نظارت دریایی) انجام می‌شود و دارای جنبه‌های توسعه‌ای به دلیل ارائه یک طرح مفهومی جدید است. از نظر ماهیت، تحقیق حاضر توصیفی-تحلیلی و مبتنی بر طراحی مفهومی است. منابع علمی (مقالات ژورنالی و کنفرانسی)، کتب، گزارش‌های فنی، و استانداردهای مرتبط با پلتفرم ترکیبی سیستم‌های چندعامله، ادغام سیستم‌ها، معماری C4ISR و ارتباطات دریایی، با تمرکز بر منابع منتشر شده از پایگاه‌های داده معتبر جمع‌آوری و تحلیل شدند. جامعه تحقیق شامل کلیه دانش و فناوری‌های مرتبط با سیستم‌های بدون سرنشین دریایی و هوایی و ادغام آن‌ها است. نمونه تحقیق شامل مجموعه‌ای هدفمند از مقالات، اسناد فنی و استانداردهای معتبر و به‌روز است که بر اساس کلیدواژه‌های تحقیق و معیارهای مرتبط بودن و اعتبار انتخاب شده‌اند. این تحقیق نمونه‌گیری آماری از افراد یا واحدهای فیزیکی ندارد.

#### ۱۲- سناریوهای عملیاتی پیشرفته برای مأموریت‌های نظارتی ترکیبی (شناورهای بدون سرنشین سطحی و زیرسطحی و پهپادها)

این سناریوها نمونه‌هایی از کاربرد هم‌افزای سامانه‌های بدون سرنشین در دامنه‌های هوایی، سطحی و زیرسطحی برای دستیابی به قابلیت‌های فراتر از توانایی‌های منفرد هر سامانه هستند. موفقیت در این مأموریت‌ها به شدت وابسته به معماری ارتباطی پایدار، الگوریتم‌های پیشرفته هماهنگی و تخصیص وظیفه، و فیوژن هوشمند داده‌ها از حسگرهای مختلف است.

##### سناریوی ۱: گشت و نظارت گسترده ساحلی<sup>۱۰</sup>

**شرح مأموریت:** در این سناریو، یک شبکه دینامیک و خودسازمان‌یافته از پهپادهای گشت‌زنی با توانایی پرواز پایدار در ارتفاع بالا، ستون فقرات پوشش منطقه وسیع

اساس تغییرات محیطی یا ویژگی‌های سیستم تطبیق دهد. برای مثال، در یک عملیات نظارتی مرزی که شرایط محیطی ممکن است به سرعت تغییر کند، کنترل تطبیقی می‌تواند اطمینان حاصل کند که پهپاد، شناور سطحی بدون سرنشین و شناور زیرسطحی بدون سرنشین به‌طور مؤثر با یکدیگر همکاری کنند، حتی اگر وضعیت سیستم تغییر کند [21].

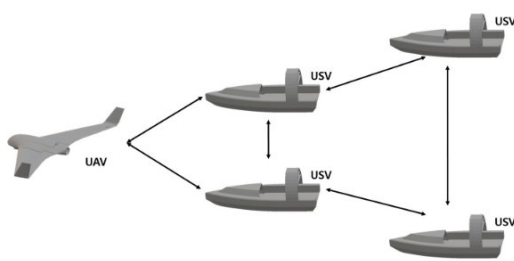
▪ **کنترل مقاوم:** این نوع کنترل به‌ویژه در شرایطی که سیستم‌ها دچار عدم قطعیت یا اختلال می‌شوند، مفید است. این الگوریتم‌ها به سامانه‌ها این امکان را می‌دهند که در برابر تغییرات غیرمنتظره در دینامیک‌های محیطی یا سامانه‌ای مقاوم بمانند. در سناریوهای نظارتی یا جستجو که ممکن است اطلاعات حسی مختل شود، کنترل مقاوم از اهمیت بالایی برخوردار است [26].

▪ **کنترل پیش‌بین:** در این الگوریتم‌ها، رفتار آینده سیستم پیش‌بینی می‌شود و تصمیمات کنترلی بر اساس پیش‌بینی‌های انجام‌شده اتخاذ می‌شود. برای مثال، در مأموریت‌های جستجو و امداد که پیش‌بینی مسیر یا شرایط محیطی اهمیت دارد، کنترل پیش‌بین می‌تواند کمک کند تا سامانه‌ها به‌طور مؤثرتری مسیرهای خود را تنظیم کرده و منابع خود را بهینه کنند [24].

#### ترکیب نظریه شبکه‌های ارتباطی و نظریه کنترل

ترکیب مؤثر شبکه‌های ارتباطی مقاوم با الگوریتم‌های کنترل پیشرفته به سیستم‌های چندعامله اجازه می‌دهد تا در شرایط متغیر، به‌طور هماهنگ و بهینه عمل کنند. این چارچوب نظری بر مبنای اصول علمی و مهندسی، نه تنها قابلیت تحقق‌پذیری سامانه‌ها را در سطح مفهومی تضمین می‌کند، بلکه عملکرد بهینه و کارایی سامانه را در مواجهه با چالش‌های مختلف محیطی و سیستمی افزایش می‌دهد [18,25]. با توجه به پیچیدگی‌ها و عدم قطعیت‌های موجود در محیط‌های عملیاتی سامانه‌های چندعامله، استفاده از ترکیب اصول نظریه شبکه‌های ارتباطی مقاوم و الگوریتم‌های کنترل پیشرفته یک راهکار مؤثر برای طراحی و پیاده‌سازی پلتفرم‌های مشترک برای، شناورهای بدون سرنشین سطحی و زیرسطحی و پهپادها در مأموریت‌های نظارتی، جستجو و امداد است [10,27].

<sup>10</sup> Wide-Area Coastal Patrol and Surveillance



شکل ۱- شماتیکی از سکوهاى ترکیبى هواپایه و سکوهاى بدون سرنشین سطحى در عملیات گشت و نظارت دریایى

جدول ۸- بررسی تهدیدها، فرصتها، نقاط ضعف و قوت در سناریو اول (گشت و نظارت گسترده ساحلى)

| تهدیدها                                           | فرصتها                                           | نقاط ضعف                                             | نقاط قوت                                                           |
|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| حملات سایبری به شبکه ارتباطی یا داده‌های حسگرها   | بهینه‌سازی مسیر گشت‌زنی                          | وابستگی به پایداری شبکه ارتباطی                      | پوشش جغرافیایی گسترده با دارایی‌های هوایی و دریایی                 |
| خرابکاری یا مداخله انسانی در عملیات‌های ساحلی     | همکاری‌های منطقه‌ای برای اشتراک داده‌های نظارتی  | مصرف بالای انرژی در مأموریت‌های طولانی               | بهبود دقت تشخیص از طریق همجواری داده‌های شناورهای بدون سرنشین سطحی |
| افزایش رقابت بین‌المللی در حوزه فناوری‌های نظارتی | توسعه فناوری‌های ارتباطی پیشرفته مانند 5G دریایی | وابستگی عملکرد به شرایط آب‌وهوایی (باد، موج، باران)  | توانایی جمع‌آوری داده‌های چندمنظوره در زمان واقعی                  |
| موانع حقوقی ناشی از قوانین بین‌المللی دریایی      | در توسعه سنسورهای نوین با ماندگاری بیشتر         | نیاز به تعمیر و نگهداری مکرر تجهیزات در محیط‌های خشن | انعطاف‌پذیری عملیاتی از طریق معماری مدولار                         |

**اهمیت سناریو:** این سناریو نمایانگر توانایی سامانه در ارائه پوشش گسترده و مداوم، انتقال هوشمند وظایف بر مبنای اولویت‌های عملیاتی و جمع‌آوری دقیق داده‌های چنددانه‌ای (هوایی، سطحی و زیرسطحی) می‌باشد. ادغام داده‌های چندمنظوره از شناورهای بدون سرنشین سطحی باعث افزایش دقت در شناسایی اهداف و بهبود کیفیت تصمیم‌گیری می‌شود. چالش‌های اصلی این سناریو شامل مدیریت حجم زیاد داده‌های حسگرها، حفظ پایداری ارتباطات در فواصل طولانی، و تخصیص بهینه منابع عملیاتی به اهداف جدید است.

جدول ۹- تحلیل ریسک عملیاتی در سناریو اول (گشت و نظارت گسترده ساحلى)

| راهکار کاهش ریسک | احتمال وقوع | شدت اثر | ریسک |
|------------------|-------------|---------|------|
|------------------|-------------|---------|------|

ساحلی را تشکیل می‌دهند. این پهپادها با بهره‌گیری از مجموعه‌ای پیشرفته از حسگرها، شامل رادارهای دهانه ترکیبی برای شناسایی اهداف سطحی در تمامی شرایط آب‌وهوایی، سامانه‌های الکترواپتیکی/فروسرخ برای شناسایی بصری و حرارتی دقیق و گیرنده‌های داده‌های سامانه شناسایی خودکار و شناسایی و ردیابی دوربرد جهت پایش ترافیک دریایی مجاز، به طور مستمر بر منطقه تحت نظارت، گشت می‌زنند. داده‌های حسگرها در سطح پهپادها یا از طریق گره‌های پردازشی لبه<sup>۱۱</sup> پردازش و تجمیع شده و اهداف دریایی، مسیر حرکت آن‌ها و تطابق با اطلاعات ترافیکی قانونی بررسی می‌شود. در صورت کشف هدفی که نیاز به بررسی میدانی بیشتری داشته باشد (مانند قایق‌های کوچک ناشناس یا کشتی‌های بدون اطلاعات سامانه شناسایی خودکار)، مختصات مکانی دقیق و مشخصات هدف به شناورهای سطحی بدون سرنشین که در نقاط کلیدی مستقر هستند، مخابره می‌شود. شناورهای سطحی بدون سرنشین با حرکت سریع به سمت هدف، با استفاده از سامانه‌های حسگری نزدیک‌برد (دوربین‌های با زوم اپتیکی بالا، لیدار سطحی برای پروفیل‌گیری سازه‌ها) اقدام به شناسایی دقیق و تأیید اطلاعات می‌کنند. در صورت نیاز به بررسی‌های زیرسطحی (نظیر جستجوی اشیاء مشکوک در بستر دریا)، سکو زیرسطحی بدون سرنشین که به طور مستقل یا از روی شناورهای سطحی بدون سرنشین مستقر شده‌اند، مأمور به انجام عملیات می‌شوند. ارتباط میان شناورهای بدون سرنشین سطحی و زیرسطحی و پهپادها از طریق یک معماری ارتباطی چندلایه، شامل پیوندهای رادیویی مستقیم یا چندمرحله‌ای بین پهپاد و شناورهای بدون سرنشین سطحی و پیوندهای آکوستیک زیر آب برای ارتباط با شناورهای بدون سرنشین زیرسطحی برقرار می‌شود. جدول ۷ و جدول ۹ تهدیدها، فرصتها و نقاط ضعف و قوت را تحلیل ریسک سناریو عملیاتی را نشان می‌دهد.

<sup>11</sup> Edge Computing Nodes

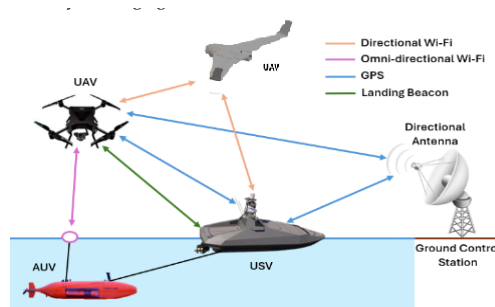
|                                                                                      |       |            |                                                             |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-------|------------|-------------------------------------------------------------|
| توسعه شبکه‌های مش مقاوم، استفاده از لینک‌های چندفرکانسی، بازاریابی بلادرنگ شبکه      | زیاد  | زیاد       | اختلال در ارتباط سکوها بدون سرنشین هواپایه و سطحی و زیرسطحی |
| استفاده از پهپادهای دورپرواز با بهره‌وری انرژی بالا، تعبیه ایستگاه‌های شارژ دریایی   | متوسط | زیاد       | تخلیه سریع باتری پهپادها                                    |
| بهبود پیش‌بینی وضعیت جوی و تعریف سیاست‌های کناره‌گیری از مأموریت در شرایط بحرانی     | کم    | بسیار زیاد | آسیب تجهیزات در طوفان‌های ناگهانی                           |
| ارتقاء الگوریتم‌های فیوزن داده یا تکنیک‌های یادگیری عمیق و اعتبارسنجی تطبیقی داده‌ها | متوسط | متوسط      | خطا در همجوشی داده‌های چندسکویی                             |

شکل ۲- شماتیکی از ترکیب سکوها بدون سرنشین در عملیات رهگیری در دریا

**شرح مأموریت:** پس از شناسایی و طبقه‌بندی یک شناور سطحی مشکوک توسط سامانه نظارتی ترکیبی (طبق سناریوی ۱)، مرحله تعقیب و احتمالاً رهگیری آغاز می‌شود. یک یا چند پهپاد برای حفظ تماس بصری و راداری مداوم با هدف از ارتفاع مناسب (که امکان پنهان‌کاری نسبی را نیز فراهم می‌کند) اختصاص می‌یابند. این پهپاد با استفاده از دوربین‌های با زوم بالا و رادارهای تعقیب، مسیر، سرعت و وضعیت هدف را به صورت بلادرنگ ردیابی کرده و داده‌های موقعیتی بسیار دقیق (با در نظر گرفتن خطای جی‌پی‌اس و استفاده از فیلترهای پیشرفته) را از طریق یک کانال ارتباطی با تأخیر کم به شناورهای بدون سرنشین سطحی تعقیب‌کننده منتقل می‌کنند. شناورهای بدون سرنشین سطحی که برای سرعت و مانورپذیری بالا طراحی شده‌اند، با استفاده از الگوریتم‌های هدایت و کنترل پیش‌بینانه<sup>۱۳</sup> و با بهره‌گیری از داده‌های دریافتی از پهپاد، اقدام به تنظیم مسیر خود برای رهگیری و مسدودسازی مسیرهای فرار احتمالی هدف در سطح می‌کنند. همزمان، با تحلیل سرعت، مسیر و موقعیت هدف و دانش قبلی از منطقه شناورهای بدون سرنشین زیرسطحی به صورت استراتژیک در مسیرهای فرار زیرسطحی احتمالی مستقر یا فعال می‌شوند. این شناورهای بدون سرنشین زیرسطحی با استفاده از سونارهای جانبی سونارهای چندپرتویی یا حتی حسگرهای مغناطیسی، به پایش هرگونه فعالیت زیرسطحی مشکوک یا تلاش هدف برای پنهان شدن در زیر آب (مثلاً در نزدیکی بستر دریا یا سازه‌های زیرآبی) می‌پردازند. هماهنگی میان پهپاد شناورهای بدون سرنشین سطحی و شناورهای بدون سرنشین زیرسطحی نیازمند یک درک مشترک از وضعیت<sup>۱۴</sup> و قابلیت تصمیم‌گیری توزیع‌شده است؛ برای مثال، اگر هدف ناگهان تغییر مسیر دهد، هر سه نوع پلتفرم باید قادر باشند به‌طور مستقل و هماهنگ، استراتژی تعقیب خود را به‌روزرسانی کنند. چالش اصلی در این سناریو، حفظ ارتباط پایدار در حین حرکت سریع، دقت ردیابی بلادرنگ

سناریوی گشت و نظارت ساحلی گسترده، ترکیبی از پوشش هوشمند، پاسخ سریع و تحلیل چندحسگری است که در کنار طراحی مقاوم ارتباطی و کنترل پیشرفته، مسیر عملیاتی مؤثری برای نظارت مستمر بر مناطق ساحلی فراهم می‌آورد. این رویکرد می‌تواند به‌عنوان یک مدل مفهومی قدرتمند برای توسعه سامانه‌های نظارتی چندعامله آینده در محیط‌های دریایی تلقی شود. پیاده‌سازی این سناریو باعث افزایش توان عملیاتی در نظارت ساحلی، بهبود آگاهی محیطی، ارتقاء سرعت پاسخ به تهدیدات و افزایش اثربخشی عملیات‌های مرزی می‌شود. بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته پردازش داده، ارتباطات امن و سامانه‌های بدون سرنشین چندسکویی، این رویکرد را به یک راهبرد اثربخش و آینده‌نگر در حوزه امنیت ساحلی و دریایی تبدیل می‌کند.

## سناریوی ۲: تعقیب و رهگیری هدف همگرا<sup>۱۲</sup>



<sup>13</sup> Predictive Control

<sup>14</sup> Shared Situational Awareness

<sup>12</sup> Converged Target Tracking and Pursuit

|                                       |       |      |                                                 |
|---------------------------------------|-------|------|-------------------------------------------------|
| شلوغ                                  |       |      | تداخل                                           |
| کاهش کیفیت<br>حسگرها در<br>فاصله زیاد | متوسط | زیاد | استفاده از حسگرهای<br>(EO/IR, چندحالت<br>Radar) |

### سناریوی ۳: بازرسی دقیق زیرساخت‌های دریایی و ارزیابی ساختاری<sup>۱۵</sup>

**شرح مأموریت:** هدف این سناریو، انجام بازرسی جامع و دقیق از زیرساخت‌های ثابت یا نیمه‌شناور دریایی (مانند سکوها نفتی، توربین‌های بادی فراساحلی، اسکله‌ها، خطوط لوله) است. در مرحله اول، پهپادها مجهز به دوربین‌های با وضوح بالا و لیدار هواپرد برای انجام فتوگرامتری دقیق و ایجاد یک مدل سه‌بعدی اولیه با جزئیات بالا از بخش‌های بالای سطح آب سازه به کار می‌روند. این مدل به عنوان مرجع فضایی برای مراحل بعدی عمل می‌کند. سپس، شناورهای بدون سرنشین سطحی مجهز به سامانه‌های موقعیت‌یابی دقیق، سیستم‌های ناوبری بصری یا لیدار و حسگرهای بازرسی نزدیک‌بردتر شامل دوربین‌های فرورسرخ برای شناسایی نقاط داغ یا خوردگی سطحی، لیدار سطحی برای اسکن دقیق بخش‌های جانبی سازه و احتمالاً حسگرهای غیرمخرب تماسی برای بررسی بخش‌های قابل دسترسی از روی سطح آب، وارد عمل می‌شوند. این شناورهای بدون سرنشین سطحی مسیرهای از پیش برنامه‌ریزی شده یا خودکار را در نزدیکی سازه با دقت بالا طی می‌کنند و داده‌های بازرسی را جمع‌آوری می‌کنند. در نهایت، شناورهای بدون سرنشین زیرسطحی که ابزارهای اصلی برای بازرسی بخش‌های غوطه‌ور و فونداسیون زیرآبی هستند، فعال می‌شوند. این شناورهای بدون سرنشین زیرسطحی ممکن است شامل شناورهای بدون سرنشین زیرسطحی خودگردان برای اسکن بستر دریا و بخش‌های بزرگتر سازه با سونار چندپرتویی/تصویری، و یا وسایل نقلیه با کنترل از راه دور باشند که توسط شناورهای بدون سرنشین سطحی مستقر و کنترل می‌شوند و مجهز به دوربین‌های زیرآبی با نورپردازی مناسب، سونارهای با وضوح بالا، حسگرهای غیرمخرب زیرآبی (مانند ضخامت‌سنجی التراسونیک، بازرسی جریان

هدف، و هماهنگی مانورهای همزمان در سه بعد برای جلوگیری از فرار بدون ایجاد تداخل یا برخورد بین عوامل خودی است. جدول ۱۰ و جدول ۱۱ تهدیدها، فرصت‌ها و نقاط ضعف و قوت را تحلیل ریسک سناریو عملیاتی دوم را نشان می‌دهد.

جدول ۱۰- بررسی تهدیدها، فرصت‌ها، نقاط ضعف و قوت در سناریو دوم (تعقیب و رهگیری هدف همگرا)

| تهدیدها                                                    | فرصت‌ها                                                | نقاط ضعف                                           | نقاط قوت                                                              |
|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| اقدامات متقابل توسط هدف (جاسوسی یا تداخل)                  | استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته چندعامله برای پیش‌بینی | عدم توانایی تغییر اندازه دارایی‌ها برای اهداف کوچک | هم‌افزایی بین پهپاد و شناور بدون سرنشین سطحی برای عملیات هوایی و سطحی |
| آسیب به دارایی‌ها در نزدیکی ساختارها                       | همکاری با سازمان‌های دیگر برای تعقیب موثرتر            | احتمال از دست دادن هدف به دلیل نگهداری پیشگیرانه   | ردیابی مخفیانه با شناورهای بدون سرنشین زیرسطحی در اعماق آب            |
| احتمال اختلال در ارتباطات به دلیل تداخل‌های الکترومغناطیسی | استفاده از هوش مصنوعی برای پیش‌بینی رفتار هدف          | نیاز به هماهنگی پیچیده بین عوامل مختلف             | قابلیت انعطاف‌پذیری در تغییر مسیر و استراتژی                          |
| افزایش پیچیدگی تاکتیک‌های فرار هدف                         | توسعه سیستم‌های خودکار برای واکنش سریع‌تر              | محدودیت در برد عملیاتی دارایی‌ها                   | سرعت بالا در پردازش داده‌های حسگرها                                   |

**اهمیت سناریو:** این سناریو اوج همکاری چنددانه‌ای در یک مأموریت پویا و واکنش‌گرا است. ترکیب دید هوایی گسترده، سرعت بالای سطحی و قابلیت پایش پنهان زیرسطحی، احتمال موفقیت در تعقیب و جلوگیری از فرار اهداف دریایی را به شدت افزایش می‌دهد. استفاده از الگوریتم‌های پیش‌بینانه و تخصیص وظیفه دینامیک، سامانه را قادر می‌سازد تا به صورت مؤثر به تاکتیک‌های فرار هدف پاسخ دهد.

جدول ۱۱- تحلیل ریسک عملیاتی در سناریو دوم (تعقیب و رهگیری هدف همگرا)

| راهکار کاهش ریسک                                         | احتمال وقوع | شدت اثر   | ریسک                                |
|----------------------------------------------------------|-------------|-----------|-------------------------------------|
| رهگیری پیش‌بینانه با الگوریتم فیلتر کالمن پیشرفته        | زیاد        | خیلی زیاد | گم کردن هدف به علت مانورهای ناگهانی |
| تعریف حریم‌های مجازی و الگوریتم‌های اجتناب در زمان واقعی | کم          | خیلی زیاد | برخورد بین دارایی‌ها                |
| جداسازی طیفی کانال‌ها و اعمال پروتکل‌های ضد              | متوسط       | زیاد      | تداخل سیگنالی در محیط‌های           |

<sup>15</sup> Detailed Maritime Infrastructure Inspection & Structural Assessment

|           |            |            |
|-----------|------------|------------|
| آسیب‌دیده | زیرساخت‌ها | تحلیل بهتر |
|-----------|------------|------------|

**اهمیت:** این فرآیند بازرسی سه‌لایه و چندحسگری، امکان ارزیابی جامع و دقیق وضعیت ساختاری زیرساخت‌های دریایی را فراهم می‌کند که منجر به تشخیص زودهنگام آسیب‌ها، برنامه‌ریزی بهینه تعمیر و نگهداری، کاهش نیاز به غواصان انسانی در شرایط خطرناک و صرفه‌جویی قابل توجه در هزینه‌ها می‌شود. ادغام خودکار داده‌ها از منابع مختلف، فرآیند تحلیل و گزارش‌دهی را تسریع می‌کند.

جدول ۱۳- تحلیل ریسک عملیاتی در سناریو سوم (بازرسی دقیق زیرساخت‌های دریایی و ارزیابی ساختاری)

| ریسک                                       | شدت اثر | احتمال وقوع | راهکار کاهش ریسک                                         |
|--------------------------------------------|---------|-------------|----------------------------------------------------------|
| سکوی بدون برخورد سرشتین زیرسطحی با زیرساخت | زیاد    | متوسط       | حسگرهای جلوگیری از برخورد و مانور خودکار فاصله‌گیری      |
| قطع ارتباط زیرآبی                          | زیاد    | متوسط       | استفاده از شبکه‌های آکوستیک مقاوم و ذخیره موقت داده      |
| نویز محیطی بالا در زیرآب                   | متوسط   | زیاد        | فیلترگذاری پیشرفته بر داده‌های سونار و اکوساندر          |
| ناکافی بودن وضوح تصاویر                    | متوسط   | متوسط       | ارتقاء دوربین‌های زیرآبی به وضوح بالا و نورپردازی تطبیقی |

**سناریوی ۴: عملیات امداد و نجات دریایی<sup>۱۶</sup>**  
**شرح مأموریت:** پس از دریافت سیگنال اضطراری یا گزارش حادثه دریایی، پهپادها به عنوان اولین واکنش‌دهنده هوایی با سرعت بالا به منطقه اعزام می‌شوند [28]. این پهپادها با استفاده از الگوهای جستجوی بهینه (مانند جستجوی شبکه‌ای یا مربع گسترده) این الگوی جستجو زمانی استفاده می‌شود که نقطه شروع جستجو معمولاً آخرین موقعیت شناخته شده هدف یا یک نقطه احتمالی با احتمال بالا برای حضور هدف (مهم است و انتظار می‌رود هدف در نزدیکی این نقطه باشد. منطقه را پوشش می‌دهند و با بهره‌گیری از حسگرهای ترکیبی شامل دوربین‌های EO/IR برای شناسایی افراد یا قایق‌های نجات در سطح آب (حتی در شب یا شرایط دید کم) و احتمالاً سامانه‌های تشخیص سیگنال (مانند ردیابی سیگنال‌های اضطراری از قایق‌ها یا تجهیزات نجات)، موقعیت دقیق بازماندگان، لاشه شناور

گردابی) و احتمالاً ابزارهای نمونه‌برداری کوچک هستند. چالش اصلی در این سناریو، ناوبری دقیق و ایمن در نزدیکی سازه‌های پیچیده، همگام‌سازی فضایی دقیق داده‌های جمع‌آوری شده از پلتفرم‌ها و حسگرهای مختلف برای ایجاد یک مدل سه‌بعدی یکپارچه و جامع از وضعیت سازه، و مدیریت ارتباطات در محیط‌های زیرآبی چالش‌برانگیز است. جدول ۱۲ و اهمیت: این فرآیند بازرسی سه‌لایه و چندحسگری، امکان ارزیابی جامع و دقیق وضعیت ساختاری زیرساخت‌های دریایی را فراهم می‌کند که منجر به تشخیص زودهنگام آسیب‌ها، برنامه‌ریزی بهینه تعمیر و نگهداری، کاهش نیاز به غواصان انسانی در شرایط خطرناک و صرفه‌جویی قابل توجه در هزینه‌ها می‌شود. ادغام خودکار داده‌ها از منابع مختلف، فرآیند تحلیل و گزارش‌دهی را تسریع می‌کند.

**جدول ۱۳** تهدیدها، فرصت‌ها و نقاط ضعف و قوت را تحلیل ریسک سناریو عملیاتی سوم را نشان می‌دهد. اهمیت این سناریو اوج همکاری چندداده‌ای در یک مأموریت پویا و واکنش‌گرا است. ترکیب دید هوایی گسترده، سرعت بالای سطحی و قابلیت پایش پنهان زیرسطحی، احتمال موفقیت در تعقیب و جلوگیری از فرار اهداف دریایی را به شدت افزایش می‌دهد. استفاده از الگوریتم‌های پیش‌بینانه و تخصیص وظیفه دینامیک، سامانه را قادر می‌سازد تا به صورت مؤثر به تاکتیک‌های فرار هدف پاسخ دهد.

جدول ۱۲- بررسی تهدیدها، فرصت‌ها، نقاط ضعف و قوت در سناریو سوم (بازرسی دقیق زیرساخت‌های دریایی و ارزیابی ساختاری)

| تهدیدها                                     | فرصت‌ها                                           | نقاط ضعف                                     | نقاط قوت                                          |
|---------------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| آسیب به دارایی‌ها در نزدیکی سازه‌ها         | توسعه سیستم‌های نجات خودمختار با قابلیت بازرسی    | پهنای باند محدود برای انتقال داده‌های سنگین  | بازرسی جامع بدون هزینه و ریسک انسانی              |
| تهدیدات امنیتی از مداخله انسانی یا خرابکاری | استفاده از فناوری‌های پیشرفته برای کاهش آسیب‌ها   | نیاز به تطبیق سریع با شرایط غیرقابل پیش‌بینی | کاهش زمان و هزینه با بازرسی‌های دوره‌ای و خودکار  |
| تغییرات ناگهانی در شرایط محیطی              | توسعه سنسورهای پیشرفته برای تشخیص دقیق‌تر آسیب‌ها | محدودیت در دسترسی به مناطق عمیق یا خطرناک    | کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات با داده‌های دقیق |
| هزینه بالای جایگزینی تجهیزات                | ادغام با سیستم‌های پیش‌بینی خرابی                 | وابستگی به باتری و محدودیت‌های انرژی         | استفاده از تصاویر سه‌بعدی برای                    |

<sup>16</sup> Maritime Search and Rescue - SAR

|                                                  |                                       |                                          |                                             |
|--------------------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------|
| سطحی های کوچک                                    |                                       |                                          |                                             |
| پشتیبانی از عملیات شبانه روزی با حسگرهای پیشرفته | وابستگی به پیش بینی دقیق موقعیت حادثه | توسعه پهپادهای تخصصی برای انتقال تجهیزات | کمبود نیروی انسانی آموزش دیده برای پشتیبانی |

**اهمیت:** این سناریو زمان واکنش در عملیات امداد و نجات دریایی را به شدت کاهش می دهد، با استفاده از قابلیت های دید وسیع و حسگرهای پیشرفته پهپاد حوزه جستجو را گسترش می دهد، ایمنی تیم های نجات انسانی را با انجام وظایف اولیه توسط سامانه های بدون سرنشین افزایش می دهد و با به کارگیری شناورهای بدون سرنشین زیرسطحی امکان جستجو و بررسی مؤثر در محیط زیر آب را فراهم می کند که در روش های سنتی بسیار دشوار است. تخصیص وظیفه هوشمند بر اساس اطلاعات بلادرنگ، کارایی عملیات نجات را به حداکثر می رساند.

جدول ۱۵- تحلیل ریسک عملیاتی در سناریو چهارم ( عملیات امداد و نجات دریایی)

| راهکار کاهش ریسک                                                     | احتمال وقوع | شدت اثر   | ریسک                                |
|----------------------------------------------------------------------|-------------|-----------|-------------------------------------|
| طراحی ساختار مقاوم، اعمال سیاست خودبازایی بعد از واژگونی             | کم          | خیلی زیاد | از دست رفتن دارایی ها در امواج بلند |
| استفاده از الگوریتم های تشخیص مبتنی بر یادگیری عمیق در تصاویر حرارتی | متوسط       | خیلی زیاد | خطا در تشخیص مصدومان در آب          |
| اولویت بندی بسته های اطلاعاتی بحرانی و اعمال QoS در شبکه ارتباطی     | متوسط       | زیاد      | تأخیر در ارسال داده های حیاتی       |
| استفاده از حسگرهای چندطیفی (حرارتی، راداری) و پروتوهای نفوذگر مه     | زیاد        | زیاد      | محدودیت دید در شب یا مه غلیظ        |

## سناریوی ۵: گشت زنی و پاسخگویی ضدنفوذ دریایی چندلایه<sup>۱۷</sup>

شرح مأموریت: برای حفاظت از مناطق حساس دریایی (مانند مرزهای آبی، بنادر استراتژیک، تأسیسات فراساحلی)، یک ساختار گشت زنی چندلایه ایجاد می شود. پهپادها به صورت مداوم در ارتفاعات مختلف بر فراز منطقه مرزی یا حساس گشت می زنند و با استفاده از رادارهای نظارتی، برای رهگیری سیگنال های رادیویی و راداری و دوربین های دوربرد، لایه نظارت هوایی را فراهم

حادثه دیده و گستردگی منطقه حادثه را شناسایی می کنند. داده های شناسایی شده شامل مختصات، تعداد تقریبی افراد، وضعیت سلامتی اولیه (قابل تخمین از تصاویر حرارتی) و وجود خطرات (مانند آتش، نشت سوخت) به صورت بلادرنگ به فرماندهی عملیات و شناورهای بدون سرنشین سطحی امداد و نجات اعزام می شود. شناورهای بدون سرنشین سطحی که مجهز به تجهیزات نجات (مانند جلیقه های نجات پرتابی، قایق های بادی خودکار، یا حتی قابلیت حمل تعداد محدودی از افراد نجات یافته) و سامانه های ناوبری مقاوم در محیط های آشفته و پر از آلودگی/لاشه هستند، به سمت نقاط شناسایی شده توسط پهپاد هدایت می شوند. آنها عملیات نجات اولیه و تثبیت وضعیت را آغاز می کنند. همزمان، در صورت وجود گزارش هایی مبنی بر غرق شدن بخشی از شناور یا احتمال وجود افراد یا اشیاء مهم در زیر سطح آب، شناورهای بدون سرنشین زیرسطحی برای جستجوی زیر آب، بررسی لاشه غرق شده، نقشه برداری از بستر دریا برای شناسایی اشیاء یا موانع و احتمالاً هدایت غواصان نجات (در صورت لزوم) با استفاده از سونارهای جستجوگر و دوربین های زیرآبی اعزام می شوند. چالش های اصلی شامل هماهنگی سریع و پویا بین سکوها، ارتباطات قابل اعتماد در محیط پر از تداخل الکترومغناطیسی و صوتی، و تصمیم گیری سریع در شرایط استرس زا و اطلاعات ناقص است. جدول ۱۴ و جدول ۱۵ تهدیدها، فرصتها و نقاط ضعف و قوت را تحلیل ریسک سناریو عملیاتی چهارم را نشان می دهد.

جدول ۱۴- بررسی تهدیدها، فرصتها، نقاط ضعف و قوت در سناریو چهارم (عملیات امداد و نجات دریایی)

| تهدیدها                                               | فرصتها                                                 | نقاط ضعف                                                    | نقاط قوت                                      |
|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| کاهش دارایی ها یا داده ها در شرایط آب و هوایی نامناسب | ارتقاء سیستم های نجات خودمختار با هوش مصنوعی           | پهنای باند محدود برای تجهیزات نجات یا ارتباط اضطراری        | کاهش قابل توجه در زمان پاسخ به حوادث          |
| تهدیدات جاسوسی یا خرابکاری در مأموریت ها              | استفاده برای نظارت امنیتی ملی و منطقه ای               | نیاز به تطبیق سریع با شرایط حادثه                           | افزایش ایمنی عملیات با کاهش دخالت انسانی      |
| افزایش تعداد حوادث به دلیل تغییرات آب و هوایی         | همکاری با سازمان های امدادی برای بهبود پروتکل های نجات | محدودیت در ظرفیت حمل تجهیزات نجات توسط شناورهای بدون سرنشین | توانایی پاسخ سریع به حوادث در مناطق دورافتاده |

<sup>17</sup> Multi-Layer Maritime Anti-Intrusion Patrol & Response

می‌کنند. شناورهای بدون سرنشین سطحی در سطح آب به صورت هماهنگ با پهپاد، خطوط مرزی را گشت‌زنی کرده و با استفاده از رادارهای سطحی، دوربین‌های حرارتی و سامانه‌های شناسایی هویت کشتی‌ها لایه نظارت سطحی را پوشش می‌دهند. همزمان، شناورهای بدون سرنشین زیرسطحی مجهز به سونارهای پسیو (برای گوش دادن به صداهای زیردریایی‌ها یا وسایل نقلیه زیرآبی کوچک)، سونارهای اکتیو با فرکانس پایین (برای برد بلند) یا فرکانس بالا (برای تشخیص دقیق‌تر اهداف نزدیک)، و احتمالاً حسگرهای مغناطیسی یا شیمیایی، لایه نظارت زیرسطحی را پوشش می‌دهند و به دنبال هرگونه نفوذگر زیرآبی یا اشیاء مشکوک (مانند مین‌های دریایی) می‌گردند. تمامی داده‌های حسگر از هر سه دامنه به صورت بلادرنگ به یک واحد پردازش مرکزی (احتمالاً توزیع شده بین چند شناورهای بدون سرنشین سطحی یا یک ایستگاه کنترل شناور) ارسال شده و با استفاده از الگوریتم‌های فیوژن داده چندمنبعی، برای تشکیل یک تصویر عملیاتی یکپارچه و شناسایی اهداف مشکوک همبستگی می‌یابند. در صورت شناسایی یک تهدید (مثلاً یک نفوذگر سطحی که توسط شناورهای بدون سرنشین سطحی شناسایی شده و همزمان پهپاد حرکت غیرعادی آن را تأیید کرده، یا یک تماس زیرسطحی که توسط شناورهای بدون سرنشین زیرسطحی تشخیص داده شده‌است)، سامانه به‌طور خودکار یک پاسخ چندلایه را آغاز می‌کند. این پاسخ می‌تواند شامل تغییر الگوهای گشت‌زنی برای تمرکز بر منطقه تهدید، اعزام سریع‌ترین شناورهای بدون سرنشین سطحی- پهپاد در دسترس برای رهگیری بصری یا راداری دقیق‌تر، یا هدایت شناورهای بدون سرنشین زیرسطحی برای تعقیب پنهان هدف زیرآبی باشد. چالش‌های کلیدی شامل حفظ هماهنگی فضایی و زمانی در الگوهای گشت‌زنی چندلایه، همبستگی دقیق و سریع اهداف در دامنه‌های مختلف، و واکنش هماهنگ و متناسب با تهدید در شرایط پرفشار است.

**اهمیت:** این سناریو امنیت دریایی را با ایجاد یک پوشش نظارتی و دفاعی همزمان در سه بُعد به طور چشمگیری افزایش می‌دهد. شناسایی تهدید از چندین منظر و امکان پاسخگویی لایه‌ای، نقاط ضعف سامانه‌های نظارتی تک‌بعدی را پوشش داده و کارایی در جلوگیری از

نفوذهای غیرمجاز را بهبود می‌بخشد. افزونگی در پوشش و مسیرهای ارتباطی نیز پایداری سامانه را تضمین می‌کند. جدول ۱۶ تهدیدها، فرصت‌ها، نقاط ضعف و قوت در سناریو پنجم را نشان می‌دهد.

جدول ۱۶- بررسی تهدیدها، فرصت‌ها، نقاط ضعف و قوت در سناریو پنجم (گشت‌زنی و پاسخگویی ضدنفوذ دریایی چندلایه)

| تهدیدها                                                    | فرصت‌ها                                            | نقاط ضعف                                    | نقاط قوت                                              |
|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| تهدیدات در حال تحول از جاسوسی یا وسایل نقلیه خودمختار دشمن | توسعه فناوری‌های پیشرفته برای نظارت چندبعدی        | مصرف بالای منابع و انرژی برای عملیات مداوم  | لایه‌بندی امنیتی چندبعدی (سطحی، زیرسطحی، هوایی)       |
| توسعه فناوری‌های جدید توسط دشمنان برای نفوذ                | همکاری با سازمان‌های امنیتی برای بهبود نظارت       | نیاز به منابع انسانی و فنی برای نظارت مداوم | ایجاد یک سیستم دفاعی چندلایه که نفوذ را دشوار می‌کند  |
| کاهش بودجه دفاعی که عملیات را محدود می‌کند                 | ادغام با سیستم‌های امنیتی ملی برای افزایش کارایی   | هزینه بالای توسعه و نگهداری سیستم‌ها        | تشخیص سریع نفوذ با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی |
|                                                            | استفاده از داده‌های ماهواره‌ای برای پایش گسترده‌تر |                                             |                                                       |

دلیل انتخاب این سناریوها عمدتاً به این برمی‌گردد که آن‌ها به بهترین نحو نیاز و پتانسیل همکاری و هماهنگی سامانه‌های بدون سرنشین در دامنه‌های عملیاتی مختلف (هوایی، سطحی، زیرسطحی) را به تصویر می‌کشند. این سناریوها طوری طراحی شده‌اند که نشان دهند چگونه می‌توان با ترکیب قابلیت‌های مکمل پهپاد، شناورهای بدون سرنشین سطحی و شناورهای بدون سرنشین زیرسطحی (مانند دید وسیع هوایی، سرعت و پایداری سطحی، و قابلیت پنهان‌کاری و حسگری زیرسطحی)، مأموریت‌های پیچیده نظارتی، امنیتی، امدادی و بازرسی را با کارایی و اثربخشی بسیار بالاتری نسبت به استفاده از هر سامانه به تنهایی انجام داد. همچنین، این سناریوها بستر مناسبی برای طرح و بررسی چالش‌های فنی و عملیاتی واقعی مرتبط با چنین سامانه‌های ترکیبی فراهم می‌کنند؛ چالش‌هایی نظیر برقراری ارتباط پایدار میان دامنه‌ها، هماهنگی بلادرنگ، تخصیص دینامیک وظایف، فیوژن داده‌های چندمنبعی و تحمل‌پذیری در برابر خطاها که نیازمند استفاده از مفاهیم پیشرفته‌ای مانند کنترل توزیع‌شده، شبکه‌های مش خودبه‌خودسازمان و

غلبه بر این ضعف‌ها، ایجاد یک سکوی مشترک است که تمامی سیستم‌ها را در یک محیط یکپارچه مدیریت کند. **تهدیدها:** پیچیدگی فزاینده عملیات‌های دریایی و هزینه‌های بالای توسعه و نگهداری سیستم‌های جداگانه به عنوان تهدید شناخته می‌شوند. طراحی یک سکوی مشترک یک پاسخ مستقیم به این تهدیدهاست، زیرا با کاهش پیچیدگی عملیاتی و بهینه‌سازی منابع، هزینه و ریسک عملیات را کاهش می‌دهد.

تحلیل فوق نشان می‌دهد که قوت‌ها و فرصت‌ها، امکان‌پذیری فنی طراحی یک سکوی مشترک را فراهم می‌کنند، در حالی که ضعف‌ها و تهدیدها، ضرورت عملیاتی آن را به اثبات می‌رسانند. بنابراین، نتیجه‌گیری مقاله مبنی بر امکان طراحی و کارآمدی یک سکوی مشترک، نه تنها یک ادعا نیست، بلکه یک نتیجه‌گیری منطقی و اجتناب‌ناپذیر از تحلیل جامع عوامل محیطی است.

این مقاله یک طراحی مفهومی برای سکو مشترک ارائه داد که هدف آن ادغام عملیاتی شناورهای بدون سرنشین سطحی زیرسطحی پهپادها برای تحول در مأموریت‌های نظارت ترکیبی است. با تکیه بر اصول مهندسی سیستم‌ها و مرور جامع ادبیات، با مولفه‌های کلیدی فرماندهی و کنترل، پیشنهاد گردید. تحلیل سناریوهای عملیاتی و آنالیز ریسک اولیه نشان داد که این پلتفرم پتانسیل بالایی برای افزایش چشمگیر کارایی، بهبود آگاهی موقعیتی و کاهش ریسک در عملیات دریایی دارد و به سوال اصلی تحقیق مبنی بر چگونگی امکان‌پذیر ساختن این ادغام مؤثر، پاسخ اولیه می‌دهد. این پژوهش با ارائه یک چارچوب مفهومی اولیه، گامی مهم در جهت تحقق سیستم‌های نظارت دریایی یکپارچه، هوشمند و خودمختار نسل آینده برداشته‌است. هر چند چالش‌های فنی و عملیاتی قابل توجهی برای پیاده‌سازی کامل باقی است، اما این طرح مفهومی می‌تواند به عنوان نقشه راهی برای تحقیقات و توسعه‌های آتی در این حوزه راهبردی عمل کند.

#### مراجع

- [1] G. Shao, Y. Ma, R. Malekian, X. Yan, and Z. Li, "A novel cooperative platform design for coupled USV-UAV systems," *IEEE Trans. Ind.*

سیستم‌های چندعامله هستند. به عبارت دیگر، این سناریوها صرفاً مثال‌های فرضی نیستند، بلکه کاربردهای عملی و حیاتی در حوزه دریانوردی، امنیت دریایی، و مدیریت بحران هستند و تنوع آن‌ها (از نظارت گسترده و تعقیب متحرک گرفته تا بازرسی ثابت و امداد اضطراری) نشان‌دهنده گستردگی کاربرد سامانه‌های بدون سرنشین چنددانه‌ای است و ضرورت توسعه فناوری‌های مرتبط برای تحقق این پتانسیل را برجسته می‌کند.

#### ۱۳- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

##### بحث و نتیجه‌گیری:

**تحلیل عوامل محیطی:** تحلیل عوامل محیطی (اعم از قوت، ضعف، فرصت و تهدید) که در بخش‌های پیشین ارائه شد، به طور مستقیم بر امکان‌پذیری و ضرورت طراحی یک سکوی مشترک تأکید دارد. این تحلیل صرفاً یک مرور بر عوامل نیست، بلکه پایه‌گذار منطقی برای نتیجه‌گیری اصلی این مقاله است.

**قوت‌ها:** وجود سامانه‌های بدون سرنشین متعدد و بالغ در بخش‌های هوایی، سطحی و زیرسطحی یک قوت کلیدی است. این قوت نشان می‌دهد که فناوری لازم برای هر یک از این پلتفرم‌ها به اندازه کافی توسعه یافته‌است. در نتیجه، به جای توسعه جداگانه این پلتفرم‌ها، منطقی است که بر ادغام و هماهنگی آن‌ها تمرکز شود. این ادغام تنها با یک سکوی مشترک امکان‌پذیر است.

**فرصت‌ها:** افزایش نیاز به نظارت دریایی و قابلیت‌های اطلاعاتی یک فرصت بزرگ است. همچنین، توسعه فناوری‌های ارتباطی و پردازش ابری این امکان را فراهم می‌کند که داده‌ها از پلتفرم‌های مختلف جمع‌آوری و به صورت یکپارچه تحلیل شوند. این فرصت‌ها، وجود یک پلتفرم متمرکز (سکوی مشترک) را به یک نیاز استراتژیک تبدیل می‌کنند. به عبارت دیگر، با وجود چنین فرصت‌هایی، عدم ادغام سامانه‌ها یک اشتباه راهبردی خواهد بود.

**ضعف‌ها:** عدم هماهنگی بین پلتفرم‌های مجزا و نیاز به منابع انسانی و زیرساختی متعدد برای هر پلتفرم به صورت جداگانه از ضعف‌های مهم هستند. این ضعف‌ها به وضوح نشان می‌دهند که رویکرد فعلی (استفاده از سیستم‌های جداگانه) ناکارآمد است. تنها راه حل برای

power engineering: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 58, pp. 814–824, May 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.339.

[14] “An Introduction to MultiAgent Systems, 2nd Edition | Wiley,” Wiley.com. Accessed: Apr. 26, 2025.

[15] P. Johnston and M. Poole, “Marine surveillance capabilities of the AutoNaut wave-propelled unmanned surface vessel (USV),” Jun. 2017, pp. 1–46. doi: 10.1109/OCEANSE.2017.8084782.

[16] “Computing Challenges of UAV Networks: A Comprehensive Survey,” *Comput. Mater. Contin.*, vol. 81, no. 2, pp. 1999–2051, Nov. 2024, doi: 10.32604/cmc.2024.056183.

[17] J. You, Z. Jia, C. Dong, Q. Wu, and Z. Han, “Generative AI-Enhanced Cooperative MEC of UAVs and Ground Stations for Unmanned Surface Vehicles,” Feb. 12, 2025, *arXiv:arXiv:2502.08119*. doi: 10.48550/arXiv.2502.08119.

[18] T. Huang, Z. Chen, W. Gao, Z. Xue, and Y. Liu, “Cooperative trajectory planning algorithm of USV-UAV with hull dynamic constraints,” Jan. 30, 2023, *arXiv:arXiv:2209.03261*. doi: 10.48550/arXiv.2209.03261.

[19] F. Novák, T. Báča, O. Procházka, and M. Saska, “Towards UAV-USV Collaboration in Harsh Maritime Conditions Including Large Waves,” in *Proceedings of the 21st International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, 2024, pp. 545–554. doi: 10.5220/0012910000003822.

[20] A. Lazarowska and A. Zak, “A Concept of Autonomous Multi-Agent Navigation System for Unmanned Surface Vessels,” *Electronics*, vol. 11, p. 2853, Sep. 2022, doi: 10.3390/electronics11182853.

[21] E. Choi and J. Ahn, “Multi-Agent Grouping and Routing with Cooperative Tasks,” *J. Aerosp. Inf. Syst.*, vol. 22, no. 3, pp. 163–176, Mar. 2025, doi: 10.2514/1.I011478.

[22] “(PDF) Unmanned aerial vehicles (UAVs): practical aspects, applications, open challenges, security issues, and future trends,” *ResearchGate*, Apr. 2025, doi: 10.1007/s11370-022-00452-4.

[23] “(PDF) Multi-Agent Systems and Complex Networks: Review and Applications in Systems Engineering,” *ResearchGate*, Apr. 2025, doi: 10.3390/pr8030312.

[24] L. Maleš, D. Sumic, and M. Rosic, “Applications of Multi-Agent Systems in Unmanned Surface Vessels,” *Electronics*, vol. 11, p. 3182, Oct. 2022, doi: 10.3390/electronics11193182.

[25] “Computing Challenges of UAV Networks: A Comprehensive Survey,” *Comput.*

*Inform.*, vol. PP, pp. 1–1, Apr. 2019, doi: 10.1109/TII.2019.2912024.

[2] J. L. Villa, J. Paez, C. Quintero, E. Yime, and J. Cabrera, “Design and control of an unmanned surface vehicle for environmental monitoring applications,” Sep. 2016, pp. 1–5. doi: 10.1109/CCRA.2016.7811411.

[3] W. Wei, J. Wang, Z. Fang, J. Chen, and Y. Dong, “3U: Joint Design of UAV-USV-UUV Networks for Cooperative Target Hunting,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Nov. 2022, doi: 10.1109/TVT.2022.3220856.

[4] T. Pulikottil, L. A. Estrada-Jimenez, H. Ur Rehman, F. Mo, S. Nikghadam-Hojjati, and J. Barata, “Agent-based manufacturing — review and expert evaluation,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 127, no. 5, pp. 2151–2180, Jul. 2023, doi: 10.1007/s00170-023-11517-8.

[5] D. Yihao *et al.*, *Drone Carrier: An Integrated Unmanned Surface Vehicle for Autonomous Inspection and Intervention in GNSS-Denied Maritime Environment*. 2025. doi: 10.48550/arXiv.2501.12869.

[6] M. Herrera, M. Pérez-Hernández, A. Kumar Parlikad, and J. Izquierdo, “Multi-Agent Systems and Complex Networks: Review and Applications in Systems Engineering,” *Processes*, vol. 8, no. 3, Art. no. 3, Mar. 2020, doi: 10.3390/pr8030312.

[7] W. Li, Y. Ge, Z. Guan, and G. Ye, “Synchronized Motion-Based UAV-USV Cooperative Autonomous Landing,” *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 10, p. 1214, Aug. 2022, doi: 10.3390/jmse10091214.

[8] “(PDF) An Introduction to Multi-Agent Systems,” *ResearchGate*, Nov. 2024, doi: 10.1007/978-3-642-14435-6\_1.

[9] M. Specht, “Methodology for Performing Bathymetric and Photogrammetric Measurements Using UAV and USV Vehicles in the Coastal Zone,” *Remote Sens.*, vol. 16, p. 328, Sep. 2024, doi: 10.3390/rs16173328.

[10] D. Yihao *et al.*, *Drone Carrier: An Integrated Unmanned Surface Vehicle for Autonomous Inspection and Intervention in GNSS-Denied Maritime Environment*. 2025. doi: 10.48550/arXiv.2501.12869.

[11] I. Bae and J. Hong, “Survey on the Developments of Unmanned Marine Vehicles: Intelligence and Cooperation,” *Sensors*, vol. 23, no. 10, Art. no. 10, Jan. 2023, doi: 10.3390/s23104643.

[12] “(PDF) Applications, Evolutions, and Challenges of Drones in Maritime Transport.” Accessed: Apr. 28, 2025. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/375040120\\_Applications\\_Evolutions\\_and\\_Challenges\\_of\\_Drones\\_in\\_Maritime\\_Transport](https://www.researchgate.net/publication/375040120_Applications_Evolutions_and_Challenges_of_Drones_in_Maritime_Transport)

[13] M. H. Moradi, S. Razini, and S. Mahdi Hosseinian, “State of art of multiagent systems in

*Mater. Contin.*, vol. 81, no. 2, pp. 1999–2051, Nov. 2024, doi: 10.32604/cmc.2024.056183.

[26] “A Hybrid Algorithm for Optimized Task Allocation and Coordination Among Multiple Specialized Robots | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore.” Accessed: Apr. 28, 2025. [Online]. Available:

<https://ieeexplore.ieee.org/document/10711462>

[27] J. You, Z. Jia, C. Dong, Q. Wu, and Z. Han, “Generative AI-Enhanced Cooperative MEC of UAVs and Ground Stations for Unmanned Surface Vehicles,” Feb. 12, 2025, *arXiv*: arXiv:2502.08119. doi:

10.48550/arXiv.2502.08119.

[28] X. Xiao, J. Dufek, T. Woodbury, and R. Murphy, “UAV assisted USV visual navigation for marine mass casualty incident response,” Sep. 2017, pp. 6105–6110. doi: 10.1109/IROS.2017.8206510.

# بررسی نقش گروه کاری عنصر انسانی (HTW) در ارتقای ایمنی دریانوردی

احمد ذادق آبادی<sup>۱</sup>، علی محمدی<sup>۲</sup>، مهدی مرادنوری<sup>۳</sup>

۱- استادیار گروه علوم دریایی، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره) نوشهر، ایران .

۲- استادیار گروه علوم دریایی ، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره) نوشهر، ایران .

۳- دانشجوی دکتری ناوبری و عملیات دریایی، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره) ، نوشهر، ایران. (نویسنده مسئول ammordad23@gmail.com)

## چکیده

ایمنی دریانوردی یکی از ارکان بنیادین حمل و نقل بین‌المللی است و همواره در مرکز توجه سازمان بین‌المللی دریانوردی (IMO) قرار داشته است. با وجود پیشرفت در فناوری‌های ناوبری و ساخت کشتی‌ها، عامل انسانی همچنان نقش غالبی در بروز حوادث دریایی دارد، به گونه‌ای که بیش از دو سوم رخدادها ایمنی به خطای انسانی مرتبط هستند. در پاسخ به این مسئله، کمیته ایمنی دریانوردی (MSC) از طریق تشکیل گروه کاری عنصر انسانی (HEWG) تلاش کرده است ابعاد انسانی همچون آموزش، صلاحیت حرفه‌ای، مدیریت خستگی، فرهنگ ایمنی و شرایط کاری دریانوردان را در سیاست‌گذاری‌ها و مقررات ایمنی ادغام کند. پژوهش حاضر با رویکرد مروری و توصیفی-تحلیلی، به بررسی جامع فعالیت‌ها، دستاوردها و چالش‌های این گروه در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵ پرداخته و از اسناد رسمی IMO، گزارش‌های MSC و زیرکمیته آموزش و نگهداری (HTW) و همچنین منابع معتبر دریانوردی مانند DNV و Lloyd's Register بهره برده است. یافته‌ها نشان می‌دهد مهم‌ترین اقدامات HEWG شامل بازنگری کنوانسیون STCW، تدوین دستورالعمل‌های مدیریت خستگی، ارتقای فرهنگ ایمنی و توسعه آموزش‌های تخصصی برای فناوری‌های نوین است. تحلیل ده حادثه مهم دریایی در این دوره حاکی از آن است که ضعف آموزش، خستگی، ناآشنایی با فناوری‌های جدید و نبود فرهنگ ایمنی سازمانی از عوامل اصلی تکرار شونده در سوانح هستند. در نهایت، نتایج بیانگر وجود شکاف میان تدوین سیاست‌های ایمنی و اجرای عملی آن‌ها در سطح جهانی است و بر ضرورت تقویت فرهنگ ایمنی، نظارت مؤثرتر و همکاری میان دولت‌ها، شرکت‌های کشتیرانی و نهادهای آموزشی تأکید دارد.

**کلمات کلیدی:** ایمنی دریانوردی، عنصر انسانی، کمیته ایمنی دریانوردی، مدیریت خستگی، فرهنگ ایمنی

# Investigating the role of the Human Factors Working Group (HTW) in promoting maritime safety

Ahmad Zadeqabadi<sup>1</sup>, Ali Mohammadi<sup>2</sup>, Mahdi Moradoori<sup>3</sup>

1- Assistant Professor, Department of Marine Sciences, Imam Khomeini University of Marine Sciences, Nowshahr, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Marine Sciences, Imam Khomeini University of Marine Sciences, Nowshahr, Iran.

3- PhD student in Navigation and Maritime Operations, Imam Khomeini University of Marine Sciences, Nadaja, Nowshahr, Iran. (Corresponding author ammordad23@gmail.com)

## Abstract

Maritime safety is one of the fundamental pillars of international transport and has always been the focus of attention of the International Maritime Organization (IMO). Despite advances in navigation and shipbuilding technologies, the human factor still plays a dominant role in the occurrence of maritime accidents, with more than two-thirds of safety incidents being related to human error. In response to this issue, the Maritime Safety Committee (MSC) has attempted to integrate human dimensions such as training, professional competence, fatigue management, safety culture, and seafarers' working conditions into safety policies and regulations through the establishment of the Human Element Working Group (HEWG). The present study, with a review and descriptive-analytical approach, comprehensively examines the activities, achievements, and challenges of this group during the period 2015-2025, and has used official IMO documents, MSC reports, and the Subcommittee on Training and Watchkeeping (HTW), as well as reliable maritime sources such as Lloyd's Register and DNV. The findings show that the most important HEWG actions include revising the STCW Convention, developing fatigue management guidelines, promoting a safety culture, and developing specialized training for new technologies. An analysis of ten major maritime accidents during this period indicates that poor training, fatigue, unfamiliarity with new technologies, and the lack of an organizational safety culture are among the main recurring factors in accidents. Finally, the results indicate a gap between the formulation of safety policies and their practical implementation at the global level, and emphasize the need to strengthen a safety culture, more effective monitoring, and cooperation between governments, shipping companies, and educational institutions.

**Keywords:** Maritime safety, human element, Maritime Safety Committee, fatigue management, safety culture.

## ۱. مقدمه

ایمنی دریانوردی به عنوان یکی از ارکان حیاتی حمل و نقل بین‌المللی، همواره در کانون توجه سازمان بین‌المللی دریانوردی (IMO) قرار داشته است. بیش از ۸۰ درصد تجارت جهانی از طریق دریا انجام می‌شود و هرگونه اختلال در ایمنی کشتی‌ها می‌تواند پیامدهای اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی گسترده‌ای به همراه داشته باشد. با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در فناوری‌های ناوبری و طراحی کشتی‌ها، شواهد نشان می‌دهد که عامل انسانی همچنان سهم غالب در بروز حوادث دریایی دارد و بیش از دو سوم رخدادهای ایمنی به خطاهای انسانی مرتبط هستند [۱]. این واقعیت نشان می‌دهد که تمرکز صرف بر جنبه‌های فنی و مکانیکی کافی نیست و توجه به ابعاد انسانی، شامل آموزش، صلاحیت، مدیریت خستگی، فرهنگ ایمنی و شرایط کاری دریانوردان، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است.

کمیته ایمنی دریانوردی (Maritime Safety Committee – MSC) به عنوان یکی از مهم‌ترین ارکان IMO، وظیفه تدوین مقررات و راهبردهای کلان در حوزه ایمنی را بر عهده دارد. این کمیته با ایجاد گروه کاری عنصر انسانی (Human Element Working Group)، تلاش کرده است تا ابعاد انسانی را در سیاست‌های ایمنی ادغام کند و از طریق بازنگری کنوانسیون STCW و تدوین دستورالعمل‌های جدید، صلاحیت و آموزش دریانوردان را ارتقا دهد [۲ و ۳]. با وجود این اقدامات، بررسی‌های اخیر نشان می‌دهد که شکاف‌هایی میان سیاست‌های تدوین شده و اجرای واقعی آن‌ها در سطح جهانی وجود دارد. بنابراین، ضرورت پژوهش حاضر در شناسایی و تحلیل این شکاف‌ها نهفته است. این مطالعه با رویکرد مروری و تحلیلی، به بررسی جامع فعالیت‌ها، دستاوردها و چالش‌های گروه کاری عنصر انسانی در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵ می‌پردازد. هدف آن است که با ارائه یک دیدگاه انتقادی و آینده‌پژوهانه، روشن شود چگونه توجه به عنصر انسانی می‌تواند به کاهش حوادث دریایی، ارتقای فرهنگ ایمنی و افزایش تاب‌آوری سیستم‌های دریانوردی منجر شود. این تحلیل می‌تواند به سیاست‌گذاران، شرکت‌های کشتیرانی و نهادهای آموزشی

کمک کند تا مسیرهای مؤثرتری برای بهبود ایمنی دریانوردی در دهه‌های آینده طراحی کنند.

## ۲. بیان مسئله

ایمنی دریانوردی به عنوان یکی از ارکان حیاتی حمل و نقل بین‌المللی، همواره دغدغه اصلی سازمان بین‌المللی دریانوردی (IMO) و کمیته ایمنی دریانوردی (Maritime Safety Committee – MSC) بوده است. با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در فناوری‌های ناوبری و طراحی کشتی‌ها، آمارهای منتشرشده در دهه اخیر نشان می‌دهد که عامل انسانی همچنان سهم غالب در بروز حوادث دریایی دارد و بیش از دو سوم رخدادهای ایمنی به خطاهای انسانی مرتبط هستند [۱]. این واقعیت نشان می‌دهد که تمرکز صرف بر جنبه‌های فنی و مکانیکی کافی نیست و توجه به ابعاد انسانی، شامل آموزش، صلاحیت، مدیریت خستگی، فرهنگ ایمنی و شرایط کاری دریانوردان، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است.

در پاسخ به این چالش، MSC با تشکیل گروه کاری عنصر انسانی (Human Element Working Group) و زیرکمیته آموزش و نگهداری (HTW)، تلاش کرده است تا ابعاد انسانی را در سیاست‌گذاری‌ها و مقررات ایمنی دریانوردی ادغام کند. این گروه کاری مسئول تدوین دستورالعمل‌ها، بازنگری کنوانسیون‌های کلیدی مانند STCW و ارائه توصیه‌های سیاستی در زمینه‌ی مدیریت منابع انسانی و فرهنگ ایمنی است [۲]. با وجود این اقدامات، شواهد نشان می‌دهد که شکاف‌هایی میان سیاست‌های تدوین شده و اجرای واقعی آن‌ها در سطح جهانی وجود دارد؛ به‌ویژه در زمینه‌ی پیاده‌سازی مقررات ساعات کاری و استراحت، آموزش در شرایط اضطراری و ارتقای فرهنگ گزارش‌دهی غیرتنبیهی.

بنابراین، مسئله اصلی این پژوهش بررسی جامع نقش گروه کاری عنصر انسانی در ارتقای ایمنی دریانوردی و تحلیل میزان موفقیت آن در کاهش حوادث ناشی از خطای انسانی است. پرسش کلیدی این است که: تا چه حد اقدامات و سیاست‌های این گروه توانسته‌اند در عمل به ارتقای ایمنی دریانوردی کمک کنند و چه شکاف‌هایی میان تدوین

شده و نقاط قوت، ضعف و شکاف‌های موجود شناسایی گردید.

### ۲-۳. پیشینه تاریخی و شکل‌گیری گروه کاری عنصر انسانی

تاریخچه توجه IMO به عامل انسانی: سازمان بین‌المللی دریانوردی (IMO) از دهه‌های پایانی قرن بیستم به‌طور جدی به نقش عامل انسانی در ایمنی دریانوردی توجه نشان داد. مطالعات متعدد نشان داده بودند که بیش از دو سوم حوادث دریایی ناشی از خطاهای انسانی است و همین امر ضرورت تمرکز بر آموزش، صلاحیت و شرایط کاری دریانوردان را آشکار ساخت. در دهه ۱۹۹۰، IMO نخستین بار مفهوم «عنصر انسانی» را به‌عنوان یک محور کلیدی در سیاست‌های ایمنی معرفی کرد و از آن زمان تاکنون این موضوع به‌طور مستمر در دستور کار کمیته ایمنی دریانوردی (MSC) قرار داشته است [۴].

### ۱-۲-۳. حوزه فعالیت و وظایف کلیدی گروه کاری عنصر انسانی

گروه کاری عنصر انسانی در کمیته ایمنی دریانوردی (MSC) سازمان IMO، مسئول هدایت سیاست‌های مرتبط با آموزش، صلاحیت، فرهنگ ایمنی و سلامت دریانوردان است. این گروه نقش محوری در کاهش خطاهای انسانی و ارتقای تاب‌آوری عملیات دریایی دارد.

در ادامه، حوزه‌های فعالیت و وظایف کلیدی این گروه را به‌صورت دقیق و دسته‌بندی‌شده مرور می‌کنیم:

#### حوزه‌های فعالیت گروه کاری عنصر انسانی:

- ادغام عامل انسانی در مقررات ایمنی دریانوردی تمرکز بر گنجاندن ابعاد انسانی در تدوین و بازنگری کنوانسیون‌ها و دستورالعمل‌های ایمنی، به‌ویژه STCW و ISM Code.
- تحلیل علل انسانی در حوادث دریایی بررسی گزارش‌های تصادفات و شناسایی الگوهای رفتاری، خستگی، ضعف آموزش یا فرهنگ سازمانی که منجر به حادثه شده‌اند.

مقررات و اجرای واقعی آن‌ها وجود دارد؟ پاسخ به این پرسش می‌تواند به سیاست‌گذاران، شرکت‌های کشتیرانی و نهادهای آموزشی کمک کند تا مسیرهای مؤثرتری برای بهبود ایمنی دریانوردی در دهه‌های آینده طراحی کنند.

### ۳. مرور ادبیات تحقیق

#### ۱-۳. روش تحقیق

این پژوهش از نوع مطالعات مروری با رویکرد توصیفی - تحلیلی است. هدف آن گردآوری و تحلیل انتقادی مطالعات و اسناد موجود در حوزه نقش عنصر انسانی در ارتقای ایمنی دریانوردی می‌باشد.

چارچوب مطالعه: تحقیق حاضر بر مبنای مرور منابع علمی و اسناد سازمانی بین‌المللی طراحی شده است تا تصویری جامع از فعالیت‌ها، دستاوردها و چالش‌های گروه کاری عنصر انسانی در کمیته ایمنی دریانوردی (MSC) ارائه دهد.

منابع مورد استفاده: اسناد رسمی سازمان بین‌المللی دریانوردی (IMO)، گزارش‌های کمیته ایمنی دریانوردی و زیرکمیته آموزش و نگهداری (HTW) و همچنین گزارش‌های منتشرشده توسط نهادهای معتبر دریانوردی مانند Lloyd's Register و DNV است. علاوه بر این، مقالات علمی منتشرشده در مجلات معتبر حوزه ایمنی دریانوردی نیز بررسی شده‌اند.

معیار انتخاب منابع: منابعی انتخاب شدند که ارتباط مستقیم با موضوع «عنصر انسانی و ایمنی دریانوردی» داشته و در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵ منتشر شده باشند.

روش گردآوری داده‌ها: داده‌ها از طریق جست‌وجوی کلیدواژه‌های مرتبط (مانند Human Element, Maritime Safety, STCW, Fatigue, Safety Culture) در اسناد و مقالات استخراج و سپس بر اساس محورهای اصلی پژوهش دسته‌بندی شدند.

روش تحلیل داده‌ها: تحلیل محتوایی و مقایسه‌ای به‌کار گرفته شد. یافته‌های مطالعات مختلف با یکدیگر مقایسه

➤ توسعه سیاست‌های آموزش و صلاحیت طراحی دوره‌های آموزشی جدید، به‌روزرسانی دوره‌های استاندارد IMO و همسوسازی مهارت‌ها با فناوری‌های نوین.

➤ ارتقای فرهنگ ایمنی و رهبری سازمانی ترویج رویکرد یادگیری، گزارش‌دهی غیرتنبیهی و ایجاد محیط‌های روانی امن برای دریانوردان.

➤ مدیریت خستگی و سلامت روانی تدوین راهنماهای برنامه‌ریزی شیفت، زمان استراحت و آموزش افسران شیفت (افسرنگهبان) برای کاهش فشار کاری و ارتقای سلامت روانی.

➤ ادغام فناوری در آموزش و عملیات انسانی بررسی تأثیر اتوماسیون (خودکارسازی)، سوخت‌های جایگزین و سامانه‌های دیجیتال بر عملکرد انسانی و طراحی آموزش‌های مبتنی بر خطر.

#### وظایف کلیدی گروه کاری عنصر انسانی:

➤ بازنگری کنوانسیون STCW و دوره‌های استاندارد IMO برای تطبیق با نیازهای جدید صنعت دریانوردی و فناوری‌های نوین.

#### ۲-۲-۳. دلایل ایجاد گروه کاری عنصر انسانی در MSC:

با افزایش پیچیدگی کشتی‌ها و فناوری‌های ناوبری، نیاز به یک نهاد تخصصی برای بررسی ابعاد انسانی بیش از پیش احساس شد. کمیته ایمنی دریانوردی (MSC) با هدف کاهش خطاهای انسانی، ارتقای فرهنگ ایمنی و بهبود صلاحیت دریانوردان، اقدام به تشکیل گروه کاری عنصر

انسانی کرد. این گروه وظیفه داشت تا ابعاد انسانی را در مقررات بین‌المللی ادغام کند، دستورالعمل‌های آموزشی و عملیاتی تدوین نماید و به MSC در زمینه سیاست‌گذاری‌های مرتبط با منابع انسانی مشاوره دهد [۵].

#### ۳-۲-۳. مرور اسناد و گزارش‌های اولیه IMO :

اسناد اولیه IMO نشان می‌دهد که توجه به عنصر انسانی در قالب گزارش‌های کمیته MSC و زیرکمیته آموزش و نگهداری (HTW) به‌طور رسمی آغاز شد. در گزارش‌های منتشرشده بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹، بر اهمیت بازنگری کنوانسیون STCW و تدوین دستورالعمل‌های جدید برای مدیریت خستگی، آموزش دریانوردان و ارتقای فرهنگ ایمنی تأکید شده است [۵]. این اسناد پایه‌گذار فعالیت‌های گروه کاری عنصر انسانی بودند و مسیر آینده سیاست‌های ایمنی دریانوردی را مشخص کردند.

#### ۳-۲-۴. جدول تحلیلی پیشینه تاریخی و شکل‌گیری

##### گروه کاری عنصر انسانی (۲۰۲۵-۲۰۱۵)

در این جدول، اقدامات کلیدی IMO و کمیته ایمنی دریانوردی (MSC) در سه دوره زمانی اخیر نشان داده شده است. این مرور تاریخی نشان می‌دهد چگونه توجه به عنصر انسانی به‌تدریج ساختارمند شده و در قالب گروه کاری و زیرکمیته‌های تخصصی دنبال شده است:

| ردیف | تأثیر بر ایمنی دریانوردی                                                            | اسناد و گزارش‌های مرتبط                                      | اقدامات کلیدی                                                                                       | دوره زمانی |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| ۱    | افزایش توجه به سلامت و کارایی دریانوردان؛ کاهش خطاهای ناشی از خستگی [4]             | IMO Guidelines on Fatigue (2017)                             | آغاز بازنگری در کنوانسیون STCW و تدوین دستورالعمل‌های مدیریت خستگی                                  | ۲۰۱۷-۲۰۱۵  |
| ۲    | تمرکز بر آموزش، صلاحیت و استانداردسازی مهارت‌های دریانوردی [5]                      | IMO HTW Reports (2019)                                       | تشکیل رسمی زیرکمیته HTW (Human Element, Training and Watchkeeping) و ادغام آن در دستور کار MSC      | ۲۰۱۹-۲۰۱۷  |
| ۳    | ارتقای فرهنگ ایمنی، بهبود کیفیت آموزش و افزایش تاب‌آوری سیستم‌های دریانوردی [6 و ۲] | IMO HTW 11th Session Report (2025); LR Summary Report (2025) | توسعه دستورالعمل‌های جدید در حوزه فرهنگ ایمنی، آموزش دیجیتال و همکاری بین‌المللی؛ بازنگری جامع STCW | ۲۰۲۵-۲۰۱۹  |

## ۲. آموزش و صلاحیت: نقش آموزش در کاهش خطاهای انسانی

آموزش و صلاحیت حرفه‌ای دریانوردان یکی از مهم‌ترین ابعاد عنصر انسانی است. بازنگری‌های اخیر در کنوانسیون STCW و دوره‌های استاندارد IMO نشان می‌دهد که آموزش باید همگام با فناوری‌های نوین و پیچیدگی‌های جدید عملیات دریایی باشد. در نشست یازدهم زیرکمیته HTW در سال ۲۰۲۵، دستورالعمل‌های آموزشی برای کار با سوخت‌های جایگزین و فناوری‌های جدید تدوین شد تا دریانوردان بتوانند با ایمنی بیشتری در شرایط نوین فعالیت کنند [۱]. این اقدامات نشان‌دهنده تلاش برای همسوسازی صلاحیت‌ها با نیازهای آینده صنعت دریانوردی است.

## ۳. خستگی و سلامت روانی: تأثیر شرایط کاری بر عملکرد دریانوردان

خستگی یکی از عوامل اصلی بروز خطاهای انسانی در عملیات دریایی است. IMO در سال ۲۰۱۷ راهنماهای جامع مدیریت خستگی را منتشر کرد که شامل توصیه‌هایی برای برنامه‌ریزی شیفت‌ها، زمان‌های استراحت و آموزش افسران شیفت بود [۴]. این راهنماها در مقررات بین‌المللی ادغام شده و به‌عنوان بخشی از صلاحیت دریانوردان در

## ۳-۳. وظایف و نقش گروه کاری عنصر انسانی در MSC

گروه کاری عنصر انسانی در کمیته ایمنی دریانوردی (MSC) سازمان بین‌المللی دریانوردی (IMO) با تمرکز بر ابعاد مختلف انسانی، تلاش دارد تا ایمنی دریانوردی را از سطح مقررات صرف به سطحی مبتنی بر رفتار، فرهنگ و فناوری ارتقا دهد. این ابعاد شامل تدوین دستورالعمل‌ها و استانداردهای آموزشی، آموزش و صلاحیت، مدیریت خستگی و سلامت روانی، فرهنگ ایمنی و رهبری سازمانی و ادغام فناوری‌های نوین در کاهش خطاهای انسانی است که وظایف هر یک در ادامه تشریح می‌گردد.

### ۱. تدوین دستورالعمل‌ها و استانداردهای آموزشی

یکی از مهم‌ترین وظایف این گروه، بازنگری و به‌روزرسانی کنوانسیون STCW و دوره‌های استاندارد IMO است. این اقدام به‌منظور همسوسازی صلاحیت‌های دریانوردان با فناوری‌های نوین و پیچیدگی‌های جدید عملیات دریایی انجام می‌شود. به‌عنوان نمونه، در نشست یازدهم زیرکمیته HTW در سال ۲۰۲۵، دستورالعمل‌های آموزشی برای کار با سوخت‌های جایگزین و فناوری‌های جدید تدوین شد [۱]. این دستورالعمل‌ها چارچوبی برای آموزش ایمن و استانداردسازی مهارت‌های دریانوردان فراهم می‌کنند.

نگهبانی و عملیات روزمره شناخته می‌شوند. همچنین، فرهنگ گزارش‌دهی غیرتنبیهی برای رخدادهای مرتبط با خستگی به عنوان بخشی از مسئولیت مشترک سازمان‌ها و کارکنان دریانوردی معرفی شده است [۵]. توجه به سلامت روانی دریانوردان نیز در سال‌های اخیر اهمیت بیشتری یافته و در دستور کار MSC قرار گرفته است.

#### ۴. فرهنگ ایمنی: اهمیت نگرش سازمانی و رهبری در ارتقای ایمنی

این گروه کاری بر اصل «مسئولیت مشترک» میان دولت‌ها، شرکت‌های کشتیرانی و دریانوردان تأکید دارد. فرهنگ ایمنی تنها زمانی پایدار خواهد بود که مقررات، منابع سازمانی و رفتار حرفه‌ای دریانوردان هم‌افزا باشند. در گزارش‌های اخیر IMO، بر اهمیت رهبری مبتنی بر یادگیری و ایجاد محیط‌های روانی امن برای گزارش‌دهی و اصلاح فرآیندها تأکید شده است [۲]. این رویکرد موجب ارتقای تاب‌آوری اجتماعی- فنی و کاهش شکاف بین مقررات و عمل می‌شود.

#### ۵. ادغام فناوری‌های نوین در کاهش خطاهای انسانی

با رشد سیستم‌های خودکار و سوخت‌های نو، گروه کاری عنصر انسانی دستورالعمل‌های آموزشی مبتنی بر خطر را توسعه داده است تا مهارت‌های انسانی برای کار ایمن با فناوری تقویت شود. بازنگری دوره‌های استاندارد IMO در سال‌های اخیر شامل آموزش کار با سامانه‌های دیجیتال، مدیریت وضعیت‌های غیرعادی و همکاری انسان - ماشین بوده است [۳]. این اقدامات مانع انتقال ریسک از فناوری به انسان شده و توازن میان خودکارسازی و مسئولیت انسانی را برقرار می‌سازد. با این حال، چالش‌هایی همچون وابستگی بیش‌ازحد به فناوری و کاهش مهارت‌های سنتی دریانوردی همچنان مطرح است و نیازمند سیاست‌گذاری دقیق و آموزش‌های تکمیلی است.

گروه کاری عنصر انسانی، ستون انسانی سیاست‌های MSC را می‌سازد: با استانداردسازی آموزش برای فناوری‌های نو، نهادینه کردن مدیریت خستگی، ارتقای فرهنگ ایمنی و رهبری مبتنی بر یادگیری و هم‌افزایی صنعت و نهادهای تنظیم‌گر، ریسک‌های ناشی از خطای انسانی را کاهش داده و تاب‌آوری عملیات دریایی را افزایش می‌دهد. این رویکرد، ایمنی را از سطح انطباق مقررات به سطح ظرفیت‌های انسانی و سازمانی ارتقا می‌دهد.

#### ۴-۳. جدول تحلیلی ۱۰ حادثه اخیر دریایی مرتبط با

##### عامل انسانی (۲۰۲۵-۲۰۱۵)

در این جدول، ده حادثه مهم دریایی که عامل انسانی، خستگی یا ضعف آموزش نقش اصلی در آن‌ها داشته‌اند مرور شده است. همچنین اقدامات کمیته ایمنی دریانوردی (MSC) و گروه کاری عنصر انسانی در پاسخ به این رویدادها ذکر شده است.

جدول ۲. تحلیل ۱۰ حادثه اخیر دریایی مرتبط با عامل انسانی (۲۰۱۵-۲۰۲۵)

| سال حادثه | نام کشتی                      | محل وقوع               | علت اصلی (عامل انسانی)                                     | اقدامات MSC و گروه کاری عنصر انسانی                                  |
|-----------|-------------------------------|------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| ۲۰۱۷      | USS Fitzgerald و ACX Crystal  | نزدیکی ژاپن            | خستگی، ضعف ارتباطات، نگهداری ناکافی                        | انتشار راهنماهای مدیریت خستگی و بازنگری آموزش نگهداری [۴]            |
| ۲۰۱۷      | Stellar Daisy                 | اقیانوس اطلس جنوبی     | ضعف فرهنگ ایمنی، عدم گزارش دهی خطر                         | تدوین دستورالعمل‌های ارتقای فرهنگ گزارش دهی و محیط‌های روانی امن [۵] |
| ۲۰۱۷      | USS John S. Alnic و McCain MC | نزدیکی سنگاپور         | خطای انسانی ناشی از خستگی و ضعف آموزش فناوری ناوبری        | توصیه به بازنگری دوره‌های آموزشی در کار با سامانه‌های دیجیتال [۵]    |
| ۲۰۱۸      | Viking Sky                    | نروژ                   | ضعف در مدیریت اضطراری و آموزش ناکافی خدمه در شرایط بحران   | MSC توصیه به ارتقای آموزش مدیریت بحران و عملیات تخلیه اضطراری [۵]    |
| ۲۰۲۰      | Wakashio                      | موریس                  | خطای انسانی در ناوبری، ضعف در رعایت پروتکل‌های ایمنی       | MSC تأکید بر آموزش ناوبری ساحلی و فرهنگ ایمنی محیط زیستی [۷]         |
| ۲۰۲۱      | Ever Given                    | کانال سوئز             | تصمیم‌گیری نادرست، ضعف هماهنگی تیمی                        | تأکید بر آموزش در شرایط اضطراری و ارتقای فرهنگ ایمنی [۱]             |
| ۲۰۲۱      | X-Press Pearl                 | نزدیکی کلمبو، سریلانکا | ضعف مدیریت اضطراری، آموزش ناکافی در حمل مواد خطرناک        | بازنگری دستورالعمل‌های آموزشی برای حمل مواد شیمیایی و خطرناک [۲]     |
| ۲۰۲۲      | Felicity Ace                  | اقیانوس اطلس           | ضعف در مدیریت آتش‌سوزی و آموزش ناکافی در حمل خودروهای برقی | MSC توصیه به بازنگری آموزش حمل بارهای خاص و مدیریت آتش‌سوزی [۸]      |
| ۲۰۲۲      | Euroferry Olympia             | دریای مدیترانه         | ضعف ارتباطات و آموزش ناکافی در شرایط اضطراری               | MSC توصیه به ارتقای آموزش ارتباطات تیمی و مدیریت بحران [۹]           |
| ۲۰۲۳      | Polesie و Verity              | دریای شمال             | خستگی خدمه، ضعف در رعایت مقررات نگهداری                    | تقویت مقررات ساعات کاری و استراحت دریانوردان در چارچوب STCW [۳]      |

### ۳-۴-۱. تحلیل کوتاه برای ۱۰ حادثه اخیر دریایی مرتبط با عامل انسانی (۲۰۱۵-۲۰۲۵)

در ادامه، برای هر حادثه یک تحلیل انتقادی کوتاه شده است تا نشان دهد چگونه این رویدادها شکاف‌های سیاستی و آموزشی را آشکار کرده‌اند و چه درس‌هایی برای آینده ایمنی دریانوردی دارند.

#### ۱. USS Fitzgerald و ACX Crystal (۲۰۱۷)

این حادثه ضعف جدی در مدیریت خستگی و

ارتباطات تیمی را آشکار کرد. نشان داد که حتی در کشتی‌های نظامی با فناوری پیشرفته، نبود آموزش کافی در نگهداری و مدیریت فشار کاری می‌تواند منجر به فاجعه شود.

#### ۲. Stellar Daisy (۲۰۱۷)

غرق شدن این کشتی فله‌بر بیانگر اهمیت فرهنگ گزارش‌دهی و شفافیت بود. خدمه نشانه‌های خطر را گزارش نکردند و همین امر به از دست رفتن جان ۲۲ نفر

انجامید. این حادثه ضرورت ایجاد محیط‌های روانی امن برای گزارش‌دهی را برجسته کرد.

۳. Alnic MC و USS John S. McCain

(۲۰۱۷) تصادم ناشی از ضعف آموزش در کار با سامانه‌های دیجیتال بود. خودکارسازی بدون آموزش مناسب می‌تواند به‌جای کاهش خطا، ریسک‌های جدید ایجاد کند.

۴. Viking Sky (۲۰۱۸) بحران موتور و تخلیه

اضطراری هزاران مسافر ضعف در آموزش مدیریت بحران را آشکار کرد. این حادثه نشان داد که آموزش خدمه باید فراتر از عملیات روزمره باشد و سناریوهای اضطراری را نیز پوشش دهد.

۵. Wakashio (۲۰۲۰) به گل نشستن این کشتی

در موریس نشان داد که خطای انسانی در ناوبری ساحلی می‌تواند پیامدهای زیست‌محیطی عظیمی داشته باشد. این حادثه ضرورت آموزش دقیق‌تر در ناوبری ساحلی و فرهنگ ایمنی محیط‌زیستی را برجسته کرد.

۶. Ever Given (۲۰۲۱) انسداد کانال سوئز ضعف

در تصمیم‌گیری و هماهنگی تیمی را نشان داد. این حادثه اهمیت آموزش در شرایط اضطراری و مدیریت عملیات حساس در مسیرهای حیاتی تجارت جهانی را آشکار کرد.

۷. X-Press Pearl (۲۰۲۱) آتش‌سوزی و غرق

شدن کشتی نشان داد که آموزش ناکافی در حمل مواد خطرناک می‌تواند پیامدهای زیست‌محیطی و اقتصادی گسترده‌ای داشته باشد. این حادثه ضرورت بازنگری دستورالعمل‌های آموزشی در حمل مواد شیمیایی را برجسته کرد.

۸. Felicity Ace (۲۰۲۲) آتش‌سوزی ناشی از

خودروهای برقی ضعف در آموزش مدیریت

بارهای خاص را نشان داد. این حادثه بیانگر نیاز فوری به آموزش‌های تخصصی برای حمل کالاهای نوین مانند باتری‌های لیتیومی بود.

۹. Euroferry Olympia (۲۰۲۲) آتش‌سوزی در

این کشتی باری ضعف ارتباطات و آموزش ناکافی در شرایط اضطراری را آشکار کرد. آموزش ارتباطات تیمی و مدیریت بحران باید در اولویت سیاست‌های ایمنی قرار گیرد.

۱۰. Verity و Polesie (۲۰۲۳) تصادم در دریای

شمال ناشی از خستگی و ضعف در رعایت مقررات نگهبانی بود. مقررات ساعات کاری و استراحت باید جدی‌تر اجرا شوند و فرهنگ سازمانی باید از گزارش خستگی حمایت کند.

#### جمع‌بندی بخش مطالعات موردی و نمونه‌های عملی

بررسی ده حادثه اخیر دریایی در بازه‌ی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵ نشان داد که عامل انسانی همچنان مهم‌ترین متغیر در بروز سوانح دریایی است. خستگی، ضعف آموزش، ناکافی بودن مهارت در کار با فناوری‌های نوین و نبود فرهنگ ایمنی سازمانی مشترک‌ترین عوامل تکرارشونده در این حوادث بودند. اقدامات کمیته ایمنی دریانوردی (MSC) و گروه کاری عنصر انسانی در پاسخ به این رویدادها، بر بازنگری آموزش‌ها، تدوین دستورالعمل‌های مدیریت خستگی، ارتقای فرهنگ گزارش‌دهی و توسعه آموزش‌های تخصصی برای فناوری‌های نوین متمرکز بوده است. این جمع‌بندی نشان می‌دهد که بدون توجه جدی به ابعاد انسانی، حتی پیشرفته‌ترین فناوری‌ها و مقررات نمی‌توانند ایمنی پایدار دریانوردی را تضمین کنند.

۳-۵. جدول تحلیلی مطالعات علمی صورت گرفته

درخصوص مؤلفه‌های گروه کاری عنصر انسانی (۲۰۲۵-۲۰۱۵)

جدول ۳. تحلیل منابع علمی بر اساس مؤلفه‌های گروه کاری عنصر انسانی (۲۰۲۵-۲۰۱۵)

| مؤلفه                                               | منابع علمی                                                            | یافته‌های کلیدی                                                                                                                                       |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| خستگی و سلامت روانی                                 | Ma & Liao (2025); Sun et al. (2025); Jepsen et al. (2015)             | خستگی ناشی از شیفت‌های طولانی و فشار کاری؛ رابطه معکوس تاب‌آوری با خستگی؛ ضرورت مداخلات سازمانی و فردی برای کاهش خطاهای ناشی از خستگی. [۱۰ و ۱۱ و ۱۲] |
| آموزش و صلاحیت حرفه‌ای                              | Pazaver & Kitada (2025); Meštrović et al. (2024/2025)                 | نیاز به بازنگری STCW؛ ادغام مهارت‌های قرن ۲۱؛ آموزش برای MASS و فناوری‌های نوین؛ چالش‌های آموزش ضمن خدمت و onboard training. [۱۳ و ۱۴]                |
| خطای انسانی و مدیریت ریسک                           | Maternová et al. (2023); Söffker et al. (2025)                        | خطاهای انسانی در ارتباطات و تصمیم‌گیری؛ نقد تمرکز بر سرزنش فردی؛ توسعه مدل‌های پیش‌بینی مرگ‌ومیر؛ اهمیت عوامل شناختی و فیزیولوژیک. [۱۵ و ۱۶]          |
| فرهنگ ایمنی و رهبری سازمانی                         | Xi et al. (2025); Hasanspahić et al. (2021); Leaders' tactics (2020s) | فرهنگ ایمنی بر رفتار ایمن اثر مستقیم دارد؛ رهبری ایمنی به پایداری کمک می‌کند؛ تاکتیک‌های نفوذ رهبران در ارتقای ایمنی مؤثرند. [۱۷ و ۱۸ و ۱۹]           |
| فناوری و خودکارسازی                                 | Lützhöft & Earthy (2023); Söffker et al. (2025)                       | ضرورت انسان‌محوری در MASS؛ نقش انسان در حلقه تعامل خودکارسازی؛ طراحی سامانه‌های اجتماعی برای کاهش خطاهای انسانی در کشتی‌های خودکار. [۲۰ و ۱۶]         |
| رفاه و شرایط کاری دریانوردان                        | Nautilus Federation (2025); Sampson & Wu (2015)                       | رفاه و شرایط کاری بر انگیزه و نگهداشت دریانوردان اثر دارد؛ فشارهای روانی و اجتماعی عامل ترک شغل؛ نیاز به سیاست‌های حمایتی و رفاهی. [۲۱ و ۲۲]          |
| مدیریت سازمانی و مقررات‌گذاری انسان‌محور (HEAP/FSA) | IMO (2017, 2019, 2025); Nautical Institute (n.d.)                     | ادغام عنصر انسانی در مقررات IMO؛ استفاده از HEAP برای تحلیل اثرات انسانی؛ تقویت چارچوب‌های شایستگی در سیاست‌گذاری ایمنی. [۲۳ و ۲۴ و ۱۵]               |
| طراحی تجهیزات و رابط‌های کاربری (HMI / ارگونومی)    | Olsen (2024); Sustainability (2021)                                   | طراحی ارگونومیک تجهیزات و پل فرماندهی؛ بهینه‌سازی رابط‌های کاربری برای کاهش خطا؛ راهبردهای تعامل شناختی برای ارتقای ایمنی. [۲۴ و ۱۸]                  |

در مجموع، مرور ادبیات نشان می‌دهد که سه محور اصلی: **خستگی، آموزش و صلاحیت و فرهنگ ایمنی**؛ به‌طور مداوم در پژوهش‌های علمی و اسناد سازمانی به‌عنوان عوامل کلیدی در ارتقای ایمنی دریانوردی مطرح شده‌اند. با این حال، شکاف میان سیاست‌های تدوین شده و اجرای

واقعی آن‌ها همچنان باقی است و نیازمند بررسی انتقادی و آینده‌پژوهانه می‌باشد.

۳-۶. روند تغییرات سهم عامل انسانی در حوادث دریایی پس از اقدامات گروه کاری عنصر انسانی (۲۰۲۵-۲۰۱۵)

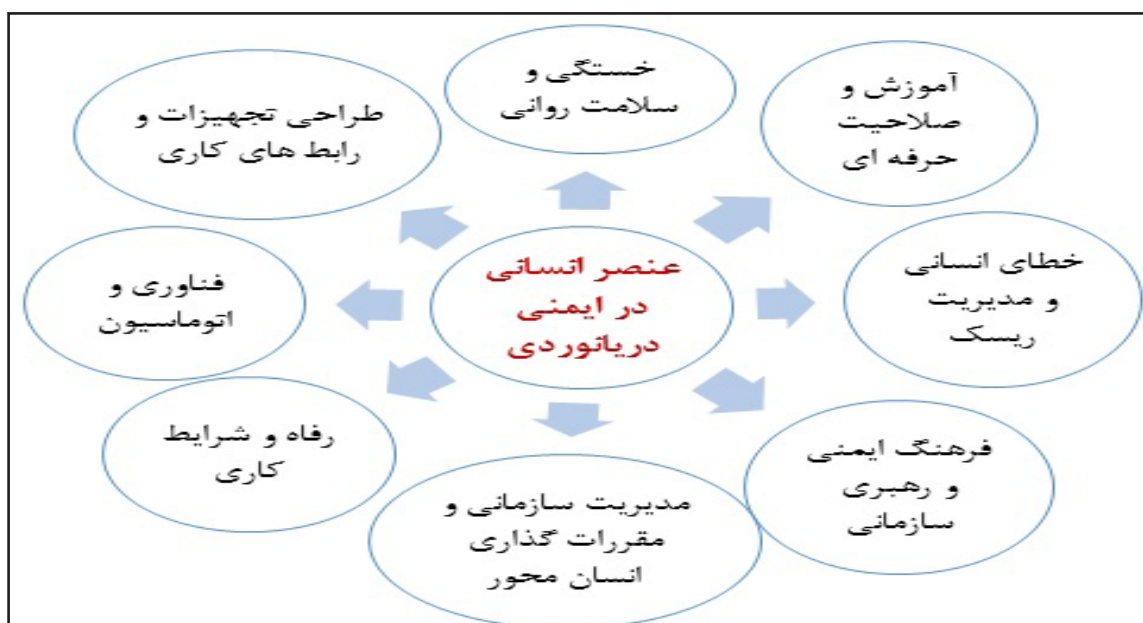
جدول ۴. روند تغییرات سهم عامل انسانی در حوادث دریایی پس از اقدامات گروه کاری عنصر انسانی (۲۰۱۵-۲۰۲۵)

| دوره زمانی                                                       | نرخ تقریبی سهم عامل انسانی در حوادث | اقدامات کلیدی گروه کاری عنصر انسانی                                                  | تأثیر مشاهده شده                                                       |
|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| ۲۰۱۵-۲۰۱۷ (قبل از اقدامات جدی) [۲۵]                              | ۷۵٪-۸۰٪ (Marine Public, n.d.)       | تمرکز محدود بر آموزش سنتی و مقررات پایه                                              | سطح بالای تکرار خطاهای انسانی، خستگی و ضعف فرهنگ ایمنی                 |
| ۲۰۱۵-۲۰۱۷ (شروع بازنگری STCW و راهنماهای خستگی) [۴]              | ۷۰٪-۷۵٪ (IMO, 2017)                 | انتشار راهنماهای مدیریت خستگی (IMO, 2017)، آغاز بازنگری STCW                         | کاهش نسبی حوادث مرتبط با خستگی، افزایش آگاهی سازمانی                   |
| ۲۰۱۷-۲۰۱۹ (تشکیل زیر کمیته HTW) [۵]                              | ۶۸٪-۷۲٪ (IMO, 2019)                 | تمرکز بر آموزش و صلاحیت، استانداردهای مهارت‌ها (IMO, 2019)                           | بهبود آموزش نگهداری و مدیریت بحران، کاهش خطاهای ارتباطی                |
| ۲۰۱۹-۲۰۲۳ (گسترش دستورالعمل‌های فرهنگ ایمنی و آموزش دیجیتال) [۲] | ۶۵٪-۷۰٪ (Lloyd's Register, 2025)    | توسعه آموزش دیجیتال، ارتقای فرهنگ گزارش‌دهی غیر تنبیهی (LR, 2025)                    | کاهش حوادث ناشی از ضعف فرهنگ ایمنی، افزایش تاب‌آوری سازمانی            |
| ۲۰۲۳-۲۰۲۵ (بازنگری جامع STCW و آموزش فناوری‌های نوین) [۳ و ۱]    | ۶۰٪-۶۵٪ (IMO, 2025; DNV, 2025)      | آموزش سوخت‌های جایگزین، سامانه‌های دیجیتال، همکاری بین‌المللی (IMO, 2025; DNV, 2025) | کاهش تدریجی سهم خطای انسانی، اما باقی ماندن شکاف در اجرای مقررات جهانی |

این جدول نشان می‌دهد که اقدامات گروه کاری عنصر انسانی توانسته‌اند سهم خطای انسانی در حوادث دریایی را از حدود ۷۵٪-۸۰٪ به ۶۰٪-۶۵٪ کاهش دهند، هرچند هنوز این عامل بزرگ‌ترین سهم را در بروز سوانح دارد.

### ۳-۷. مدل مفهومی اولیه

این تصویر، چارچوب مفهومی مؤلفه‌های گروه کاری عنصر انسانی در MSC را نشان می‌دهد.



شکل ۱. مدل مفهومی اولیه

- **خستگی و سلامت روانی:** به‌طور مستقیم بر خطای انسانی و رفاه دریانوردان اثر می‌گذارد.
- **آموزش و صلاحیت حرفه‌ای:** پایه‌ای برای کاهش خطا و سازگاری با فناوری‌های نوین.
- **خطای انسانی و مدیریت ریسک:** نقطه تلاقی بیشتر مؤلفه‌ها؛ از خستگی تا طراحی تجهیزات.
- **فرهنگ ایمنی و رهبری سازمانی:** بستری برای اجرای مؤثر آموزش و مدیریت بحران.
- **فناوری و خودکارسازی:** نیازمند آموزش و طراحی انسان‌محور برای جلوگیری از وابستگی بیش از حد.
- **رفاه و شرایط کاری:** عامل کلیدی در انگیزه و نگه‌داشت دریانوردان.
- **مدیریت سازمانی و مقررات‌گذاری انسان‌محور (HEAP/FSA):** چارچوبی برای ادغام همه مؤلفه‌ها در سیاست‌گذاری IMO.
- **طراحی تجهیزات و رابط‌های کاربری:** کاهش خطاهای انسانی از طریق ارگونومی و <sup>۱</sup> HMI مناسب.

### ۳-۸. تجزیه و تحلیل

بررسی جامع فعالیت‌های گروه کاری عنصر انسانی نشان می‌دهد که این نهاد توانسته است ایمنی دریانوردی را از سطح مقررات صرف به سطحی مبتنی بر ظرفیت‌های انسانی و سازمانی ارتقا دهد. بازنگری‌های مکرر در کنوانسیون STCW<sup>۱</sup>، تدوین دستورالعمل‌های آموزشی برای فناوری‌های نوین و توجه به مدیریت خستگی و سلامت روانی دریانوردان، همگی بیانگر تحول در رویکرد ایمنی هستند. با این حال، تحلیل حوادث دریایی اخیر نشان می‌دهد که شکاف میان سیاست‌های تدوین‌شده و

اجرای واقعی آن‌ها همچنان پابرجاست. تفاوت‌های فرهنگی، محدودیت منابع آموزشی در کشورهای در حال توسعه و مقاومت سازمانی در برابر تغییر، از جمله عواملی هستند که مانع تحقق کامل اهداف گروه کاری عنصر انسانی می‌شوند. این واقعیت نشان می‌دهد که ایمنی دریانوردی یک مسئله صرفاً فنی نیست، بلکه به‌شدت به ابعاد اجتماعی - فرهنگی و روان‌شناختی وابسته است.

از منظر آینده‌پژوهی، نقش عنصر انسانی در ایمنی دریانوردی بیش‌ازپیش اهمیت خواهد یافت. وابستگی روزافزون به فناوری‌های دیجیتال و خودکارسازی، خطر کاهش مهارت‌های سنتی دریانوردی را به همراه دارد و همین امر ضرورت آموزش‌های تکمیلی و بومی‌سازی‌شده را برجسته می‌کند. همچنین، سلامت روانی و رفاه دریانوردان باید به‌عنوان بخشی از سیاست‌های ایمنی نهادینه شود تا تاب‌آوری اجتماعی - فنی سیستم‌های دریایی افزایش یابد. ایجاد شاخص‌های جهانی برای سنجش فرهنگ ایمنی، توسعه آموزش‌های مبتنی بر واقعیت مجازی و تقویت همکاری بین‌المللی در تبادل داده‌های ایمنی، از جمله راهکارهایی هستند که می‌توانند شکاف میان سیاست و اجرا را کاهش دهند. در نهایت، عنصر انسانی نه‌تنها یک متغیر اجرایی بلکه یک سرمایه راهبردی در معماری ایمنی دریانوردی جهانی است و توجه به آن می‌تواند آینده‌ای پایدار و ایمن برای حمل‌ونقل دریایی رقم بزند.

### ۴. نتیجه‌گیری

این پژوهش با رویکرد مروری و تحلیلی به بررسی نقش گروه کاری عنصر انسانی در ارتقای ایمنی دریانوردی طی بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵ پرداخته است. مرور اسناد رسمی سازمان بین‌المللی دریانوردی (IMO)، گزارش‌های کمیته ایمنی دریانوردی (MSC) و زیرکمیته آموزش و نگهداری (HTW)، همراه با مطالعات مقالات علمی معتبر، نشان داد که عامل انسانی همچنان مهم‌ترین متغیر در بروز سوانح دریایی است و بدون توجه جدی به ابعاد انسانی،

<sup>۱</sup> Human Machine Interface

حتی پیشرفته‌ترین فناوری‌ها و مقررات نمی‌توانند ایمنی پایدار ایجاد کنند.

گروه کاری عنصر انسانی کمیته ایمنی دریانوردی (MSC) در بازه ۲۰۲۵-۲۰۱۵ توانست توجه به عامل انسانی را از یک موضوع جانبی به یکی از سه ستون اصلی سیاست‌گذاری ایمنی دریانوردی (در کنار طراحی کشتی و حفاظت از محیط‌زیست) تبدیل کند. دستاوردهای کلیدی این گروه شامل بازنگری ساختاری کنوانسیون STCW، انتشار راهنماهای جامع مدیریت خستگی در سال ۲۰۱۷، ادغام الزامات فرهنگ ایمنی و گزارش‌دهی غیرتنبیهی در کد ISM، تدوین دوره‌های استاندارد جدید برای سوخت‌های جایگزین و سامانه‌های دیجیتال و به‌ویژه آغاز گسترده‌ترین پروژه تاریخ IMO یعنی تطبیق نظام صلاحیت و آموزش با کشتی‌های خودران سطحی (MASS) است. این اقدامات نشان‌دهنده تغییر پارادایم از «ایمنی مبتنی بر انطباق» به «ایمنی مبتنی بر ظرفیت انسانی و سازمانی» است. با وجود این پیشرفت‌ها، تحلیل ۱۰ حادثه بزرگ دریایی این دهه نشان می‌دهد که چهار عامل تکرارشونده همچنان غالب‌اند:

۱- خستگی مزمن و نقض ساعات کار و استراحت، ۲- ضعف مهارت در کار با سامانه‌های پیچیده دیجیتال و اتوماسیون، ۳- از دست رفتن آگاهی موقعیتی ناشی از اعتماد بیش‌ازحد به فناوری، ۴- نبود یا ضعف فرهنگ گزارش‌دهی غیرتنبیهی و یادگیری از اشتباهات.

این تکرار، گواه شکاف عمیق میان سیاست‌های مصوب IMO و اجرای واقعی آن‌ها در سطح کشتی‌ها، شرکت‌ها و کشورهای پرچم است. مهم‌ترین موانع اجرا عبارت‌اند از تفاوت‌های فرهنگی-سازمانی، کمبود زیرساخت آموزشی در کشورهای در حال توسعه، مقاومت برخی شرکت‌ها در برابر هزینه‌های بلندمدت فرهنگ ایمنی و سلامت روانی و کندی انتقال دانش از اسناد IMO به آموزش‌های عملی و onboard.

ظهور کشتی‌های هوشمند و خودران (MASS) این شکاف را عمیق‌تر نیز خواهد کرد؛ زیرا خودکارسازی پیشرفته

به‌جای حذف خطای انسانی، آن را به شکل‌های جدیدی (mode confusion، over-reliance، skill fade) بازتولید می‌کند. پاسخ گروه کاری تا پایان ۲۰۲۵ عمدتاً در قالب بازنگری موقت STCW و صدور دوره‌های استاندارد جدید برای MASS متبلور شده، اما اجرای جهانی این الزامات تا پایان دهه ۲۰۳۰ طول خواهد کشید.

در نهایت، این مطالعه به این نتیجه قطعی می‌رسد که عنصر انسانی همچنان مهم‌ترین متغیر در ایمنی دریانوردی است و خواهد ماند. فناوری‌های نوین، هرچند قدرتمند، بدون دریانوردان آموزش‌دیده، سالم، باانگیزه و دارای فرهنگ ایمنی قوی، نمی‌توانند ایمنی پایدار ایجاد کنند؛ بنابراین، موفقیت واقعی گروه کاری عنصر انسانی نه در تعداد قطعنامه‌ها و راهنماهای منتشرشده، بلکه در کاهش واقعی حوادث ناشی از خطای انسانی در دهه آینده سنجیده خواهد شد.

## ۵. پیشنهاد‌های کاربردی برای ارتقای ایمنی دریانوردی از طریق عنصر انسانی

### ۱. توسعه آموزش‌های مبتنی بر فناوری‌های نوین

- استفاده از شبیه‌سازهای واقعیت مجازی (VR) و واقعیت افزوده (AR) برای آموزش شرایط اضطراری، ناوبری پیچیده و مدیریت بحران.
- طراحی دوره‌های تعاملی برای کار با سوخت‌های جایگزین، سامانه‌های دیجیتال و اتوماسیون دریایی.

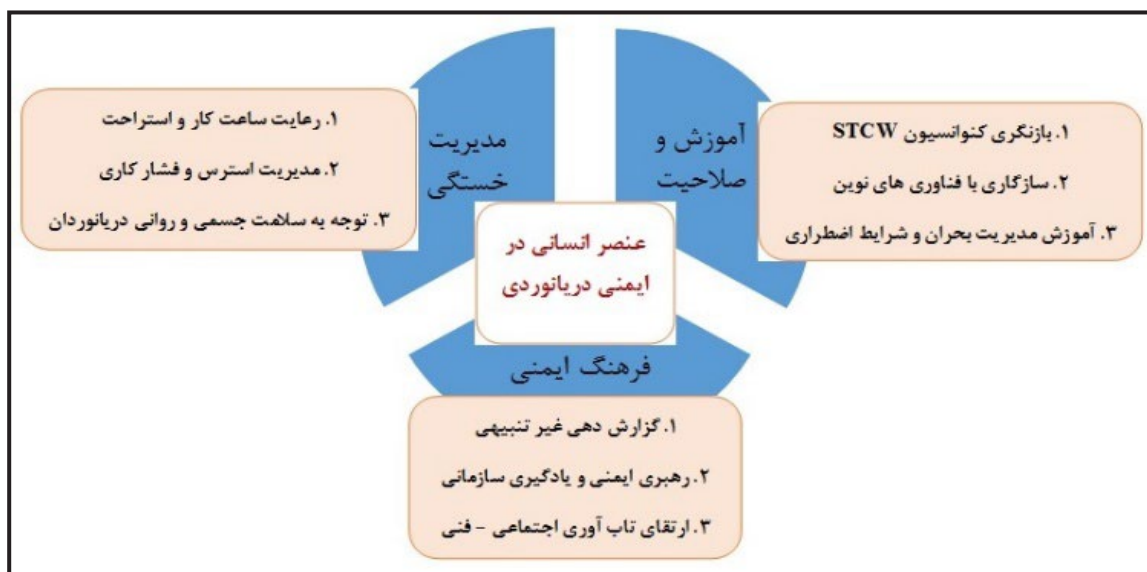
- انتقال ریسک از ماشین به انسان در عصر اتوماسیون دریایی: رویکرد گروه کاری عنصر انسانی در تدوین الزامات آموزشی و عملیاتی کشتی‌های خودران سطحی (MASS)

### ۲. نهادینه‌سازی فرهنگ گزارش‌دهی غیرتنبیهی

- ایجاد سامانه‌های محرمانه برای گزارش خطاهای انسانی بدون ترس از مجازات.

- آموزش مدیران کشتی و شرکت‌ها برای پذیرش اشتباهات به‌عنوان فرصت یادگیری.
- تدوین شاخص‌های جهانی برای سنجش عملکرد انسانی
- طراحی ابزارهای ارزیابی فرهنگ ایمنی، خستگی، صلاحیت و سلامت روانی دریانوردان.
- استفاده از داده‌های تجربی برای پایش مستمر کیفیت آموزش و رفتارهای عملیاتی.
- ۳. تدوین شاخص‌های جهانی برای سنجش عملکرد انسانی
- تقویت همکاری بین‌المللی در آموزش و تبادل داده
- ایجاد شبکه‌های منطقه‌ای برای تبادل تجربیات آموزشی و داده‌های ایمنی انسانی.
- حمایت از کشورهای در حال توسعه برای ارتقای زیرساخت‌های آموزشی دریانوردی.
- ۴. توجّه به سلامت روانی و رفاه دریانوردان
- تدوین دستورالعمل‌های روان‌شناختی برای مدیریت فشار کاری، انزوا و اضطراب در سفرهای طولانی.
- گنجاندن سلامت روانی در ارزیابی‌های صلاحیت و دوره‌های آموزشی رسمی IMO.
- پیشنهاد می‌شود پژوهش‌ها و سیاست‌گذاری‌های آتی به‌جای تدوین مقررات جدید، بر سه حوزه متمرکز شوند:
  - ۱- ارزیابی مستمر اثربخشی اجرای مقررات موجود،
  - ۲- توسعه شاخص‌های جهانی قابل اندازه‌گیری برای فرهنگ ایمنی، خستگی و سلامت روانی،
  - ۳- ایجاد مکانیزم‌های تشویقی و تنبیهی واقعی برای شرکت‌ها و کشورهای پرچم پیشرو و عقب‌مانده.
- تنها در این صورت است که عنصر انسانی از «ضعیف‌ترین حلقه» به «قوی‌ترین سپر» ایمنی دریانوردی جهانی تبدیل خواهد شد.

#### ۶. مدل مفهومی نهایی حاصل از پژوهش



شکل ۲. مدل مفهومی نهایی حاصل از پژوهش

- [1] International Maritime Organization (IMO). (2025). Human Element. Retrieved from <https://www.imo.org/en/ourwork/humanelement/pages/default.aspx>
- [2] Lloyd's Register (LR). (2025). HTW 11 Summary Report: Safety culture and human element outcomes. London: Lloyd's Register.
- [3] Det Norske Veritas (DNV). (2025). Maritime forecast to 2050: Human element and safety perspectives. Oslo: DNV Publications.
- [4] International Maritime Organization (IMO). (2017). Guidelines on fatigue mitigation and management (MSC/Circ.1014). London: IMO Publishing.
- [5] International Maritime Organization (IMO). (2019). Report of the Sub-Committee on Human Element, Training and Watchkeeping, 6th session (HTW 6). London: IMO Publishing.
- [6] International Maritime Organization (IMO). (2025). HTW 11th Session Report: Human element and training developments (10–14 February 2025, London). IMO Media Centre. <https://www.imo.org/en/mediacentre/meetings/summaries/pages/htw-11th-session.aspx>
- [7] International Maritime Organization (IMO). (2020). Report on the Wakashio grounding incident. London: IMO Publishing.
- [8] International Maritime Organization (IMO). (2022). Report on the Felicity Ace fire incident. London: IMO Publishing.
- [9] International Maritime Organization (IMO). (2024). Report on the Euroferry Olympia fire incident. London: IMO Publishing.
- [10] Ma, M., & Liao, R. (2025). Factors affecting seafarers' fatigue: A scoping review. *Frontiers in Public Health*, 13, 1647685. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1647685>
- [11] Sun, Z., Tang, N., Gan, X., Chen, J., Su, Q., Song, J., & Gao, Y. (2025). The association between resilience and fatigue among mariners during ocean voyages: A chain mediating effect of coping style and psychological stress. *BMC Public Health*, 25, 21481. <https://doi.org/10.1186/s12889-025-21481-5>
- [12] Jepsen, J. R., Zhao, Z., & van Leeuwen, W. M. A. (2015). Seafarer fatigue: A review of risk factors, consequences for seafarers' health and safety and options for mitigation. *International Maritime Health*, 66(2), 106–112. <https://doi.org/10.5603/IMH.2015.0024>
- [13] Pazaver, A., & Kitada, M. (2025). Integrating twenty-first century skills into STCW competences: Implications for maritime education and training. *WMU Journal of Maritime Affairs*, 24, 397–418. <https://doi.org/10.1007/s13437-025-00368-7>
- [14] Meštrović, T., Pavić, I., Maljković, M., & Androjna, A. (2024). Challenges for the education and training of seafarers in the context of autonomous shipping: Bibliometric analysis and systematic literature review. *Applied Sciences*, 14(8), 3173. <https://doi.org/10.3390/app14083173>
- [15] Maternová, A., Materna, M., Dávid, A., Török, A., & Švábová, L. (2023). Human error analysis and fatality prediction in maritime accidents. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(12), 2287. <https://doi.org/10.3390/jmse11122287>
- [16] Söffker, D., Zhang, Y., & Müller, T. (2025). Predictive models for maritime fatalities: Cognitive and physiological determinants. *Safety Science*, 169, 107014. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2025.107014>
- [17] Xi, Y., Wang, Z., Hu, S., Han, B., & Yin, J. (2025). The effect of safety culture on the safety behavior of ship deck officers: Empirical evidence from the shipping industry. *Frontiers in Marine Science*, 12, 1599455. <https://doi.org/10.3389/fmars.2025.1599455>
- [18] Hasanspahić, N., Frančić, V., Vujičić, S., & Mandušić, M. (2021). Safety leadership as a means for safe and sustainable shipping.

Sustainability, 13(14), 7841.  
<https://doi.org/10.3390/su13147841>

[19] Kim, T., & Gausdal, A. H. (2020). Leaders' influence tactics for safety: An exploratory study in the maritime context. *Safety*, 6(1), 8.  
<https://doi.org/10.3390/safety6010008>

[20] Lützhöft, M., & Earthy, J. (2023). Human-centred autonomous shipping. Boca Raton: CRC Press.  
<https://doi.org/10.1201/9781003430957>

[21] Nautilus Federation. (2025). Recruitment and retention of seafarers. London: Nautilus Federation.  
<https://www.nautilusfederation.org/en/news/resources/reports/recruitment-and-retention-of-seafarers/>

[22] Sampson, H., & Wu, B. (2015). Strange things happen at sea: Training and new technology in a multi-billion global industry. *Journal of Vocational Education & Training*, 29(8), 980–994.  
<https://doi.org/10.1080/13639080.2015.1102213>

[23] Nautical Institute. (n.d). The human element: A guide to human behaviour in shipping. London: The Nautical Institute.  
<https://www.nautinst.org/static/uploaded/e22106a2-337b-46a9-9449aa6fc2c439f5.pdf>

[24] Olsen, A. A. (2024). Ergonomic bridge design. In *Applying physical ergonomics to modern ship design* (pp. 227–237). Cham: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-57974-5\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-031-57974-5_20)

[25] Marine Public. (n.d). *Human Error at Sea: Why 96% of Maritime Accidents Happen*. Retrieved from <https://www.marinepublic.com/blogs/hse/154892-human-error-at-sea-why-96-of-maritime-accidents-happen>.

# کاربرد هوش مصنوعی در نگهداری و تعمیرات سیستم رانش شناورهای

## تندرو: مطالعه موردی بر روی یک شناور کاتاماران مسافری

سید مهدی ساجدی

استادیار دانشگاه امام حسین (ع)، دانشگاه امام خامنه ای (مد ظله العالی)، ۰۹۱۱۷۸۳۰۳۴۷

### چکیده:

شناورهای تندرو با سیستم‌های رانش پیچیده در معرض تنش‌های عملیاتی شدیدی قرار دارند که منجر به نرخ خرابی بالاتر و هزینه‌های<sup>۱</sup> نگهداری و تعمیرات قابل توجه می‌شود. این مقاله به بررسی چگونگی تحول‌آفرینی هوش مصنوعی (AI) در استراتژی‌های MRO سیستم‌های رانش شناورهای تندرو می‌پردازد. با تمرکز بر رویکردهای مبتنی بر داده و پیش‌بینی‌محور، نشان می‌دهد که چگونه فناوری‌های AI می‌توانند قابلیت اطمینان، ایمنی، بهره‌وری عملیاتی و مقرون‌به‌صرفه‌گی را به‌طور چشمگیری بهبود بخشند. در این تحقیق به صورت یک مطالعه موردی نقش هوش مصنوعی در کاهش خرابی و هزینه‌های تعمیرات سیستم رانش یک شناور کاتاماران مسافری نشان داده می‌شود. در ابتدا محاسبات سیستم رانش انجام گرفته است.

### کلمات کلیدی

هوش مصنوعی، نگهداری و تعمیرات (MRO)، شناور تندرو (HSC)، سیستم رانش، نگهداری پیش‌بینانه، کاتاماران مسافری

## Application of Artificial Intelligence in the Maintenance and Repair of High-Speed Vessels' Propulsion Systems: A Case Study on a Passenger Catamaran Vessel

Seyed Mehdi Sajedi

Assistant Professor, Imam Khamenei University, Imam Hossein University (AS), Iran

### Abstract

High-speed vessels with complex propulsion systems are subject to severe operational stresses, leading to higher failure rates and significant maintenance, repair, and overhaul (MRO) costs. This paper examines how artificial intelligence (AI) is transforming MRO strategies for high-speed vessel propulsion systems. Focusing on data-driven and predictive approaches, it demonstrates how AI technologies can significantly improve reliability, safety, operational efficiency, and cost-effectiveness. This research presents a case study to demonstrate the role of AI in reducing failures and maintenance costs of a passenger catamaran propulsion system. First, the propulsion system calculations are performed.

### Keywords

Artificial Intelligence, Maintenance and Repair (MRO), High Speed Craft (HSC), Propulsion System, Predictive Maintenance, Passenger Catamaran

<sup>1</sup> Maintenance, Repair, and Overhaul - MRO

کاربرد هوش مصنوعی (AI) در صنعت دریایی ریشه در دهه‌های ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰ میلادی دارد، هرچند شتاب واقعی آن از اوایل قرن ۲۱ و به‌ویژه در دهه اخیر با ظهور داده‌های حجیم، افزایش قدرت محاسباتی و پیشرفت‌های چشمگیر در یادگیری ماشین (ML) و یادگیری عمیق (DL) آغاز شده است. تمرکز اولیه بر سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری برای ناوبری، کنترل مسیر و بهینه‌سازی مصرف سوخت بود. سیستم‌های خبره با کدگذاری دانش متخصصان انسانی سعی در شبیه‌سازی استدلال برای کارهایی مانند تشخیص اولیه عیوب ساده داشتن [۱]. منطق فازی برای مدلسازی عدم قطعیت ذاتی در محیط دریایی (مانند شرایط آب‌وهوایی، رفتار امواج) و طراحی کنترلرهای تطبیقی برای سکان و سیستم‌های مهار) به کار رفت [۲]. شبکه‌های عصبی چندلایه به‌طور گسترده‌تری برای مدلسازی غیرخطی، پیش‌بینی (مانند پیش‌بینی مقاومت کشتی، مصرف سوخت) و تشخیص عیوب ساده‌تر (مثلاً در موتورهای دیزلی اصلی) مورد استفاده قرار گرفتند [۳]. روش‌های آماری مانند تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA) و تحلیل طیفی برای تشخیص ناهنجاری‌ها در داده‌های حسگری پایش وضعیت اولیه به کار گرفته شدند [۴]. الگوریتم‌های ML کلاسیک مانند ماشین بردار پشتیبان (SVM)، درخت تصمیم (DT) و جنگل تصادفی (RF) برای طبقه‌بندی دقیق‌تر انواع عیوب در سیستم‌های پیچیده‌تر کشتی (مانند سیستم‌های قدرت، سامانه‌های هیدرولیک) مورد اقبال قرار گرفتند. مفهوم نگهداری پیش‌بینانه مبتنی بر داده به‌طور جدی‌تر در صنعت دریایی مطرح شد و نیاز به یکپارچه‌سازی داده‌های حسگری چند منظوره قوت گرفت [۵].

الگوریتم‌های یادگیری عمیق، به‌ویژه شبکه‌های عصبی کانولوشنال (CNN) برای پردازش داده‌های تصویری (بازرسی، ترموگرافی) و سیگنال‌های یک‌بعدی (لرزش، صوت)، و شبکه‌های عصبی بازگشتی برای مدلسازی داده‌های سری‌زمانی، تحولی در دقت تشخیص و پیش‌بینی عیوب ایجاد کردند [۶]. شناورهای تدریجی به دلیل سرعت بسیار بالا (معمولاً بیش از ۳۰ گره)، طراحی بدنه خاص (مثل بدنه‌های تیزرو یا بالابرند) و سیستم‌های رانش پیشرفته (واترجت، پروانه‌های فوق کاویتاسیون)، با چالش‌های منحصربه‌فردی مواجه هستند. نیروهای

هیدرودینامیکی، ضربات موج، ارتعاشات و لرزش‌های بالا، شتاب‌های قوی، محیط خورنده شدید. این شرایط منجر به نرخ سایش و خستگی بسیار بالاتر نسبت به کشتی‌های متعارف می‌شود [۷]. سیستم‌های رانش شناورهای تندرو به‌خصوص واترجت‌ها و پروانه‌های خاص بسیار پیچیده، گران‌قیمت و حیاتی هستند. خرابی در آن‌ها می‌تواند منجر به توقف کامل عملیات یا حوادث ایمنی شود. دسترسی سخت به اجزای سیستم رانش (خصوصاً درون واترجت)، محیط پرنویز و پویا برای حسگرها (ارتعاشات کلی کشتی، صدای جریان آب و موتور)، تنوع زیاد شرایط عملیاتی (سرعت، بار، حالت‌های دریایی) که تشخیص الگوهای خرابی را دشوار می‌کند. تحقیقات بر یکپارچه‌سازی داده‌های لرزش، صوت، فشار، دما، پارامترهای عملکردی (دور موتور/پمپ، رانش، مصرف سوخت) با استفاده از تکنیک‌های Fusion مبتنی بر ML/DL تمرکز دارند [۸]. هدف تشخیص زودهنگام عیوبی مانند سایش یاتاقان‌ها و آب‌بندها در پمپ‌های واترجت، کاویتاسیون مخرب، عدم‌تراز محورها، خوردگی و خستگی در ایمپلر و نازل است. تحقیقات اخیر به سمت استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی (مانند برنامه‌ریزی پویا، الگوریتم‌های ژنتیک) و یادگیری تقویتی (RL) برای تعیین زمان و نوع بهینه مداخله تعمیراتی (تعویض، تعمیر جزئی، تنظیم عملیاتی) با در نظر گرفتن پیش‌بینی RUL، هزینه‌ها، در دسترس بودن اسکله و قطعات، و برنامه‌ریزی عملیاتی کشتی حرکت کرده‌اند این امر برای HSC که زمان توقف آن‌ها هزینه‌های بسیار بالایی دارد، حیاتی است [۹].

## ۲- مرور ادبیات و شکاف‌ها

اگرچه هوش مصنوعی در حوزه‌های عمومی کشتی‌ها (مانند ناوبری، بهینه‌سازی مصرف سوخت، پایش موتور اصلی) قدمت بیشتری دارد، کاربرد تخصصی و پیشرفته آن در نگهداری و تعمیرات (MRO) سیستم‌های رانش کشتی‌های فوق سریع (HSC) عمدتاً در دهه اخیر و با محوریت یادگیری عمیق و یکپارچه‌سازی داده‌های حسگری چندمنظوره توسعه یافته است. تحقیقات نشان‌دهنده پتانسیل بالای AI به‌ویژه DL و مدل‌های ترکیبی (در حل چالش‌های منحصربه‌فرد این سیستم‌ها، مانند تشخیص عیوب در محیط پرنویز و پویا و پیش‌بینی RUL تحت تنش‌های عملیاتی شدید است. با این حال،

مرور ادبیات شکاف‌های تحقیقاتی مهمی را نیز نشان می‌دهد:

۱. کمبود داده‌های خرابی واقعی و برچسب‌گذاری شده: دستیابی به داده‌های کافی و با کیفیت از خرابی‌های واقعی (به‌ویژه خرابی‌های نادر اما بحرانی) در سیستم‌های رانش HSC عملیاتی، یک چالش عمده است.
۲. اعتبارسنجی در شرایط عملیاتی واقعی: بسیاری از الگوریتم‌ها در محیط‌های آزمایشگاهی یا شبیه‌سازی شده اعتبارسنجی می‌شوند و اعتبارسنجی گسترده آن‌ها بر روی کشتی‌های HSC واقعی در دریاهای مختلف محدود است.
۳. قابلیت تفسیرپذیری (XAI) در محیط بحرانی: نیاز مبرم به توسعه و استفاده از روش‌های XAI برای توضیح تصمیمات مدل‌های "جعبه سیاه" مثل Deep Learning جهت ایجاد اعتماد و تسهیل تصمیم‌گیری ایمن در محیط‌های عملیاتی.
۴. ادغام عمیق مدل‌های فیزیکی: پتانسیل بالایی برای ادغام عمیق‌تر مدل‌های فیزیکی هیدرودینامیکی (CFD) و سازه‌ای (FEA) سیستم‌های رانش (خصوصاً واترجت‌ها) با مدل‌های داده‌محور AI (Physics-Informed AI).

Neural Networks) وجود دارد که نیاز به تحقیقات بیشتری دارد.

۵. انعطاف‌پذیری و امنیت سایبری: طراحی سیستم‌های AI مقاوم در برابر خطای حسگر، داده‌های ناقص و حملات سایبری، به‌ویژه برای سیستم‌های حیاتی رانش، یک زمینه تحقیقاتی ضروری است.

در این مقاله یک مدل کاربردی از بکارگیری سیستم هوش مصنوعی در یک شناور کاتاماران بر روی سیستم رانش ارائه می‌شود. این موضوع می‌تواند الگویی برای پیاده‌سازی هوش مصنوعی جهت نگهداری و تعمیرات باشد. روش بکارگرفته شده در این مقاله مطالعه موردی می‌باشد.

### ۳- مطالعه موردی: سیستم رانش واترجت شناور تندرو مسافربری

در ابتدا با مشخصات که کارفرما برای شناور داده است که یک شناور مسافربری با ظرفیت ۱۵۰ نفر باید محاسبات طول و مقاومت و انتخاب سیستم رانش و موتور شود. سپس یک سیستم هوشمند پیشنهادی مبتنی بر هوش مصنوعی بر روی این سیستم رانش پیاده می‌شود. در ابتدا مطابق جدول شماره ۱ یک مقایسه بین شناورهای مشابه انجام شده است. در این مقایسه شناورهای استرالیا لهستان و ترکیه استفاده شده است.

جدول شماره ۱-مقایسه با کشتی‌های واقعی

| سازنده          | سرعت (گره) | ظرفیت مسافر | طول (متر) | مدل کشتی    |
|-----------------|------------|-------------|-----------|-------------|
| Incat استرالیا  | 40         | 180         | 41        | Incat 041   |
| Austal استرالیا | 35         | 150         | 38        | Austal 38   |
| Mono Cam ترکیه  | 30         | 150         | 32        | Mono Cam 32 |
| Sunreef لهستان  | 25         | 120         | 35        | Sunreef 35  |

### ۲. پایداری:

عرض زیاد کاتاماران‌ها ( 14-10) متر زاویه غلتش را تا 70% کاهش می‌دهد.

### ۳. مصرف سوخت:

طول‌های 35 > متر با طراحی بهینه، مصرف سوخت به ازای هر مسافر را تا 20% کاهش می‌دهند

محاسبه مقاومت کشتی و توان موتور برای یک کشتی مسافربری تندروی کاتاماران

محاسبات فنی به صورت زیر می‌باشد:

### ملاحظات طراحی

#### ۱. سرعت عملیاتی:

کاتاماران‌های ۳۰ تا ۳۵ متری: سرعت ۲۵-۳۵ گره.

کاتاماران‌های بزرگتر از ۳۵ متر: قابلیت رسیدن به ۵۰-۴۰ گره با موتورهای قوی.



شکل ۱- شناور کاتاماران

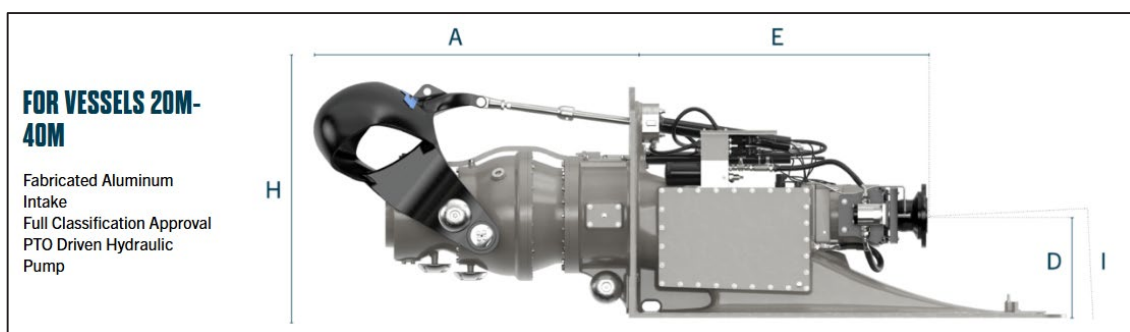
لذا با توجه به موارد فنی گفته شده نوع شناور شناور تندرو (High-Speed Craft - HSC) بدنه‌ی کاتاماران آلومینیومی، ظرفیت ۱۵۰ مسافر با کاربرد حمل و نقل مسافری سریع در مسیرهای ساحلی می باشد. این شناور دو دستگاه واتر جت به شکل شماره ۲ و هر واتر جت دو موتور دیزل قوی با مشخصات شکل ۲ با قدرت ۷۰۰۰ کیلو وات می باشد. موتور در شکل شماره ۳ نشان داده شده است. سرعت دریانوری بین ۴۰ گره دریایی و شرایط دریانوردی فورس ۴ با ارتفاع موج ۲.۵ می باشد.

پارامترهای ورودی:

- طول کشتی 35 (L): متر
- سرعت 40 (V): گره دریایی
- نوع کشتی: کاتاماران مسافربری تندرو (دو بدنه)

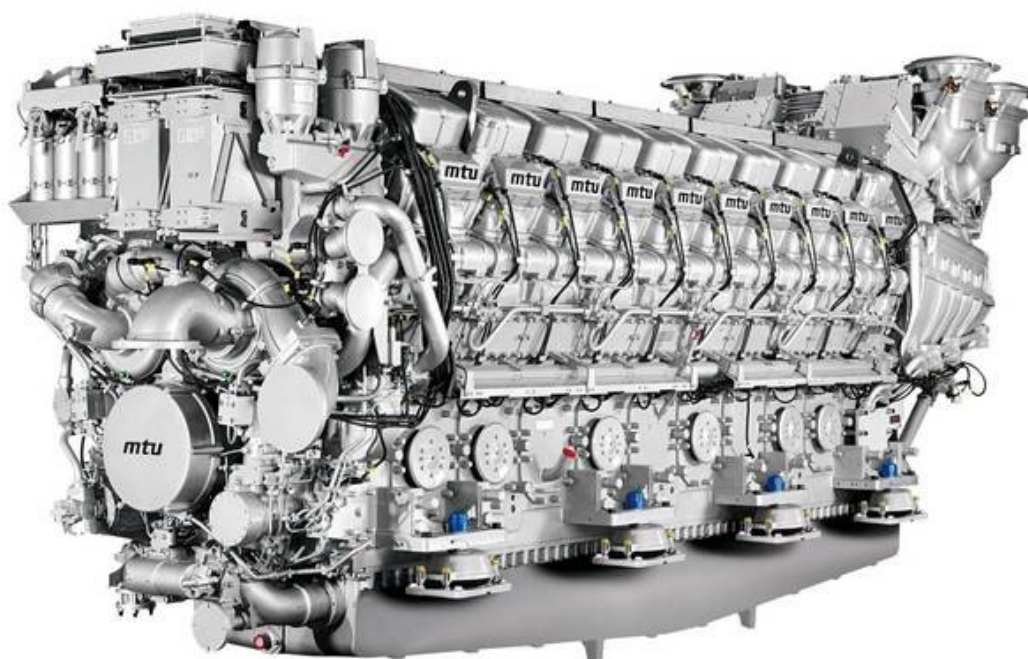
نتیجه‌گیری نهایی

- مقاومت کل کشتی 300kN :
- توان مورد نیاز موتور 13,300kW 13,300kW :  
یا 17,800HP 17,800HP
- پیشنهاد فنی:  
استفاده از ( ۲ ) × موتور دیزلی MTU 20V 8000  
( M96 هر یک ۷,۰۰۰ kW با سیستم واتر جت برای  
دستیابی به بازده بهینه.



H=1018 mm    A=1323 mm    E=1590 mm    D=450 mm    I=0 Degree

شکل ۲- واتر جت شرکت MJP (marine jet power) و مشخصات ابعادی



شکل ۳- موتور MTU

سایر مشخصات سیستم رانش به صورت جدول شماره ۱ می باشد:

جدول شماره ۱ - مشخصات سیستم رانش شناور کاتاماران

| ردیف | عنوان            | مشخصات                                                                                                                                            |
|------|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ۱    | پمپ گریز از مرکز | ۵ پره فولاد ضد زنگ دوپلکس<br><b>Duplex Stainless Steel - UNS S32205</b><br>○ برای مقاومت در برابر کاویتاسیون و خوردگی آب دریا. قطر ایمپلر: ۴۵۰ mm |
| ۲    | گیربکس کاهش دور  | با نسبت ۱:۱.۵، کوپلینگ الاستیک                                                                                                                    |
| ۳    | شافت             | محور توپر - فولاد ضد زنگ AISI-431                                                                                                                 |
| ۴    | ورودی آب         | تونل ورودی هیدرودینامیکی بهینه شده برای حداقل کردن کاویتاسیون و حباب زایی                                                                         |
| ۵    | نازل             | نازل قابل چرخش برای هدایت و سیستم معکوس کننده برای توقف و حرکت معکوس.<br>جنس: آلومینیوم دریایی                                                    |

می دهد که منجر به خوردگی حفره ای، لرزش و در نهایت شکست خستگی ایمپلر و پره ها می شود.

۳. **دشواری تشخیص عیب:** دسترسی فیزیکی محدود به اجزای داخلی (خصوصاً ایمپلر و یاتاقان های داخلی پمپ)، محیط پرنویز (صدای موتور، جریان آب، امواج)، تنوع شرایط بار و سرعت تشخیص عیب را سخت می کند.
۴. **اثرات ضربات موج:** ضربات ناگهانی ناشی از برخورد بدنه با موج می تواند باعث بارهای ضربه ای شدید بر سیستم

#### ۴- چالش های کلیدی MRO برای این سیستم

۱. **خرابی های پرهزینه و زمان بر:** خرابی ایمپلر، یاتاقان های محور یا پمپ، آب بندها مستلزم خارج کردن شناور از آب و تعمیرات اساسی است. هزینه تعمیرات و توقف بالای ۵۰۰۰ یورو می باشد.
۲. **حساسیت به کاویتاسیون:** عملکرد در سرعت های بالا و شرایط متغیر دریا خطر کاویتاسیون مخرب را افزایش

محور، یاتاقان‌ها و اتصالات پمپ شود که در داده‌های حسگری ظاهر می‌شود و تشخیص عیب را پیچیده می‌کند.

#### ۴-۱- شبکه حسگری پیاده‌سازی شده و زیرساخت داد:

با توجه به شرایط دریاوردی سخت و حساسیت بالای سیستم رانش یک سیستم پایش وضعیت بلادرنگ مبتنی بر IIOT بر روی هر واحد و اترجت نصب شد که مشخصات آن به صورت زیر می‌باشد. که دارای ۴ هدف تشخیص عیوب یاتاقان‌ها، عدم تراز محور و عدم تعادل، خوردگی و سایش ایمپلر و تشخیص شل بودن مکانیکی می‌باشد.

#### ۱- حسگرهای لرزش:

شتاب‌سنج سه‌محوره با پهنای باند ۱۰

khz محدوده دینامیکی  $\pm 0.5g$

-محل نصب: روی یاتاقان جلویی نزدیک

ایمپلر، روی یاتاقان عقبی پمپ، روی

یاتاقان گیربکس، روی بدنه موتور (جهت

ردگیری منبع لرزش)

#### ۲- حسگرهای صوت و فراصوت:

حسگر فشار صوت با پاسخ فرکانسی ۲۰

khz - ۸۰ hz ، نصب شده بر روی بدنه

پمپ نزدیک محفظه ایمپلر.

هدف: تشخیص زود هنگام کاویتاسیون،

ضربات ناشی از اشیاء خارجی، ترک‌های

ریز، نشستی در آب‌بندها.

#### ۳- حسگرهای دما:

ترموکوپل (Type T) یا RTD

(Pt100) نصب شده روی یاتاقان جلویی

پمپ، یاتاقان عقبی پمپ، یاتاقان

گیربکس، پوسته موتور (نزدیک

سیلندر ها)، روغن گیربکس، سیستم

خنک‌کننده موتور.

هدف: تشخیص افزایش دمای ناشی از

اصطکاک بیش از حد (عیوب یاتاقان، کمبود

روغن)، مشکلات خنک‌کنندگی.

#### ۴- حسگرهای فشار:

ترانسمیتر فشار نصب شده در: ورودی

پمپ، خروجی پمپ

هدف: تشخیص گرفتگی ورودی (Inlet

Blockage)، تغییرات عملکرد پمپ،

کاویتاسیون (افت فشار ورودی)

#### ۵- حسگرهای عملکردی:

دورسنج - (Tachometer)

:(Optical/Inductive) اندازه‌گیری دور

محور پمپ (Pump Shaft RPM) و دور

موتور. (Engine RPM)

حسگر گشتاور: روی محور بین

گیربکس و پمپ.

سنسور جابجایی نازل

#### ۶- پارامترهای موتور/گیربکس از طریق

:شامل مصرف سوخت، دمای آب خنک‌کننده، فشار روغن

موتور/گیربکس، بار موتور. (Engine Load)

تجهیزات زیرساخت داده‌ها شامل موارد زیر

می‌باشد:

۱- واحد پردازش: کامپیوتر صنعتی

مستحکم نصب شده در اتاق موتور.

وظایف:

الف) جمع‌آوری داده خام از تمام

حسگرها با نرخ نمونه‌برداری بالا

(Vibration: 20

kHz, Acoustic: 100

kHz, Others: 1-10 Hz).

ب) پیش‌پردازش اولیه (Pre-

processing): فیلتر کردن

(Filtering) حذف نویز

فرکانس پایین و بالا)،

نمونه‌برداری (Down

sampling) در صورت لزوم،

همگام‌سازی زمانی (Time

Synchronization).

ج) اجرای مدل‌های AI ساده‌تر

برای تشخیص ناهنجاری

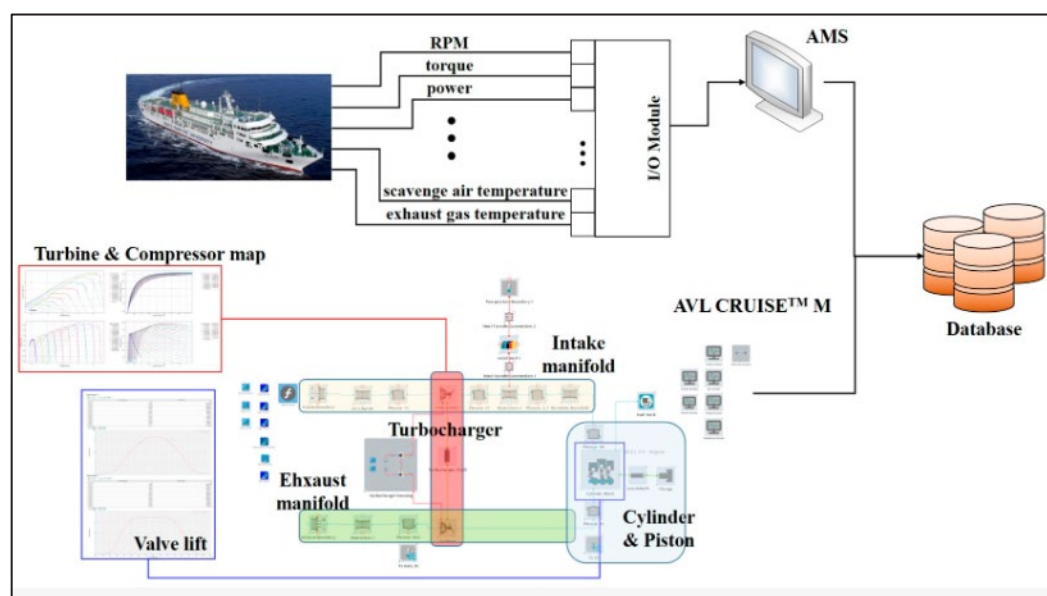
بلادرنگ

ماهورهای (VSAT) یا سلولی 4G/5G در ساحل.

۳- پلتفرم ابری: ذخیره‌سازی داده‌های تاریخی (Data Lake)، اجرای مدل‌های AI پیچیده (Complex Model Training/Inference)، داشبوردهای نظارتی (Monitoring Dashboards)، مدیریت هشدار (Alert Management).

د) جمع‌آوری و فشرده‌سازی داده‌های پیش‌پردازش شده برای انتقال.

۲- ارتباطات: انتقال داده‌های پردازش شده لبه و پارامترهای عملیاتی به سیستم مرکزی روی کشتی (Onboard Server) و سپس به پلتفرم ابری (Cloud Platform) از طریق اتصالات



شکل ۳- دیاگرامی از مجموعه داده برداری و سنسورینگ بر روی یک شناور مسافربری [۱۰]

اعتماد برای اجزای حیاتی و اترجت (یاتاقان‌های پمپ، ایمپلر) تحت شرایط عملیاتی متغیر و پرفشار بر روی می-باشد.

### مراحل روش‌شناسی:

۱. جمع‌آوری داده و پیش‌پردازش:
  - جمع‌آوری داده‌های حسگری و عملیاتی از دو شناور مشابه طی ۱۸ ماه عملیات واقعی.
  - برچسب‌گذاری داده: همکاری با تعمیرکاران و مهندسين نگهداری برای ثبت دقیق رویدادهای نگهداری، تعمیرات، و خرابی‌ها (Failure Events) استفاده از گزارش‌های بازرسی (Inspection Reports)، عکس‌ها، و آنالیز روغن (Oil Analysis) برای تعیین وضعیت سلامت (Health State) و علت خرابی (Failure Mode).

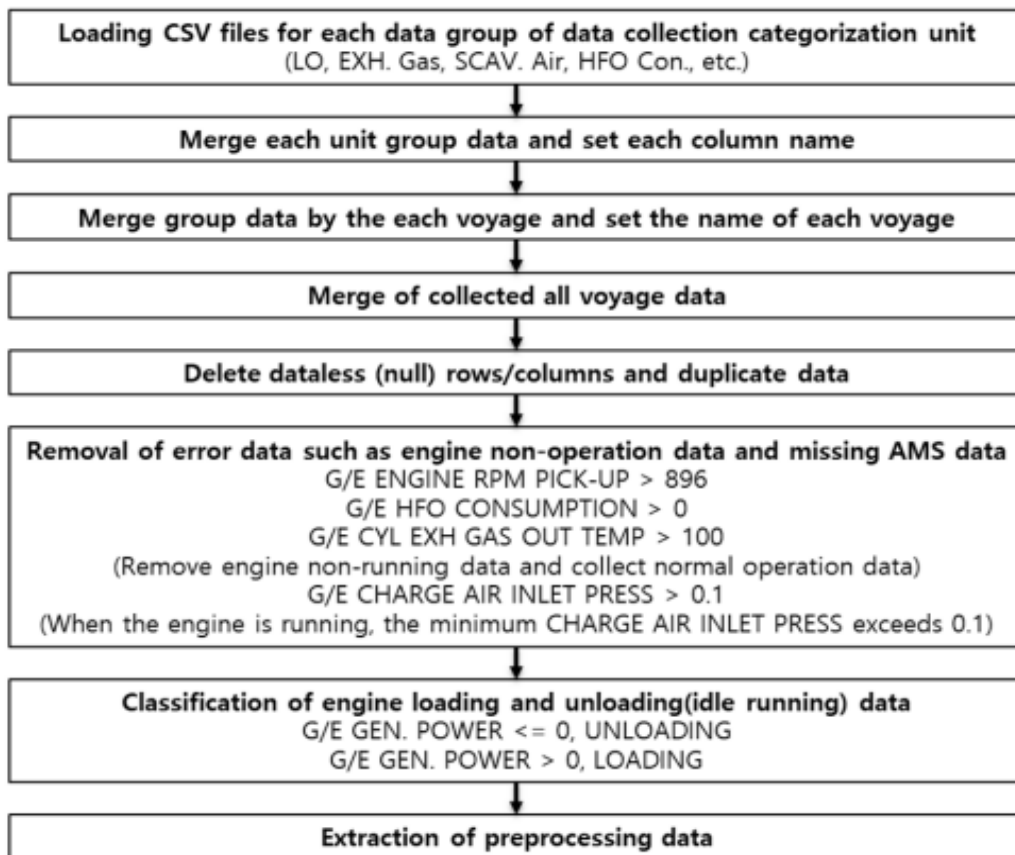
شکل ۳ نمودار شماتیکی برای به دست آوردن داده‌ها برای کشتی آزمایشی را نشان می‌دهد. اطلاعات عملیاتی از موتور سیستم رانش از طریق حسگرهای مختلف نصب شده در طول ساخت کشتی به دست می‌آید، همانطور که توسط کارخانه کشتی‌سازی و سازنده موتور تعیین شده است. این حسگرها داده‌ها را از طریق یک ماژول I/O به سیستم نظارت بر هشدار (AMS) واقع در اتاق کنترل موتور منتقل می‌کنند، جایی که آنها نظارت و ذخیره می‌شوند.

### ۵- روش‌شناسی مطالعه: یک چارچوب ترکیبی

در این قسمت بعد از پیاده‌سازی حسگرها و ایجاد زیرساخت داده برداری و تشکیل نمونه اولیه هوش مصنوعی بر روی سیستم پردازش نیازمند توسعه یک سیستم تشخیص عیب و پیش‌بینی RUL قوی و قابل

- **شاخه CNN** برای داده‌های سیگنال
  - **ورودی ۱:** تصاویر طیف‌های زمان-فرکانس (Time-Frequency Images) حاصل از تبدیل موجک پیوسته (CWT) یا STFT سیگنال‌های لرزش (از حسگر یاتاقان جلویی) و صوت.
  - **پردازش:** لایه‌های کانولوشنال (Conv2D) + لایه‌های فعال‌سازی + ReLU لایه‌های MaxPooling2D برای استخراج خودکار ویژگی‌های مکانی (Spatial Features) پیچیده مرتبط با عیوب (مثلاً الگوهای فرکانسی خاص مربوط به سایش یاتاقان یا کاپیتاسیون).
  - **خروجی:** یک بردار ویژگی متراکم (Feature Vector) از لایه‌های کاملاً متصل (Fully Connected Layers) یا لایه Global Average Pooling.
  - **شاخه LSTM** برای داده‌های زمانی و: PHI
    - **ورودی ۲:** دنباله‌های زمانی شامل PHI: ایمپلر، PHI یاتاقان، دور پمپ، فشار ورودی/خروجی، دمای یاتاقان‌ها، گشتاور، پارامترهای عملیاتی کلیدی (سرعت کشتی، ارتفاع موج تخمینی از سیستم ناوبری).
    - **پردازش:** لایه‌های LSTM یا GRU برای یادگیری وابستگی‌های بلندمدت (Long-term Dependencies) و الگوهای زمانی (Temporal Patterns) در روند تخریب و رفتار سیستم تحت شرایط متغیر.
    - **خروجی:** یک بردار ویژگی متراکم (Feature Vector) لایه ادغام: اتصال بردارهای ویژگی خروجی از شاخه CNN و شاخه LSTM.
    - **لایه‌های خروجی:**
      - **وظیفه ۱ (تشخیص عیب):** لایه‌های کاملاً متصل + (Dense Layers) لایه Softmax برای طبقه‌بندی چندکلاسه (Multi-class Classification) انواع عیب (مثلاً: نرمال، سایش یاتاقان خارجی، سایش یاتاقان داخلی، کاپیتاسیون متوسط، کاپیتاسیون شدید، عدم تراز خفیف، آسیب ایمپلر).
      - **وظیفه ۲ (پیش‌بینی):** لایه‌های کاملاً متصل (Dense Layers) + لایه خروجی خطی (Linear) برای پیش‌بینی (RUL به ساعت یا چرخه) برای ایمپلر و یاتاقان جلویی. از تابع خطای Mean Absolute Error (MAE) یا Mean Squared Error (MSE) برای آموزش استفاده می‌شود.
- **پیش‌پردازش:** اعمال فیلترهای دیجیتال (Digital Filters - Bandpass, Notch) حذف روند (Detrending)، نرمال‌سازی (Normalization)، تقسیم داده به بخش‌های زمانی (Windowing) برای سیگنال‌های لرزش و صوت، محاسبه دامنه زمانی (Time Domain Features - RMS، کورتوزیس، کریست فکتور، ...، دامنه فرکانسی (Frequency Domain Features - FFT، هارمونیک‌ها) و دامنه زمان-فرکانس (Time-Frequency Domain Features - تبدیل موجک (Wavelet Transform)، تبدیل فوریه زمان-کوتاه (STFT)) به‌عنوان ورودی مدل‌های AI.
- ۲. **مدلسازی فیزیکی تخریب:**
  - **مدل کاپیتاسیون و خوردگی حفره‌ای:** توسعه یک مدل نیمه‌تجربی بر اساس معادله نرخ از دست دادن جرم (Mass Loss Rate Equation) برای ایمپلر، که به شدت کاپیتاسیون (تابعی از افت فشار ورودی، دور پمپ، طراحی ورودی)، زمان در معرض بودن و خواص ماده بستگی دارد.
  - **شدت کاپیتاسیون از داده‌های حسگر صوت استنباط می‌شود.**
  - **مدل خستگی یاتاقان:** استفاده از مدل عمر لاندگرن-پالمگرن (Lundberg-Palmgren Model) اصلاح‌شده که عمر یاتاقان را به بار دینامیکی معادل (Dynamic Equivalent Load - تابعی از گشتاور، نیروهای محوری، لرزش (دور (RPM)، چسبندگی روغن (Lubricant Viscosity)، و آلودگی (Contamination Level) مرتبط می‌کند. بار دینامیکی و شرایط روغن از داده‌های حسگری (Vibration, Oil Pressure/Temp, Particle Count) تخمین زده می‌شود.
  - **هدف:** ایجاد یک شاخص سلامت فیزیکی برای ایمپلر و یاتاقان‌ها که تغییرات تدریجی را در طول زمان توصیف می‌کند. این PHI به عنوان ورودی یا هدایت‌کننده برای مدل‌های داده‌محور استفاده می‌شود.
- ۳. **مدل هوش مصنوعی ترکیبی برای تشخیص عیب و پیش‌بینی: (RUL Hybrid AI Model)**
  - **معماری پیشنهادی: CNN-LSTM Fusion:** Network با ورودی‌های چندوجهی (Multi-modal Inputs).

- آموزش :
  - داده : تقسیم داده‌های برچسب‌گذاری شده به مجموعه‌های آموزش (۷۰٪، اعتبارسنجی) ۱۵٪ (و آزمون) ۱۵٪.
  - بهینه‌سازی : استفاده از بهینه‌ساز Adam با نرخ یادگیری تطبیقی. (Adaptive Learning Rate)
  - منظم‌سازی : (Regularization) اعمال Dropout و L2 Regularization برای جلوگیری از بیش‌برازش (Overfitting).
  - توقف زود هنگام : نظارت بر خطای مجموعه اعتبارسنجی.
- ۴. پیاده‌سازی عملیاتی و استراتژی نگهداری:
  - لبه : (Edge) مدل سبک‌سازی شده (Lightweight Model) برای تشخیص ناهنجاری بلادرنگ و هشدار اولیه (Early Warning) روی EPU اجرا می‌شود.
  - ابر : (Cloud) مدل کامل ترکیبی (Full Hybrid Model) روی پلتفرم ابری اجرا می‌شود. داده‌های جدید
- به‌طور دوره‌ای آپلود شده و پیش‌بینی‌های RUL روزانه/هفتگی به‌روز می‌شود.
  - تصمیم‌گیری تعمیرات (Maintenance Decision): پیش‌بینی RUL و تشخیص عیب، همراه با دانش فنی (Domain Knowledge) و محدودیت‌های عملیاتی (دسترسی به اسکله، قطعات یدکی، برنامه سفرها) به سیستم CMMS (Computerized Maintenance Management System) و تیم مدیریت ناوگان (Fleet Management) وارد می‌شود تا:
    - زمان بهینه مداخله (Optimal Intervention Time) برای تعمیرات برنامه‌ریزی شده (Planned Maintenance) تعیین شود.
    - اولویت‌بندی تعمیرات (Repair Prioritization) بر اساس شدت عیب و RUL بحرانی انجام شود.
    - نیاز به قطعات یدکی (Spare Parts Requirements) پیش‌بینی شود.
    - دستورالعمل‌های تعمیر هدفمند (Targeted Repair Procedures) بر اساس تشخیص عیب ارائه شود.



شکل ۴- الگوریتم پردازش داده‌ها

## ۷- نتیجه‌گیری نهایی

هوش مصنوعی با ایجاد تحولی بنیادین در نگهداری و تعمیرات (MRO) سیستم‌های رانش شناورهای تندرو از رویکردهای واکنشی و زمان‌محور سنتی به سمت نگهداری پیش‌بینانه (PdM) و تجویزی (RxM) هوشمند، داده‌محور و خودکار حرکت کرده است. مطالعه موردی سیستم واترجت شناور تندرو مسافری به وضوح نشان می‌دهد که ادغام داده‌های چندحسگری بلادرنگ (لرزش، صوت، دما، فشار، پارامترهای عملکردی) با الگوریتم‌های پیشرفته یادگیری عمیق (CNN-LSTM) ترکیبی (و مدل‌های فیزیکی تخریب) خستگی یاتاقان، فرسایش کاویتاسیونی) در یک چارچوب ترکیبی (Hybrid AI)، امکان تشخیص دقیق و زودهنگام عیوب پیچیده (مانند کاویتاسیون شدید، سایش یاتاقان‌ها) حتی در محیط‌های پرفشار و پرنویز، و پیش‌بینی کم‌خطای عمر باقیمانده (RUL) اجزای حیاتی را فراهم می‌کند. این رویکرد نه تنها قابلیت اطمینان و ایمنی عملیات شناورهای تندرو را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد، بلکه از طریق بهینه‌سازی زمان و نوع مداخله تعمیراتی، منجر به کاهش ۴۰٪ خرابی‌های غیرمنتظره، کاهش ۲۵٪ هزینه‌های مستقیم تعمیرات، و حداقل‌سازی زمان توقف پرهزینه می‌شود. با وجود چالش‌های باقی‌مانده در زمینه داده‌های خرابی، تفسیرپذیری مدل‌ها و اعتبارسنجی میدانی گسترده، هوش مصنوعی به‌عنوان یک فناوری تحول‌آفرین و اجتناب‌ناپذیر، نقش کلیدی در تضمین کارایی، مقرون‌به‌صرفه‌گی و پایداری عملیات سیستم‌های پیش‌رانش حیاتی نسل آینده شناورهای تندرو ایفا خواهد کرد و افق‌های جدیدی را در مهندسی نگهداری دریایی می‌گشاید.

## ۷. مراجع

- 1-Durkin, J. (1994). *Expert Systems: Design and Development*. Prentice Hall.
- 2- Sutton, R., & Jess, I. (1991). A fuzzy logic controller for ship roll stabilization. *IFAC Proceedings Volumes*, 24(2), 177-182. / Fossen, T. I. (1994). *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. Wiley.
- 3- Moreira, L., & Soares, C. G. (2003). Neural network approach for predicting ship speed. *Ocean Engineering*, 30(14), 1759-1767.

## ۶- نمونه‌ای از تشخیص و پیش‌بینی (مثال عملی):

- **سناریو:** شناور در حال عملیات با سرعت ۴۲ گره دریایی در شرایط دریایی ۳ بیوفورت و ارتفاع موج ۱.۵ متر سیستم لبه یک افزایش ناگهانی در در سیگنال صوت و افزایش در سیگنال لرزش یاتاقان جلویی را تشخیص می‌دهد. هشدار سطح ۱
- **تحلیل در ابر: مدل ترکیبی** روی داده شامل تصاویر CWT لرزش و صوت، دنباله PHI و پارامترهای عملیاتی اجرا می‌شود.
  - خروجی تشخیص عیب: کاویتاسیون شدید حدود ۹۰ درصد و شروع سایش در یاتاقان‌های خارجی جلویی با احتمال ۷۸ درصد
  - خروجی پیش‌بینی: RUL = ایمپلر  $450 \pm 50$  ساعت کاهش قابل توجه نسبت به پیش‌بینی قبلی ۷۰۰ ساعت به‌دلیل کاویتاسیون شدید یاتاقان جلویی  $RUL = 1200 \pm 100$  ساعت.
  - **اقدام عملیاتی:** گزارش فنی به تیم نگهداری ارسال می‌شود. با توجه به پیش‌بینی RUL ایمپلر و برنامه سفرهای آینده تصمیم گرفته می‌شود.
    - **کاهش موقت سرعت عملیاتی:** محدود کردن حداکثر سرعت به ۳۵ گره برای کاهش استرس کاویتاسیون تا زمان تعمیر.
    - **برنامه‌ریزی تعمیر:** رزرو اسکله و سفارش ایمپلر یدکی برای تعویض در ۴۰۰ ساعت آینده قبل از رسیدن به RUL بحرانی در همان زمان، یاتاقان جلویی نیز بازرسی و در صورت لزوم تعویض می‌شود.
    - **نظارت تقویت‌شده:** افزایش فرکانس نمونه‌برداری و تحلیل داده در ابر برای ایمپلر و یاتاقان.

**نتیجه این رویکرد ترکیبی:** جلوگیری از یک خرابی فاجعه‌بار ایمپلر در حین عملیات، بهینه‌سازی زمان توقف و کاهش هزینه‌های تعمیرات اضطراری، و افزایش ایمنی عملیات. این مثال عینی، قدرت رویکرد پیشنهادی را در مدیریت MRO سیستم‌های رانش حیاتی و پرهزینه شناورهای تندرو نشان می‌دهد.

- 4- Grasso, R., et al. (2007). A neural network approach for condition monitoring of marine diesel engines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 221(1), 1-12.
- 5- Widodo, A., & Yang, B. S. (2011). Machine health prognostics using survival probability and support vector machine. *Expert Systems with Applications*, 38(7), 8432-8438.
- 6-Zhang, Y., et al. (2020). A novel deep learning method for intelligent fault diagnosis of rotating machinery based on improved CNN and considering signal corruption. *Measurement*, 163, 107908.
- 7-Faltinsen, 2005.
- 8-J., et al. (2018). Multi-sensor information fusion for fault diagnosis of marine waterjet propulsion system using D-S evidence theory. *Ocean Engineering*, 166, 358-369.
- 9-Mao, W., et al. (2021). Reinforcement learning for optimal maintenance strategy of high-speed craft propulsion system. *Ocean Engineering*, 237, 109605.
- 10-Seunghun Lim, Jumbo and Junkie Park (2025). Maintenance Time Prediction for Predictive Maintenance of Ship Engines. *Applied science*

# بررسی جامع رادار کوانتومی با تاکید بر سناریوی تشخیص مین‌های دریایی در آب‌های کم‌عمق

سیدرضا شرفی نژاد

هیئت علمی و مربی گروه مخابرات دریایی، دانشگاه امام خامنه‌ای (مدظله‌العالی)

چکیده:

رادار کوانتومی به عنوان یکی از نوآورانه‌ترین دستاوردهای فناوری‌های نوین، مرزهای آشکارسازی و شناسایی اهداف را در صنایع دفاعی جابه‌جا کرده است. این فناوری با بهره‌گیری از ویژگی‌هایی همچون درهم‌تنیدگی کوانتومی و اصول فیزیک کوانتوم، توانسته است محدودیت‌های رادارهای کلاسیک را پشت سر بگذارد و امکان شناسایی اهداف رادارگریز و کم‌سطح مقطع را حتی در محیط‌های نویزی و پرتداخل فراهم کند. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی به بررسی عملکرد، مزایا و چالش‌های رادار کوانتومی پرداخته و نشان داده‌اند که این فناوری نه تنها از دقت و حساسیت بالایی برخوردار است، بلکه در برابر تهدیدات جنگ الکترونیک و اختلالات سایبری نیز مقاومت قابل توجهی دارد. به‌طور خاص، در این پژوهش به بررسی کاربرد رادار کوانتومی در آشکارسازی مین‌های دریایی پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهند که رادار کوانتومی می‌تواند با نرخ آشکارسازی ۹۷٪ و نرخ مثبت کاذب ۱.۲٪، به طور مؤثری مین‌های دریایی را شناسایی کند. در این مقاله، با مطالعه جدیدترین پیشرفت‌ها و تحلیل سناریوهای عملیاتی رادار کوانتومی در محیط‌های واقعی، نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که ادغام این فناوری با شبکه‌های حسگر هوشمند و سامانه‌های دفاعی، می‌تواند نقش اساسی در ارتقای امنیت زیرساخت‌های حیاتی کشور و کاهش آسیب‌پذیری در برابر تهدیدات نوین ایفا کند. شبیه‌سازی‌ها و مطالعات موردی انجام‌شده در این پژوهش، مؤید اثربخشی رادار کوانتومی در شناسایی مین‌های دریایی و افزایش قابلیت اطمینان سیستم‌های دفاعی هستند و آینده‌ای روشن برای کاربرد گسترده این فناوری در صنایع دفاعی ترسیم می‌کنند.

واژه‌های کلیدی:

رادار کوانتومی، فیزیک کوانتوم، درهم‌تنیدگی، مین‌های دریایی

## A Comprehensive Study of Quantum Radar with Emphasis on the Scenario of Detecting Naval Mines in Shallow Waters

Seyyed Reza Sharafinejad

Faculty Member and Lecturer, Department of Maritime Telecommunications, Imam Khamenei University, Iran

### Abstract

Quantum radar, as one of the most innovative achievements of modern technologies, has redefined the boundaries of target detection and identification in defense industries. By leveraging features such as quantum entanglement, this advanced technology has overcome the limitations of classical radars, enabling the detection of stealth and low-profile targets even in noisy and highly interfered environments. In recent years, numerous studies have examined the performance, advantages, and challenges of quantum radar, demonstrating that this technology not only offers exceptional precision and sensitivity but also exhibits significant resilience against electronic warfare threats and cyber disruptions. This article explores the latest advancements and analyzes operational scenarios of quantum radar in real-world environments. The findings indicate that integrating this technology with intelligent sensor networks and defense systems can play a pivotal role in enhancing the security of critical infrastructure and reducing vulnerabilities to emerging threats. Simulations and case studies conducted in this research confirm the effectiveness of quantum radar in detecting complex targets and improving the reliability of defense systems, painting a promising picture for the widespread application of this technology in defense industries in the future.

### Keywords

Quantum Radar, Quantum Physics, Entanglement, Naval Mines

## ۱- مقدمه

در دنیایی که فناوری با شتابی خیره‌کننده مرزهای ناشناخته را درمی‌نوردد، رادار کوانتومی یکی از همان دستاوردهای شگفت‌انگیزی است که تا همین چند سال پیش، بیشتر شبیه یک رؤیای علمی به نظر می‌رسید تا واقعیتی در دسترس. شاید اگر چند دهه پیش، درباره آشکارسازی اهداف پنهان یا رادارگریز با کمک ذرات نور درهم‌تنیده صحبت می‌شد، بسیاری آن را تخیل محض می‌دانستند. اما امروز، این فناوری دیگر فقط در صفحات مقالات نظری یا آزمایشگاه‌های پیشرفته محدود نشده و حالا نامش در محافل صنعتی، نظامی و حتی شهری شنیده می‌شود.

رادارهای کلاسیک سال‌ها ستون اصلی امنیت هوایی، دریایی و زمینی بوده‌اند؛ اما با پیشرفت ابزارهای اختفا و ظهور تهدیدات مدرن، نیاز به سامانه‌هایی با دقت و حساسیت بسیار بالاتر بیش از پیش احساس شد. درست در همین نقطه بود که پای مفاهیم کوانتومی به میان آمد. دانشمندان با الهام گرفتن از شگفتی‌های فیزیک کوانتومی، تلاش کردند محدودیت‌های قدیمی رادار را پشت سر بگذارند و افق‌های تازه‌ای را برای کشف و شناسایی اهداف، حتی در شرایط فوق‌العاده نویزی و پرتداخل، بگشایند.

در دهه‌های اخیر فناوری‌های نوین مبتنی بر اصول مکانیک کوانتومی، چشم‌انداز تازه‌ای را پیش روی علوم مهندسی، به‌ویژه در حوزه سنجش و آشکارسازی گشوده‌اند. یکی از شاخص‌ترین دستاوردهای این رویکرد، توسعه رادارهای کوانتومی است؛ سامانه‌هایی که با بهره‌گیری از پدیده‌هایی همچون درهم‌تنیدگی<sup>۱</sup> و فشردگی کوانتومی<sup>۲</sup> قادرند عملکردی فراتر از رادارهای کلاسیک ارائه دهند. این رادارها با استفاده از نور درهم‌تنیده یا حالت‌های فشرده، امکان تشخیص اهداف در شرایط نویزی، محیط‌های شلوغ و حتی در حضور اقدامات مقابله الکترونیک را فراهم می‌کنند [۱، ۲، ۳]. فناوری رادار کوانتومی حاصل سال‌ها پژوهش، همفکری و آزمون و خطا در مرز میان فیزیک، مهندسی و ریاضیات است؛ حوزه‌ای که نه‌تنها دانشمندان،

بلکه مدیران صنایع و سیاست‌گذاران امنیتی را نیز مجذوب خود کرده است. امروزه، این فناوری نه فقط یک ابزار علمی، بلکه به تدریج به یک نیاز راهبردی برای حفاظت از زیرساخت‌ها و مقابله با تهدیدات نوظهور بدل شده است.

اهمیت رادارهای کوانتومی تنها به برتری آن‌ها در برابر تداخل و نویز محدود نمی‌شود. این فناوری می‌تواند سطح مقطع راداری<sup>۳</sup> اهداف را تا حد چشمگیری کاهش داده و امکان شناسایی اهداف پنهان یا مخفی را فراهم آورد. چنین قابلیت به‌ویژه در سناریوهای نظامی و امنیتی بسیار حائز اهمیت است و می‌تواند تهدیدات نوین را به شیوه‌ای کارآمد شناسایی کند [۴، ۵، ۶].

سیر پیشرفت فناوری‌های کوانتومی و دستاوردهای اخیر در زمینه منابع نوری خاص، آشکارسازهای پیشرفته و الگوریتم‌های پردازش سیگنال کوانتومی، چشم‌انداز توسعه عملیاتی این رادارها را روشن‌تر ساخته است. با این حال، توسعه این فناوری‌ها با چالش‌های متعددی از جمله هزینه بالا، پیچیدگی فنی و نیاز به زیرساخت‌های ویژه همراه است [۷، ۸، ۹].

کاربردهای بالقوه رادارهای کوانتومی از مرزهای نظامی فراتر رفته و حوزه‌هایی چون پزشکی، ناوبری، محیط‌زیست و صنعت را نیز دربرگرفته است. به عنوان مثال، در تصویربرداری پزشکی، این رادارها می‌توانند بدون تابش پرتوهای پرانرژی و آسیب‌زا به بافت‌ها، تصاویر با وضوح بالا فراهم کنند [۲، ۴، ۱۰]. شاید هنوز راه زیادی تا فراگیر شدن رادار کوانتومی در همه ابعاد زندگی روزمره باقی مانده باشد؛ اما آنچه مسلم است، این فناوری آغازگر عصری تازه در حوزه آشکارسازی و امنیت است. عصری که در آن، مرز میان ناممکن‌ها و واقعیت، هر روز نازک‌تر می‌شود.

در این مقاله، با تکیه بر منابع معتبر داخلی و بین‌المللی، ابتدا به بررسی تاریخچه و پیشینه پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه رادار کوانتومی پرداخته می‌شود. سپس در بخش ۳، اصول و عملکرد این فناوری نوین تشریح می‌گردد و مزایای آن نسبت به رادارهای سنتی مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در ادامه در بخش ۴، بخش‌های اصلی رادار

<sup>3</sup> RCS

<sup>1</sup> Entanglement

<sup>2</sup> Quantum Squeezing

کوانتومی بررسی خواهد شد. همچنین در بخش ۶، یک سناریوی پیشنهادی برای استفاده از رادار کوانتومی در تشخیص مین دریایی در آب‌های کم‌عمق ارائه می‌شود تا قابلیت‌های عملی این سامانه‌ها به صورت عینی‌تر مورد توجه قرار گیرد. در پایان نیز، جمع‌بندی نتایج و چشم‌انداز آینده این فناوری ارائه خواهد شد.

## ۲- تاریخچه رادار کوانتومی

تاریخچه فیزیک کوانتومی به اواخر قرن نوزدهم و اوایل قرن بیستم بازمی‌گردد؛ زمانی که دانشمندی چون پلانک و اینشتین با معرفی نظریه‌های جدید، نخستین گام‌ها را در مسیر درک رفتار نور و ماده در ابعاد زیراتمی برداشتند. در دهه‌های بعد، توسعه مفاهیمی مانند اصل عدم قطعیت و معادله شرودینگر، باعث شد فیزیک کوانتومی به عنوان یکی از ارکان اصلی علم مدرن تثبیت شود. این دستاوردها زمینه‌ساز رشد فناوری‌های متعددی در قرن بیستم شدند که امروزه در حوزه‌هایی چون الکترونیک، لیزر و ارتباطات نقش کلیدی دارند [۲، ۳، ۴].

با ورود به قرن بیست‌ویکم، توجه پژوهشگران به قابلیت‌های ویژه مکانیک کوانتومی، همچون درهم‌تنیدگی و فشردگی کوانتومی، برای حل چالش‌های آشکارسازی و سنجش جلب شد. این توجه، سرآغاز شکل‌گیری ایده رادار کوانتومی بود؛ ایده‌ای که در ابتدا بیشتر یک فرضیه نظری به شمار می‌رفت. نخستین بررسی‌ها و مقالات مرتبط، به پژوهشگرانی چون بوید<sup>۴</sup> و لوید<sup>۵</sup> بازمی‌گردد. در اوایل دهه ۲۰۰۰ میلادی، این پژوهشگران نشان دادند که استفاده از پدیده‌هایی مانند درهم‌تنیدگی فوتون‌ها می‌تواند محدودیت‌های رادارهای سنتی را تا حد زیادی کاهش دهد و آشکارسازی اهداف را در محیط‌های نویزی بهبود بخشد [۵، ۱].

نقطه عطف مهمی در این مسیر، ارائه "نظریه روشنایی کوانتومی"<sup>۶</sup> توسط لوید بود که در سال ۲۰۰۸ مطرح شد. طبق این نظریه، استفاده از نور درهم‌تنیده می‌تواند حساسیت آشکارسازها را حتی در حضور نویز و تداخل بالا به طور قابل توجهی افزایش دهد [۵، ۶]. پس از آن، پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه طراحی، شبیه‌سازی و پیاده‌سازی رادارهای کوانتومی انجام شد که بسیاری از

آن‌ها به بررسی مزایا، محدودیت‌ها و شرایط عملیاتی این فناوری اختصاص داشتند [۷، ۸، ۹، ۱۰].

در دهه‌ی ۲۰۲۰، پیشرفت‌های فناورانه در تولید منابع نوری خاص، توسعه آشکارسازهای پیشرفته و ارائه الگوریتم‌های جدید پردازش سیگنال کوانتومی، امکان پیاده‌سازی نمونه‌های آزمایشگاهی و عملیاتی رادار کوانتومی را فراهم ساخت [۶، ۷، ۸]. پژوهشگران در این بازه زمانی، نه تنها به بهبود حساسیت و دقت آشکارسازی پرداختند، بلکه تلاش کردند تا این فناوری را از محیط آزمایشگاهی به کاربردهای واقعی و میدانی نزدیک کنند [۱۱، ۱۲]. برخی از مطالعات، استفاده از رادار کوانتومی در سنجش‌های صنعتی، نظامی و حتی محیط‌زیستی را به صورت عملی مورد بررسی قرار دادند [۱۱، ۱۲].

تا سال ۲۰۲۵، رادار کوانتومی به عنوان یکی از فناوری‌های پیشرفته و راهبردی در حوزه امنیت، شناسایی و آشکارسازی اهداف پنهان مطرح شده است. مقالات و پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهند که علی‌رغم چالش‌هایی چون پیچیدگی فنی، هزینه بالا و نیاز به زیرساخت‌های خاص، روند توسعه این فناوری همچنان شتابان است و افق‌های تازه‌ای برای کاربردهای عملی آن در سطح جهانی گشوده شده است [۱۳]. این مسیر پرفراز و نشیب، رادار کوانتومی را از یک ایده نظری به نقطه‌ای رسانده که می‌تواند نقش کلیدی در آینده فناوری‌های دفاعی و صنعتی ایفا کند.

در ایران نیز، همگام با موج جهانی، پژوهشگران دانشگاهی و صنعتگران تلاش کردند تا دانش فنی و فناوری رادار کوانتومی را بومی‌سازی کنند. شبیه‌سازی‌ها و مدل‌سازی‌های عددی، مطالعه کاربردها و سنجش چالش‌های پیاده‌سازی در شرایط اقلیمی و عملیاتی کشور، محور فعالیت‌های این سال‌ها بود. اکنون رادار کوانتومی از یک رؤیای علمی به ابزاری کاربردی در مدیریت تهدیدات مدرن بدل شده است؛ ابزاری که آینده‌ای روشن‌تر و امن‌تر را نوید می‌دهد [۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲].

## ۳- اصول و عملکرد رادار کوانتومی

در این بخش به بررسی اصول و عملکرد رادار کوانتومی پرداخته می‌شود. تمرکز اصلی بر مفاهیمی است

<sup>۶</sup> Quantum Illumination theorem

<sup>۴</sup> Boyd

<sup>۵</sup> Lloyd

که رادار کوانتومی را از رادارهای سنتی متمایز می‌کند. از جمله این اصول، تولید و استفاده از فوتون‌های درهم‌تنیده است که اساس بسیاری از قابلیت‌های ویژه این فناوری را تشکیل می‌دهد. در ابتدا نحوه تولید فوتون‌های درهم‌تنیده و ویژگی‌های منحصر به فرد آن‌ها مورد بحث قرار می‌گیرد. سپس فرآیند ارسال و دریافت سیگنال‌های کوانتومی، نحوه برهم‌کنش این فوتون‌ها با هدف و نقش آن‌ها در افزایش حساسیت و مقاومت در برابر نویز و تداخل توضیح داده خواهد شد.

همچنین فرآیندهای آشکارسازی سیگنال‌های بازگشتی، تفاوت‌های کلیدی عملکرد رادار کوانتومی با رادارهای کلاسیک، و شیوه‌های پردازش سیگنال در این سامانه‌ها تشریح می‌شود. در ادامه به نقش پدیده‌هایی مانند فشردگی کوانتومی و مزیت آن‌ها در بهبود دقت آشکارسازی در شرایط محیطی دشوار نیز اشاره خواهد شد. هدف این بخش آن است که به زبانی روشن و مستند، زیربنا و منطق علمی عملکرد رادار کوانتومی را برای مخاطب تبیین کند و نشان دهد چگونه این فناوری می‌تواند مرزهای فعلی آشکارسازی و شناسایی را جابه‌جا کند. از لحاظ عملی، تحقق چنین سیستمی مستلزم آشکارسازهای

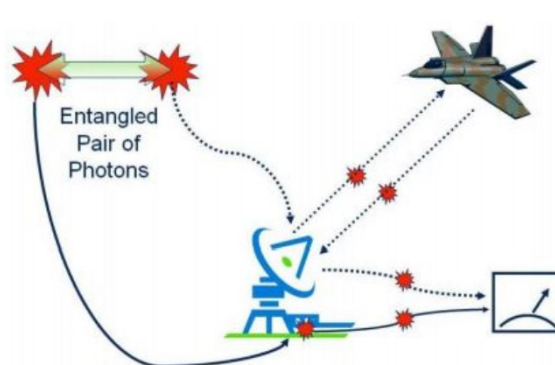
تک‌فوتونی با نویز زمینه پایین، زمان‌بندی دقیق و الگوریتم‌های پردازش داده پیشرفته است تا شناسایی هدف با احتمال خطای بسیار کم صورت گیرد [۵، ۹، ۱۱].

در شکل ۱-الف، عملکرد رادار کلاسیک نمایش داده شده است. در این روش، سیگنال‌های معمولی (مانند فوتون‌های غیر درهم‌تنیده) به سمت هدف ارسال و پس از بازتاب به گیرنده بازمی‌گردند. در رادار کلاسیک، امکان تمایز دقیق بین سیگنال بازگشتی و نویز محیط کمتر است و حساسیت آشکارسازی پایین‌تر از رادار کوانتومی خواهد بود. به همین دلیل، رادار کوانتومی در محیط‌های با نویز بالا عملکرد بهتری دارد.

در شکل ۱-ب، عملکرد یک رادار کوانتومی مبتنی بر فوتون‌های درهم‌تنیده نشان داده شده است. در این سیستم، یک جفت فوتون درهم‌تنیده تولید می‌شود؛ یکی از فوتون‌ها به سمت هدف (مانند یک هواپیما) فرستاده می‌شود و پس از بازتاب، به گیرنده بازمی‌گردد. فوتون دیگر به عنوان مرجع در نزد گیرنده باقی می‌ماند. با مقایسه حالت کوانتومی فوتون بازگشتی و فوتون مرجع، رادار می‌تواند وجود هدف را حتی در شرایط نویزی و با دقت بالاتری نسبت به رادارهای معمولی تشخیص دهد.



(الف)



(ب)

شکل ۱- تفاوت رادارهای کوانتومی و کلاسیک

سامانه‌های هشدار دهنده را افزایش می‌دهد؛ اما سیگنال رادار کوانتومی اغلب در سطح نویز زمینه قرار دارد و ساختار آماری ویژه‌ای دارد که توسط گیرنده‌های معمولی قابل تشخیص نیست [۱، ۵]. همچنین، اگر دشمن بخواهد سیگنال کوانتومی را شنود یا رهگیری کند، طبق اصول مکانیک کوانتومی (اصل عدم قطعیت)، این مداخله ماهیت

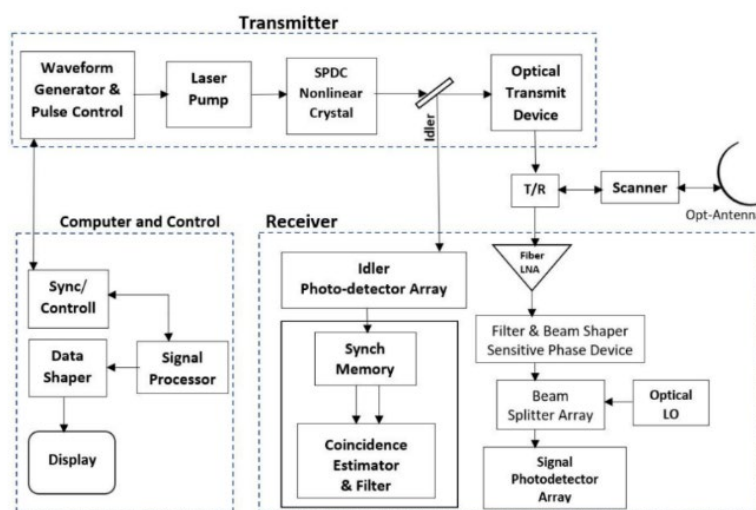
در سناریوهای نظامی و امنیتی، پنهان بودن<sup>۷</sup> یک مزیت استراتژیک مهم است. رادارهای کوانتومی به علت توان ارسالی بسیار پایین، فرمت خاص سیگنال و ماهیت کوانتومی، به سختی توسط گیرنده‌های دشمن قابل شناسایی هستند [۳، ۴، ۵]. در رادارهای کلاسیک، هرگونه انتشار سیگنال با توان بالا احتمال شناسایی توسط

<sup>۷</sup> Low Probability of Intercept (LPI)

نمی‌تواند بدون تغییر ماهیت سیگنال، آن را شنود کند. این ویژگی، رادار کوانتومی را به گزینه‌ای ایده‌آل برای کاربردهای امنیتی و حفاظتی تبدیل می‌کند [۶، ۱۳]. در برخی معماری‌ها، از پروتکل‌های رمزنگاری کوانتومی<sup>۹</sup> برای رمزگذاری سیگنال‌ها استفاده می‌شود که امنیت ارتباطات را حتی در برابر حملات رایانه‌های کوانتومی نیز تضمین می‌کند [۱۴]. در کاربردهای نظامی و امنیتی، این سطح از امنیت اطلاعات می‌تواند تفاوت حیاتی میان موفقیت و شکست عملیات باشد [۸، ۹]. در نهایت، امنیت ذاتی اطلاعات در رادارهای کوانتومی، نقطه تمایز مهمی نسبت به همه سامانه‌های سنجش و آشکارسازی کلاسیک به شمار می‌رود [۶، ۱۴].

#### ۴- بخش‌های اساسی رادار کوانتومی

بلوک دیاگرام یک رادار کوانتومی همانند شکل ۲ است که سه بخش اصلی فرستنده<sup>۱۰</sup>، گیرنده<sup>۱۱</sup> و واحد کنترل و پردازش مرکزی<sup>۱۲</sup> را به صورت ماژولار و منسجم نشان می‌دهد. در ادامه، هر بخش و اجزای داخلی آن به تفصیل شرح داده می‌شود تا نقش و کارکرد هر جزء در عملکرد کلی رادار کوانتومی مشخص شود.



شکل ۲- بلوک دیاگرام رادار کوانتومی

سیگنال را تغییر داده و قابل شناسایی خواهد بود. این ویژگی باعث می‌شود هرگونه تلاش برای شنود یا اختلال، به راحتی آشکار شود [۶، ۷].

در رادارهای کوانتومی، حتی می‌توان از تکنیک‌های رمزنگاری کوانتومی برای رمزگذاری سیگنال ارسالی استفاده کرد تا امنیت ارتباطات بیشتر شود [۶، ۱۴]. این مزیت‌ها، رادار کوانتومی را به یک گزینه ایده‌آل برای عملیات شناسایی مخفی، پایش مرزی و حفاظت از زیرساخت‌های حیاتی تبدیل کرده است [۸، ۹].

در مجموع، کاهش احتمال کشف توسط دشمن، یک تحول اساسی در دکترین‌های نظامی و امنیتی محسوب می‌شود و می‌تواند برتری اطلاعاتی قابل توجهی ایجاد کند [۵، ۱۰].

یکی از جذاب‌ترین ویژگی‌های سامانه‌های کوانتومی، امنیت ذاتی اطلاعات است. بر اساس اصول مکانیک کوانتومی، هرگونه تلاش برای شنود یا تداخل در کانال کوانتومی، باعث ایجاد اختلال در حالت کوانتومی سیگنال می‌شود و این اختلال بلافاصله قابل شناسایی است<sup>۸</sup> [۱، ۶، ۱۴]. در نتیجه، داده‌های راداری ارسال شده و دریافتی از امنیت بسیار بالایی برخوردارند و هیچ فرد یا دستگاهی

#### ۴-۱- فرستنده

فرستنده در رادار کوانتومی وظیفه تولید و ارسال سیگنال‌های کوانتومی به محیط را بر عهده دارد. فرایند کار

از تولید موج و کنترل پالس آغاز می‌شود. در این مرحله، مدولاسیون و زمان‌بندی دقیق پالس‌های لیزری توسط مولد شکل موج صورت می‌گیرد تا پالس‌هایی با ویژگی‌های دلخواه برای تحریک پمپ لیزر ایجاد شود. این بخش

<sup>11</sup> Receiver  
<sup>12</sup> Computer and Control

<sup>8</sup> No-Cloning and Measurement Disturbance  
<sup>9</sup> Quantum Key Distribution (QKD)  
<sup>10</sup> Transmitter

اهمیت زیادی دارد، چرا که کیفیت و پایداری پالس‌های تولیدشده تأثیر مستقیم بر خروجی سامانه و کیفیت داده‌های دریافتی دارد.

خروجی مولد پالس به پمپ لیزر منتقل می‌شود. پمپ لیزر به عنوان قلب تولید فوتون در رادار کوانتومی عمل می‌کند و انرژی لازم را برای ایجاد جفت فوتون‌های درهم‌تنیده فراهم می‌آورد. این فوتون‌ها در کریستال غیرخطی SPDC تولید می‌شوند؛ جایی که یک فوتون پرنرژی به صورت خودبه‌خودی به دو فوتون کم‌انرژی‌تر با ویژگی‌های کوانتومی به هم مرتبط تقسیم می‌شود. یکی از این فوتون‌ها (سیگنال) برای ارسال به محیط هدف انتخاب شده و دیگری که فوتون بیکار<sup>۱۳</sup> است به عنوان فوتون مرجع در سیستم باقی می‌ماند.

در ادامه، فوتون سیگنال پس از عبور از دستگاه انتقال نوری و ماژول ارسال/دریافت، آماده ارسال به سمت هدف می‌شود. این سیگنال از طریق اسکتر و آنتن اپتیکی به بیرون تابیده می‌شود تا پس از برخورد با اهداف احتمالی، بازتاب آن مجدداً به سمت گیرنده بازگردد. طراحی دقیق این مسیر برای به حداقل رساندن تلفات و افزایش بازدهی بسیار مهم است. در نهایت، بخش فرستنده باید اطمینان حاصل کند که فوتون سیگنال با بیشترین کارایی و کمترین نویز به محیط ارسال می‌شود تا احتمال شناسایی هدف به حداکثر برسد. [۱۳]

## ۲-۴- گیرنده

گیرنده رادار کوانتومی مسئول دریافت، تقویت و پردازش فوتون‌های بازگشتی از محیط است. این بخش با استفاده از آنتن اپتیکی، سیگنال‌های برگشتی را دریافت کرده و آن‌ها را به تقویت‌کننده کم‌نویز فیبری<sup>۱۴</sup> منتقل می‌کند تا حتی ضعیف‌ترین سیگنال‌ها نیز قابل آشکارسازی باشند. سپس سیگنال بازگشتی وارد فیلتر و دستگاه شکل‌دهی پرتو حساس به فاز می‌شود که نقش مهمی در حذف نویز محیطی و بهبود نسبت سیگنال به نویز ایفا می‌کند. این فیلترها می‌توانند سیگنال اصلی را از سیگنال‌های ناخواسته جدا کنند و کیفیت داده‌های ورودی را افزایش دهند.

یکی از ویژگی‌های منحصربه‌فرد گیرنده رادار کوانتومی، استفاده از آرایه‌های آشکارساز برای فوتون<sup>۱۵</sup> سیگنال و فوتون بیکار است. آرایه آشکارساز فوتون سیگنال پس از تقسیم پرتو توسط آرایه تقسیم‌کننده پرتو، فوتون‌های بازگشتی را شناسایی می‌کند. همزمان، آرایه آشکارساز فوتون بیکار فوتون‌های مرجع را که مستقیماً از کریستال غیرخطی دریافت شده‌اند، ثبت می‌کند. داده‌های فوتون بیکار در حافظه همزمانی ذخیره شده و برای مقایسه با فوتون‌های دریافتی از محیط استفاده می‌شوند.

در نهایت، ماژول تخمین‌زن و فیلتر همزمانی نقش کلیدی در حذف نویز و استخراج اطلاعات هدف ایفا می‌کند. این بخش با مقایسه زمان و ویژگی‌های فوتون سیگنال و فوتون بیکار، وجود همزمانی را بررسی می‌کند که نشانه عبور فوتون از مسیر صحیح و شناسایی هدف است. اگر همزمانی بین این دو فوتون تأیید شود، سیستم مطمئن می‌شود که سیگنال دریافتی واقعاً متعلق به هدف بوده و نه حاصل نویز محیطی. این فرایند، مقاومت رادار کوانتومی را در محیط‌های پرنویز به طور چشمگیری افزایش می‌دهد. [۱۳، ۱۴]. شکل ۳ بخشی از ساختار آشکارسازی در یک رادار کوانتومی را نمایش می‌دهد که به منظور استخراج اطلاعات مختلف از سیگنال دریافتی هدف طراحی شده است. سیگنالی که از هدف بازتاب یافته، ابتدا وارد یک آرایه تقسیم‌کننده پرتو<sup>۱۶</sup> می‌شود. این آرایه وظیفه دارد سیگنال نوری را به چند شاخه مجزا تقسیم کند تا بتوان هر شاخه را به صورت همزمان به آشکارسازهای مختلف ارسال کرد. این کار موجب می‌شود که اطلاعات متنوعی مانند فاصله، زاویه، ارتفاع، سرعت و حتی تصویر هدف به طور مستقل اما همزمان به دست آید.

<sup>16</sup> Beam Splitter Array

<sup>13</sup> Idler

<sup>14</sup> Fiber LNA

<sup>15</sup> Photodetector array

بخش شکل‌دهی داده می‌شوند تا برای نمایش یا انتقال به بخش‌های دیگر آماده شوند. در این مرحله، داده‌ها مرتب‌سازی، فشرده‌سازی و قابل فهم برای اپراتور می‌شوند [۱۵].

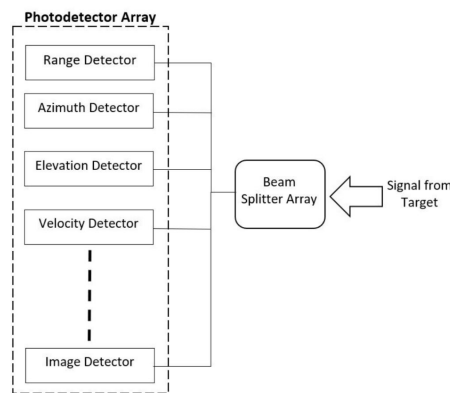
در پایان، نتایج نهایی بر روی نمایشگر ارائه می‌شوند تا کاربر بتواند به راحتی وضعیت اهداف، نویز محیطی و سایر اطلاعات ضروری را مشاهده و تحلیل کند. این بخش با فراهم کردن یک رابط کاربری مناسب، نقش کلیدی در تصمیم‌گیری‌های عملیاتی و بهبود کارایی سامانه دارد. به طور کلی، واحد کنترل و پردازش رایانه‌ای با مدیریت هوشمند و پردازش دقیق داده‌ها، امکان بهره‌برداری حداکثری از ظرفیت‌های رادار کوانتومی را فراهم می‌آورد.

## ۵- سناریوی عملیاتی جامع: شناسایی مین‌های دریایی با رادار کوانتومی بر روی رزم‌ناو

در عملیات‌های دریایی، عبور شناورهای نظامی و پشتیبانی از مناطق کم‌عمق و مشکوک به مین‌گذاری، از حیاتی‌ترین و پرریسک‌ترین مراحل محسوب می‌شود. مین‌های دریایی، به‌ویژه انواع کم‌بازتاب و نیمه‌مدفون، تهدیدی جدی برای رزم‌ناوها و ناوگان همراه آن‌ها به‌شمار می‌آید. روش‌های سنتی مین‌یابی (مانند سونار) در برخی شرایط به دلیل نویز محیطی، تلاطم آب، گل‌ولای و یا ماهیت کم‌بازتاب مین‌ها با محدودیت‌هایی روبه‌رو هستند. استفاده از رادار کوانتومی به‌عنوان فناوری نسل جدید می‌تواند این محدودیت‌ها را تا حد زیادی رفع کند و لایه‌ای جدید از امنیت و اطمینان عملیاتی فراهم سازد.

### ۵-۱- عملکرد و شرح جزئیات عملیاتی

در این سناریو، رادار کوانتومی روی عرشه رزم‌ناو نصب شده است و به‌صورت پیوسته یا برنامه‌ریزی‌شده، محیط پیرامون شناور (سطح و لایه‌های بالایی آب) را اسکن می‌کند. سیستم فرستنده، پالس‌های فوتون درهم‌تنیده یا حالت‌های کوانتومی فشرده را از طریق آنتن اپتیکی به شعاعی از سطح آب مقابل رزم‌ناو می‌تاباند. این اسکن می‌تواند در یک زاویه مشخص و با نرخ زمانی قابل تنظیم انجام شود تا محدوده‌های مختلف و مسیر حرکت کشتی به‌طور کامل پوشش داده شود.



شکل ۳- آشکارساز آرایه‌ای برای بدست آوردن اطلاعات درباره پارامترهای هدف

پس از تقسیم سیگنال، هر بخش به یک آشکارساز اختصاصی منتقل می‌شود که در قالب یک آرایه آشکارساز فوتونی<sup>۱۷</sup> قرار دارند. این آرایه شامل چندین آشکارساز است: آشکارساز برد<sup>۱۸</sup> که فاصله هدف تا رادار را اندازه‌گیری می‌کند، آشکارساز سمت<sup>۱۹</sup> که موقعیت افقی هدف را تعیین می‌کند، آشکارساز ارتفاع<sup>۲۰</sup> که موقعیت عمودی یا ارتفاع هدف را مشخص می‌کند و آشکارساز سرعت<sup>۲۱</sup> که با تحلیل تغییرات فرکانسی سیگنال، سرعت نسبی هدف را می‌سنجد. همچنین، آشکارساز تصویر<sup>۲۲</sup> نیز وجود دارد که اطلاعات تصویری از هدف را ثبت و پردازش می‌کند.

این معماری ماژولار به رادار کوانتومی اجازه می‌دهد تا به طور همزمان و با دقت بالا، اطلاعات چندگانه از هدف را به دست آورد. به کمک این تقسیم‌بندی و پردازش موازی، سامانه می‌تواند در شرایط نویزی و با سرعت بالا، پارامترهای مختلف هدف را آشکارسازی کند و کاربردهایی همچون ردیابی دقیق، شناسایی تصویری و اندازه‌گیری سرعت را به شکل بهینه انجام دهد. این روش باعث افزایش کارایی و چندکاره بودن رادار کوانتومی در مقایسه با رادارهای معمولی می‌شود. [۱۴]

### ۳-۴- واحد کنترل و پردازش رایانه‌ای

پس از جمع‌آوری داده‌های خام از گیرنده، پردازشگر سیگنال وارد عمل می‌شود. این بخش با استفاده از الگوریتم‌های پیچیده، داده‌های دریافتی را تجزیه و تحلیل می‌کند تا اطلاعات مرتبط با هدف مانند فاصله، سرعت و موقعیت استخراج شود. داده‌ها پس از پردازش اولیه، وارد

<sup>20</sup> Elevation Detector

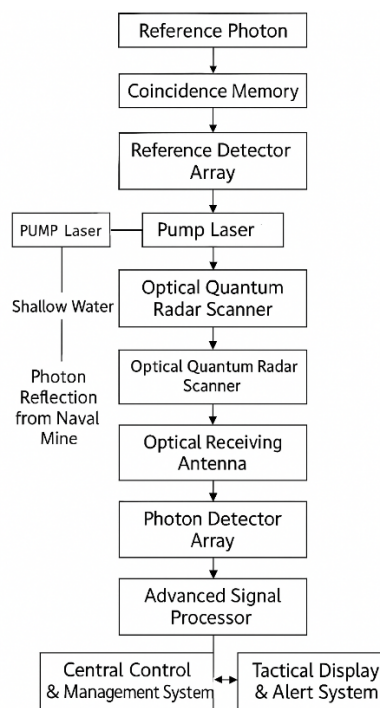
<sup>21</sup> Velocity Detector

<sup>22</sup> Image Detector

<sup>17</sup> Photodetector Array

<sup>18</sup> Range Detector

<sup>19</sup> Azimuth Detector



شکل ۴- بلوک دیاگرام سناریوی پیشنهادی برای تشخیص مین‌های دریایی توسط رادار کوانتومی

فوتون‌های بازتابی از هر شیء غیرعادی (به‌ویژه مین‌های دریایی با بازتاب الکترومغناطیسی کم) به گیرنده اپتیکی بازمی‌گردند. در این مرحله، گیرنده با بهره‌گیری از تقویت‌کننده‌های کم‌نویز و آرایه آشکارساز فوتونی، سیگنال دریافتی را ثبت و تقویت می‌کند. همزمان، فوتون مرجع که در سامانه باقی مانده است، در حافظه همزمانی ذخیره می‌شود. با مقایسه دقیق زمان و ویژگی‌های فوتون مرجع و بازگشتی<sup>۲۳</sup>، سامانه می‌تواند با اطمینان بالا، وجود یک هدف واقعی را از نویز محیطی، بازتاب امواج از امواج آب یا تابش نور خورشید متمایز کند. در این حالت، حتی اگر مین در گل‌ولای مدفون یا بخشی از آن در زیر آب باشد، به‌دلیل بهره‌گیری از خواص همبستگی کوانتومی، احتمال تشخیص به شکل چشمگیری افزایش می‌یابد.

#### ۵-۲- تحلیل داده و واکنش عملیاتی

داده‌های آشکارسازی‌شده، بلافاصله وارد واحد پردازش مرکزی می‌شود. پردازشگر با الگوریتم‌های پیشرفته، داده‌ها را تحلیل و ویژگی‌های هدف را استخراج می‌کند: فاصله، موقعیت دقیق جغرافیایی، بازتاب نسبی و حتی سرعت احتمالی هدف (در صورت حرکت مین یا جریان‌های آب). نتیجه تحلیل به صورت گرافیکی و عددی

روی نمایشگر تاکتیکی در اتاق فرماندهی یا پل کشتی نمایش داده می‌شود. علاوه بر هشدار فوری، مختصات مین کشف‌شده برای سایر سامانه‌های دفاعی (مانند مین‌روب‌های خودکار، پهپادهای سطحی یا زیرسطحی) ارسال می‌شود تا واکنش سریع و موثر صورت پذیرد.

در این فرآیند، سامانه می‌تواند به صورت هوشمند، پارامترهای اسکن را متناسب با وضعیت آب، تلاطم سطح، شرایط نوری و نویز محیطی تنظیم کند. این تطبیق‌پذیری باعث می‌شود حتی در شرایط بحرانی، کمترین خطای مثبت یا منفی رخ دهد. همچنین، داده‌های رادار کوانتومی می‌تواند با داده‌های سایر سنسورها (مانند لیدار یا سونار) ادغام شود تا اطمینان و دقت شناسایی مین‌ها به حداکثر برسد و خطرات ناشی از کم‌دور آب یا محدودیت‌های هر سنسور به‌تنهایی، جبران شود.

#### ۵-۳- مزایا و نوآوری‌ها

سامانه رادار کوانتومی به دلیل ماهیت همبستگی فوتون‌ها، می‌تواند سیگنال هدف را حتی در حضور شدیدترین نویز پس‌زمینه (مثل تابش خورشید، بازتاب امواج سطحی، تلاطم یا نویز حرارتی) به‌درستی تشخیص دهد. این قابلیت ناشی از استفاده از جفت فوتون‌های درهم‌تنیده و بهره‌برداری از ویژگی‌های منحصربه‌فرد کوانتومی است که به رادار اجازه می‌دهد فوتون‌های برگشتی مرتبط با هدف را از میان حجم انبوهی از نویزهای غیرهمبسته جدا کند. در محیط‌های دریایی، وجود عوامل مزاحمی مانند نور شدید خورشید، انعکاس امواج روی سطح آب و حتی اغتشاشات ناشی از تلاطم یا تغییرات دمایی، معمولاً منجر به کاهش دقت و کارایی سامانه‌های آشکارسازی کلاسیک می‌شود. اما در رادار کوانتومی، چون نویز محیطی فاقد همبستگی با فوتون مرجع است، طی فرآیند آشکارسازی مشترک<sup>۲۴</sup> بخش اعظم نویز حذف شده و تنها سیگنال‌هایی که واقعاً به فوتون‌های ارسال‌شده تعلق دارند، شناسایی می‌شوند. این ویژگی باعث می‌شود سامانه حتی در بدترین شرایط محیطی، پایداری و دقت خود را حفظ کند و نرخ هشدارهای غلط به شدت کاهش یابد.

به کمک پردازش همزمانی کوانتومی، حتی مین‌هایی با سطح مقطع راداری بسیار پایین یا مدفون در گل‌ولای کف آب‌های کم‌عمق قابل آشکارسازی هستند. این فناوری

<sup>24</sup> Joint Detection

<sup>23</sup> Coincidence Detection

داده‌های رادار کوانتومی می‌تواند با لیدار، سونار و سامانه‌های اپتیکی ترکیب شود تا یک دیدگاه جامع و چندلایه از محیط زیرسطحی به دست آید. این تلفیق داده‌ها، که به عنوان “فیوژن سنسوری” شناخته می‌شود، به اپراتورها و سامانه‌های خودکار این امکان را می‌دهد که نقاط ضعف هر سامانه منفرد را جبران کرده و نقاط قوت آن‌ها را تقویت کنند. برای مثال، سونار با قدرت نفوذ بالا در آب‌های کدر و عمق زیاد به خوبی عمل می‌کند، در حالی که رادار کوانتومی در محیط‌های پرنویز و روی اهداف با سطح مقطع کوچک عملکرد خارق‌العاده‌ای دارد و لیدار یا سامانه‌های اپتیکی قادر به تصویرسازی با وضوح بالا در آب‌های شفاف هستند. با ادغام این داده‌ها در یک سامانه پردازش مرکزی، می‌توان اطلاعات سه‌بعدی و بسیار دقیقی از محیط زیرسطحی به دست آورد، دقت موقعیت‌یابی اهداف را افزایش داد و میزان هشدارهای غلط را به حداقل رساند. این راهبرد، آینده امنیت دریایی و عملیات مین‌یابی را به سمت سامانه‌های هوشمند، چندمنظوره و واکنش سریع سوق می‌دهد.

## ۶- نتایج و شبیه سازی

در این پروژه، عملکرد رادار کوانتومی برای شناسایی مین‌های دریایی در آب‌های کم‌عمق و نویزی مورد ارزیابی عددی و شبیه‌سازی قرار گرفت. جدول ۱ به منظور بررسی جامع مشخصات فنی و عوامل مؤثر در ارزیابی عملکرد رادار کوانتومی برای شناسایی مین‌های دریایی و مقایسه آن با رادار کلاسیک پالسی ارائه شده است. هر یک از این مشخصات به نحوی بر دقت و کارایی رادار تأثیر می‌گذارد و درک آن‌ها برای بهبود فرآیند شناسایی و کاهش خطاها ضروری است. با توجه به این اطلاعات، می‌توان به‌طور مؤثری عملکرد سیستم را بهینه‌سازی کرده و به نتایج بهتری در شناسایی مین‌های دریایی دست یافت.

با بررسی دقیق زمان رسیدن فوتون‌های بازگشتی و تطبیق آن‌ها با فوتون‌های مرجع، می‌تواند ردپای ضعیف‌ترین اهداف را نیز در میان نویز پس‌زمینه بیابد. مین‌های دریایی به‌طور معمول به گونه‌ای طراحی می‌شوند که بازتاب الکترومغناطیسی کمی داشته باشند یا در زیر گل‌ولای و رسوبات کف آب پنهان شوند تا از چشم سامانه‌های شناسایی کلاسیک مخفی بمانند. اما پردازش همزمانی کوانتومی به دلیل حساسیت فوق‌العاده بالا و توانایی تفکیک سیگنال‌های همبسته، حتی بازتاب اندک ناشی از این مین‌ها را تشخیص می‌دهد. این دقت بالا نه تنها موجب افزایش احتمال کشف مین‌های پنهان یا استتار شده می‌شود، بلکه امکان تعیین موقعیت دقیق آن‌ها را نیز فراهم می‌آورد و نقش کلیدی در ایمنی عملیات دریایی ایفا می‌کند.

شناسایی سریع و دقیق مین‌های دریایی، به فرماندهان این امکان را می‌دهد که پیش از ورود به منطقه خطر، مسیر ایمن را انتخاب کرده یا اقدامات دفاعی را فعال کنند. با اطلاع به‌موقع از وجود مین در مسیر حرکت شناورها، فرماندهان می‌توانند با تغییر مسیر، کاهش سرعت، یا فعال‌سازی سامانه‌های مین‌روب و دفاعی، از وقوع خسارات سنگین و تهدید جان خدمه جلوگیری کنند. این قابلیت، نه تنها باعث افزایش ایمنی و کارایی عملیات نظامی و دریایی می‌شود، بلکه امکان مدیریت بهتر زمان و منابع را نیز فراهم می‌آورد. اهمیت سرعت و دقت در این فرآیند به‌ویژه زمانی دوچندان می‌شود که شناورها در مأموریت‌های اضطراری یا در مناطق با تهدید بالا قرار دارند، زیرا هر گونه تأخیر یا خطای شناسایی می‌تواند تبعات جبران‌ناپذیری در پی داشته باشد. رادار کوانتومی با ارائه اطلاعات فوری و قابل اعتماد، به شکل مؤثری ریسک عملیاتی را کاهش می‌دهد و فرماندهان را در اتخاذ تصمیمات راهبردی یاری می‌کند.

جدول ۱- مشخصات و شرایط رادار کوانتومی و کلاسیک

| عنوان       | رادار کلاسیک              | رادار کوانتومی | توضیحات                                                               |
|-------------|---------------------------|----------------|-----------------------------------------------------------------------|
| نوع رادار   | رادار پالسی یا رادار FMCW | رادار کوانتومی | فناوری پیشرفته‌ای که از اصول کوانتوم برای شناسایی استفاده می‌کند.     |
| فرکانس کاری | 10 GHz                    | 10 GHz         | فرکانس عملیاتی که رادار برای ارسال و دریافت سیگنال‌ها استفاده می‌کند. |
| قدرت سیگنال | 20 dBm                    | 20 dBm         | توان سیگنال خروجی رادار که بر قابلیت شناسایی تأثیر دارد.              |

| نسبت سیگنال به نویز (SNR) ورودی رادار | 15 dB                                  | 15 dB                                  | معیاری برای ارزیابی کیفیت سیگنال در برابر نویز محیطی.         |
|---------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| زاویه دید                             | ۶۰ درجه                                | ۶۰ درجه                                | زاویه‌ای که رادار قادر به پوشش آن است.                        |
| ابعاد مین                             | قطر ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر | قطر ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر | اندازه و شکل فیزیکی مین‌های دریایی.                           |
| وزن مین                               | ۵ کیلوگرم                              | ۵ کیلوگرم                              | وزن کلی مین که بر قابلیت شناسایی تأثیر می‌گذارد.              |
| نوع مین                               | مین مغناطیسی                           | مین مغناطیسی                           | نوع مین‌هایی که رادار برای شناسایی آنها طراحی شده است.        |
| میزان دفن شدگی                        | ۵۰ سانتی‌متر                           | ۵۰ سانتی‌متر                           | عمق دفن مین‌ها در بستر دریا.                                  |
| عمق آب                                | ۲ متر                                  | ۲ متر                                  | عمق آبی که رادار در آن عمل می‌کند.                            |
| شدت نویز پس‌زمینه                     | 30 dB                                  | 30 dB                                  | مقدار نویز محیطی که می‌تواند بر عملکرد رادار تأثیر بگذارد.    |
| شرایط جوی                             | آفتابی                                 | آفتابی                                 | وضعیت جوی که ممکن است تأثیری بر عملکرد رادار داشته باشد.      |
| مدل‌سازی و شبیه‌سازی                  | استفاده از نرم‌افزار Python Spyder 6   | استفاده از نرم‌افزار Python Spyder 6   | نرم‌افزار مورد استفاده برای شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد رادار. |

الگوریتم‌های سنتی پردازش سیگنال و عدم توانایی در تفکیک دقیق سیگنال‌های هدف از نویز، به ۱۲٪ می‌رسد. در مقابل، رادار کوانتومی با بهره‌گیری از اصول همبستگی کوانتومی و تکنیک‌های پیشرفته پردازش داده، موفق به کاهش نرخ هشدار غلط به ۱.۲٪ می‌شود، که نشان‌دهنده دقت بالاتر و توانایی بهتر در شناسایی واقعی اهداف است. این بدان معناست که سامانه کوانتومی، هم در تشخیص درست مین و هم در جلوگیری از هشدارهای کاذب، برتری محسوسی نسبت به رادار کلاسیک دارد. علاوه بر این، حداقل ابعاد مین قابل شناسایی در رادار کوانتومی بسیار کوچکتر است و این سامانه حتی مین‌های نیمه‌مدفون یا با سطح مقطع پایین را بهتر شناسایی می‌کند.

جدول ۲- جدول مقایسه عملکرد رادار کلاسیک و کوانتومی در سناریوی شناسایی مین دریایی

| پارامتر                               | رادار کلاسیک      | رادار کوانتومی      |
|---------------------------------------|-------------------|---------------------|
| نسبت سیگنال به نویز (SNR) خروجی رادار | 2 dB              | 9 dB                |
| نرخ آشکارسازی صحیح (TPR)              | 75%               | 97%                 |
| نرخ هشدار غلط (FAR)                   | 12%               | 1.2%                |
| حداقل سطح مقطع قابل شناسایی           | 5 cm <sup>2</sup> | 0.5 cm <sup>2</sup> |
| تأثیر نویز پس‌زمینه                   | بسیار بالا        | بسیار پایین         |

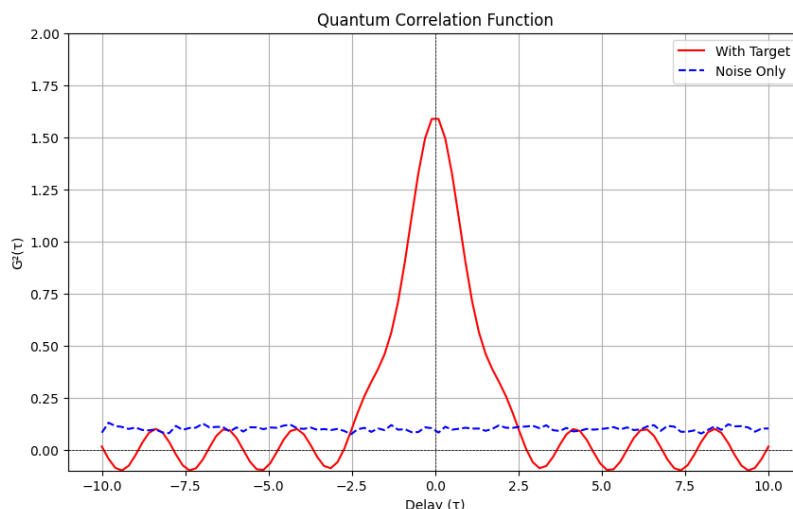
<sup>26</sup> False Alarm Rate

<sup>25</sup> True Positive Rate

شکل ۶ نمودار نرخ آشکارسازی صحیح بر حسب درصد دفن‌شدگی مین را در دو رادار کوانتومی و کلاسیک نشان می‌دهد. در این نمودار، هر چه درصد دفن‌شدگی مین بیشتر می‌شود، توانایی رادار کلاسیک برای تشخیص صحیح به سرعت کاهش می‌یابد؛ به گونه‌ای که در دفن‌شدگی‌های بالا تقریباً از کار می‌افتد. در مقابل، رادار کوانتومی حتی زمانی که بخش بزرگی از مین زیر گل و لای مدفون شده است، همچنان بخش زیادی از اهداف را با موفقیت شناسایی می‌کند. این نتیجه به خوبی بیانگر برتری فناوری کوانتومی در شرایط دشوار عملیاتی است.

شکل ۵ نمودار تابع همبستگی مرتبه دوم  $G^{(2)}(\tau)$

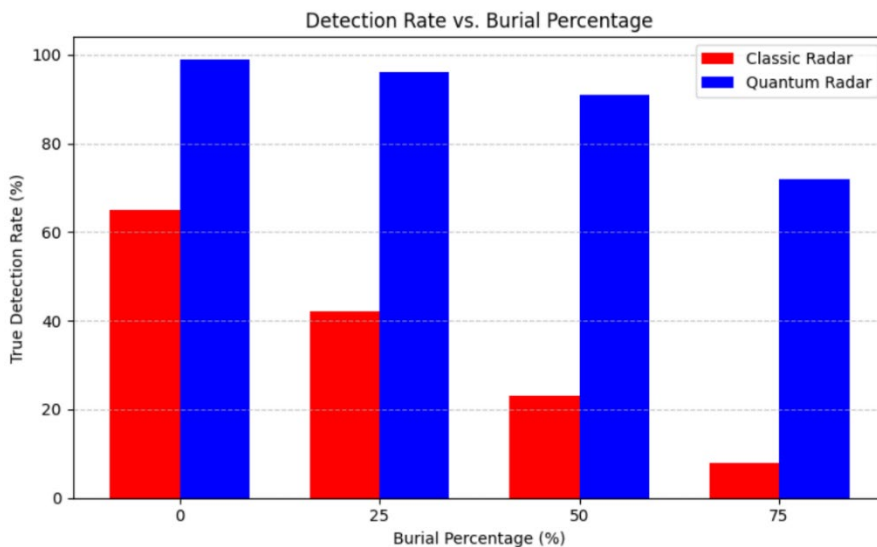
تصویری گویای قدرت رادار کوانتومی در حذف نویز و شناسایی دقیق اهداف است. در این نمودار، محور افقی تاخیر زمانی بین دو فوتون (سیگنال و مرجع) و محور عمودی مقدار همبستگی را نشان می‌دهد. وقتی هدف (مین) در میدان دید رادار وجود دارد، یک قله باریک و واضح درست در مرکز نمودار ایجاد می‌شود که نشان‌دهنده همزمانی دقیق فوتون‌ها و در نتیجه وجود هدف است. اما اگر هیچ هدفی وجود نداشته باشد و فقط نویز دریافت شود، نمودار هیچ قله‌ای ندارد و کاملاً تخت و پراکنده است. این ویژگی باعث می‌شود رادار کوانتومی با قطعیت بسیار بالایی بین هدف واقعی و نویز محیطی تمایز قائل شود.



شکل ۵- نمودار تابع همبستگی مرتبه دوم

بر دقت آشکارسازی اهداف داشته باشند. خط آبی نقطه‌چین، نشان‌دهنده همبستگی مربوط به "نویز تنها" است که به‌طور یکنواخت در سطح پایین‌تری قرار دارد و تأثیر قابل توجهی بر نتایج ندارد. این نمودار به وضوح نشان می‌دهد که سایدلوب‌ها در این حالت نسبتاً ضعیف هستند و به همین دلیل اثرات منفی چند هدفی را به وضوح نشان نمی‌دهند.

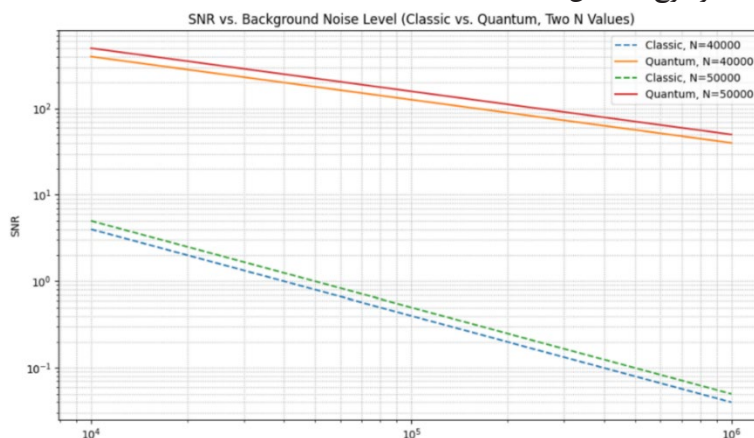
در این نمودار که تابع همبستگی کوانتومی را نشان می‌دهد، دو خط مختلف ترسیم شده است. خط قرمز، مربوط به حالت "هدف" است که دارای یک پیک بزرگ در نقطه صفر (مرکز) می‌باشد و سایدلوب‌های قابل توجهی در اطراف آن دیده نمی‌شود. این سایدلوب‌های کوچک نشان‌دهنده وجود همبستگی‌های ضعیفی در مقادیر تأخیر غیر صفر هستند که می‌توانند به‌طور بالقوه تأثیر منفی کمی



شکل ۶- نمودار نرخ آشکارسازی صحیح در رادار کوانتومی در مقایسه با رادار کلاسیک

افزایش شدت نویز محیطی، کارایی رادار کلاسیک به سرعت افت می‌کند و تقریباً غیرقابل استفاده می‌شود. اما رادار کوانتومی در همین شرایط، همچنان سطح بالایی از SNR را حفظ می‌کند و قادر است سیگنال هدف را از میان نویز تشخیص دهد و با شیب ملایمی افت می‌کند. این نمودار به خوبی اثبات می‌کند که چرا فناوری کوانتومی می‌تواند در محیط‌های نویزی و چالش‌برانگیز، تحولی بزرگ در حوزه کشف مین دریایی و امنیت عملیات نظامی ایجاد کند.

در نهایت، شکل ۷ نمودار نسبت سیگنال به نویز (SNR) بر حسب شدت نویز پس‌زمینه را نشان می‌دهد. در این نمودار محور افقی (شدت نویز پس‌زمینه) به صورت لگاریتمی رسم شده تا تغییرات در گستره بزرگتر نویز مشهود شود. محور عمودی (SNR) هم لگاریتمی است تا تفاوت افت دو مدل بهتر دیده شود. خطوط نقطه‌چین مربوط به رادار کلاسیک هستند و خطوط پیوسته مربوط به رادار کوانتومی است. برای هر  $N$  (۴۰۰۰۰ و ۵۰۰۰۰)، دو منحنی وجود دارد و مشاهده می‌شود که با افزایش  $N$ ، هر دو منحنی بالاتر می‌روند. به وضوح مشخص است که با



شکل ۷- میزان SNR در رادار کوانتومی و رادار کلاسیک

محور افقی نمودار نرخ هشدار غلط<sup>۲۸</sup> و محور عمودی نرخ آشکارسازی صحیح<sup>۲۹</sup> را نشان می‌دهد. منحنی آبی که به رادار کوانتومی اختصاص دارد، در سراسر بازه نرخ هشدار

شکل ۸ مقایسه‌ای بین منحنی ویژگی عملکرد گیرنده<sup>۲۷</sup> رادار کوانتومی و دو حالت از رادار کلاسیک در فرآیند تشخیص مین دریایی به تصویر کشیده شده است.

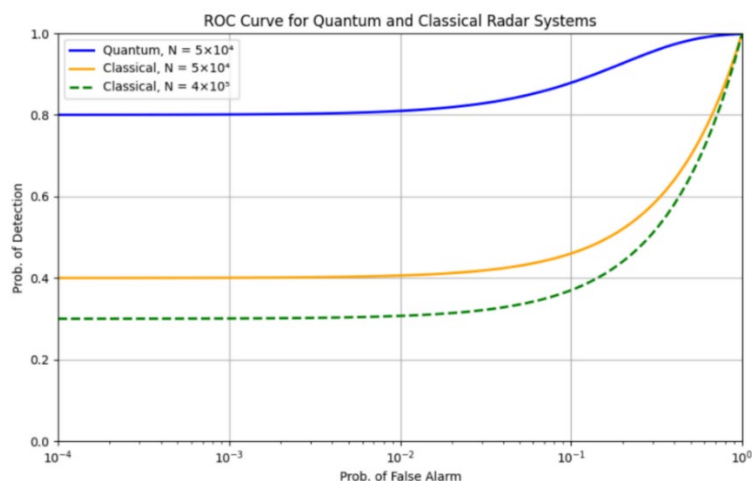
<sup>۲۹</sup> True Detection Rate

<sup>۲۷</sup> Receiver Operating Characteristic curve (ROC)

<sup>۲۸</sup> False Alarm Rate

رادار کوانتومی نرخ آشکارسازی پایین‌تری دارند. این تفاوت‌ها به خوبی نشان می‌دهد که رادار کوانتومی در تمامی شرایط، برای هر مقدار نرخ هشدار غلط، آشکارسازی مطمئن‌تر و دقیق‌تری ارائه می‌دهد و این امر برتری فنی و عملی این فناوری را نسبت به رادارهای سنتی نمایان می‌سازد.

غلط، بالاتر از منحنی‌های متعلق به رادار کلاسیک قرار می‌گیرد و بیانگر توانایی بیشتر این سامانه در تشخیص صحیح هدف حتی در حضور نویز و خطا است. منحنی نارنجی عملکرد رادار کلاسیک را در شرایط معمولی و منحنی سبز خط‌چین همان سامانه را در شرایط سخت‌تر یا با حساسیت کمتر نمایش می‌دهد که هر دو نسبت به



شکل ۸- مقایسه ROC بین رادار کوانتومی و رادار کلاسیک

قابل توجهی در گل و لای مدفون شده، عملکردی به مراتب برتر نسبت به رادار کلاسیک ارائه می‌دهد. نمودارهای همبستگی مرتبه دوم، جداول مقایسه‌ای و نمودار نرخ آشکارسازی صحیح به وضوح بیانگر آن بودند که رادار کوانتومی حتی در حضور نویز پس‌زمینه بسیار شدید، موفق به شناسایی اهداف با دقت و قابلیت اطمینان بالا می‌شود، در حالی که رادار کلاسیک عملاً کارایی خود را از دست می‌دهد. به ویژه در سناریوی شناسایی مین مدفون، نرخ آشکارسازی صحیح در رادار کوانتومی چندین برابر سامانه‌های سنتی باقی می‌ماند و نسبت سیگنال به نویز (SNR) آن با افزایش نویز محیطی افت چندانی پیدا نمی‌کند.

در مجموع، پژوهش حاضر اثبات می‌کند که فناوری رادار کوانتومی نه تنها محدودیت‌های اساسی رادارهای کلاسیک در محیط‌های نویزی و چالش‌برانگیز را برطرف می‌کند، بلکه با بهره‌گیری از ویژگی‌های منحصر به فرد فوتون‌های درهم‌تنیده و پردازش همزمان کوانتومی، افق جدیدی را برای کاربردهای امنیتی، نظامی و صنعتی گشوده است. این موفقیت‌ها، رادار کوانتومی را به ابزاری بی‌رقیب برای شناسایی اهداف پنهان، کوچک و یا مدفون

این مجموعه جداول و نمودارها، هرکدام بخشی از مزایا و توانایی‌های رادار کوانتومی را به زبان عدد و تصویر نمایش می‌دهند و با نگاه تحلیلی و مقایسه‌ای، برتری این فناوری را نسبت به روش‌های سنتی به طور عینی و قابل دفاع به نمایش می‌گذارند.

## ۷- نتیجه گیری

در این مقاله، با مروری جامع بر رادارهای کوانتومی، ابتدا زمینه تاریخی و روند تکامل این فناوری نوین بررسی شد و تفاوت‌های بنیادی آن با رادارهای کلاسیک از منظر اصول عملکرد و مبانی نظری تبیین گردید. ساختار اجزای اصلی یک سامانه رادار کوانتومی، نحوه تولید و آشکارسازی فوتون‌های درهم‌تنیده اهمیت همبستگی کوانتومی در افزایش حساسیت و دقت شناسایی اهداف، به تفصیل مورد بحث قرار گرفت. همچنین، با طرح یک سناریوی عملی مهم در حوزه امنیت دریایی، یعنی تشخیص مین‌های دریایی در آب‌های کم‌عمق و محیط‌های پرنویز، کاربرد عملی رادار کوانتومی به صورت گام‌به‌گام شرح داده شد.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی و تحلیل‌های آماری نشان داد که رادار کوانتومی به‌ویژه در شرایطی که سطح مقطع راداری هدف بسیار کوچک است یا مین تا حد

در محیط‌های سخت بدل می‌کند و زمینه را برای توسعه و پیاده‌سازی عملی آن در آینده‌ای نزدیک، فراهم می‌سازد.

#### ۸- منابع و مراجع

12. Luong, D., et al. (2025). Field demonstration of quantum radar in a maritime environment. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 61(2), 512-522.
13. Mathews, M. (2022). A Study on Quantum Radar Technology Developments and Design Consideration for its integration. *arXiv preprint arXiv:2205.14000*.
14. D. Latypov, "From Atom-Based RF Metrology to Quantum RF Receivers and Emitters," *NAECON 2024 - IEEE National Aerospace and Electronics Conference*, Dayton, OH, USA, 2024, pp. 80-82.
15. M. Alalili, M. B. Ali, Q. Nasir and M. A. Talib, "Quantum Radar: Overview on Technology, Limitations and Opportunities," *2024 17th International Conference on Development in eSystem Engineering (DeSE)*, Khorfakkan, United Arab Emirates, 2024, pp. 180-186.
۱۶. احمدزاده، ن.، شیبانی، ا. بررسی و امکان‌سنجی کاربرد رادار کوانتومی در سیستم‌های ایوینیکی هواپیما، هشتمین کنفرانس بین‌المللی توسعه فناوری در مهندسی مکانیک و هوافضا. ۱۴۰۳.
۱۷. حسینی، س. م.، نوروزی، م.، سیدی‌یزدی، ج.، و ایران‌نژاد، ف. (۱۴۰۱). بررسی رفتار کیفی چلاندگی و درهم‌تنیدگی در رادار چلاندیده دومی کوانتومی. فصلنامه علمی اپتوالکترونیک، دانشگاه پیام نور، ۱۴(۴)، ۲۳-۳۵.
۱۸. حسینی، س. م.، نوروزی، م.، سیدی‌یزدی، ج.، و ایران‌نژاد، ف. (۱۴۰۲). آنتروپی و اثرات واهمدوسی در رادار چلاندیده دومی کوانتومی. فصلنامه علمی پژوهشی فیزیک، دانشگاه پیام نور، ۱۵(۲)، ۷۱-۸۵.
۱۹. جعفری، م.، احمدی، س.، و رضایی، ن. (۱۴۰۲). رادار کوانتومی در باند مایکروویو مبتنی بر آشکارساز اپتیکی و کاواک مگنونی. هشتمین کنفرانس ملی رادار و سامانه‌های مراقبتی ایران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ری، ایران.
۲۰. علیزاده، ح.، محمدی، س.، و رضوی، م. (۱۴۰۱). ساختاری کارآمد برای منبع رادار کوانتومی مبتنی بر فناوری ابررسانایی. نهمین کنفرانس ملی مهندسی برق و الکترونیک ایران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.
1. Lloyd, S. (2008). Enhanced sensitivity of photodetection via quantum illumination. *Science*, 321(5895), 1463-1465.
2. Shapiro, J. H., & Lloyd, S. (2009). Quantum illumination versus coherent-state target detection. *New Journal of Physics*, 11(6), 063045.
3. Zhang, Z., Zhuang, Q., Shapiro, J. H., & Lloyd, S. (2015). Quantum illumination with photon-subtracted states. *Physical Review Letters*, 115(2), 020502.
4. Barzanjeh, S., Guha, S., Weedbrook, C., Vitali, D., Shapiro, J. H., & Pirandola, S. (2015). Microwave quantum illumination. *Physical Review Letters*, 114(8), 080503.
5. Pirandola, S., Bardhan, B. R., Gehring, T., Weedbrook, C., & Lloyd, S. (2018). Advances in photonic quantum sensing. *Nature Photonics*, 12(12), 724-733.
6. Luong, D., et al. (2020). Entanglement-Based Quantum Radar: From Myth to Reality. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 35(10), 22-35.
7. England, D. G., Balaji, B., & Sussman, B. J. (2019). Quantum-enhanced standoff detection using correlated photon pairs. *Physical Review A*, 99(2), 023828.
8. Wenye, J., Chang, J. and et al. (2023). Recent advances in metasurface design and quantum optics applications with machine learning, *Light: Science & Applications*, 12(169), 1-16.
9. Slepian, G., Vlasenko, S. and et al. (2022). Quantum Radars and Lidars: Concepts, realizations, and perspectives. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 64(1), 16-26.
10. Lopaeva, E. D., et al. (2013). Experimental realization of quantum illumination. *Physical Review Letters*, 110(15), 153603.
11. Weichman, P. (2020). Quantum-enhanced detection of objects in complex environments. *Colrnel University: Quantum Physics*, 103(4), 1-31.

۲۱. جباررشیدی، ع.، پورسجادی، س.، و خوشه‌مهری، آ. (۱۳۹۹). تحلیل ساختار، فناوری‌ها و عملکرد رادار کوانتومی در ناحیه مایکروویو. هفتمین کنفرانس رادار و سیستم‌های مراقبتی، تهران، ایران.
۲۲. جباررشیدی، ع.، خوشه‌مهری، آ.، و سادات‌موسوی، م. (۱۳۹۹). طراحی و تحقق رادار برتابندگی کوانتومی: رویکردها و چالش‌های علمی و فناوری. دهمین کنفرانس بین‌المللی فناوری‌های نوین اطلاعات، کامپیوتر و مخابرات، تهران، ایران.

# بررسی جامع رویکردهای نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه مبتنی بر هوش مصنوعی در شناورهای دریایی

محمدباقر کیایی<sup>۱</sup>، مجتبی یوسفی‌پور<sup>۲</sup>

۱- مدرس گروه مکانیک دریایی، دانشکده شناوری، دانشگاه امام خمین‌ای (مد ظله العالی)، kiaei.mb69@gmail.com, ۹۳۸۷۹۹۲۳۹۹  
۲- مدرس گروه مکانیک دریایی، دانشکده شناوری، دانشگاه امام خمین‌ای (مد ظله العالی)، mojtaba-you@gmail.com, ۹۰۵۶۳۷۱۳۱۲

## چکیده:

با رشد روزافزون صنعت کشتیرانی و نقش کلیدی آن در زنجیره تأمین جهانی، اهمیت بهبود روش‌های نگهداری و تعمیرات در افزایش ایمنی، کاهش هزینه‌ها و ارتقای بهره‌وری عملیاتی شناورها بیش از پیش احساس می‌شود. پژوهش حاضر به بررسی جامع راهبردهای نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه (PdM) مبتنی بر داده در صنعت دریایی می‌پردازد و مروری بر جدیدترین تکنیک‌های مورد استفاده در سامانه‌های مختلف کشتی، ارائه می‌دهد. برخلاف روش‌های سنتی مانند نگهداری واکنشی و پیشگیرانه، نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه با بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین (ML) و یادگیری عمیق (DL) قادر است زمان خرابی را پیش‌بینی کرده و برنامه‌ریزی نگهداری را بهینه سازد. این مقاله به بررسی مدل‌های مختلف، از رگرسیون خطی تا شبکه‌های عصبی پیچشی و حافظه‌دار (مانند شبکه‌های حافظه کوتاه‌مدت بلندمدت (LSTM) و شبکه‌های عصبی پیچشی (CNNs)) می‌پردازد و چالش‌های عملیاتی آن‌ها از جمله نیاز به داده‌های برچسب‌خورده، پیچیدگی محاسباتی و مشکلات مقیاس‌پذیری را تحلیل می‌کند. همچنین، از رویکردهای نوین مانند یادگیری فدرال (FL) و یادگیری انتقالی (TL) به عنوان راهکارهای نویدبخش برای حفظ حریم خصوصی، امنیت داده و کاهش نیاز به منابع متمرکز نام برده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد استقرار نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه داده‌محور در ناوگان، کاهش چشمگیر هزینه نگهداری و کاهش محسوس زمان توقف را به دنبال دارد. مدل‌های یادگیری عمیق نسبت به روش‌های کلاسیک دقت بالاتری دارند؛ ولی نیاز داده برچسب‌خورده و منابع محاسباتی زیاد، مانع استقرار عملیاتی در دستگاه کاربر دریایی است. یادگیری فدرال و انتقالی مسیرهای کاهش وابستگی به داده و حفظ حریم خصوصی‌اند؛ اما نبود استاندارد و مجموعه داده خرابی، پذیرش صنعتی را محدود کرده است.

## واژه‌های کلیدی:

نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه، یادگیری ماشین، هوش مصنوعی، عمر مفید باقیمانده، پیش‌بینی خرابی

## A Comprehensive Review of Artificial Intelligence-Based Predictive Maintenance Approaches in Marine Vessel

Mohammad bagher Kiaei<sup>1</sup>, mojtaba usefi pour<sup>2</sup>

1, 2 Department of Marine Mechanical Engineering, Faculty of Naval Architecture, Imam Khamenei University, Iran

## Abstract

With the rapid growth of the shipping industry and its key role in the global supply chain, the importance of improving maintenance methods to enhance safety, reduce costs, and increase the operational efficiency of vessels is more evident than ever. The present study provides a comprehensive review of data-driven predictive maintenance (PdM) strategies in the maritime industry and surveys the latest techniques applied to various ship systems, including propulsion, electrical, auxiliary, and hull structures. Unlike traditional approaches such as reactive and preventive maintenance, predictive maintenance (PdM), empowered by machine learning (ML) and deep learning (DL) algorithms, is capable of forecasting failures and optimizing maintenance scheduling. This paper examines a range of models, from linear regression to recurrent and convolutional neural networks (such as Long Short-Term Memory (LSTM) and Convolutional Neural Networks (CNNs)), and analyzes their operational challenges, including the need for labeled data, computational

complexity, and scalability issues. Furthermore, emerging approaches such as Federated Learning (FL) and Transfer Learning (TL) are highlighted as promising solutions for ensuring privacy, data security, and reducing reliance on centralized resources. Finally, by addressing existing gaps in standardization, insufficient data, and model decision transparency, the paper outlines future research directions toward developing reliable and adaptable predictive maintenance (PdM) systems for the maritime industry.

## Keywords

Predictive Maintenance, Machine Learning, Artificial Intelligence, Remaining Useful Life, Failure Prediction

بخش کارآمدتر و پایدارتر کمک می‌کنند [۳، ۴].  
با این حال، با وجود این پیشرفت‌ها، چالش‌های استقرار در دنیای واقعی، از جمله مقیاس‌پذیری مدل، کارایی ارتباطی و حریم خصوصی و امنیت داده‌ها، به‌ویژه در رویکردهای یادگیری ماشین متمرکز کلاسیک (CML)، همچنان باقی هستند. به طور دقیق، یادگیری ماشین متمرکز کلاسیک نیازمند بارگذاری مقادیر عظیمی از داده‌های ناوگان به سرورهای مرکزی است که سطح حمله سایبری و خطرات عملیاتی را افزایش می‌دهد، در حالی که باید با انواع و اندازه‌های مختلف شناورها نیز سازگار شود. برای کاهش این مسائل، الگوهای یادگیری غیرمتمرکز مانند یادگیری فدرال اخیراً معرفی شده‌اند که جاذبه امن داده‌ها را تضمین می‌کنند و به کشتی‌ها اجازه می‌دهند به‌عنوان گره‌های لبه عمل کنند. یادگیری فدرال آموزش محلی مدل‌های یادگیری ماشین را روی کشتی‌ها امکان‌پذیر می‌سازد. سرور یادگیری فدرال پارامترهای مدل را جمع‌آوری و تجمیع می‌کند و حریم خصوصی را تضمین می‌نماید، مدل‌ها را بدون نیاز به انتقال داده‌های خام به سرور از طریق دوره‌های تکراری آموزش می‌دهد و یک مدل جهانی متناسب با شرایط خاص شناور ارائه می‌دهد [۵-۷].

مطالعات اخیر جنبه‌هایی از پیش‌بینی عیوب در صنعت دریایی را بررسی کرده‌اند. به عنوان مثال، علی و همکاران بر روی سامانه‌های تشخیص خوردگی برای ساختارهای بدنه تمرکز کردند [۸]، ژانگ و همکاران مدل‌های پیش‌بینی عمر باقیمانده مفید عمر مفید باقی‌مانده (RUL) را مورد کاوش قرار دادند [۹]، در حالی که لیانگ و همکاران بر نقش نظارتی انجمن‌های رده‌بندی دریایی تمرکز کردند [۱۰]. اگرچه این مطالعات اطلاعات قابل توجهی در مورد جنبه‌های مختلف نگهداری و

## ۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین عامل عملیاتی بودن شناورها در سازمان رزم در نیروی دریایی تعمیر و نگهداری است، راهبردهای سنتی نگهداری و تعمیرات، مانند نگهداری واکنشی و نگهداری پیشگیرانه، محدودیت‌هایی در پیشگیری از حوادث نشان داده‌اند و اغلب به هزینه‌های قابل توجهی منجر شده‌اند. به عنوان مثال، تنها در سال ۲۰۲۳، نیمی از حوادث دریایی گزارش شده به خرابی‌های مکانیکی نسبت داده شد [۱، ۲]. در راستای رسیدگی به این چالش‌ها، تلاش‌های پژوهشی بر توسعه راهبردهای نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه متمرکز شده‌اند. برخلاف نگهداری واکنشی و نگهداری پیشگیرانه، نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه از مدل‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی فعالانه زوال یا خرابی‌های احتمالی تجهیزات بر اساس بینش‌های مبتنی بر داده‌های عملیاتی مرتبط با شناور استفاده می‌کند.

مفهوم نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه مبتنی بر یادگیری ماشین جزئی جدایی‌ناپذیر از نسل چهارم کشتیرانی (این نسل از کشتیرانی، استفاده گسترده از فناوری‌های نوین برای هوشمندسازی، خودکارسازی و پایداری زیست‌محیطی عملیات دریایی را دنبال می‌کند)، معروف به کشتیرانی ۴.۰<sup>۱</sup> است. این الگو، یکپارچه‌سازی پیشرفت‌های فناورانه نوین مانند اینترنت اشیا کشتی‌ها (IoS) و هوش مصنوعی (AI) را برای تبدیل کشتی‌های سنتی به "کشتی‌های هوشمند" متصور می‌کند. در چارچوب این الگو، این پیشرفت‌ها مدیریت خودکار ناوگان، کاهش زمان از کار افتادگی و برآورده ساختن مقررات زیست‌محیطی را امکان‌پذیر می‌سازند و به یک

<sup>۱</sup> Shipping 4.0

تعمیرات پیش‌بینانه ارائه می‌دهند، اما فاقد یک تحلیل جامع از رویکردهای نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه بر اساس سامانه‌های مختلف شناور هستند. با توجه به اطلاعات موجود، مطالعه‌ای وجود ندارد که یک بررسی جامع از رویکردهای نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه دربرگیرنده تمام سیستم‌های اصلی شناور ارائه دهد.

با در نظر گرفتن پتانسیل قابل توجه ادغام استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه در حوزه دریایی و شکاف موجود در ادبیات علمی، این کار با هدف ارائه یک مرور کلی از جدیدترین تکنیک‌های نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه مبتنی بر داده که در سیستم‌های مختلف شناور یعنی سامانه پیش‌ران، سیستم‌های الکتریکی، سیستم‌های فرعی و بدنه به کار رفته‌اند، انجام می‌شود. این بررسی ضمن شناسایی روندها، مسائل باز مرتبط و مسیرهای آینده بالقوه را نیز مشخص می‌کند تا تحقیقات بیشتر را تحریک نماید.

## ۲- رویکردهای نگهداری و تعمیرات در صنعت دریایی

### ۲-۱- مروری بر استراتژی‌های تعمیر و نگهداری

عملیات نگهداری و تعمیرات در حوزه دریایی به طور سنتی بر نگهداری و تعمیرات واکنشی (RM) متکی بوده است. نگهداری واکنشی به این صورت است که تعمیرات، بلافاصله پس از وقوع خرابی و به عنوان یک پاسخ مستقیم، در شناور انجام می‌شوند. با وجود اینکه تعمیرات واکنشی به مسائل فوری رسیدگی می‌کند، اما به هزینه‌بر بودن و ناکامی (عمدتاً به دلیل توقف‌های غیرمنتظره)، شناخته شده است؛ چرا که بر اقدامات اصلاحی به‌جای پیشگیری تمرکز دارد و نگرانی‌های ایمنی را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، به دلیل هزینه‌های عملیاتی کلی<sup>۲</sup> بالا (حدود ۴۰٪) که با عملیات نگهداری و تعمیرات یک کشتی مرتبط است، سازمان‌های دریایی به دنبال بررسی استراتژی‌های بهینه‌سازی جایگزین بوده‌اند [۱۱، ۱۲].

علاوه بر این، طبق کنوانسیون بین‌المللی ایمنی جان اشخاص در دریا<sup>۳</sup>، سازمان‌های دریایی موظف به انجام یک

سری بازرسی‌ها هستند، از جمله یک بازرسی اولیه و به دنبال آن بازرسی‌های سالانه، میانی و بازرسی‌های پنج سال یک‌بار در طول عمر عملیاتی کشتی انجام می‌شوند [۱۳، ۱۴]. در راستای رفع این چالش، استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه با هدف قرار دادن اجزای مختلف کشتی معرفی شده‌اند. به طور جزئی، یک استراتژی نگهداری پیش‌بینانه شامل ایجاد بازرسی‌های نگهداری و تعمیرات برنامه‌ریزی‌شده بر اساس فواصل استاندارد صنعتی یا پیش‌بینی‌های فرسودگی ارائه شده توسط سازنده است. اگرچه نگهداری پیش‌بینانه در مقایسه با نگهداری واکنشی، خرابی‌ها و توقف‌های غیرمنتظره را کاهش می‌دهد، اما اغلب منجر به هزینه‌های عملیاتی کلی قابل توجهی می‌شود که با تعمیرات غیرضروری و دوره‌های نگهداری و تعمیرات بیش از حد برنامه‌ریزی شده همراه است [۱۵].

در مقابل نگهداری واکنشی و نگهداری پیش‌بینانه، نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه با هدف افزایش طول عمر تجهیزات و کاهش خرابی‌ها، بازرسی‌ها را بهینه می‌کند تا با استفاده از روش‌های مبتنی بر داده مانند یادگیری ماشین (ML)، زمان توقف و هزینه‌ها را به حداقل برساند. به طور خاص، نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه از داده‌های دریافتی از کشتی‌های دریایی (مانند ارتعاشات، دما و غیره) بهره می‌برد و پیش‌بینی‌هایی از خرابی‌های مورد انتظار تجهیزات تولید می‌کند. مطالعات نشان می‌دهد که نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه پتانسیل کاهش هزینه‌های عملیاتی کلی نگهداری و تعمیرات تا ۴۵٪ در مقایسه با استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات سنتی را دارد، در حالی که خطرات ایمنی را نیز کاهش می‌دهد و حجم کاری خدمه را نیز کم می‌کند [۱۶، ۱۷].

### ۲-۲- روش‌های پیشرفته نگهداری و تعمیرات: مدل‌محور و مبتنی بر یادگیری ماشین

این بخش به توصیف روش‌های مختلفی می‌پردازد که برای نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه در صنعت دریایی به کار گرفته می‌شوند. در این راستا، دو دسته اصلی از روش‌ها متمایز می‌شوند: مدل‌های مبتنی بر فیزیک و مدل‌های داده‌محور (یادگیری ماشین و یادگیری عمیق).

<sup>۲</sup> OPEX

<sup>۳</sup> SOLAS

## ۲-۲-۱- روش‌های مبتنی بر فیزیک برای نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه

نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه با پیش‌بینی خرابی‌های عملیاتی احتمالی، هدف بهینه‌سازی بازه‌های زمانی پرمصرف نگهداری و بازرسی‌ها را دنبال می‌کند. روش‌های مبتنی بر فیزیک بر مدل‌های ریاضی تکیه دارند که به طور خاص برای تخمین وضعیت فرسودگی یک قطعه بر اساس مقادیر مشاهده شده سیستم طراحی شده‌اند. با وجود اینکه این روش‌ها به دلیل سادگی و نیاز محاسباتی کم می‌توانند مزایایی داشته باشند، اما ممکن است به تصویر کشیدن تمامی جزئیات پیچیده فیزیکی یک سیستم را چالش‌برانگیز کنند. علاوه بر این، تغییرات احتمالی در شرایط عملیاتی سیستم‌ها یا تأثیر عواملی که در مدل گنجانده نشده‌اند، می‌توانند بر دقت پیش‌بینی‌ها تأثیر بگذارند. از جمله روش‌های مدل‌محور برجسته می‌توان به فیلترهای کالمن (KFs) و تحلیل وایبول<sup>۴</sup> اشاره کرد [۱۰، ۱۸-۲۰].

## ۲-۲-۲- روش‌های داده‌محور برای نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه

در حال حاضر، اکثر کشتی‌های عملیاتی یک تحول دیجیتال را در راستای اصول کشتیرانی ۴.۰ تجربه کرده‌اند [۲۱]. این کشتی‌ها اغلب به عنوان کشتی‌های فعال‌شده سایبری (CESS) شناخته می‌شوند که در یک اکوسیستم جامع عمل می‌کنند. این اکوسیستم شامل (الف) کشتی، (ب) یک مرکز کنترل مستقر در خشکی (SCC)، که مسئول راهبری سیستم مدیریت اضطراری، کشتی‌های فعال‌شده سایبری و (ج) پروتکل‌های ارتباطی مورد استفاده بین کشتی‌های فعال‌شده سایبری و مرکز کنترل مستقر در خشکی است. علاوه بر این، کشتی‌های فعال‌شده سایبری شامل هر دو سیستم فناوری اطلاعات (IT) و فناوری عملیاتی (OT) است که برای عملیات کشتی ضروری هستند [۲۲]. بر اساس این سیستم‌های سیستم فناوری اطلاعات و فناوری عملیاتی، حجم وسیعی از داده‌های عملیاتی روزانه توسط حسگرهای روی کشتی تولید و جمع‌آوری می‌شوند. هوش مصنوعی این امکان را برای سازمان‌های دریایی فراهم کرده است تا پتانسیل این داده‌ها را به طور موثر مهار کنند و آن‌ها را قادر سازند تا

نیازهای خدماتی مختلفی (مانند نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه، پیش‌بینی مصرف سوخت و غیره) را برآورده کرده و تصمیم‌گیری بهینه را امکان‌پذیر سازند [۲۳، ۲۴]. برخلاف روش‌های سنتی مبتنی بر مدل، روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین برای مدل‌های پیشرفته نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه مناسب‌تر در نظر گرفته می‌شوند و توانایی‌های زیر را ارائه می‌دهند: (الف) یادگیری الگوها از مجموعه داده‌های پیچیده و بزرگ؛ (ب) انطباق با ماشین‌ها بدون نیاز به طراحی مدل‌های فیزیکی دقیق؛ (ج) انجام پیش‌بینی‌های دقیق در زمان واقعی؛ و (د) مقاومت در برابر داده‌های نویزی و ناقص [۲۵-۲۷].

یادگیری ماشین زیرمجموعه‌ای از هوش مصنوعی است که بر توسعه مدل‌های هوشمند متمرکز است. این مدل‌ها قادرند از الگوها و بینش‌های مختلفی که از داده‌های ورودی پردازش می‌شوند، یاد بگیرند تا تصمیم‌گیری کنند [۲۸]. یادگیری ماشین به سه دسته اصلی تقسیم می‌شود: یادگیری با نظارت<sup>۵</sup>، یادگیری بدون نظارت و یادگیری تقویتی<sup>۶</sup> که در ادامه توضیح داده می‌شوند:

- یادگیری با نظارت: این روش به مجموعه داده‌های برچسب‌گذاری شده متکی است که شامل هر دو ورودی (X) و خروجی متناظر (Y) آن می‌شود تا یک تابع نگاشت ( $f: X \rightarrow Y$ ) را یاد بگیرد. وظایف نظارت شده مثال‌زدنی در حوزه دریایی شامل طبقه‌بندی<sup>۷</sup> و رگرسیون<sup>۸</sup> هستند که به ترتیب برای تشخیص خرابی ماشین‌آلات و پیش‌بینی فعالانه خرابی‌های احتمالی استفاده می‌شوند.
- یادگیری بدون نظارت<sup>۹</sup>: این روش به کشف الگوها در داده‌هایی می‌پردازد که فاقد خروجی‌های برچسب‌گذاری شده هستند. تکنیک‌های پرکاربرد در یادگیری بدون نظارت شامل خوشه‌بندی<sup>۱۰</sup> و کاهش ابعاد<sup>۱۱</sup> هستند.

<sup>5</sup> Supervised Learning

<sup>6</sup> Reinforcement Learning (RL)

<sup>7</sup> Classification

<sup>8</sup> Regression

<sup>9</sup> Unsupervised Learning

<sup>10</sup> Clustering

<sup>11</sup> Dimensionality reduction

<sup>4</sup> Weibull analysis

خوشه‌بندی امکان گروه‌بندی نقاط داده مشابه را فراهم می‌کند، درحالی‌که کاهش ابعاد، ابعاد داده را کاهش می‌دهد و درعین‌حال ساختار آن‌ها را حفظ می‌کند. در حوزه دریایی، الگوریتم‌های یادگیری بدون نظارت می‌توانند برای شناسایی الگوهای مربوط به مصرف سوخت و رفتارهای مکانیکی غیرعادی یا برای ساده‌سازی داده‌های پیچیده دریایی جهت تحلیل و بصری‌سازی استفاده شوند.

- یادگیری تقویتی<sup>۱۲</sup>: این روش بر یادگیری یک سیاست در یک محیط خاص تمرکز دارد، با در نظر گرفتن هزینه‌ها و پاداش‌های تجمعی با هر عمل. کاربردهای مثال‌زدنی یادگیری تقویتی (RL) در حوزه دریایی شامل ناوبری خودمختار کشتی و بهینه‌سازی زمان‌بندی بازرسی‌های نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه است.

علاوه بر این، کاربردهای فعلی یادگیری ماشین از شبکه‌های ارتباطی دریایی (MCNs) برای امکان انتقال بی‌سیم داده‌ها که توسط مرکز کنترل ساحلی (SCC) (مانند ستاد شرکت) و سیستم‌های ماهواره‌ای ارائه می‌شود، استفاده می‌کنند. با این حال، این ساختارها با چالش‌هایی مانند تأخیرهای ارتباطی، در دسترس بودن طیف و مشکلات اتصال متناوب روبرو هستند [۲۹]. علاوه بر این، کاربردهای یادگیری ماشین متمرکز کلاسیک نگرانی‌های امنیتی و مقیاس‌پذیری قابل توجهی را ایجاد می‌کنند. به عنوان مثال، از آنجایی که مدل‌های یادگیری ماشین متمرکز کلاسیک برای انتقال داده‌های عملیاتی به یک سرور، نیاز به ارتباط کشتی به ساحل دارند، خطراتی در مورد احتمال دسترسی غیرمجاز یا سوء استفاده از داده‌های کشتی که برای آموزش مدل‌های یادگیری ماشین استفاده می‌شوند، وجود دارد. علاوه بر این، ترکیب چندین کشتی که مقادیر زیادی داده تولید می‌کنند، می‌تواند منجر به چالش‌های مقیاس‌پذیری شود [۳۰، ۳۱].

در راستای رفع این چالش‌ها، یادگیری فدرال معرفی شده است که به کشتی‌ها این امکان را می‌دهد تا به‌عنوان گره‌های لبه (یعنی دستگاه کاربرها<sup>۱۳</sup> یادگیری فدرال) عمل کرده و مدل‌ها را در کشتی با هدف حل مشترک یک وظیفه یادگیری و تنها انتقال پارامترهای مدل و داده‌های خود آموزش دهند. این فرآیند توسط یک سرور یادگیری فدرال هماهنگ می‌شود که مدل جهانی را بر اساس تعداد دورهای از پیش تعریف شده، به‌روزرسانی و به دستگاه کاربرها باز می‌گرداند. رویکرد آموزش غیرمتمرکز یادگیری فدرال، حریم خصوصی و امنیت داده‌ها را افزایش می‌دهد و سطح حمله سایبری را در مقایسه با یادگیری ماشین متمرکز کلاسیک کاهش می‌دهد، در حالی که با گنجاندن گره‌های دستگاه کاربر بیشتر (یعنی کشتی‌ها) در فرآیند آموزش، مقیاس‌پذیری مدل را پشتیبانی می‌کند و آن را برای کاربردهای دریایی مانند نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه بسیار مناسب می‌سازد [۴، ۳۲].

در کاربردهای دنیای واقعی، دسترسی به داده‌های برجسب‌گذاری شده اغلب محدود است. جمع‌آوری این داده‌ها، به ویژه در مواجهه با سیستم‌های قدیمی، پرهزینه، زمان‌بر یا غیرعملی در نظر گرفته می‌شود. یادگیری انتقالی با افزایش عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین از طریق انتقال دانش از دامنه‌های منبع مرتبط، این چالش‌ها را برطرف می‌کند و نیاز به داده‌های عملیاتی گسترده را کاهش می‌دهد [۳۳].

در زمینه نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه دریایی، یادگیری انتقالی راه حلی برای مقیاس‌پذیری مدل‌ها جهت تطبیق با سازندگان قطعات و فناوری‌های مختلف ارائه می‌دهد. به عنوان مثال، دانش به دست آمده از یک موتور دیزل (DE) هیبریدی یک کشتی فله‌بر می‌تواند به یک موتور دیزل تک‌سوز یک کشتی مسافربری منتقل شود. شکل ۱، تفاوت‌های بین آموزش CML (یادگیری ماشین متمرکز کلاسیک)، FL (یادگیری فدرال) و TL (یادگیری انتقالی) را نشان می‌دهد.

<sup>13</sup> clients

<sup>12</sup> Reinforcement Learning (RL)

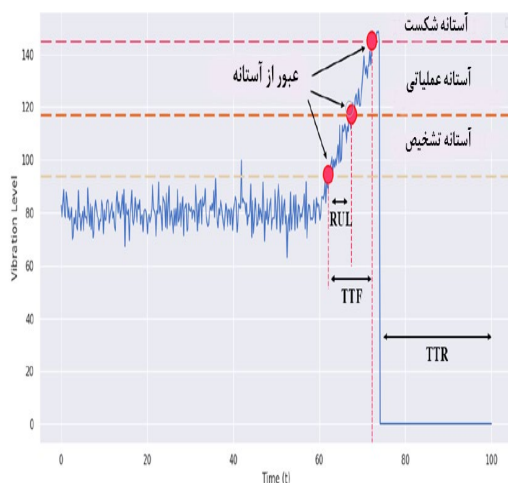
$$RUL(t) = t_e - t \quad (1)$$

زمان تا خرابی (TTF): زمان تا خرابی به عنوان زمان باقی مانده قبل از رسیدن یک دارایی به نقطه خرابی تعریف می شود. برخلاف عمر مفید باقی مانده (RUL)، TTF بر محاسبه زمان مطلق خرابی تمرکز دارد. تفاوت بین TTF و عمر مفید باقی مانده (RUL) در شکل ۲ نشان داده شده است [۳۷]. اگر زمانی باشد که خرابی رخ می دهد و  $t$  زمان فعلی باشد، TTF را می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$TTF(t) = t_f - t \quad (2)$$

زمان تعمیر (TTR): به عنوان زمان مورد نیاز برای تعمیر یک دارایی دریایی و بازگرداندن آن به شرایط عملیاتی عادی تعریف می شود [۳۸]. فرض کنید  $t_r$  زمانی باشد که دارایی به طور کامل بازیابی شده است، درحالی که  $t_f$  زمان خرابی است، TTR را می توان به صورت زیر بیان کرد:

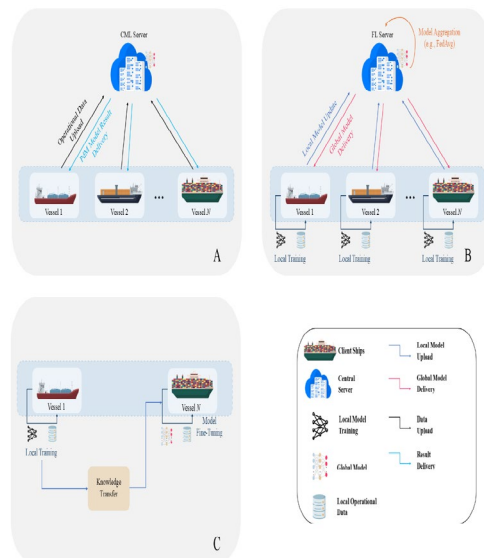
$$TTR(t) = t_r - t_f \quad (3)$$



شکل ۲. تمایز بین عمر مفید باقیمانده (RUL)، زمان تا خرابی (TTF) و زمان تعمیر (TTR) را به وضوح نشان می دهد [۳۸].

### ۳- تحلیل مبتنی بر اجزا در رویکردهای نگهداری و تعمیرات پیش بینانه

این بخش به ارائه تحلیل عمیقی از کاربردهای نگهداری و تعمیرات پیش بینانه از منظر مبتنی بر اجزا می پردازد و بر سیستم های کلیدی در کشتی های دریایی تمرکز می کند.



شکل ۱. تفاوت های بین سه رویکرد آموزش یادگیری ماشین را نشان می دهد: (A) یادگیری ماشین متمرکز کلاسیک، (B) یادگیری فدرال و (C) یادگیری انتقالی (TL).

### ۳-۲-۲- تکنیک های کلیدی در نگهداری و تعمیرات پیش بینانه

نگهداری و تعمیرات پیش بینانه یک رویکرد دگرگون کننده برای مدیریت دارایی ها در صنعت دریایی محسوب می شود. با بهره گیری از بینش های مبتنی بر داده، نگهداری و تعمیرات پیش بینانه می تواند وضعیت تجهیزات و مشکلات آن ها را تشخیص دهد و همچنین خرابی های احتمالی آینده را پیش بینی<sup>۱۴</sup> کند تا در نهایت به افزایش طول عمر تجهیزات کمک کند [۳۴، ۳۵]. در این زمینه، تکنیک های مختلفی در ادبیات نگهداری و تعمیرات پیش بینانه یافت می شوند که هر یک نقاط قوت منحصر به فردی را به همراه دارند و به چالش ها و نیازهای متفاوتی پاسخ می دهند. این تکنیک ها عبارتند از:

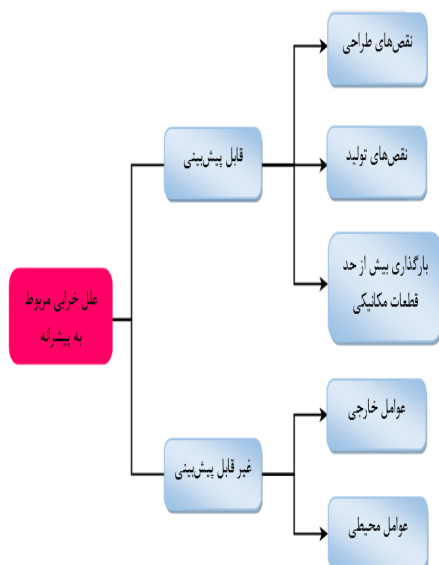
عمر مفید باقی مانده (RUL): عمر مفید باقیمانده به عنوان زمان باقی مانده ای تعریف می شود که یک دارایی می تواند به طور کارآمد عمل کند، قبل از اینکه به پایان عمر مفید (EOL) خود برسد [۳۶]. اگر  $t_e$  زمان پیش بینی شده EOL باشد و  $t$  زمان فعلی باشد، عمر مفید باقی مانده (RUL) را می توان به صورت زیر بیان کرد:

<sup>14</sup> Prognose

### ۳-۱- سیستم‌های پیش‌ران و فرعی

تولید برق برای عملکرد، کارایی و ردپای زیست‌محیطی یک کشتی حیاتی است، از این‌رو نگهداری از آن اهمیت ویژه‌ای دارد. از قرن بیستم، موتورهای احتراق داخلی (ICEs) و به‌ویژه موتورهای دیزل دریایی (DEs)، به دلیل کارایی عملیاتی و اقتصادی بالا، فناوری‌های اصلی برای تولید برق بوده‌اند. با این حال، از آنجایی که موتورهای دیزل دلیل انتشار بالای اکسیدهای نیتروژن (NOx) هستند، شرکت‌های دریایی برای همسویی با استراتژی کاهش گازهای گلخانه‌ای که توسط سازمان بین‌المللی دریانوردی (IMO) اجرا می‌شود، سیستم‌های جایگزین را بررسی کرده‌اند [۳۹-۴۱].

خرابی سیستم‌های پیش‌ران و فرعی می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر ایمنی، پایداری زیست‌محیطی و عملکرد اقتصادی داشته باشد. به‌طور کلی، عوامل مسئول خرابی در سیستم‌های پیش‌ران را می‌توان به دو دسته اصلی تقسیم کرد: عوامل غیرقابل پیش‌بینی و عوامل قابل پیش‌بینی. عوامل غیرقابل پیش‌بینی شامل شرایط سخت محیطی، خطاهای عملیاتی، یا حتی خوردگی اجزای کلیدی نام برد. عوامل قابل پیش‌بینی شامل عوامل تنشی هستند که می‌توانند از مراحل طراحی یا ساخت قطعات (مانند نقص مواد و غیره) یا به دلیل خستگی تجهیزات در طول زمان و منجر به تخریب تدریجی شوند [۴۲]. خرابی‌های رایج در سیستم پیش‌ران با موارد زیر مرتبط هستند: (الف) سیستم سوخت (مانند گرفتگی فیلترها، خرابی تزریق و غیره)؛ (ب) روانکاری ناکافی سیستم با روغن؛ (ج) سیستم خنک‌کننده؛ و (د) سیستم ورودی و خروجی موتور (مانند گرفتگی در سوپاپ‌ها، فیلترهای هوا و غیره) [۴۲-۴۹]. عوامل کلیدی که به خرابی‌های مرتبط با پیش‌ران کمک می‌کنند، در شکل ۳ نشان داده شده‌اند.



شکل ۳. عوامل کلیدی موثر در خرابی‌های مرتبط با پیش‌ران

در راستای ارزیابی وضعیت سیستم‌های پیش‌ران دریایی، الگوریتم‌های مختلف نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه مبتنی بر یادگیری ماشین در منابع علمی موجود هستند. مدل‌های رگرسیون خطی (LR) باهدف تخمین نقاط داده از طریق یک ابرصفحه<sup>۱۵</sup> مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

به‌عنوان مثال، چلیوتیس و همکاران با پیش‌بینی دمای گاز خروجی (EGT) یک موتور دو زمانه ۵ سیلندر در یک کشتی باری Handymax با استفاده از مدل رگرسیون چندجمله‌ای رنج و تشخیص عروق با نمودارهای کنترل میانگین متحرک وزن‌دار نمایی به پایش وضعیت آن پرداختند [۵۰]. به همین ترتیب، کانگ و همکاران با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای به‌حداقل‌رساندن ابعاد داده و یک مدل رگرسیون حداقل قدرمطلق باقیمانده (LAR) برای پیش‌بینی بار موتور وضعیت یک موتور دوگانه‌سوز (دیزل-گاز طبیعی) را پایش کردند [۵۱].

با این حال، درحالی‌که مدل‌های خطی نسبتاً آسان برای پیاده‌سازی هستند و در مقایسه با تنظیمات پیچیده یادگیری عمیق به داده‌های کمتری نیاز دارند، اما فاقد توانایی لازم برای شناسایی روابط پیچیده و غیرخطی هستند که به طور معمول در داده‌های ماشین‌آلات یافت

<sup>15</sup> Hyperplane

می‌کند [۵۵]. معماری‌های مختلف شبکه‌های عصبی مصنوعی برای سناریوهای نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه دریایی به کار گرفته شده‌اند. به عنوان مثال، لورنسن و همکاران، کاربرد یک شبکه پرسپترون چندلایه با ساختار <sup>۲۱</sup> (FNN) ساده را برای ارزیابی وضعیت زوال یک سامانه پیش‌راهنه CODLAG بررسی کردند. نویسندگان شبیه‌سازی‌های گسترده‌ای را برای تعیین پارامترهای بهینه مدل (مانند توابع فعال‌سازی، حل‌کننده‌ها، ساختار شبکه و غیره) به منظور بهبود عملکرد پیش‌بینی انجام دادند. نتایج نشان داد که استفاده از حل‌کننده Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno و تابع فعال‌سازی تانژانت هایپربولیک منجر به بهبود عملکرد شد [۶۱]. علاوه بر این، گوئرو و همکاران ناهنجاری‌ها را در یک موتور دیزل دو زمانه با سرعت پایین، بر اساس بارهای مختلف، مورد مطالعه قرار دادند. برخلاف کارهای پیشین، نویسندگان از تحلیل هارمونیک و حساسیت برای مرتبط ساختن دینامیک احتراق سیلندر با ضرایب فوریه به عنوان گام اول استفاده کردند تا سپس یک شبکه پرسپترون چندلایه با ساختار را برای تخمین توان متوسط موتور دیزل آموزش دهند [۶۲]. شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌توانند برای کاربردهای مختلف نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه مناسب باشند و امکان مدل‌سازی روابط پیچیده داده‌ای و همچنین پردازش انواع مختلف داده‌ها (مانند سری‌های زمانی، تصاویر و غیره) را فراهم می‌کنند. با این حال، معایب آنها از جمله نیاز به حجم زیادی از داده‌های تاریخی برچسب‌گذاری شده برای آموزش آنها و همچنین خطر بیش‌برازش در غیاب رگولاریزاسیون مناسب، نیز باید در نظر گرفته شود، [۶۳، ۶۴].

شبکه‌های عصبی بازگشتی (RNNs)<sup>۲۲</sup> به طور گسترده برای مدیریت داده‌های ترتیبی به کار رفته‌اند، اما توانایی یادگیری الگوها در داده‌های ورودی با گام‌های زمانی بزرگ را ندارند. برای رفع این چالش، شبکه‌های حافظه کوتاه‌مدت بلندمدت (LSTM)<sup>۲۳</sup> معرفی شده‌اند که با ترکیب مکانیزم‌های گیتینگ در ساختار شبکه‌های عصبی بازگشتی، به طور مؤثر مسئله وابستگی‌های

می‌شود. علاوه بر این، این مدل‌ها نسبت به داده‌های پرت<sup>۱۶</sup> حساس هستند که می‌تواند منجر به پیش‌بینی‌های منحرف شده و در نتیجه کاهش قابلیت اطمینان کلی آنها در سناریوهای واقعی شود [۵۲-۵۴].

در حوزه ارزیابی سامانه‌های پیش‌راهنه، روش‌های هسته<sup>۱۷</sup> مانند ماشین بردار پشتیبان<sup>۱۸</sup> نیز در ادبیات پژوهشی موردتوجه قرار گرفته‌اند. ماشین بردار پشتیبان (SVM) یک رویکرد یادگیری نظارت شده است که هدف آن شناسایی یک ابرصفحه است که دو کلاس را به صورت بهینه از یکدیگر تفکیک کند. به طور مشابه، رگرسیون بردار پشتیبان<sup>۱۹</sup> کاربرد ماشین بردار پشتیبان (SVM) را برای وظایف رگرسیون گسترش می‌دهد [۵۵]. کورادو و همکاران، کاربرد رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) را برای پیش‌بینی تخریب توربین گاز در یک سامانه پیش‌راهنه ترکیبی دیزل-الکترونیک و گاز شبیه‌سازی شده مورد بررسی قرار دادند [۵۶، ۵۷]. علاوه بر این، وورکاپیچ و همکاران، توابع هسته چندجمله‌ای و پیرسون VII را در یک مدل رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) برای پیش‌عملکرد یک موتور دیزل (DE) دو زمانه در یک کشتی حامل گاز مایع به کار گرفتند [۵۸]. با این حال، با وجود مزایایشان، روش‌های هسته مانند رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) به دلیل پیچیدگی محاسباتی بالا، می‌توانند منجر به افزایش زمان آموزش و استنتاج شوند. علاوه بر این، با افزایش حجم مجموعه داده، ممکن است مسائل مقیاس‌پذیری نیز ایجاد شود، درحالی‌که این روش‌ها به توابع هسته نیز حساس هستند و انتخاب نامناسب می‌تواند بر دقت و قابلیت تعمیم‌پذیری آنها تأثیر منفی بگذارد [۵۹، ۶۰].

شبکه‌های عصبی مصنوعی<sup>۲۰</sup> (ANNs) از ساختار و عملکرد شبکه‌های عصبی بیولوژیکی الهام گرفته‌اند. این شبکه‌ها از سه لایه متمایز تشکیل شده‌اند: (الف) لایه ورودی که داده‌های ورودی به شبکه را پردازش می‌کند؛ (ب) لایه‌های پنهان که محاسبات پیچیده‌ای را انجام می‌دهند؛ و (ج) لایه خروجی که نتایج نهایی را تولید

<sup>16</sup> Outliers

<sup>17</sup> Kernel methods

<sup>18</sup> Support Vector Machine - SVM

<sup>19</sup> Support Vector Regression - SVR

<sup>20</sup> Artificial Neural Networks - ANNs

<sup>21</sup> Feed-Forward Network (FNN)

<sup>22</sup> Recurrent Neural Networks - RNNs

<sup>23</sup> Long Short-Term Memory - LSTM

بلندمدت را مدیریت می‌کنند و آنها را برای کاربردهای نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه بسیار مناسب می‌سازند [۶۵]. هان و همکاران با موفقیت یک شبکه شبکه‌های حافظه کوتاه‌مدت بلندمدت را برای ارزیابی وضعیت موتور دیزل با تخمین عمر باقیمانده مفید (RUL) آن به کار گرفتند. نویسندگان مدل را در سناریوهای نزدیک به دنیای واقعی در برابر سایر جایگزین‌های مبتنی بر یادگیری عمیق (DL)، نه تنها با استفاده از پروفایل‌های بار مختلف، بلکه با افزودن نویز گوسی سفید به داده‌های ورودی، ارزیابی کردند [۶۶]. علاوه بر این، گریبستاد و همکاران، کاربرد یادگیری انتقالی را برای رفع مسائل کمبود داده، با تمرکز بر پیش‌بینی عمر مفید باقی‌مانده (RUL) کمپرسورهای هوا، بررسی کردند. این پژوهش از یک مدل شبکه‌های حافظه کوتاه‌مدت بلندمدت تنظیم شده با بهینه‌سازی ازدحام ذرات<sup>۲۴</sup> (PSO) بر روی یک مجموعه داده عمومی کمپرسور استفاده کرد. متعاقباً، اجزای مدل از پیش آموزش‌دیده منتقل شده و با یک مجموعه داده کمپرسور هوای دریایی تطبیق داده شدند. نتایج تجربی نشان داد که این رویکرد یادگیری انتقالی به طور قابل توجهی از مدل‌های پایه بهتر عمل کرده و اثربخشی این رویکرد را در سناریوهایی با داده‌های محدود تا خرابی برجسته می‌کند [۶۷].

اگرچه شبکه‌های حافظه کوتاه‌مدت بلندمدت برای کاربردهای نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه که شامل داده‌های حسگر ترتیبی می‌شوند، بسیار مناسب هستند و می‌توانند وابستگی‌های بلندمدت را بدون افت عملکرد ثبت کنند، اما برخی معایب آن‌ها نیز باید مورد توجه قرار گیرند. به طور دقیق‌تر، شبکه‌های حافظه کوتاه‌مدت بلندمدت (LSTM): (الف) منابع محاسباتی فشرده‌ای دارند (یعنی پیچیدگی بالای آن‌ها می‌تواند به زمان‌های آموزش طولانی‌تر منجر شود)، (ب) به عنوان پیکربندی‌ای از شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANNs)، مستعد بیش‌برازش<sup>۲۵</sup> هستند، به خصوص در غیاب رگولایزاسیون کافی، (ج) عملکرد آن‌ها می‌تواند به طور قابل توجهی تحت تأثیر تنظیم ضعیف پارامترهای بیشینه قرار گیرد [۶۸، ۶۶].

شبکه‌های عصبی پیچشی<sup>۲۶</sup> (CNNs) قادر به شناسایی و استخراج ویژگی‌ها از طریق عملیات پیچشی هستند و در ابتدا عمدتاً برای وظایف بینایی کامپیوتر به کار می‌رفتند [۵۵، ۶۹، ۷۰]. در حوزه نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه، شبکه‌های عصبی پیچشی به عنوان بخشی از معماری‌های ترکیبی برای ثبت مؤثر وابستگی‌های زمانی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به عنوان مثال، جی و همکاران، یک شبکه ترکیبی متشکل از یک شبکه‌های عصبی پیچشی، یک شبکه‌های حافظه کوتاه‌مدت بلندمدت دوجهته (BiLSTM) و یک لایه توجه را برای ارزیابی وضعیت موتور دیزل (DE) دوگانه‌سوز یک کشتی حمل‌کننده گاز طبیعی مایع بر اساس مقادیر دمای گاز خروجی (EGT) توسعه دادند. مدل پیشنهادی از نقاط قوت (۱) شبکه‌های عصبی پیچشی برای استخراج مؤثر ویژگی‌ها از داده‌های ورودی، (۲) شبکه‌های حافظه کوتاه‌مدت بلندمدت دوجهته (BiLSTM) برای ثبت وابستگی‌های زمانی، (۳) مکانیزم توجه امکان تخصیص پویا و مبتنی بر اهمیت به وزن‌دهی ویژگی‌های ورودی را فراهم می‌سازد. این شبکه در برابر سایر شبکه‌های پایه و ترکیبی ارزیابی شد و از نظر دقت پیش‌بینی عملکرد بالاتری را نشان داد [۷۱]. به طور مشابه، لی و همکارانش کاهش عملکرد تزیق سوخت را بر اساس داده‌های حاصل از یک موتور ۴ زمانه ۹ سیلندر با سرعت متوسط دوگانه‌سوز بررسی کردند و یک شبکه CNN-GRU<sup>۲۷</sup>-Convolutional Block Attention Module را برای پیش‌بینی عمر مفید باقی‌مانده موتور معرفی کردند [۷۲]. در همین راستا، لیو و همکاران نیز یک مدل Deep CNN-Bidirectional-GRU را برای پیش‌بینی روندهای EGT یک سیستم پيش‌رانه هیبریدی الکتریکی دوگانه‌سوز توسعه دادند [۷۳]. پژوهش‌ها همچنین به حداقل رساندن نیازهای محاسباتی برای آموزش مدل روی سیستم‌های داخلی کشتی را نیز بررسی کرده‌اند. به عنوان مثال، کالافاتلیس و همکاران، تکنیک‌های بهینه‌سازی مختلف را بر روی مدل CNN+AE برای پیش‌بینی عمر مفید باقی‌مانده یک پاک‌کننده سوخت سنگین<sup>۲۸</sup> در یک کشتی باری فله‌بر

<sup>۲۶</sup> Convolutional Neural Networks- CNNs

<sup>۲۷</sup> Gated Recurrent Unit

<sup>۲۸</sup> HFO purifier

<sup>۲۴</sup> Particle Swarm Optimization - PSO

<sup>۲۵</sup> Overfitting

کرد که عمر باقیمانده مفید (RUL) ظرفیت سلول را پیش‌بینی می‌کند [۷۸]. درحالی‌که ماشین بردار مرتبط در توانایی مدل‌سازی الگوهای غیرخطی شباهت‌هایی با رگرسیون بردار پشتیبان دارند، اما محدودیت‌هایی نیز از خود بروز می‌دهند که مانع از پذیرش گسترده آن‌ها می‌شود. به طور خاص، ماشین‌های بردار مرتبط می‌توانند مصرف منابع محاسباتی بالایی داشته باشند، به‌ویژه زمانی که برای مجموعه داده‌های بزرگ به کار می‌روند و به‌شدت به پیش‌پردازش داده‌ها وابسته هستند، زیرا مقیاس‌بندی نامناسب می‌تواند به مسائل همگرایی منجر شود [۷۹، ۸۰].

علاوه بر این، لیو و همکاران، یک چارچوب ترکیبی برای ارزیابی وضعیت باتری‌های دریایی توسعه دادند. این چارچوب الگوریتم خوشه‌بندی فضایی مبتنی بر چگالی کاربردها با نویز (DBSCAN) <sup>۳۲</sup> را برای تشخیص عیوب و یک ترانسفورماتور را برای پیش‌بینی ناهنجاری‌های ولتاژ یکپارچه کرد. ترانسفورماتورها شبکه‌های عصبی هستند که بر اساس مکانیزم‌های خودتوجهی قادر به پردازش نمایش‌های چندسطحی در داده‌های ترتیبی هستند [۸۱، ۸۲]. این چارچوب بر روی یک کشتی بزرگ مسافربری الکتریکی اعتبارسنجی شد و توانایی آن در غلبه بر تأخیرات موجود در سامانه مدیریت باتری سنتی را به نمایش گذاشت [۸۳].

ترانسفورماتورها مزایای قابل‌توجهی برای کاربردهای نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه ارائه می‌دهند و امکان پردازش توالی‌های طولانی داده را بدون محدودیت‌های حافظه‌ای موجود در سایر شبکه‌ها (مانند شبکه‌های عصبی بازگشتی (RNNs)) فراهم می‌کنند. با این حال، محدودیت‌های آن‌ها نیز باید برای توسعه نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه در نظر گرفته شود، از جمله موارد زیر: (الف) مصرف قابل‌توجه منابع محاسباتی و حافظه، (ب) نیاز به داده‌های گسترده برای تعمیم مؤثر و جلوگیری از بیش‌برازش و (ج) تنظیم پارامترهای بیشینه که می‌تواند چالش‌برانگیز و زمان‌بر باشد [۸۴، ۸۵].

برخلاف رویکردهای یادگیری ماشین کلاسیک که پیش‌تر ذکر شد، کاراندیکار و همکاران، یک طرح مبتنی بر یادگیری فدرال را پیشنهاد کردند که فناوری بلاک‌چین

ارزیابی کردند. این مطالعه تکنیک‌هایی مانند توقف زودهنگام و هرس مدل، از جمله ثابت، چندجمله‌ای کاهشی و رگولایزاسیون‌های L1 و L2 را بررسی کرد. در میان این موارد، استفاده از توقف زودهنگام و رگولایزاسیون L2 مؤثرترین عملکرد را نشان داد که دقت پیش‌بینی، پیچیدگی مدل و زمان آموزش را به تعادل می‌رساند [۷۴]. شبکه‌های عصبی پیچشی می‌توانند هم برای وظایف نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه مبتنی بر سری‌های زمانی (مانند شبکه‌های عصبی پیچشی یک‌بعدی، پیکربندی‌های ترکیبی) و هم برای وظایف نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه مبتنی بر تصویر مفید باشند. به طور خاص، شبکه‌های عصبی پیچشی توانایی شناسایی خودکار الگوهای مکانی یا زمانی را از داده‌های ورودی ارائه می‌دهند. با این حال، با وجود مزایایشان، آن‌ها نیازمند: (۱) حجم زیادی از داده‌ها برای تعمیم مؤثر، (۲) منابع محاسباتی بالا برای آموزش و استنتاج (که استقرار آن‌ها در سیستم‌های لبه‌ای در سناریوهای یادگیری فدرال را دشوار می‌کند) و (۳) پیکربندی دقیق پارامترهای بیشینه به دلیل پیچیدگی معماری‌شان، به ویژه در موارد مدل‌های ترکیبی، هستند [۷۵-۷۷].

## ۲-۳- رویکردهای نوین نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه در سامانه‌های الکتریکی کشتی‌ها

مسائل متداول در سامانه‌های الکتریکی کشتی‌ها شامل، اما نه محدود به: (۱) آسیب‌دیدگی کابل‌ها و سیم‌کشی‌ها، (۲) نارسایی باتری‌ها، (۳) اختلال در عملکرد ژنراتورها، آلترناتورها و ترانسفورماتورها و (۴) خرابی سامانه‌های روشنایی است. در راستای رسیدگی به این چالش‌ها و بهینه‌سازی عملکرد، پژوهش‌های متعددی به بررسی یکپارچه‌سازی سامانه‌های نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه <sup>۲۹</sup> پرداخته‌اند.

به‌عنوان مثال، تانگ و همکاران، حالات کاهش سلول‌های یون لیتیوم مورد استفاده در شناورهای هیبریدی را مورد کاوش قرار دادند. به تفصیل، پژوهش آن‌ها یک رویکرد بیزی <sup>۳۰</sup> برای ماشین بردار پشتیبان (SVM) با نام ماشین بردار مرتبط (RVM) <sup>۳۱</sup> را معرفی

<sup>29</sup> Predictive Maintenance - PdM

<sup>30</sup> Bayesian approach

<sup>31</sup> Relevance Vector Machine - RVM

<sup>32</sup> Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise - DBSCAN

را برای افزایش بیشتر امنیت و حریم خصوصی یکپارچه می‌کند. به طور دقیق، این چارچوب قراردادهای هوشمند را معرفی می‌کند که جایگزین سرور سنتی یادگیری فدرال شده و پارامترهای مختلف مدل را بر روی بلاکچین ذخیره و مدیریت می‌کنند. نویسندگان با موفقیت این چارچوب را در یک مورد کاربردی باتری دریایی، با استفاده از یک مدل رگرسیون خطی (LR) برای پیش‌بینی وضعیت سلامت (SOH)<sup>۳۳</sup> آن‌ها به صورت غیرمتمرکز ارزیابی کردند [۸۶]. درحالی‌که چارچوب پیشنهادی نویدبخش پیشرفت در حریم خصوصی و عدم تمرکز است، اما به آزمایش‌های بیشتری با مدل‌های یادگیری عمیق پیچیده‌تر نیاز دارد تا مقیاس‌پذیری و اثربخشی آن در وظایف نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه و همچنین الزامات تأخیر مورد بررسی قرار گیرد، زیرا مکانیزم‌های اجماع می‌توانند بر زمان آموزش دستگاه کاربر یادگیری فدرال تأثیر بگذارند. علاوه بر این، یکپارچه‌سازی یادگیری فدرال و بلاکچین ممکن است پیچیدگی معماری و پیاده‌سازی آن را افزایش دهد، زیرا هر دو فناوری نیازمند منابع محاسباتی قابل‌توجهی هستند.

### ۳-۳- رویکردهای نوین مدل‌سازی و پیش‌بینی خرابی‌های بدنه و سازه کشتی

ایمنی عملیاتی و عمر باقیمانده مفید (RUL) یک شناور، به طور قابل‌توجهی تحت تأثیر یکپارچگی سازه‌ای بدنه آن قرار دارد. بر اساس مقررات تعیین شده توسط انجمن بین‌المللی مؤسسات رده‌بندی (IACS)<sup>۳۴</sup>، بازرسی‌های بدنه هم در طول فاز ساخت کشتی و هم در طول فاز عملیاتی خدماتی آن انجام می‌شود. به طور خاص، در فاز ساخت، بازرسی‌های دستی برای تأیید اینکه مواد و فرایندهای ساخت مطابق با مقررات و استانداردهای مربوطه انجام شده‌اند، صورت می‌گیرد. درحالی‌که بازرسی‌های عملیاتی یا بر اساس یک برنامه نگهداری واکنشی یا نگهداری پیشگیرانه در کشتی‌سازی‌ها انجام می‌شوند [۸۷-۸۹، ۱۳]. علاوه بر این، در طول

عملیات یک شناور، خرابی‌ها در ساختار بدنه به دلایل زیر رخ می‌دهند:

**خوردگی:** خوردگی یک پدیده طبیعی و اجتناب‌ناپذیر است که در سطح بیرونی بدنه کشتی رخ می‌دهد. به طور خاص، در اثر تعامل طولانی‌مدت بدنه با محیط دریایی، واکنش‌های الکتروشیمیایی مختلف باعث اکسیدشدن مواد فلزی می‌شوند که منجر به حداقل رسیدن چگالی و انعطاف‌پذیری سازه می‌گردد [۸، ۸۷].

**پوشش زیستی:** پوشش زیستی یک مشکل رایج در سطوح زیر آب بدنه است که باعث تشکیل ساختارهای لجن‌مانند از ارگانیسم‌های دریایی (مانند جلبک‌ها و غیره) می‌شود. این پدیده تأثیر منفی بر راندمان عملکرد شناور یعنی افزایش پسا (drag) و افزایش مصرف سوخت دارد [۹۰-۹۲].

**خستگی سازه‌ای:** تغییر شکل‌های سازه‌ای بدنه کشتی، در اکثر موارد، ناشی از آسیب‌های تکراری تماسی است، مانند آنچه که توسط امواج، عملیات پهلوگیری، یا حتی از تنش بیش از حد ناشی از بارگذاری بیش از حد محموله ایجاد می‌شود [۸۷].

**فرسودگی پوشش:** لایه‌های پوششی بر روی سطوح بدنه اعمال می‌شوند تا از آن‌ها در برابر پوشش زیستی و خوردگی محافظت کنند. با این حال، لایه ضد رسوب به دلیل قرار گرفتن طولانی‌مدت در معرض محیط دریایی به تدریج فرسوده می‌شود که منجر به خطرات سازه‌ای می‌گردد [۸۷، ۹۳].

### ۳-۴- رویکردهای نوین در مدل‌سازی و پیش‌بینی خرابی‌های بدنه و سازه کشتی

برای مثال، جوآنگ و همکاران، یک مدل رگرسیون گام‌به‌گام را برای پیش‌بینی نرخ خوردگی لوله‌های فولاد کربن با در نظر گرفتن سرعت جریان و دما توسعه دادند [۹۵]. جی و همکاران نیز یک چارچوب جامع برای پیش‌بینی وضعیت پوشش‌های رزین اکریلیک در شرایط مختلف دریایی پیشنهاد کردند. این پژوهشگران شاخص‌های کلیدی پوشش (مانند براقیت، رنگ و غیره) را به عنوان ورودی به مدل‌های مختلف (رگرسیون خطی (LR))، الگوریتم ژنتیک<sup>۳۵</sup> و مدل‌های تعمیم‌یافته

<sup>33</sup> State-of-Health - SOH

<sup>34</sup> International Association of Classification Societies - IACS

<sup>35</sup> Genetic algorithm

عملکرد فوق‌العاده‌ای را حتی در مجموعه داده‌های جدولی ساختاریافته کوچک (مانند داده‌های حسگر) از خود نشان دهند؛ با این حال، عملکرد آن‌ها ممکن است با افزایش داده‌های آموزشی به حد اشباع برسد، که این در تضاد با پیکربندی‌های پیچیده‌تر یادگیری عمیق است که می‌توانند دقت پیش‌بینی خود را بهبود بخشند [۱۰۰-۱۰۳].

علاوه بر این، پژوهشگران از شبکه‌های عصبی مصنوعی نیز برای مدل‌سازی الگوهای زوال یا تخریب<sup>۴۲</sup> در ساختارهای بدنه استفاده کرده‌اند. برای مثال، سیپولینی و همکاران یک مدل رگرسیون چندکلاسی<sup>۴۳</sup> مبتنی بر معماری ANN عمیق را برای تخمین وضعیت اجزای مختلف شناور، شامل بدنه، پروانه، توربین گاز و کمپرسور توربین گاز یک سیستم پیشران CODLAG پیشنهاد کردند [۱۰۴]. به طور مشابه، اسپاندونیدیس و همکاران یک مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی را برای ارزیابی تخریب سیستم‌های پروانه-بدنه توسعه دادند. این رویکرد با استاندارد صنعتی ISO-19030 ارزیابی شد [۱۰۵] و با استفاده از داده‌های عملیاتی یک کشتی باری فله‌بر، نتایج تجربی عملکرد پیش‌بینی برتر شبکه‌های عصبی مصنوعی را به نمایش گذاشت [۱۰۶]. هر دو این مثال‌ها، اثربخشی شبکه‌های عصبی مصنوعی را در کاربردهای نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه برای ساختارهای بدنه نشان می‌دهند. با این حال، استفاده از پیکربندی‌های مرتبط با شبکه‌های عصبی مصنوعی نیز چالش‌های متعددی را به همراه دارد، از جمله نیاز به مجموعه داده‌های برجسب‌گذاری شده گسترده برای تعمیم مؤثر و فقدان شفافیت در استدلال آن‌ها که به عنوان "جعبه سیاه" در نظر گرفته می‌شوند و اعتماد اپراتورها را بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهند [۱۰۷، ۱۰۸].

#### ۴- چالش‌های کنونی و مسیرهای آینده در

##### سامانه‌های نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه دریایی

اگرچه سامانه‌های نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه پتانسیل بهبود کارایی عملیاتی و کاهش زمان

ایرینگ<sup>۳۶</sup> وارد کرده و شاخص پیری را پیش‌بینی نمودند. طبق نتایج مطالعه، الگوریتم ژنتیک بالاترین عملکرد پیش‌بینی را به دست آورد [۹۶].

روش‌های مبتنی بر درخت<sup>۳۷</sup> نیز در ارزیابی ساختارهای بدنه مورد استفاده قرار گرفته‌اند که درختان تصمیم (DT)<sup>۳۸</sup> شناخته‌شده‌ترین رویکرد در این زمینه هستند. درختان تصمیم و روش‌های ترکیبی آن‌ها، مدل‌های یادگیری نظارت‌شده ناپارامتریک هستند که برای وظایف طبقه‌بندی و رگرسیون به کار می‌روند و به دلیل سادگی و قابلیت تفسیرپذیری مورد استقبال قرار گرفته‌اند [۹۷]. در همین راستا، جی و همکاران یک چارچوب ترکیبی برای پیش‌بینی وضعیت خوردگی سازه‌های فولادی بدنه معرفی کردند. رویکرد آن‌ها ابتدا از یک مدل شبکه‌های حافظه کوتاه‌مدت بلندمدت برای پیش‌بینی پارامترهای محیطی دینامیک دریایی در طول زمان استفاده می‌کند. خروجی‌های پیش‌بینی‌شده سپس با داده‌های عملیاتی سامانه شناسایی خودکار (AIS)<sup>۳۹</sup> ترکیب می‌شوند تا بردارهای ورودی جدیدی تولید شوند. این بردارها سپس توسط یک مدل جنگل تصادفی (RF)<sup>۴۰</sup> که با بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)<sup>۴۱</sup> بهینه شده است، پردازش می‌شوند [۹۸]. مثال امیدوارکننده دیگری از استفاده از یک مدل نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه مبتنی بر درخت، کار پیرا و همکاران است. در این پژوهش، نویسندگان به پیش‌بینی خوردگی در سازه‌های بدنه شناور را با استفاده از یک مدل مبتنی بر درخت رگرسیون پرداختند، که متغیرهایی مانند ماده و سن عنصر، نوع مخزن و مایع ذخیره‌شده را در نظر می‌گرفت [۹۹]. اگرچه مدل‌های یادگیری فدرال از بیش‌برازش جلوگیری کرده و داده‌های نويزدار و پرت را بهتر از یک درخت واحد مدیریت می‌کنند و امتیازهای اهمیت ویژگی را ارائه می‌دهند، اما ممکن است قابلیت تفسیرپذیری کمتری نسبت به درختان تصمیم (DT) داشته باشند. علاوه بر این، یادگیری فدرال می‌تواند

<sup>36</sup> Generalized Eyrin models

<sup>37</sup> Tree-based methods

<sup>38</sup> Decision Trees - DT

<sup>39</sup> Automatic Identification System - AIS

<sup>40</sup> Random Forest - RF

<sup>41</sup> Particle Swarm Optimization - PSO

<sup>42</sup> Degradation patterns

<sup>43</sup> Multiclass regression model

از کارافتادگی شناور را دارند، اما همچنان چندین چالش باقی‌مانده که مانع از پذیرش آن‌ها در دنیای واقعی می‌شود.

به‌عنوان مثال، نبود استانداردهای یکنواخت و چارچوب‌های نظارتی برای فناوری‌های نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه، بر پذیرش آن‌ها تأثیر می‌گذارد. این شکاف ناشی از سرعت پایین پذیرش پیشرفت‌ها در صنعت است [۸، ۱۰]. برای رفع این موضوع، تلاش‌های آتی باید بر توسعه دستورالعمل‌ها و پروتکل‌های استاندارد شده بر اساس ابزارهای متن‌باز<sup>۴۴</sup> متمرکز شود تا این شکاف برطرف شده و سازگاری و اعتماد به فناوری تضمین شود. نمونه‌هایی از این موارد شامل دستورالعمل‌های اخیراً تأسیس شده برای امنیت سایبری و کشتی‌های خودمختار توسط سازمان بین‌المللی دریانوردی (IMO) و سازمان طبقه‌بندی آمریکایی<sup>۴۵</sup> است [۱۰۹، ۱۱۰].

یکی از الزامات برای آموزش سامانه‌های نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه دقیق، در دسترس بودن داده‌های عملیاتی باکیفیت بالا از شناورها است. در حال حاضر، مجموعه داده‌های "زمان تا خرابی" دریایی در دسترس عموم محدود هستند که منجر به اشباع پژوهش بر روی اجزای خاص شده، درحالی‌که سایر اجزا ناشناخته باقی‌مانده‌اند. برای حل این مشکل، پژوهش‌های آتی باید تکنیک‌های هوش مصنوعی مولد و دوقلوهای دیجیتال را برای تولید داده‌های مصنوعی و ترویج همکاری‌های دانشگاه-صنعت (مانند فضاهای داده و غیره) بررسی کنند. علاوه بر این، دقت پیش‌بینی نیز می‌تواند تحت تأثیر انحراف داده (تغییر ویژگی‌های آماری داده‌های ورودی) قرار گیرد که ناشی از ارتقای، اصلاحات، یا حتی زوال حسگرها در کشتی‌ها است [۱۰، ۱۱۱]. برای رفع این مشکل و اطمینان از قابلیت اطمینان سیستم، پژوهش‌ها باید بر روی تکنیک‌های پایش خودکار داده‌ها و استراتژی‌های آموزش مدل (مانند یادگیری آنلاین، آموزش افزایشی<sup>۴۶</sup>، یادگیری فدرال، یادگیری انتقالی و غیره) انجام شود [۱۰، ۱۱۲، ۱۱۳].

خطرات قابل‌توجهی نیز از استفاده از کاربردهای نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه مبتنی بر یادگیری ماشین کلاسیک (CML) ناشی می‌شود. مدل‌های یادگیری ماشین کلاسیک تهدیدات امنیتی قابل‌توجه، ناکارآمدی‌های ارتباطی و چالش‌های مرتبط با مقیاس‌پذیری و محدودیت‌های محاسباتی داخلی کشتی را به همراه دارند [۱۱۴، ۱۱۵]. پژوهش‌های آتی باید بر توسعه راهکارهای نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه مبتنی بر الگوهای یادگیری ماشین غیرمتمرکز (مانند یادگیری فدرال (FL))، با بهره‌گیری از نقاط قوت یادگیری انتقالی، تمرکز کنند. به طور خاص، این امر می‌تواند شامل بررسی تکنیک‌های مختلف تجمیع یادگیری فدرال همراه با روش‌های رمزنگاری، استراتژی‌های انتخاب دستگاه کاربر برای بهینه‌سازی آموزش و طراحی راهکارهایی با در نظر گرفتن منابع محاسباتی موجود در کشتی‌ها باشد.

در نهایت، فقدان شفافیت در استدلال مدل، بر پذیرش در حوزه دریایی تأثیر بیشتری می‌گذارد. به طور دقیق، راه‌حل‌های یادگیری ماشین اغلب به‌عنوان "جعبه‌های سیاه" عمل می‌کنند و عدم اطمینان در میان اپراتورها ایجاد می‌کنند، زیرا آن‌ها قادر به تفسیر استدلال مدل نیستند [۱۱۶]. برای رفع این مشکل، چارچوب‌های نظارتی مانند قانون هوش مصنوعی اروپا<sup>۴۷</sup> معرفی شده‌اند. پژوهش‌های آتی در مورد سامانه‌های نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه باید بر همسویی با مقررات هوش مصنوعی، یکپارچه‌سازی روش‌های توضیح‌پذیری مدل در سامانه‌های موجود و افزایش شفافیت در تصمیم‌گیری‌های آن‌ها تمرکز کنند [۱۱۷، ۱۱۸].

در جدول ۱ نشان داده شده است که اگرچه روش‌های کلاسیک و مدل‌های خطی از نظر هزینه محاسباتی به‌صرفه‌ترند، اما توان تبیین رفتارهای غیرخطی و پویا را ندارند و سقف دقت آن‌ها در سناریوهای دریایی محدود است. در مقابل، مدل‌های عمیق به‌ویژه LSTM و CNN بالاترین قدرت پیش‌بینی RUL را ارائه می‌دهند، اما هزینه محاسباتی و نیاز به داده خرابی واقعی، مانع استقرار مستقیم آن‌ها در دستگاه کاربر سامانه‌های دریایی است. در این میان، یادگیری انتقالی و یادگیری فدرال رویکردهای میانی واقع‌بینانه و با قابلیت به‌کارگیری عملی در صنعت

<sup>44</sup> Open source tools

<sup>45</sup> American Bureau of Shipping

<sup>46</sup> Incremental training

<sup>47</sup> European AI Act

محسوب می‌شوند که ضمن حفظ پذیرش‌پذیری عملیاتی، هستند.

قادر به کاهش نیاز به داده و افزایش امنیت داده‌ای

جدول ۱. مقایسه جامع روش‌های داده‌محور در نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه (PdM) دریایی از منظر عملکرد، هزینه و امنیت داده

| امنیت / حریم خصوصی        | هزینه محاسباتی | سطح دقت نسبی در دریایی | مزیت کلیدی                                                         | روش                                         |
|---------------------------|----------------|------------------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| کم (داده باید جابجا شود)  | بسیار کم       | پایین                  | سادگی، مناسب داده کم، قابل اعتماد                                  | <i>LR / Ridge / LAR</i>                     |
| کم                        | کم             | پایین تا متوسط         | کاهش ابعاد مؤثر، مناسب قبل از مدل‌های دیگر                         | <i>PCA + Regression</i>                     |
| کم (داده باید متمرکز شود) | متوسط تا زیاد  | متوسط                  | عملکرد خوب روی داده‌های متوسط                                      | <i>SVM / SVR</i>                            |
| کم                        | متوسط          | متوسط                  | تفسیرپذیر - مقاوم نسبت به نویز                                     | <i>Random Forest / Decision Trees</i>       |
| کم                        | متوسط          | متوسط تا خوب           | یادگیری روابط غیرخطی                                               | <i>ANN / FNN</i>                            |
| کم                        | زیاد           | بالا                   | بهترین عملکرد روی سنسورهای زمانی (RUL)                             | <i>LSTM / CNN</i>                           |
| کم                        | بسیار زیاد     | بالا                   | عملکرد بهتر در موارد پیچیده                                        | <i>PSO-tuned LSTM / hybrid DL</i>           |
| متوسط                     | متوسط          | متوسط تا بالا          | حل کمبود داده‌های خرابی، استفاده مجدد از مدل‌های از پیش آموزش‌دیده | <i>Transfer Learning (TL)</i>               |
| بسیار بالا (بهترین)       | متوسط تا زیاد  | اغلب خوب (مشروط)       | عدم نیاز به انتقال داده، امنیت مناسب ناوگان                        | <i>Federated Learning (FL)</i>              |
| کم                        | بسیار کم       | پایین تا متوسط         | مناسب تحلیل آماری نرخ خرابی                                        | مدل‌های کلاسیک ( <i>Weibull / Poisson</i> ) |

## ۵- نتیجه‌گیری

این بررسی، یک تحلیل دقیق از چشم‌انداز فعلی نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه را ارائه می‌دهد که شکل‌دهنده شیوه‌های نگهداری در صنعت دریایی است. مشارکت‌های کلیدی این پژوهش شامل تحلیل ادبیات رویکردهای نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه به‌کاررفته در سامانه‌های حیاتی مانند پیش‌ران، کمکی، الکتریکی، بدنه و اجزای سازه‌ای است. به طور دقیق، بر اساس تحلیل انجام شده در این کار، هیچ رویکرد واحدی نمی‌تواند به‌عنوان یک راه‌حل جامع عمل کند، بلکه هر سیستم نیازمند یک رویکرد سفارشی است که مزایا و محدودیت‌های منحصر به فرد هر مدل را در نظر می‌گیرد.

این پژوهش همچنین چالش‌های بحرانی که مانع از پذیرش نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه می‌شوند را شناسایی و مسیرهای بالقوه برای غلبه بر آن‌ها را مورد بحث قرار می‌دهد. به طور خاص، درحالی‌که مدل‌های یادگیری عمیق از نظر مقیاس‌پذیری و عملکرد پیش‌بینی از مدل‌های یادگیری ماشین سنتی بهتر عمل می‌کنند، اما برای آموزش مؤثر و جلوگیری از بیش‌برازش (انطباق

بیش از حد)<sup>۴۸</sup>، به مجموعه داده‌های برجسته‌گذاری شده بزرگ و باکیفیت بالا نیاز دارند. یک محدودیت کنونی در حوزه نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه دریایی، کمبود مجموعه داده‌های "زمان تا خرابی" در دسترس عموم است که منجر به تمرکز پژوهش‌ها تنها بر روی اجزای خاص شده است. علاوه بر این، اکثر کارهای بررسی شده، بر به‌کارگیری یادگیری مبتنی بر یادگیری ماشین کلاسیک تمرکز دارند که خطرات قابل‌توجهی مانند نگرانی‌های مربوط به حریم خصوصی داده‌ها، آسیب‌پذیری‌های امنیتی و مسائل مقیاس‌پذیری را به همراه دارد. به همین دلیل، یادگیری فدرال و یادگیری انتقالی نیز در این کار به‌عنوان جایگزین‌های امیدوارکننده‌ای معرفی شده‌اند که می‌توانند برخی از این چالش‌ها را کاهش داده و پژوهش را به سمت غیرمتمرکزسازی سوق دهند. علاوه بر این، برای اطمینان از انطباق با مقررات نوظهور، فقدان شفافیت در تصمیم‌گیری‌ها نیز مورد بحث قرار می‌گیرد و یکپارچه‌سازی تکنیک‌های توضیح‌پذیری مدل در

<sup>48</sup> Overfitting

سامانه‌های نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه برای افزایش اعتماد در میان اپراتورها ضروری تلقی می‌شود. در نهایت این مرور نشان داد که اگرچه روش‌های کلاسیک آماری و یادگیری ماشین (نظیر (LR) و (SVM)) برای تحلیل‌های اولیه و سناریوهای با محدودیت داده، همچنان قابل اتکا و از نظر محاسباتی اقتصادی هستند، اما دقت پیش‌بینی و حساسیت آنها در محیط‌های عملیاتی متغیر شناورها محدود است و در مواجهه با افزایش ابعاد و پیچیدگی داده، ضعف مقیاس‌پذیری و حساسیت به انتخاب هسته مشاهده می‌شود. در مقابل، معماری‌های عمیق‌تر مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی<sup>۴۹</sup> (ANNs) و به‌ویژه شبکه‌های حافظه کوتاه‌مدت بلندمدت (LSTM) با قابلیت مدل‌سازی وابستگی‌های زمانی طولانی، در پیش‌بینی RUL موتورهای دریایی عملکرد برتر ارائه کرده‌اند و در آزمایش‌های نزدیک به دنیای واقعی برتری خود را نسبت به مدل‌های پایه نشان داده‌اند. با این حال، نیاز بسیار بالا به داده‌های برچسب‌خورده خرابی و ریسک بیش‌برازش بدون رگولایزاسیون مناسب، به‌همراه هزینه محاسباتی، استقرار مستقیم این مدل‌ها را در سناریوهای لبه یعنی روی خود شناور دشوار کرده است. بر همین بستر، رویکردهای نوین مانند یادگیری انتقالی و یادگیری فدرال، راه‌حل‌های واقع‌بینانه‌تری برای شرایط صنعت دریایی محسوب می‌شوند: انتقالی، اثربخشی خود را در شرایط فقدان داده‌های عمومی خرابی واقعی اثبات کرده است (کمبود دائمی داده تا خرابی واقعی در کشتی‌ها یک واقعیت صنعتی است) و فدرال، پتانسیل حل مسئله حفظ حریم خصوصی و عدم تمرکز داده را دارد. بنابراین مسیر پژوهشی آینده نباید صرفاً «قدرت مدل» را بزرگ‌تر کند، بلکه باید «اثربخشی‌پذیری صنعتی» را حداکثر کند. نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه اکنون از مرحله قابلیت‌سنجی علمی عبور کرده و به مرحله «امکان‌پذیری عملی با شروط» رسیده است. زمانی بیشترین ارزش شکل می‌گیرد که مدل‌های یادگیری عمیق، با معماری‌های سبک، یادگیری انتقالی و فدرال ادغام شوند و در قالب چرخه‌های واقعی کشتی قابل استقرار باشند. ایجاد داده‌های عمومی استاندارد خرابی و استانداردسازی

تجربی، پیش‌نیاز حیاتی گذار از وضعیت «موارد پژوهشی پراکنده» به «راه‌حل صنعتی پذیرفته‌شده» است.

### فهرست اختصارات

|        |                                            |                           |
|--------|--------------------------------------------|---------------------------|
| AI     | Artificial Intelligence                    | هوش مصنوعی                |
|        |                                            | سیستم                     |
|        |                                            | شناسایی                   |
| AIS    | Automatic Identification System            | خودکار                    |
|        |                                            | کشتی‌های                  |
|        |                                            | فعال‌شده                  |
| CESs   | Cyber-Enabled Ships                        | سایبری                    |
|        |                                            | سیستم پیش‌رانه            |
|        |                                            | ترکیبی دیزل-الکتریک و گاز |
| CODLAG | Combined Diesel-Electric and Gas           |                           |
| DE     | Diesel Engine                              | موتور دیزل                |
| DL     | Deep Learning                              | یادگیری عمیق              |
| DT     | Decision Tree                              | درخت تصمیم                |
|        |                                            | دمای گاز                  |
| EGT    | Exhaust Gas Temperature                    | خروجی                     |
|        |                                            | سیستم                     |
|        |                                            | ذخیره‌سازی                |
| ESS    | Energy Storage System                      | انرژی                     |
|        |                                            | میانگین                   |
|        |                                            | متحرک وزن‌دار             |
| EWMA   | Exponentially Weighted Moving Average      | نمایی                     |
| FL     | Federated Learning                         | یادگیری فدرال             |
| FNN    | Feed-Forward Network                       | شبکه پیش‌خور              |
|        |                                            | شناور تولید،              |
|        |                                            | ذخیره‌سازی و              |
| FPSO   | Floating Production Storage and Offloading | تخلیه شناور               |
| GT     | Gas Turbine                                | توربین گاز                |
|        |                                            | پیش‌رانه                  |
|        |                                            | الکتریکی                  |
| HE     | Hybrid Electric Propulsion                 | هیبریدی                   |
| HFO    | Heavy Fuel Oil                             | سوخت سنگین                |

<sup>49</sup> Artificial Neural Networks - ANNs

|                   |                                            |      |                                                       |  |  |
|-------------------|--------------------------------------------|------|-------------------------------------------------------|--|--|
| دریایی            | سیستم                                      |      |                                                       |  |  |
| یادگیری           | گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع                |      |                                                       |  |  |
| ماشین             | Heating, Ventilation, and Air Conditioning | HVAC |                                                       |  |  |
| فناوری            | انجمن                                      |      |                                                       |  |  |
| عملیاتی           | بین‌المللی                                 |      |                                                       |  |  |
| تحلیل             | مؤسسات                                     |      |                                                       |  |  |
| مؤلفه‌های اصلی    | رده‌بندی                                   | IACS | International Association of Classification Societies |  |  |
| نگهداری و تعمیرات | موتور احتراق داخلی                         | ICE  | Internal Combustion Engine                            |  |  |
| پیش‌بینانه        | سازمان                                     |      |                                                       |  |  |
| فیلتر ذرات        | بین‌المللی                                 |      |                                                       |  |  |
| نگهداری           | دریانوردی                                  | IMO  | International Maritime Organization                   |  |  |
| پیشگیرانه         | اینترنت اشیا                               |      |                                                       |  |  |
| بهینه‌سازی        | کشتی‌ها                                    | IoS  | Internet of Ships                                     |  |  |
| ازدحام ذرات       | فناوری                                     |      |                                                       |  |  |
| جنگل تصادفی       | اطلاعات                                    | IT   | Information Technology                                |  |  |
| یادگیری           | فیلتر کالمن                                | KF   | Kalman Filter                                         |  |  |
| تقویتی            | حداقل                                      |      |                                                       |  |  |
| نگهداری           | قدرمطلق                                    |      |                                                       |  |  |
| واکنشی            | باقیمانده                                  | LAR  | Least Absolute Residual                               |  |  |
| شبکه عصبی         | لیتیوم-آهن-                                |      |                                                       |  |  |
| بازگشتی           | فسفات                                      | LFP  | Lithium-Iron-Phosphate                                |  |  |
| عمر باقیمانده     | گاز طبیعی                                  |      |                                                       |  |  |
| مفید              | مابع‌شده                                   | LNG  | Liquefied Natural Gas                                 |  |  |
| مرکز کنترل        | لیتیوم-نیکل-                               |      |                                                       |  |  |
| مستقر در خشکی     | منگنز-کبالت-اکسید                          | LNMC | Lithium-Nickel-Manganese-Cobalt-Oxide                 |  |  |
| وضعیت سلامت       | رگرسیون خطی                                | LR   | Linear Regression                                     |  |  |
| کنوانسیون         | حافظه                                      |      |                                                       |  |  |
| بین‌المللی        | کوتاه‌مدت                                  |      |                                                       |  |  |
| ایمنی جان         | بلندمدت                                    | LSTM | Long Short Term Memory                                |  |  |
| اشخاص در دریا     | لیتیوم-                                    |      |                                                       |  |  |
| یادگیری           | تیتانیوم-اکسید                             | LTO  | Lithium-Titanium-Oxide                                |  |  |
| انتقالی           | شبکه ارتباطی                               |      |                                                       |  |  |
| زمان تا خرابی     | دریایی                                     | MCN  | Maritime Communication Network                        |  |  |
| زمان تا تعمیر     | نفت گازوئیل                                | MDO  | Marine Diesel Oil                                     |  |  |
|                   |                                            |      |                                                       |  |  |

- [12] Barata, J.; Soares, C.G.; Marseguerra, M.; Zio, E. Simulation modelling of repairable multi-component deteriorating systems for 'on condition' maintenance optimisation. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* **2002**, *76*, 255–264.
- [13] Karatuglu, C.; Arslanoglu, Y.; Soares, C.G. Review of maintenance strategies for ship machinery systems. *J. Mar. Eng. Technol.* **2023**, *22*, 233–247.
- [14] International Maritime Organization (IMO). International Convention for the Safety of Life At Sea (SOLAS); IMO: London, UK, 2002.
- [15] IMO. Survey Guidelines Under the Harmonized System of Survey and Certification (HSSC), Resolution A.1120(30); IMO: London, UK, 2017.
- [15] Basri, E.I.; Razak, I.H.A.; Ab-Samat, H.; Kamaruddin, S. Preventive maintenance (PM) planning: A review. *J. Qual. Maint. Eng.* **2017**, *23*, 114–143.
- [16] Ahmad, R.; Kamaruddin, S. An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application. *Comput. Ind. Eng.* **2012**, *63*, 135–149.
- [17] Cvrk, S.; Ilijević, D. Application of diagnostics as a basis of condition based maintenance of the marine propulsion diesel engine. *Brodogr. Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng. Res. Dev.* **2020**, *71*, 119–134.
- [18] Cui, Y.; Shi, J.; Wang, Z. Quantum assimilation-based state-of-health assessment and remaining useful life estimation for electronic systems. *IEEE Trans. Ind. Electron.* **2015**, *63*, 2379–2390.
- [19] Skordilis, E.; Moghaddass, R. A condition monitoring approach for real-time monitoring of degrading systems using Kalman filter and logistic regression. *Int. J. Prod. Res.* **2017**, *55*, 5579–5596.
- [20] Wang, J.; Yin, H. Failure rate prediction model of substation equipment based on Weibull distribution and time series analysis. *IEEE Access* **2019**, *7*, 85298–85309.
- [21] de la Pena Zarzuelo, I.; Soeane, M.J.F.; Bermudez, B.L. Industry 4.0 in the port and maritime industry: A literature review. *J. Ind. Inf. Integr.* **2020**, *20*, 100173.
- [22] Kavallieratos, G.; Diamantopoulou, V.; Katsikas, S.K. Shipping 4.0: Security requirements for the cybe enabled ship. *IEEE Trans. Ind. Inform.* **2020**, *16*, 6617–6625.
- [23] Gomez Ruiz, M.A.; de Almeida, I.M.; Perez Fernandez, R. Application of
- [1] Simion, D.; Postolache, F.; Fleacă, B.; Fleacă, E. AI-Driven Predictive Maintenance in Modern Maritime Transport-Enhancing Operational Efficiency and Reliability. *Appl. Sci.* **2024**, *14*, 9439.
- [2] Allianz Global Corporate & Specialty (AGCS). Safety and Shipping Review 2019: An Annual Review of Trends and Developments in Shipping Losses and Safety; AGCS: Munich, Germany, 2019.
- [3] Aiello, G.; Giallanza, A.; Mascarella, G. Towards Shipping 4.0. A preliminary gap analysis. *Procedia Manuf.* **2020**, *42*, 24–29.
- [4] Kalafatelis, A.; Nomikos, N.; Giannopoulos, A.; Trakadas, P. A Survey on Predictive Maintenance in the Maritime Industry Using Machine and Federated Learning. *TechRxiv* **2024**.
- [5] Wang, H.; Yan, R.; Au, M.H.; Wang, S.; Jin, Y.J. Federated learning for green shipping optimization and management. *Adv. Eng. Inform.* **2023**, *56*, 101994.
- [6] Zhang, Z.; Guan, C.; Chen, H.; Yang, X.; Gong, W.; Yang, A. Adaptive privacy-preserving federated learning for fault diagnosis in internet of ships. *IEEE Internet Things J.* **2021**, *9*, 6844–6854.
- [7] Xylouris, G.; Nomikos, N.; Kalafatelis, A.; Giannopoulos, A.; Spantideas, S.; Trakadas, P. Sailing into the future: Technologies, challenges, and opportunities for maritime communication networks in the 6G era. *Front. Commun. Netw.* **2024**, *5*, 1439529.
- [9] Ali, A.A.I.M.; Imran, M.M.H.; Jamaludin, S.; Ayob, A.F.M.; Russtam, M.I.; Suhrab, S.M.N.; Basri, S.B.H.; Mohamed, S.B. A review of predictive maintenance approaches for corrosion detection and maintenance of marine structures. *J. Sustain. Sci. Manag.* **2024**, *19*.
- [10] Zhang, P.; Gao, Z.; Cao, L.; Dong, F.; Zou, Y.; Wang, K.; Zhang, Y.; Sun, P. Marine systems and equipment prognostics and health management: A systematic review from health condition monitoring to maintenance strategy. *Machines* **2022**, *10*, 72.
- [11] Liang, Q.; Knutsen, K.E.; Vanem, E.; Asoy, V.; Zhang, H. A review of maritime equipment prognostics health management from a classification society perspective. *Ocean Eng.* **2024**, *301*, 117619.

- learning. In Proceedings of the 2021 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCCWorkshops), Xiamen, China, 28–30 July 2021; pp. 266–271.
- [33] Zhuang, F.; Qi, Z.; Duan, K.; Xi, D.; Zhu, Y.; Zhu, H.; Xiong, H.; He, Q. A comprehensive survey on transfer learning. *Proc. IEEE* **2020**, *109*, 43–76.
- [34] Es-Sakali, N.; Cherkaoui, M.; Mghazli, M.O.; Naimi, Z. Review of predictive maintenance algorithms applied to HVAC systems. *Energy Rep.* **2022**, *8*, 1003–1012.
- [35] Kalafatelis, A.S.; Nomikos, N.; Angelopoulos, A.; Trochoutsos, C.; Trakadas, P. An Effective Methodology for Imbalanced Data Handling in Predictive Maintenance for Offset Printing. In Proceedings of the International Conference on Mechatronics.
- [36] Okoh, C.; Roy, R.; Mehnen, J.; Redding, L. Overview of remaining useful life prediction techniques in through-life engineering services. *Procedia Cirp* **2014**, *16*, 158–163.
- [37] Galar, D.; Kumar, U.; Lee, J.; Zhao, W. Remaining useful life estimation using time trajectory tracking and support vector machines. In *Journal of Physics: Conference Series* 364; IOP Publishing: Bristol, UK, 2012; Volume 364, p. 012063.
- [38] Alhilman, J.; Atmaji, F.T.D.; Athari, N. Software application for maintenance system: A combination of maintenance methods in printing industry. In Proceedings of the 2017 IEEE 5th International Conference on Information and Communication Technology (ICoIC7), Melaka, Malaysia, 17–19 May 2017; pp. 1–6.
- [39] Inal, O.B.; Charpentier, J.F.; Deniz, C. Hybrid power and propulsion systems for ships: Current status and future challenges. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2022**, *156*, 111965.
- [40] Joung, T.H.; Kang, S.G.; Lee, J.K.; Ahn, J. The IMO initial strategy for reducing Greenhouse Gas (GHG) emissions, and its follow-up actions towards 2050. *J. Int. Marit. Safety, Environ. Aff. Shipp.* **2020**, *4*, 1–7.
- [41] Ni, P.; Wang, X.; Li, H. A review on regulations, current status, effects and reduction strategies of emissions for marine diesel engines. *Fuel* **2020**, *279*, 118477.
- Machine Learning Techniques to the Maritime Industry. *J. Mar. Sci. Eng.* **2023**, *11*, 1820.
- [24] Angelopoulos, A.; Giannopoulos, A.; Nomikos, N.; Kalafatelis, A.; Hatziefremidis, A.; Trakadas, P. Federated Learning-Aided Prognostics in the Shipping 4.0: Principles, Workflow, and Use Cases. *IEEE Access* **2024**, *12*, 6437–6454.
- [25] Achouch, M.; Dimitrova, M.; Ziane, K.; Sattarpanah Karganroudi, S.; Dhoub, R.; Ibrahim, H.; Adda, M. On predictive maintenance in industry 4.0: Overview, models, and challenges. *Appl. Sci.* **2022**, *12*, 8081.
- [26] Kalafatelis, A.S.; Trochoutsos, C.; Giannopoulos, A.E.; Angelopoulos, A.; Trakadas, P. A Stacking Ensemble Learning Model for Waste Prediction in Offset Printing. In Proceedings of the 2023 10th International Conference on Industrial Engineering and Applications, Rome, Italy, 9–11 January 2023; pp. 267–272.
- [27] Zheng, H.; Paiva, A.R.; Gurciullo, C.S. Advancing from predictive maintenance to intelligent maintenance with ai and iiot. *arXiv* **2020**, arXiv:2009.00351.
- [28] Durlik, I.; Miller, T.; Dorobczyński, L.; Kozłowska, P.; Kostecki, T. Revolutionizing marine traffic management: A comprehensive review of machine learning applications in complex maritime systems. *Appl. Sci.* **2023**, *13*, 8099.
- [29] Nomikos, N.; Giannopoulos, A.; Kalafatelis, A.; Ozduran, V.; Trakadas, P.; Karagiannidis, G.K. Improving connectivity in 6G maritime communication networks with UAV swarms. *IEEE Access* **2024**, *12*, 18739–18751.
- [30] Sarlas, A.; Kalafatelis, A.; Alexandridis, G.; Kourtis, M.A.; Trakadas, P. Exploring federated learning for speech-based parkinson's disease detection. In Proceedings of the 18th International Conference on Availability, Reliability and Security, Benevento, Italy, 29 August–1 September 2023; pp. 1–6.
- [31] Giannopoulos, A.; Gkonis, P.; Bithas, P.; Nomikos, N.; Kalafatelis, A.; Trakadas, P. Federated learning for maritime environments: Use cases, experimental results, and open issues. *J. Mar. Sci. Eng.* **2024**, *12*, 1034.
- [32] Han, C.; Yang, T. Privacy protection technology of maritime multi-agent communication based on part-federated

- [55] Hurtado, J.; Salvati, D.; Semola, R.; Bosio, M.; Lomonaco, V. Continual learning for predictive maintenance: Overview and challenges. *Intell. Syst. Appl.* **2023**, *19*, 200251.
- [56] Coraddu, A.; Oneto, L.; Ghio, A.; Savio, S.; Anguita, D.; Figari, M. Machine learning approaches for improving condition-based maintenance of naval propulsion plants. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part M J. Eng. Marit. Environ.* **2016**, *230*, 136–153.
- [57] Coraddu, A.; Oneto, L.; Ghio, A.; Savio, S.; Figari, M.; Anguita, D. Machine learning for wear forecasting of naval assets for condition-based maintenance applications. In *Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS)*, Aachen, Germany, 3–5 March 2015; pp. 1–5.
- [58] Vorkapić, A.; Radonja, R.; Babić, K.; Martinčić-Ipšić, S. Machine learning methods in monitoring operating behaviour of marine two-stroke diesel engine. *Transport* **2020**, *35*, 474–485.
- [59] Wang, H.; Zhu, Z.; Shao, Y. Fast Support Vector Machine with Low-Computational Complexity for Large-Scale Classification. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Syst.* **2024**, *54*, 4151–4163.
- [60] Wu, C.H.; Tzeng, G.H.; Lin, R.H. A Novel hybrid genetic algorithm for kernel function and parameter optimization in support vector regression. *Expert Syst. Appl.* **2009**, *36*, 4725–4735.
- [61] Lorencin, I.; Andrić, N.; Mrzljak, V.; Car, Z. Multilayer perceptron approach to condition-based maintenance of marine CODLAG propulsion system components. *Pomorstvo* **2019**, *33*, 181–190.
- [62] Guerrero, D.P.; Jimenez-Espadafor, F.J. Torsional system dynamics of low speed diesel engines based on instantaneous torque: Application to engine diagnosis. *Mech. Syst. Signal Process.* **2019**, *116*, 858–878.
- [63] Jabbar, H.; Khan, R.Z. Methods to avoid over-fitting and under-fitting in supervised machine learning (comparative study). *Comput. Sci. Commun. Instrum. Devices* **2015**, *70*, 978–981.
- [64] Agatonovic-Kustrin, S.; Beresford, R. Basic concepts of artificial neural network (ANN) modeling and its application in pharmaceutical research. *J. Pharm. Biomed. Anal.* **2000**, *22*, 717–727.
- [42] Vizentin, G.; Vukelic, G.; Murawski, L.; Recho, N.; Orovic, J. Marine propulsion system failures—A review. *J. Mar. Sci. Eng.* **2020**, *8*, 662.
- [43] Cai, C.; Weng, X.; Zhang, C. A novel approach for marine diesel engine fault diagnosis. *Clust. Comput.* **2017**, *20*, 1691–1702.
- [44] Wang, X.; Liu, C.; Bi, F.; Bi, X.; Shao, K. Fault diagnosis of diesel engine based on adaptive wavelet packets and EEMD-fractal dimension. *Mech. Syst. Signal Process.* **2013**, *41*, 581–597.
- [45] Wang, J.; Sun, X.; Zhang, C.; Ma, X. An integrated methodology for system-level early fault detection and isolation. *Expert Syst. Appl.* **2022**, *201*, 117080.
- [46] Xu, X.; Yan, X.; Sheng, C.; Yuan, C.; Xu, D.; Yang, J. A belief rule-based expert system for fault diagnosis of marine diesel engines. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Syst.* **2017**, *50*, 656–672.
- [47] Velasco-Gallego, C.; Lazakis, I. RADIS: A real-time anomaly detection intelligent system for fault diagnosis of marine machinery. *Expert Syst. Appl.* **2022**, *204*, 117634.
- [48] Bai, H.; Zhan, X.; Yan, H.; Wen, L.; Jia, X. Combination of optimized variational mode decomposition and deep transfer learning: A better fault diagnosis approach for diesel engines. *Electronics* **2022**, *11*, 1969.
- [49] Lv, Y.; Yang, X.; Li, Y.; Liu, J.; Li, S. Fault detection and diagnosis of marine diesel engines: A systematic review. *Ocean Eng.* **2024**, *294*, 116798.
- [50] Cheliotis, M.; Lazakis, I.; Theotokatos, G. Machine learning and data-driven fault detection for ship systems operations. *Ocean Eng.* **2020**, *216*, 107968.
- [51] Kang, Y.J.; Noh, Y.; Jang, M.S.; Park, S.; Kim, J.T. Hierarchical level fault detection and diagnosis of ship engine systems. *Expert Syst. Appl.* **2023**, *213*, 118814.
- [52] Laake, P.; Benestad, H.B.; Olsen, B.R. *Research in Medical and Biological Sciences: From Planning and Preparation to Grant Application and Publication*; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2015.
- [53] Filzmoser, P.; Nordhausen, K. Robust linear regression for high-dimensional data: An overview. *Wiley Interdiscip. Rev. Comput. Stat.* **2021**, *13*, e1524.
- [54] Teng, J.; Yuan, Y. Inject Machine Learning into Significance Test for Misspecified Linear Models. *arXiv* **2020**, arXiv:2006.03167.

- M.; Farhan, L. Review of deep learning: Concepts, CNN architectures, challenges, applications, future directions. *J. Big Data* **2021**, *8*, 1-74.
- [76] Santos, C.F.G.D.; Papa, J.P. Avoiding overfitting: A survey on regularization methods for convolutional neural networks. *ACM Comput. Surv. CSUR* **2022**, *54*, 1-25.
- [77] Thanapol, P.; Lavangnananda, K.; Bouvry, P.; Pinel, F.; Leprevost, F. Reducing overfitting and improving generalization in training convolutional neural network (CNN) under limited sample sizes in image recognition. In Proceedings of the 2020-5th IEEE International Conference on Information Technology (InCIT), Chonburi, Thailand, 21-22 October 2020; pp. 300-305.
- [78] Tang, W.; Roman, D.; Dickie, R.; Robu, V.; Flynn, D. Prognostics and health management for the optimization of marine hybrid energy systems. *Energies* **2020**, *13*, 4676.
- [79] Schmolck, A.; Everson, R. Smooth relevance vector machine: A smoothness prior extension of the RVM. *Mach. Learn.* **2007**, *68*, 107-135.
- [80] Bishop, C.M.; Tipping, M. Variational relevance vector machines. *arXiv* **2013**, arXiv:1301.3838.
- [81] Vaswani, A.; Shazeer, N.; Parmar, N.; Uszkoreit, J.; Jones, L.; Gomez, A.; Aidan, N.; Kaiser, L.; Polosukhin, I. Attention is all you need. In Proceedings of the 31st Annual Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS): Advances in Neural Information Processing Systems, Long Beach, CA, USA, 4-9 December 2017; pp. 6000-6010.
- [82] Liu, Y.; Hu, T.; Zhang, H.; Wu, H.; Wang, S.; Ma, L.; Long, M. itransformer: Inverted transformers are effective for time series forecasting. *arXiv* **2023**, arXiv:2310.06625.
- [83] Liu, Y.; Jin, H.; Yang, X.; Tang, T.; Song, Q.; Chen, Y.; Liu, L.; Jiang, S. Early Fault Diagnosis and Prediction of Marine Large-Capacity Batteries Based on Real Data. *J. Mar. Sci. Eng.* **2024**, *12*, 2253.
- [84] Yang, X.; Yan, B.; Li, H.; Chen, Y. ReTransformer: ReRAM-based processing-in-memory architecture for transformer acceleration. In Proceedings of the 39th International Conference on Computer-Aided Design, Virtual, 2-5 November 2020; pp. 1-9.
- [85] Khan, S.; Naseer, M.; Hayat, M.; Zamir, S.W.; Khan, F.S.; Shah, M. Transformers
- [65] Yu, Y.; Si, X.; Hu, C.; Zhang, J. A review of recurrent neural networks: LSTM cells and network architectures. *Neural Comput.* **2019**, *31*, 1235-1270.
- [66] Han, P.; Ellefsen, A.L.; Li, G.; Asoy, V.; Zhang, H. Fault prognostics using LSTM networks: Application to marine diesel engine. *IEEE Sens. J.* **2021**, *21*, 25986-25994.
- [67] Gribbestad, M.; Hassan, M.U.; Hameed, I.A. Transfer learning for Prognostics and health Management (PHM) of marine Air Compressors. *J. Mar. Sci. Eng.* **2021**, *9*, 47.
- [68] Kang, J.; Park, J.; Choi, S.; Sim, J. Q-LATte: An Efficient and Versatile LSTM Model for Quantized Attention-Based Time Series Forecasting in Building Energy Applications. *IEEE Access* **2024**, *12*, 69325-69341.
- [69] Li, Z.; Liu, F.; Yang, W.; Peng, S.; Zhou, J. A survey of convolutional neural networks: Analysis, applications, and prospects. *IEEE Trans. Neural Networks Learn. Syst.* **2021**, *33*, 6999-7019.
- [70] O' Shea, K. An introduction to convolutional neural networks. *arXiv* **2015**, arXiv:1511.08458.
- [71] Ji, Z.; Gan, H.; Liu, B. A deep learning-based fault warning model for exhaust temperature prediction and fault warning of marine diesel engine. *J. Mar. Sci. Eng.* **2023**, *11*, 1509.
- [72] Li, X.; Cao, H.; Ma, Z. Research on Remaining Useful Life Prediction of Dual-fuel Main Engine Based on CBAM Attention Mechanism. In Proceedings of the 2023 3rd International Conference on Artificial Intelligence, Automation and Algorithms, Beijing, China, 21-23 July 2023; pp. 91-99.
- [73] Liu, B.; Gan, H.; Chen, D.; Shu, Z. Research on fault early warning of marine diesel engine based on CNN-BiGRU. *J. Mar. Sci. Eng.* **2022**, *11*, 56.
- [74] Kalafatelis, A.S.; Stamou, N.; Dailani, A.; Theodoridis, T.; Nomikos, N.; Giannopoulos, A.; Tsoulakos, N.; Alexandridis, G.; Trakadas, P. A Lightweight Predictive Maintenance Strategy for Marine HFO Purification Systems. In Proceedings of the 21<sup>st</sup> European Mediterranean Middle Eastern Conference on Information Systems (EMCIS), Athens, Greece, 2-3 September 2024.
- [75] Alzubaidi, L.; Zhang, J.; Humaidi, A.J.; Al-Dujaili, A.; Duan, Y.; Al-Shamma, O.; Santamaria, J.; Fadhel, M.A.; Al-Amidie,

- [98] Ji, H.; Wang, H.; Chen, Q.; Ma, X.; Cai, Y. Corrosion behavior prediction for hull steels under dynamic marine environments by jointly utilizing LSTM network and PSO-RF model. *Ocean Eng.* **2024**, *300*, 117371. [
- [99] Pereira, A.A.; Neves, A.C.; Ladeira, D.; Caprace, J.D. Corrosion prediction of FPSOs hull using machine learning. *Mar. Struct.* **2024**, *97*, 103652.
- [100] Belgiu, M.; Dragut, L. Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* **2016**, *114*, 24–31.
- [101] Mao, Q.; Cao, Y. Can a Single Tree Outperform an Entire Forest? *arXiv* **2024**, arXiv:2411.17003.
- [102] Probst, P.; Boulesteix, A.L. To tune or not to tune the number of trees in random forest. *J. Mach. Learn. Res.* **2018**, *18*, 1–18.
- [103] Breiman, L. Random forests. *Mach. Learn.* **2001**, *45*, 5–32.
- [104] Cipollini, F.; Oneto, L.; Coraddu, A.; Murphy, A.J.; Anguita, D. Condition-based maintenance of naval propulsion systems with supervised data analysis. *Ocean Eng.* **2018**, *149*, 268–278.
- [105] ISO 19030; Ships and Marine Technology—Measurement of Changes in Hull and Propeller Performance. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2016.
- [106] Spandonidis, C.; Paraskevopoulos, D. Evaluation of a Deep Learning-Based Index for Prognosis of a Vessel's Propeller-Hull Degradation. *Sensors* **2023**, *23*, 8956.
- [107] Zhang, Z.; Beck, M.W.; Winkler, D.A.; Huang, B.; Sibanda, W.; Goyal, H. Opening the black box of neural networks: Methods for interpreting neural network models in clinical applications. *Ann. Transl. Med.* **2018**, *6*, 216.
- [108] Lu, Y.; Shen, M.; Wang, H.; Wang, X.; van Rechem, C.; Fu, T.; Wei, W. Machine learning for synthetic data generation: A review. *arXiv* **2023**, arXiv:2302.04062.
- [109] International Maritime Organization (IMO). Guidelines on Maritime Cyber Risk Management; Resolution MSC-FAL. 1/Circ. 3; International Maritime Organization: London, UK, 2017.
- [110] IMO; MSC. Outcome of the Regulatory Scoping Exercise for the Use of Maritime Autonomous Surface Ships (MASS); IMO: London, UK, 2021.
- in vision: A survey. *ACM Comput. Surv. CSUR* **2022**, *54*, 1–41.
- [86] Karandika, N.; Knutsen, K.; Wang, S.; Lovoll, G. Federated Learning on Trusted Data for Distributed PHM Data Analysis. In Proceedings of the PHM Conference, Turin, Italy, 6–8 July 2022.
- [87] Lin, B.; Dong, X. Ship hull inspection: A survey. *Ocean Eng.* **2023**, *289*, 116281.
- [88] Wen, F.; Pray, J.; McSweeney, K.; Gu, H. Emerging inspection technologies—enabling remote surveys/inspections. In Proceedings of the Offshore Technology Conference, OTC, Houston, TX, USA, 6–9 May 2019; p. D011S002R003.
- [89] Melnyk, O.; Onyshchenko, S.; Onishchenko, O.; Shibaev, O.; Volyanskaya, Y. A Comprehensive Approach to Structural Integrity Analysis and Maintenance Strategy for Ship's Hull. *J. Marit. Res.* **2024**, *21*, 36–44.
- [90] Townsin, R. The ship hull fouling penalty. *Biofouling* **2003**, *19*, 9–15.
- [91] Moser, C.S.; Wier, T.P.; Grant, J.F.; First, M.R.; Tamburri, M.N.; Ruiz, G.M.; Miller, A.W.; Drake, L.A. Quantifying the total wetted surface area of the world fleet: A first step in determining the potential extent of ships' biofouling. *Biol. Invasions* **2016**, *18*, 265–277.
- [92] Valchev, I.; Coraddu, A.; Kalikatzarakis, M.; Geertsma, R.; Oneto, L. Numerical methods for monitoring and evaluating the biofouling state and effects on vessels' hull and propeller performance: A review. *Ocean Eng.* **2022**, *251*, 110883.
- [93] Davies, J.; Truong-Ba, H.; Cholette, M.E.; Will, G. Optimal inspections and maintenance planning for anti-corrosion coating failure on ships using non-homogeneous Poisson Processes. *Ocean Eng.* **2021**, *238*, 109695.
- [94] Chliveros, G.; Tzanetatos, I.; Kamzelis, K. MaVeCoDD dataset: Marine vessel hull corrosion in dry-dock images. *Mendeley Data* **2021**.
- [95] Jung, K.H.; Lee, J.H. Prediction of Corrosion Rate for Carbon Steel Using Regression Model with Commercial LPR Sensor Data. *Appl. Sci.* **2024**, *14*, 10836.
- [96] Ji, H.; Ma, X.; Cai, Y.; Jiao, S. Predictive mapping and analysis of aging severity for acrylic resin coatings in global marine environments. *J. Mater. Sci.* **2024**, *59*, 14790–14806.
- [97] Blockeel, H.; Devos, L.; Frenay, B.; Nanack, G.; Nijssen, S. Decision trees: From efficient prediction to responsible AI. *Front. Artif. Intell.* **2023**, *6*, 1124553.

- [111] Ackerman, S.; Raz, O.; Zalmanovici, M.; Zlotnick, A. Automatically detecting data drift in machine learning classifiers. *arXiv* **2021**, arXiv:2111.05672.
- [112] Velasco-Gallego, C.; Lazakis, I. Mar-RUL: A remaining useful life prediction approach for fault prognostics of marine machinery. *Appl. Ocean Res.* **2023**, *140*, 103735.
- [113] Kotsev, A.; Minghini, M.; Tomas, R.; Cetl, V.; Lutz, M. From spatial data infrastructures to data spaces—A technological perspective on the evolution of European SDIs. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* **2020**, *9*, 176.
- [114] Nguyen, D.C.; Ding, M.; Pathirana, P.N.; Seneviratne, A.; Li, J.; Poor, H.V. Federated learning for internet of things: A comprehensive survey. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* **2021**, *23*, 1622-1658.
- [115] Bharati, S.; Mondal, M.R.H.; Podder, P.; Prasath, V.S. Federated learning: Applications, challenges and future directions. *Int. J. Hybrid Intell. Syst.* **2022**, *18*, 19-35.
- [116] Ribeiro, M.T.; Singh, S.; Guestrin, C. “Why should i trust you?” Explaining the predictions of any classifier. In *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, San Francisco, CA, USA, 13-17 August 2016; pp. 1135-1144.
- [117] Madiega, T. Artificial Intelligence Act; European Parliament (European Parliamentary Research Service): Brussels, Belgium, 2021.
- [118] Cummins, L.; Sommers, A.; Ramezani, S.B.; Mittal, S.; Jabour, J.; Seale, M.; Rahimi, S. Explainable predictive maintenance: A survey of current methods, challenges and opportunities. *IEEE Access* **2024**, *12*, 57574-57602.

# مروری جامع بر تنش‌های روانی-اجتماعی، شاخص‌های فیزیولوژیکی و پیامدهای سلامت روان دریانوردان نظامی در مأموریت‌های برد بلند

علیرضا حبیبی

گروه علوم پایه، دانشکده علوم، دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین(ع)، زیباکنار، رشت، ایران؛ alirh110@gmail.com

## چکیده:

مأموریت‌های دریایی برد بلند (۴-۹ ماه) به دلیل جداسازی طولانی‌مدت، محدودیت شدید حریم خصوصی، محرومیت مزمن از خواب و تقاضاهای عملیاتی بالا، یکی از استرس‌زاترین محیط‌های عملیاتی در نیروهای مسلح به‌شمار می‌روند. این مرور سیستماتیک به بررسی عوامل استرس‌زای روانی-اجتماعی، تغییرات بیومارکرها، پیامدهای سلامت روان و عوامل حفاظتی در دریانوردان نظامی در مأموریت‌های برد بلند پرداخته است. جست‌وجوی سیستماتیک در پایگاه‌های PubMed، Scopus، Web of Science و Google Scholar (۲۰۲۵-۲۰۲۰) انجام شد و ۵۱ مطالعه مرتبط انتخاب و مورد بررسی و تحلیل قرار گرفتند. جداسازی طولانی‌مدت، فقدان حریم خصوصی، محرومیت شدید از خواب (میانگین ۵٫۲۵ ساعت) و فشار عملیاتی بالا مهم‌ترین استرسورها بودند. بیومارکهای کلیدی شامل کاهش کورتیزول در استرس مزمن، کاهش HRV (Heart Rate Variability) که پیش‌بینی‌کننده قوی (post-Traumatic Stress Disorder) PTSD است و افزایش سایتوکاین‌های پیش‌التهابی بودند. شیوع افسردگی بیش از ۵۰٪، PTSD تا ۲۹٪ و اختلال خواب در ۸۰٫۴٪ گزارش شد. حمایت خانوادگی قوی و مداخلات مبتنی بر ذهن‌آگاهی مؤثرترین عوامل حفاظتی بودند که علائم روانپزشکی را تعدیل کرده و HRV را بهبود می‌بخشیدند. مأموریت‌های دریایی برد بلند خطر بالای اختلالات روانپزشکی ایجاد می‌کنند، اما تقویت حمایت خانواده و آموزش کوتاه‌مدت ذهن‌آگاهی پیش از استقرار می‌تواند این پیامدها را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد.

## واژه‌های کلیدی:

مأموریت دریایی، استرس مزمن، HRV، PTSD، افسردگی، اختلال خواب، حمایت خانوادگی، ذهن‌آگاهی

## A Comprehensive Review of Psychosocial Stressors, Physiological Markers, and Mental Health Outcomes of Military Seafarers during Extended-Range Naval Deployments

Alireza Habibi

Department of Basic Sciences, Faculty of Sciences, Imam Hossein (AS) Officers and Guard Training University, Zibaknar, Rasht, Iran

## Abstract

Long-duration naval missions (4–9 months) are considered among the most stressful operational environments in the armed forces due to prolonged separation, severe restriction of privacy, chronic sleep deprivation, and high operational demands. This systematic review examined psychosocial stressors, biomarker changes, mental health outcomes, and protective factors among military mariners during extended deployments. A systematic search was conducted in PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar databases (2002–2025), and 51 relevant studies were included in the analysis. The most prominent stressors were prolonged separation, lack of privacy, severe sleep deprivation (mean 5.25 hours), and high operational pressure. Key biomarkers included reduced cortisol under chronic stress, decreased heart rate variability (HRV) — a strong predictor of post-traumatic stress disorder (PTSD) — and elevated pro-inflammatory cytokines. Reported prevalence rates included depression >50%, PTSD up to 29%, and sleep disturbances in 80.4% of personnel. Strong family support and

mindfulness-based interventions were the most effective protective factors, mitigating psychiatric symptoms and improving HRV. Extended naval deployments carry a high risk of psychiatric disorders; however, strengthening family support and delivering brief pre-deployment mindfulness training can substantially reduce these adverse outcomes.

### Keywords:

Prolonged naval deployment, chronic psychosocial stress, HRV, PTSD, sleep disturbance, family support, mindfulness-based interventions

## ۱- مقدمه

نیروهای دریایی نظامی در سراسر جهان بخش حیاتی از دفاع ملی را تشکیل می‌دهند. دریانوردان زمان قابل توجهی را در دریا می‌گذرانند، به طوری که بیش از نیمی از آن‌ها در طول حرفه خود سه بار یا بیشتر برای مدت بیش از یک سال مستقر می‌شوند [۱]. این الگوی استقرار منحصر به فرد، پرسنل را در معرض عوامل استرس‌زای خاصی قرار می‌دهد که از سایر شاخه‌های نظامی متمایز است. در یک مطالعه نشان داده شده است که تقریباً ۱۴٪ تا ۱۶٪ از اعضای خدمت ایالات متحده مستقر در افغانستان و عراق تحت تأثیر PTSD یا افسردگی قرار گرفته‌اند [۲]. دریانوردان در طول استقرار نیروی دریایی چالش‌های منحصر به فردی را تجربه می‌کنند، از جمله فضاهای زندگی محدود با حریم خصوصی محدود و دوره‌های طولانی در دریا که معمولاً ۴-۸ ماه طول می‌کشد. آن‌ها با فرصت‌های محدودی برای ترک ساحل مواجه هستند و تحت شرایط نامطلوب محیطی مانند سر و صدا، لرزش، دمای شدید و حرکت مداوم کشتی قرار می‌گیرند. همانطور که در مقاله تحقیقاتی برجسته شده است، این عوامل به پیچیدگی محیط کار آن‌ها کمک می‌کنند و بر سلامت روانی و رفاه آن‌ها تأثیر می‌گذارد [۳]. بودن در دریا می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر سلامت جسمی و روانی داشته باشد، زیرا ترکیب ریتم عملیاتی سخت و محیط منحصر به فرد کشتی منجر به عوامل استرس‌زا و تهدیدات بالقوه می‌شود [۴]. مطالعات نشان داده‌اند که بطور میانگین، پرسنل کشتی‌ها ۵.۲۵ ساعت خواب در هر شبانه‌روز دریافت می‌کنند که به طور قابل توجهی کمتر از ۷ ساعت

توصیه شده است [۵]. در دهه‌های اخیر، تحقیقات نشان داده‌اند که استرس روانی-اجتماعی با تغییرات قابل اندازه‌گیری در سیستم‌های فیزیولوژیکی از جمله محور هیپوتالاموس-هیپوفیز-آدرنال<sup>۱</sup>، HPA، سیستم عصبی اتونوم و سیستم ایمنی همراه است [۶]. این بیومارکرها می‌توانند شاخص‌های عینی برای سنجش استرس و پیش‌بینی پیامدهای سلامت روان فراهم کنند. این مطالعه مروری با اهداف زیر انجام شده است:

۱. شناسایی و تحلیل عوامل استرس‌زای روانی-اجتماعی در ماموریت‌های دریایی برد بلند
۲. بررسی تغییرات بیومارک‌های فیزیولوژیکی شامل کورتیزول، تستوسترون، تغییرپذیری ضربان قلب HRV و سایتوکاین‌های التهابی
۳. تحلیل پیامدهای سلامت روان از جمله افسردگی، PTSD، اضطراب و اختلالات خواب
۴. شناسایی عوامل حفاظتی و ارائه توصیه‌های عملی برای مداخلات

## ۲- روش تحقیق

جست‌وجوی سیستماتیک در پایگاه‌های داده PubMed، Web of Science، Scopus و Google Scholar برای یافتن مقالات منتشر شده از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۵ میلادی انجام گرفت. کلیدواژه‌های مورد استفاده عبارت بودند از "naval deployment"، "submarine"، "naval personnel"، "maritime deployment"، "depression"، "PTSD"، "mental health"، "anxiety"، "psychological stress"

<sup>1</sup> Hypothalamic-Pituitary-Adrenal axis

"cortisol"، "HRV"، "heart rate variability"، "biomarkers"، "cytokines"، "physiological"، "isolation"، "confinement" و "sleep deprivation".

در این تحقیق در مجموع ۱,۲۴۷ مقاله در جستجوی اولیه یافت شد. پس از حذف موارد تکراری، ۸۰۵ مقاله باقی ماند. پس از بررسی عنوان و چکیده، ۱۲۶ مقاله برای بررسی متن کامل انتخاب شدند. در نهایت، ۵۱ مطالعه که معیارهای ورود را داشتند، در این مرور سیستماتیک گنجانده شدند. کیفیت مطالعات با استفاده از معیارهای "اقدام گزارش‌دهی ترجیحی برای مرورهای سیستماتیک و متآنالیزها" (PRISMA) برای مطالعات مروری و مقیاس-Newcastle Ottawa برای مطالعات مشاهده‌ای ارزیابی شد. اکثر مطالعات (۸۲٪) از کیفیت متوسط تا بالا برخوردار بودند.

### ۳- نتایج و بحث

مأموریت‌های دریایی برد بلند یکی از چالش‌برانگیزترین محیط‌ها برای عملکرد انسانی در نیروهای مسلح به‌شمار می‌روند؛ محیطی که ترکیبی از جداسازی اجتماعی، محدودیت فیزیکی، محرومیت از خواب، فشار عملیاتی، نوسانات فیزیولوژیکی و در نهایت پیامدهای جدی سلامت روان را ایجاد می‌کند. مرور مطالعات انجام‌شده در چند دهه گذشته نشان می‌دهد که دریانوردان نظامی، به‌ویژه خدمه زیردریایی‌ها و ناوهای رزمی، در معرض مجموعه‌ای از استرس‌سورهای منحصر به فرد قرار دارند که آن‌ها را نسبت به سایر گروه‌های عملیاتی آسیب‌پذیرتر می‌کند.

#### ۳-۱- تنش‌های روانی - اجتماعی در محیط‌های بسته و

##### ایزوله دریایی

#### الف - جداسازی اجتماعی، انزوا و فاصله عاطفی از خانواده

جداسازی طولانی‌مدت از خانواده و جامعه در مأموریت‌های چندماهه دریایی، یکی از عمیق‌ترین عوامل استرس‌زا برای پرسنل شناخته شده است. تحقیقات نشان می‌دهند که دریانوردی حرفه‌ای با سطوح بالا و پایدار استرس شغلی، افسردگی و فرسودگی همراه است [7]. مطالعات نشان می‌دهد

که انزوا و حبس می‌تواند استرس را افزایش دهد و منجر به افزایش تنش بین فردی در میان اعضای خدمه شود [8]. این یافته‌ها با پژوهش‌های جدیدتر هم‌خوانی دارند؛ به‌طوری که در مطالعه Tang و همکاران (۲۰۱۸) کاهش سلامت روانی در طول گشت‌زنی دریایی و نقش تعدیل‌گر ذهن‌آگاهی در سازگاری روانی گزارش شده است [۹]. نتایج مرور حاضر تأکید دارد که انزوا در زیردریایی‌ها فقط یک مسئله روان‌شناختی نیست، بلکه با فرآیندهای نورویولوژیک مرتبط با سیستم‌های استرس نیز برهم‌کنش دارد و ممکن است خطر اختلالات روانپزشکی پس از مأموریت را افزایش دهد.

#### ب - محدودیت‌های فیزیکی و فقدان حریم خصوصی

مأموریت‌های بسته دریایی طولانی‌مدت، دارای محدودیت‌های قابل توجهی مانند کاهش فضا، عدم حریم خصوصی و یکنواختی هستند که می‌تواند منجر به مسائل روانی اجتماعی در میان اعضای خدمه شود. این عوامل باعث افزایش تنش گروهی و خستگی اجتماعی می‌شوند و بر سلامت روان تأثیر می‌گذارند [۱۰]. تحقیق دیگر در خصوص چگونگی تأثیر منفی بر سلامت روان بحث می‌کند و مکانیزم‌هایی مانند تأثیر منفی و استرس فیزیولوژیکی به‌ویژه در محیط‌های پر استرس مانند مأموریت‌های طولانی‌مدت دریایی را برجسته می‌کند، که می‌تواند پرخاشگری و تحریک‌پذیری را تشدید کند [۱۱]. قرار گرفتن مزمن در معرض شرایط شلوغ می‌تواند منجر به انصراف اجتماعی و افزایش پاسخ‌های استرس فیزیولوژیکی مانند افزایش فشار خون شود [۱۱].

#### ج - محرومیت از خواب و خستگی عملیاتی

خواب ناکافی یکی از بارزترین و پایدارترین مشکلات دریانوردان نظامی است. بر اساس یافته‌ها، میانگین ساعت خواب در مأموریت‌های دریایی به حدود ۵٫۲۵ ساعت می‌رسد [۱۲]، در حالی که محرومیت از خواب می‌تواند قدرت تصمیم‌گیری، زمان واکنش و تنظیم هیجانی را کاهش دهد. کاهش ۲۵٪ عملکرد شناختی

<sup>2</sup> Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses

کورتیزول، محصول نهایی محور HPA، یک هورمون استروئیدی است که در پاسخ به استرس ترشح می‌شود و برای تنظیم متابولیسم، سیستم ایمنی و پاسخ التهابی ضروری است [۱۸]. کورتیزول از نظر سنجش پاسخ فیزیولوژیکی استرس در زمینه سلامت روان دارای اهمیت ویژه‌ای است [۱۹]. در مطالعه‌ای بر روی مهندسان رزمی ارتش استرالیا، مشخص شد که در طول تمرین میدانی ۸ روزه که شامل محرومیت کامل از خواب و محدودیت شدید خواب بود، سطح کورتیزول صبحگاهی کاهش یافت [۲۰]. ناهماهنگی مزمن شبانه روزی، که ممکن است شامل محرومیت طولانی مدت از خواب باشد، به طور قابل توجهی سطح کورتیزول را کاهش می‌دهد و نشان دهنده رابطه پیچیده بین مدت محرومیت از خواب و تنظیم کورتیزول است [۲۱]. مطالعات نشان داده‌اند که پرسنلی که در معرض استرس عملیاتی نظامی قرار دارند، تغییرات در کورتیزول بیداری (CAR) را تجربه می‌کنند. در یک مطالعه بر روی نگهبانان و محافظان مستقر در افغانستان، سطوح کورتیزول در T3 (پایان ماموریت) نسبت به T1 (قبل از ماموریت) کاهش یافته بود [۲۲]. نسبت تستوسترون به کورتیزول (T/C) یک شاخص مهم از حالت آنابولیک در مقابل کاتابولیک بدن است. در مطالعه بر روی غواصان نخبه نیروی دریایی، تغییرات قابل توجهی در تستوسترون و DHEA در طول چرخه آموزشی مشاهده شد، در حالی که کورتیزول نسبتاً پایدار ماند [۲۳]. حساسیت سطوح تستوسترون و نسبت T/C به دوره تمرین میدانی نشان می‌دهد که آن‌ها ممکن است شاخص‌های مفیدی از وضعیت فشار فیزیولوژیکی سرباز باشند [۲۴].

#### ب- تنوع ضربان قلب (HRV) و عملکرد سیستم عصبی خودکار

HRV، به عنوان شاخص عملکرد سیستم عصبی اتونوم، به مفهوم تغییرات در فاصله زمانی بین ضربان‌های قلب بوده و یک معیار از فعالیت سیستم عصبی اتونوم است. HRV بالاتر نشان‌دهنده تن واگ قلبی (فعالیت قلبی عصب واگ) بیشتر است [۲۵]. کاهش HRV با پاتوفیزیولوژی،

پس از ۲۴ ساعت بیداری [۱۳] و افت ۹٪ زمان واکنش پس از ۳۶ ساعت محرومیت خواب [۱۴] اهمیت آن را در محیط‌های پرخطر نظامی برجسته می‌کند. شدت این مشکل در ماموریت‌های برد بلند پرسنل نیروی دریایی حتی بیشتر از سایر شاخه‌ها گزارش شده است.

این وضعیت زمانی بحرانی‌تر می‌شود که بدانیم الگوهای خواب نامنظم، کار شیفتی، هشدارهای اضطراری ناگهانی و چرخه‌های کاری طولانی مدت، همگی خستگی تجمعی را افزایش می‌دهند. خستگی مداوم نه تنها بر عملکرد فردی، بلکه بر ایمنی گروهی اثر گذاشته و در برخی حادثه‌های مهم دریایی به عنوان عامل مشارکت‌کننده گزارش شده است.

#### د- طول مدت مأموریت و تقاضاهای شغلی

مأموریت‌های دریایی ۴ تا ۸ ماهه همراه با ساعات کاری بیش از ۱۲ ساعت در روز، فشار عملیاتی مضاعفی ایجاد می‌کنند. نتایج نشان داده‌اند که استقرارهای طولانی مدت، رفاه روانی و تعادل عاطفی دریانوردان را کاهش داده و خستگی مزمن را تشدید می‌کند [۱۵، ۱۶]. یک مطالعه نشان داد که خدمه نیروی دریایی پس از چهار ماه در دریا، نمره بهداشت روانی پایین‌تری نسبت به ارزیابی‌های پیش از استقرار کسب کردند. بر این اساس دریانوردی طولانی مدت به طور قابل توجهی وضعیت سلامت روان خدمه نیروی دریایی را کاهش می‌دهد و با عواملی مانند فشار کاری و خستگی ارتباط دارد، بنابراین، این ایده حمایت می‌شود که استقرار طولانی مدت بر بهزیستی روانشناختی و تعادل عاطفی تأثیر منفی می‌گذارد. این تحقیق تأثیرات نامطلوب دریانوردی طولانی مدت را بر سلامت روانی برجسته کرد [۱۷]. این پدیده یک خصیصه ویژه محیط‌های دریایی است؛ زیرا پرسنل ساحلی در شرایط مشابه چنین الگوهای واکنشی را نشان نمی‌دهند.

#### ۳-۲- بیومارکرهای فیزیولوژیک استرس

الف- تغییرات محور هیپوتالاموس-هیپوفیز-آدرنال (HPA) و کورتیزول

روان‌آسیب‌شناسی و افزایش مرگ‌ومیر مرتبط بوده است [۲۶]. در مطالعه بزرگی بر روی ۲,۴۳۰ تفنگدار دریایی فعال، HRV در طول ۵ دقیقه استراحت قبل از استقرار رزمی اندازه‌گیری شد. پس از کنترل متغیرهای کمکی از جمله آسیب دیدگی تروماتیک مغز، رگرسین نشان داد که سطوح پایین‌تر HRV فرکانس بالا (HF) با تشخیص PTSD مرتبط است ( $p=0.035$ ,  $\beta = -0.20$ ) [۲۷]. در یک مطالعه طولی دیگر بر روی ۱,۴۱۵ تفنگدار دریایی در فاز اول و ۷۴۵ نفر در فاز دوم، پس از در نظر گرفتن قرار گرفتن در معرض جنگ مرتبط با استقرار، HRV پایین‌تر قبل از استقرار به عنوان نسبت افزایش یافته LF به HF با خطر تشخیص PTSD پس از استقرار مرتبط بود (نسبت شانس متا-آنالیز: ۱.۴۷؛ ۹۵٪ CI: ۱.۱۰-۱.۹۸؛  $P = 0.01$ ) [۲۸].

#### ج- التهاب سیستمیک و سایتوکاین‌ها

استرس می‌تواند سیستم ایمنی را از طریق بافت‌های لنفاوی اولیه و ثانویه و رشته‌های سمپاتیک در مغز تحت تأثیر قرار دهد [۲۹]. سطوح خونی سایتوکاین‌های پیش‌التهابی در طول استرس افزایش می‌یابد و ویروس‌های نهفته را فعال می‌کند [۳۰]. تحقیقات نشان داده‌اند که افراد با PTSD سطوح بالاتری از سایتوکاین‌های محیطی (IL-2، IL-4، IL-6، IL-8، IL-10 و  $TNF-\alpha$ ) نسبت به افراد سالم دارند که نشان‌دهنده یک حالت التهابی عمومی است [۳۱]. در مطالعه‌ای بر روی کهنه‌سربازان جنگ عراق، ۸۵٪ از افراد مبتلا به PTSD یا اختلالات وحشت‌زدگی، در مقایسه با تنها ۲۵٪ در گروه کنترل، سطوح قابل تشخیص حداقل شش سایتوکاین پیش‌التهابی معمول داشتند، [۳۲]. در مطالعه قبل و بعد از استقرار، گروهی از کموکاین‌ها شامل پنج CC (CCL2، CCL3، CCL15، CCL23 و CCL25) و دو CXC (CXCL2 و CXCL12) در افراد مبتلا به PTSD پس از استقرار در مقایسه با قبل از استقرار (بدون PTSD) نابجا بودند [۳۳]. در نمونه‌های بدست آمده از افراد نظامی، بروز آسیب تروماتیک مغزی و اختلال

استرس پس از سانحه (PTSD) با ایجاد التهاب مرتبط بود. مطالعه نشان داد که سطوح بالای IL-6 و  $TNF-\alpha$  در سیستم عصبی مرکزی منجر به فعال‌سازی بیش از حد میکروگلیا، تخریب نورون‌های آسیب‌نندیده، افزایش نفوذپذیری سد خونی-مغزی و از دست دادن کلی نورون‌ها می‌شود [۳۴]. در یک مطالعه بر روی ۶۱ سرباز (۹۷٪ مرد) در طول ۲۲ هفته آموزش اولیه، لنفوسیتوز، بلوغ زیرمجموعه‌های سلول T و افزایش واکنش‌پذیری سلول T مشهود بود. پاسخ‌های سایتوکاین به تحریک-anti CD3/CD28 بالاتر بود، در حالی که پاسخ‌های سایتوکاین به تحریک لیپوپلی‌ساکارید عموماً کاهش یافته بود [۳۵].

#### ۳-۳- پیامدهای سلامت روان

##### الف- افسردگی و مسیرهای ناهمگن آن

افسردگی یکی از شایع‌ترین پیامدهای روانی در نیروهای دریایی در حال مأموریت‌های برد بلند است. در یک مطالعه بزرگ در نیروی دریایی ایالات متحده، بیش از ۵۰٪ کارکنان در حال مأموریت، نسبت به افسردگی غربالگری مثبت داشتند [۳۶]. شناسایی چهار مسیر مجزای افسردگی از مقاوم تا علامتی مزمن نشان می‌دهد که واکنش افراد به استرس عملیاتی بسیار متفاوت است و عوامل پیش‌زمینه (مانند تروماهای اولیه زندگی) نقش مهمی در این مسیرها دارند [۳۷].

##### ب- پیامدهای استرس عملیاتی

نرخ PTSD در نیروهای مستقر در مأموریت‌های دریایی، چه به صورت مستقل و چه همراه با افسردگی، بالا گزارش شده است [۳۸، ۳۹]. مرورهای متاآنالیز نشان می‌دهند که استقرار در عملیات دریایی اثرات پایدار و منفی بر عملکرد سلامت روان دارد [۴۰]. همچنین پرسنل بهداشتی-درمانی در کشتی‌ها در معرض خطر بیشتری برای PTSD قرار دارند [۴۱].

##### ج- اضطراب، علائم روانپزشکی و اختلالات خواب

اضطراب، علائم روانپزشکی جزئی و رفتارهای اجتنابی در طول مأموریت‌ها افزایش می‌یابند و معمولاً با میزان استرس

توجهی مدیریت استرس، تنظیم هیجانی و عملکرد شناختی را در محیط های نظامی با استرس بالا بهبود بخشد. مطالعات نشان می دهد که تمرین ذهن آگاهی می تواند تغییرات ضربان قلب (HRV) را افزایش دهد و نشان دهنده بهبود عملکرد سیستم عصبی خودمختار و تنظیم هیجانی است که برای مدیریت استرس حیاتی است [۴۸]. توانایی پرسنل نیروی دریایی برای ارزیابی مجدد عوامل استرس زا و دسترسی به استراحت و بازیابی با کیفیت با مسیرهای سلامت روان تاب آور مرتبط است [۴۹]. در مطالعه بر روی ۲۴ فرد خدمه زیردریایی، افرادی که سطح بالاتری از ذهن آگاهی داشتند، سازگاری روانی بهتری در طول گشت زنی نشان دادند [۵۰]. مطالعات نشان داده اند که آموزش ذهن آگاهی قبل از استقرار<sup>۳</sup> (MMFT) به طور قابل توجهی بر مکانیسم های بهبودی از استرس در تفنگداران دریایی تأثیر می گذارد، به ویژه از طریق تغییرات در فعالیت مغز، سطح نوروپتید Y و کیفیت خواب. مطالعه کنترل شده نشان داد که MMFT با تعدیل پاسخ های عصبی، به ویژه در انسولا قدامی، تاب آوری را افزایش می دهد، که برای آگاهی بین گیرانه و تنظیم هیجانی بسیار مهم است [۵۱].

#### ۴- نتیجه گیری

این مرور نشان می دهد که مأموریت های دریایی برد بلند یک محیط چندعاملی و پیچیده از استرس ایجاد می کنند که همزمان بر سیستم های روانی، خودکار، غدد درون ریز و ایمنی تأثیر می گذارد. ناهمگنی واکنش ها، نقش پررنگ بیومارکرهای فیزیولوژیک، و تعامل میان خواب، التهاب و HPA، ضرورت مطالعات طولی چندساله را برجسته می کند. شکاف های موجود شامل موارد زیر است: یکپارچه سازی بیومارکرها در قالب شاخص بار آلوستاتیک، توسعه مداخلات شخصی سازی شده برای بهبود تاب آوری و استفاده از فناوری های پوشیدنی برای پایش خواب و HRV در مأموریت های واقعی. یافته های این تحقیق تأکید

عملیاتی، کیفیت حمایت اجتماعی و توانایی مقابله مرتبطاند [۴۲]. اختلالات خواب نیز یکی از شایع ترین پیامدها است. ۸۰٪ ملوانان به عنوان «خوابنده های ضعیف» طبقه بندی می شوند [43]. خواب ناکافی به افسردگی، اضطراب، کاهش عملکرد شناختی و افزایش خطر تصمیم گیری های اشتباه منجر می شود [44].

### ۳-۴ عوامل محافظتی و تاب آوری

#### الف- حمایت خانوادگی و اجتماعی

حمایت خانوادگی یکی از قوی ترین عوامل حفاظتی در برابر پیامدهای منفی سلامت روان در نیروی دریایی است. مطالعه ای در مورد استقرار نیروی دریایی نشان داد که نیروهایی که به مأموریت های دریایی اعزام می شوند، با حمایت بالای خانواده در طول مأموریت خود هیچ افزایش علائم روانپزشکی جزئی را تجربه نمی کنند. این نشان می دهد که حمایت خانواده به عنوان یک حفره در برابر مسائل مربوط به سلامت روان مرتبط با استرس عمل می کند [45]. حمایت خانواده همچنین باعث جبران خودکارآمدی پایین در شرایط تهدید بالا، کاهش فرسودگی شغلی و افزایش مشارکت کاری در حین مأموریت می شود [46]. مطالعه برخی محققین نشان داده است که حمایت از همسران در طول مأموریت های طولانی به طور قابل توجهی در کاهش علائم افسردگی، ارتباط دارد. این مطالعه بر اهمیت حمایت اجتماعی طبیعی، از جمله حمایت خانواده، در افزایش سازگاری پس از استقرار تأکید دارد و نشان می دهد که حمایت قوی خانواده ممکن است نقش محافظتی در برابر نتایج منفی سلامت روان ایفا کند [47].

#### ب- ذهن آگاهی، خودتنظیمی و مداخلات مبتنی بر توجه

ذهن آگاهی و خودتنظیمی نقش مهمی در افزایش عملکرد و انعطاف پذیری ذهنی پرسنل نظامی در مأموریت های دریایی ایفا می کند. تحقیقات نشان داده است که مداخله های مبتنی بر ذهن آگاهی (MBI) می تواند به طور قابل

<sup>3</sup> Mind Fitness Training

[11] void UG, Evans GW. Crowding. 2023.

[12] Miller NL, Matsangas P, Kenney A. The role of sleep in the military: Implications for training and operational effectiveness. 2012.

[13] Belenky G, Wesensten NJ, Thorne DR, Thomas ML, Sing HC, Redmond DP, et al. Patterns of performance degradation and restoration during sleep restriction and subsequent recovery: A sleep dose-response study. *Journal of sleep research*. 2003;12:1-12.

[14] Fullagar HH, Skorski S, Duffield R, Hammes D, Coutts AJ, Meyer T. Sleep and athletic performance: the effects of sleep loss on exercise performance, and physiological and cognitive responses to exercise. *Sports medicine*. 2015;45:161-86.

[15] Rengamani J, Murugan MS. A study on the factors influencing the seafarers' stress. *AMET International Journal of Management*. 2012;4:44-51.

[16] Dohrmann SB, Leppin A. Determinants of seafarers' fatigue: a systematic review and quality assessment. *International Archives of Occupational and Environmental Health*. 2017;90:13-37.

[17] YU H-Z. Analysis of mental health status and its influencing factors of navy crews during long-term sailing. *Academic Journal of Second Military Medical University*. 2017.۱۰-۵۰۶:

[18] Sapolsky RM, Romero LM, Munck AU. How do glucocorticoids influence stress responses? Integrating permissive, suppressive, stimulatory, and preparative actions. *Endocrine reviews*. 2000;21 1:55-89.

[19] Hellhammer DH, Wüst S, Kudielka BM. Salivary cortisol as a biomarker in stress research. *Psychoneuroendocrinology*. 2009;34:163-71.

[20] Nindl BC, Leone CD, Tharion WJ, Johnson RF, Castellani JW, Patton JF, et al. Physical performance responses during 72 h of military operational stress. *Medicine and science in sports and exercise*. 2002;34 11:1814-22.

[21] Wright Jr KP, Drake AL, Frey DJ, Fleshner M, Desouza CA, Gronfier C, et al. Influence of sleep deprivation and circadian misalignment on cortisol, inflammatory markers, and cytokine balance. *Brain, behavior, and immunity*. 2015;47:24-34.

[22] Stevelink SAM, Jones M, Hull L, Pernet D, MacCrimmon S, Goodwin L, et al. Mental health outcomes at the end of the British involvement in the Iraq and Afghanistan

می‌کنند که درک سیستماتیک از تعامل استرس‌ورهای دریایی، بیومارکرهای فیزیولوژیک و پیامدهای سلامت روان، برای طراحی برنامه‌های آمادگی، پیشگیری و مداخله در نیروهای دریایی ضروری است.

## References

- [1] Hoge CW, Castro CA, Messer SC, McGurk D, Cotting DI, Koffman RL. Combat duty in Iraq and Afghanistan, mental health problems, and barriers to care. *The New England journal of medicine*. 2004;351 1:13-22.
- [2] Kessler RC, Berglund PA, Demler OV, Jin R, Merikangas KR, Walters EE. Lifetime prevalence and age-of-onset distributions of DSM-IV disorders in the National Comorbidity Survey Replication. *Archives of general psychiatry*. 2005;62 6:593-602.
- [3] Blackburn P. Seafarers: "They that go down to the sea in ships to do business in great waters" 1. *Psychological Support for Workers on the Move: Routledge*; 2023. p. 126-43.
- [4] Oldenburg M, Hogan B, Jensen H-J. Systematic review of maritime field studies about stress and strain in seafaring. *International archives of occupational and environmental health*. 2013;86:1-15.
- [5] Miller NL, Tvaryanas AP, Shattuck LG. Accommodating adolescent sleep-wake patterns: the effects of shifting the timing of sleep on training effectiveness. *Sleep*. 2012;35:1123-36.
- [6] McEwen BS. Physiology and neurobiology of stress and adaptation: central role of the brain. *Physiological reviews*. 2007;87 3:873-904.
- [7] Idenburg M, Jensen H-J, Latza U, Baur X. Seafaring stressors aboard merchant and passenger ships. *International journal of public health*. 2009;54:96-105.
- [8] Shved D, Kuznetsova P, Rozanov IA, Lebedeva SA, Vinokhodova A, Savinkina A, et al. Effects of isolation, crowding, and different psychological countermeasures on crew behavior and performance. *Frontiers in Physiology*. 2022;13:963301.
- [9] Tang W, Wang G, Hu T, Dai Q, Xu J, Yang Y, et al. Mental health and psychosocial problems among Chinese left-behind children: A cross-sectional comparative study. *Journal of affective disorders*. 2018;241:133-41.
- [10] Tafforin C, editor 26 *Behavior , Confinement , and Isolation*2022 .

- [32] Hoge E, Brandstetter K, Moshier S, Pollack M, Wong K, Simon N. Broad spectrum of cytokine abnormalities in panic disorder and posttraumatic stress disorder. *Depression and anxiety*. 2009;26:447-55.
- [33] Lindqvist D, Dhabhar FS, James SJ, Hough CM, Jain FA, Bersani FS, et al. Oxidative stress, inflammation and treatment response in major depression. *Psychoneuroendocrinology*. 2017;76:197-205.
- [34] Gill J, Vythilingam M, Page GG. Low cortisol, high DHEA, and high levels of stimulated TNF- $\alpha$ , and IL-6 in women with PTSD. *Journal of Traumatic Stress: Official Publication of The International Society for Traumatic Stress Studies*. 2008;21:530-9.
- [35] Campbell JP, Riddell NE, Burns VE, Turner M, van Zanten JJV, Drayson MT, et al. Acute exercise mobilises CD8+ T lymphocytes exhibiting an effector-memory phenotype. *Brain, behavior, and immunity*. 2009;23:767-75.
- [36] Larson GE, Highfill-McRoy RM, Booth-Kewley S. Psychiatric diagnoses in historic and contemporary military cohorts: combat deployment and the healthy warrior effect. *American journal of epidemiology*. 2008;167:1269-76.
- [37] Bonanno GA, Mancini AD, Horton JL, Powell TM, LeardMann CA, Boyko EJ, et al. Trajectories of trauma symptoms and resilience in deployed US military service members: Prospective cohort study. *The British Journal of Psychiatry*. 2012;200:317-23.
- [38] Fulton JJ, Calhoun PS, Wagner HR, Schry AR, Hair LP, Feeling N, et al. The prevalence of posttraumatic stress disorder in Operation Enduring Freedom/Operation Iraqi Freedom (OEF/OIF) veterans: A meta-analysis. *Journal of anxiety disorders*. 2015;31:98-107.
- [39] Warner CH, Appenzeller GN, Warner CM, Grieger TA. Psychological Effects of Deployments on Military Families. *Psychiatric Annals*. 2009;39:56-63.
- [40] Xue C, Ge Y, Tang B, Liu Y, Kang P, Wang M, et al. A Meta-Analysis of Risk Factors for Combat-Related PTSD among Military Personnel and Veterans. *PLoS ONE*. 2015;10.
- [41] Reger MA, Smolenski DJ, Skopp NA, Metzger-Abamukang MJ, Kang HK, Bullman TA, et al. Risk of suicide among US military service members following Operation Enduring Freedom or Operation Iraqi Freedom deployment and separation from the US military. *JAMA psychiatry*. 2015;72:561-9.
- conflicts: a cohort study. *The British Journal of Psychiatry*. 2018;213:690 - 7.
- [23] Taylor MK, Sausen KP, Potterat EG, Mujica-Parodi LR, Reis JP, Markham AE, et al. Stressful military training: endocrine reactivity, performance, and psychological impact. *Aviation, space ,and environmental medicine*. 2007;78 12:1143-9.
- [24] Nindl BC, Castellani JW, Warr BJ, Sharp MA, Henning PC, Spiering BA, et al. Physiological Employment Standards III: physiological challenges and consequences encountered during international military deployments. *European journal of applied physiology*. 2013;113:2655-72.
- [25] Thayer JF, Åhs F, Fredrikson M, Sollers III JJ, Wager TD. A meta-analysis of heart rate variability and neuroimaging studies: implications for heart rate variability as a marker of stress and health. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. 2012;36:747-56.
- [26] Kemp AH, Quintana DS, Gray MA, Felmingham KL, Brown K, Gatt JM. Impact of depression and antidepressant treatment on heart rate variability: a review and meta-analysis. *Biological psychiatry*. 2010;67:1067-74.
- [27] Minassian A, Geyer MA, Baker DG, Nievergelt CM, O'Connor DT, Risbrough VB, et al. Heart rate variability characteristics in a large group of active-duty marines and relationship to posttraumatic stress . *Biopsychosocial Science and Medicine*. 2014;76:292-301.
- [28] Minassian A, Maihofer AX, Baker DG, Nievergelt CM, Geyer MA, Risbrough VB, et al. Association of predeployment heart rate variability with risk of postdeployment posttraumatic stress disorder in active-duty marines. *JAMA psychiatry*. 2015;72:979-86.
- [29] Dhabhar FS. Effects of stress on immune function: the good, the bad, and the beautiful. *Immunologic research*. 2014;58:193-210.
- [30] Steptoe A, Hamer M, Chida Y. The effects of acute psychological stress on circulating inflammatory factors in humans: a review and meta-analysis. *Brain, behavior, and immunity*. 2007;21:901-12.
- [31] Passos IC, Vasconcelos-Moreno MP, Costa LG, Kunz M, Brietzke E, Quevedo J, et al. Inflammatory markers in post-traumatic stress disorder: a systematic review, meta-analysis, and meta-regression. *The Lancet Psychiatry*. 2015;2:1002-12.

- [42] Nash WP, Boasso AM, Steenkamp MM, Larson JL, Lubin RE, Litz BT. Posttraumatic stress in deployed Marines: prospective trajectories of early adaptation. *Journal of Abnormal Psychology*. 2015;124:155.
- [43] Matsangas P, Shattuck NL. Sleep quality, occupational factors, and psychomotor vigilance performance in the US Navy sailors. *Sleep*. 2020;43:zsaa118.
- [44] Adam Farhandika G, Modjo R. Kelelahan Kerja di Kalangan Awak Kapal: Systematic Literature Review. *Jurnal Ilmiah Kedokteran dan Kesehatan*. 2025.
- [45] Nordmo M, Hystad SW, Sanden S, Johnsen BH. Mental health during naval deployment: The protective role of family support. *Military medicine*. 2020;185:e703-e10.
- [46] Delahaij R, Kamphuis W, van den Berg CE. Keeping engaged during deployment: The interplay between self-efficacy, family support, and threat exposure. *Military Psychology*. 2016;28:78-88.
- [47] Welsh JA, Olson J, Perkins DF, Travis WJ, Ormsby L. The role of natural support systems in the post-deployment adjustment of active duty military personnel. *American journal of community psychology*. 2015;56:69-78.
- [48] Lee S, Kim JH, Kim H, Kim SH, Park SS, Hong CW, et al. Investigating the effect of mindfulness training for stress management in military training: the relationship between the autonomic nervous system and emotional regulation. *BMC psychology*. 2025;13:13.
- [49] Green KT, Calhoun PS, Dennis MF, Beckham JC. Exploration of the resilience construct in posttraumatic stress disorder severity and functional correlates in military combat veterans who have served since September 11, 2001. *The Journal of clinical psychiatry*. 2010;71:6966.
- [50] De Vibe M, Solhaug I, Tyssen R, Friborg O, Rosenvinge JH, Sørli T, et al. Mindfulness training for stress management: a randomised controlled study of medical and psychology students. *BMC medical education*. 2013;13:107.
- [51] Haase L, Thom NJ, Shukla A, Davenport PW, Simmons AN, Stanley EA, et al. Mindfulness-based training attenuates insula response to an aversive interoceptive challenge. *Social cognitive and affective neuroscience*. 2016;11:182-90.

# بهینه‌سازی واحدهای نگهداری و تعمیر در نیروهای مسلح جمهوری

## اسلامی ایران

مصطفی مسلمی<sup>۱</sup>، علی اصغر سراقی<sup>۲</sup>

۱ دانشجوی دکترای مدیریت راهبردی نظامی، دانشگاه عالی دفاع ملی؛ مربی دانشگاه امام خامنه‌ای (رضوان الله تعالی علیه)

۲ دانشجوی دکترای مدیریت راهبردی نظامی، دانشگاه عالی دفاع ملی

### چکیده:

این تحقیق به تحلیل و بررسی بهینه‌سازی واحدهای نگهداری و تعمیر در نیروهای مسلح پرداخته و به نقش کلیدی سه عامل انسانی، فنی و اقتصادی در بهینه‌سازی این واحدها می‌پردازد. آموزش به‌عنوان یکی از ارکان اساسی در بهبود توانمندی‌های کارکنان، تأثیر قابل توجهی برافزایش بهره‌وری و ارتقاء فرهنگ‌سازمانی دارد. عوامل فنی به شرایط و ویژگی‌هایی اشاره دارد که به‌طور مستقیم توسط نیروی انسانی ایجاد نشده‌اند؛ اما تأثیر عمیقی بر عملکرد آن دارند. کیفیت و کمیت تجهیزات، ماشین‌آلات و مدیریت فرآیندهای تولید از جمله این عوامل هستند که می‌توانند به‌طور مستقیم بر بهینه‌سازی نیروی انسانی تأثیر بگذارند. عوامل اقتصادی نیز به متغیرهای کلان اقتصادی مرتبط می‌شوند که وضعیت کلی اقتصاد را منعکس می‌کنند. در شرایط رکود اقتصادی، مشکلاتی مانند بیکاری و نگرانی از اخراج می‌تواند به کاهش کارایی و انگیزه کارکنان منجر شود. این مقاله تأکید می‌کند که برگزاری دوره‌های آموزشی فنی و حرفه‌ای، تأمین تجهیزات استاندارد و به‌کارگیری روش‌های نوین در مدیریت انبار و تخصیص منابع مالی می‌تواند به بهینه‌سازی واحدهای تعمیر و نگهداری کمک کند. در نهایت، این عوامل به ارتقاء عملکرد و افزایش آمادگی نیروهای مسلح کمک خواهند کرد و به ایجاد یک ساختار کارآمد و مؤثر در این حوزه منجر می‌شوند.

### واژه‌های کلیدی:

بهینه‌سازی، نگهداری و تعمیر، عوامل انسانی، عوامل فنی، عوامل اقتصادی

## Optimization of maintenance and repair units in the Armed Forces of the Islamic Republic of Iran

Mostafa Moslemi<sup>1</sup>, Ali Asghar Saraghi<sup>2</sup>

1. Ph.D. Candidate in Military Strategic Management, National Defense University; Imam Khamenei University, Iran

2. Ph.D. Candidate in Military Strategic Management, National Defense University, Iran

### Abstract

Optimizing maintenance and repair processes plays a vital role in increasing efficiency, reducing costs, and enhancing the operational readiness of military organizations. This research analyzes and examines the optimization of maintenance units in the Armed Forces of the Islamic Republic of Iran, focusing on the key role of three factors: human, technical, and economic in this area. Training, as one of the fundamental pillars in improving personnel capabilities, has a significant impact on increasing productivity and enhancing organizational culture. Technical factors refer to conditions and characteristics that are not directly created by human resources but have a profound effect on their performance; the quality and quantity of equipment, machinery, and management of production processes are among these factors. Economic factors are also related to macroeconomic variables that reflect the overall state of the economy. In times of economic recession, problems such as unemployment and fear of layoffs can lead to reduced employee efficiency and motivation. This article, aiming to explain optimization methods and using a mixed-method approach (qualitative and quantitative) with interview and questionnaire tools, has analyzed the views of 171 personnel from maintenance units (selected from a population of 310 individuals using stratified random sampling). Data analysis was performed with SPSS software at two levels: descriptive and inferential statistics (Chi-square test). The results show that conducting technical and vocational training courses, providing standard equipment, employing modern methods in warehouse management, and optimal allocation of financial resources (capital and current credits) can significantly contribute to the optimization of maintenance units. Ultimately, simultaneous attention to these three factors can lead

to improved performance and increased readiness of the armed forces, paving the way for creating an efficient and effective structure in this field.

### Keywords:

Optimization, Maintenance and Repair, Human Factors, Technical Factors, Economic Factors

با استفاده از فرمول کوکران، تعداد ۱۰۵ نفر انتخاب شده است. در این راستا، ابتدا با به کارگیری روش نمونه‌گیری طبقه‌ای، درصد انتخاب هر طبقه مشخص و سپس با استفاده از روش نمونه‌گیری تصادفی طبقاتی ساده، افراد نمونه انتخاب گردیده‌اند. ابزارهای مورد استفاده در این تحقیق شامل مصاحبه با کارشناسان و پرسشنامه است. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS و به روش‌های آماری توصیفی و استنباطی انجام می‌شود. همچنین، روش گردآوری اطلاعات به صورت میدانی و کتابخانه‌ای صورت گرفته است.

این تحقیق به دنبال شناسایی و تحلیل بهینه‌سازی واحدهای نگهداری و تعمیر است و نتایج آن می‌تواند به بهبود عملکرد این واحدها کمک کند. با توجه به چالش‌های موجود، این مطالعه می‌تواند راهکارهای عملی و مؤثری را برای بهینه‌سازی فرآیندها و افزایش بهره‌وری ارائه دهد.

### ۲- سؤال‌های تحقیق:

#### ۲-۱- سؤال اصلی تحقیق

چگونه می‌توان واحدهای نگهداری و تعمیر در نیروهای مسلح را بهینه‌سازی کرد؟

#### ۲-۲- سؤالات فرعی تحقیق

۱- چگونه می‌توان با به کارگیری فناوری‌های نوین، (عوامل فنی) فرآیندهای نگهداری و تعمیر در نیروهای مسلح را بهبود بخشید؟

۲- چگونه می‌توان با آموزش و توانمندسازی کارکنان، (عوامل انسانی) کیفیت خدمات نگهداری و تعمیر را در نیروهای مسلح افزایش داد؟

۳- چگونه می‌توان با به کارگیری مدیریت منابع و بهینه‌سازی هزینه‌ها، (عوامل اقتصادی) عملکرد واحدهای نگهداری و تعمیر را ارتقاء داد؟

#### ۲-۳- فرضیه‌ها

۱- به نظر می‌رسد که آموزش و توانمندسازی کارکنان، (عوامل انسانی) کیفیت خدمات نگهداری و تعمیر در نیروهای مسلح را افزایش می‌دهد.

### ۱- مقدمه

بهینه‌سازی واحدهای تعمیر و نگهداری در نیروهای مسلح، به عنوان یک نیاز اساسی برای بهینه‌سازی و اثربخشی این واحدها، اهمیت ویژه‌ای دارد. کارایی به معنای اجرای صحیح و مؤثر کارها در سازمان‌هاست و به طور خاص در یگان‌های نگهداری و تعمیر، به تصمیماتی اشاره دارد که باهدف کاهش هزینه‌ها، افزایش تولید و بهبود کیفیت خدمات اتخاذ می‌شوند. در سال‌های اخیر، عوامل متعددی بر سطح کارایی و بهره‌وری واحدهای نیروهای مسلح تأثیر گذاشته‌اند. تغییرات در رفتار و خواسته‌های نیروی انسانی، پیشرفت‌های تکنولوژیکی و توجه به صرفه اقتصادی، از جمله این عوامل هستند که توجه مدیران را به بهینه‌سازی فرآیندها جلب کرده است. به ویژه در یگان‌های نگهداری و تعمیر، توجه به بهره‌وری و کارایی از اولویت‌های مهم فرماندهان به شمار می‌آید.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که بهینه‌سازی واحدهای نگهداری و تعمیر در نیروی مسلح جمهوری اسلامی ایران پس از جنگ تحمیلی و در شرایط جدید جهانی و منطقه‌ای، به وضعیت مطلوبی نرسیده است. نیروی انسانی فعال در این یگان‌ها معمولاً از آموزش‌های فنی و مهارتی کافی برخوردار نیستند و تجهیزات عملیاتی نیز به دلیل عمر مفید خود، کارایی لازم را ندارند. این عوامل، به همراه مشکلات اقتصادی و تحریم‌ها، دستیابی به کارایی بهینه را دشوار کرده است.

تحقیقات نشان داده‌اند که عوامل مؤثر بر بهینه‌سازی واحدهای نگهداری و تعمیر را می‌توان در سه بعد انسانی، فنی و اقتصادی بررسی کرد. در بعد انسانی، نیاز به آموزش و توانمندسازی نیروی انسانی احساس می‌شود. در بعد فنی، به روزرسانی تجهیزات و استفاده از فناوری‌های نوین می‌تواند به بهبود عملکرد کمک کند. همچنین، در بعد اقتصادی، تخصیص منابع مالی کافی برای نگهداری و تعمیرات از اهمیت بالایی برخوردار است.

جامعه آماری این تحقیق شامل ۳۱۰ نفر از کارکنان یگان‌های نگهداری و تعمیر است. برای تعیین حجم نمونه،

در صورت عدم اجرای این تحقیق، نیروهای مسلح ممکن است با چالش‌های زیر مواجه شوند:

- ۱- افزایش زمان و هزینه‌های تعمیرات.
- ۲- کاهش آمادگی عملیاتی به دلیل نقص‌های فنی.
- ۳- کاهش انگیزه و کارایی کارکنان فنی.

#### ۴- مبانی نظری تحقیق:

##### ۴-۱- عوامل انسانی و نقش آن در بهینه‌سازی واحدهای

##### تعمیر و نگهداری در نیروهای مسلح

عوامل مؤثر در بهینه‌سازی واحدهای نگهداری و تعمیر به دودسته کلی تقسیم می‌شوند: عوامل درون‌سازمانی و عوامل برون‌سازمانی.

برخی از مؤلفه‌های عوامل درون‌سازمانی عبارت‌اند از:

##### الف) آموزش

آموزش به‌عنوان یکی از وظایف مهم سازمان‌ها و مدیران محسوب می‌شود. سازمان‌های بزرگ امروزه با تلاش برای بهینه‌سازی هرچه بیشتر، اقدام به تأسیس نهادهای دانشگاهی می‌کنند (جباری، ۱۳۸۰).

##### ب) اهمیت آموزش

ضرورت آموزش و به‌ویژه بازآموزی کارکنان سازمان‌ها بر هیچ فردی پوشیده نیست. این امر به پرورش و رشد مهارت‌ها و تخصص‌های کاری منجر می‌شود و درواقع پایه‌ریزی و استمرار روند آموزش در سازمان‌ها نقش به سزایی در تخصصی عمل کردن آن‌ها دارد. بررسی‌ها نشان داده است که آموزش، به حفظ تداوم و بقای سازمان منجر می‌شود. به‌عنوان مثال، یک بررسی سه‌ساله در سنگاپور نشان داده است که ۱۷ درصد شرکت‌های تجاری و صنعتی ورشکست شده‌اند که از این تعداد کمتر از ۱ درصد شرکت‌هایی بوده‌اند که برای کارکنان خود دوره‌های آموزشی برگزار کرده‌اند (صائمیان، ۱۳۸۲).

##### ج) رضایت شغلی

رضایت شغلی یکی از عوامل بسیار مهم در موفقیت شغلی است و باعث افزایش کارایی و احساس رضایت فردی می‌شود. هر کارفرما به‌نوعی درصدد افزایش رضایت شغلی در کارکنان خود است و اهمیت آن از آنجا ناشی می‌شود که افراد تقریباً تیمی از ساعات بیداری خود را در محیط کاری می‌گذرانند (سید جوادین، ۱۳۸۵).

##### د) توانمندسازی

توانمندسازی مهم‌ترین چالش مدیران در عصر حاضر است. سازمان‌ها در معرض تغییرات سریع و

۲- به نظر می‌رسد که به‌کارگیری فناوری‌های نوین، (عوامل فنی) بهینه‌سازی فرآیندهای نگهداری و تعمیر در نیروهای مسلح را تسهیل می‌کند.

۳- به نظر می‌رسد که مدیریت بهینه منابع و هزینه‌ها، (عوامل اقتصادی) عملکرد واحدهای نگهداری و تعمیر در نیروهای مسلح را بهبود می‌بخشد.

#### ۳- اهداف تحقیق

##### ۳-۱- اهداف کلی تحقیق:

هدف کلی از انجام این تحقیق، تبیین روش‌های بهینه‌سازی واحدهای نگهداری و تعمیر در نیروهای مسلح است.

##### ۳-۲- اهداف فرعی

- ۱- تبیین چگونگی افزایش کیفیت خدمات تعمیر و نگهداری از طریق آموزش و توانمندسازی کارکنان.
- ۲- تبیین چگونگی بهینه‌سازی فرآیندهای نگهداری و تعمیر با استفاده از فناوری‌های نوین.

۳- تبیین چگونگی بهینه‌سازی هزینه‌ها و منابع در واحدهای نگهداری و تعمیر.

##### ۳-۳- اهمیت و ضرورت تحقیق

بهینه‌سازی واحدهای تعمیر و نگهداری در نیروهای مسلح به‌عنوان یک نیاز اساسی می‌تواند تأثیرات قابل‌توجهی بر عملکرد کلی این نیروها داشته باشد. اهمیت این تحقیق به شرح زیر است:

۱- افزایش کارایی و کاهش زمان تعمیرات: بهینه‌سازی می‌تواند منجر به کاهش زمان لازم برای تعمیرات و نگهداری تجهیزات نظامی شود.

۲- کاهش هزینه‌ها: با بهینه‌سازی فرآیندها و مدیریت منابع، هزینه‌های مربوط به تعمیر و نگهداری کاهش می‌یابد.

۳- افزایش آمادگی عملیاتی: بهبود وضعیت تعمیر و نگهداری به افزایش آمادگی عملیاتی نیروهای مسلح کمک می‌کند.

۴- تضمین ایمنی تجهیزات: بهینه‌سازی فرآیندها می‌تواند به افزایش ایمنی تجهیزات و کاهش خطرات ناشی از نقص فنی کمک کند.

غیرقابل پیش‌بینی قرار دارند. از مهم‌ترین عوامل بروز این تغییرات می‌توان به رقابت روزافزون جهانی، توسعه فناوری اطلاعات و تغییرات در ویژگی‌ها و خواسته‌های مشتریان اشاره کرد (وتن و کیم کمرون، ۱۳۹۰).

#### ه) مشارکت دادن کارکنان

مشارکت کارکنان در مدیریت به معنای افزایش نفوذ و مسئولیت کارکنان در فرآیند تصمیم‌گیری از طریق نمایندگی مناسب در سطوح مختلف سازمان است (کاظمی، ۱۳۹۲).

#### و) سبک مدیریتی

مدیر در نقش رهبری سازمان می‌تواند سبک‌های متفاوتی را در هدایت نیروی انسانی انتخاب کند. الگوهای رفتاری مناسب مدیر در هر سازمان باعث ایجاد روحیه و انگیزش در کارکنان می‌شود و میزان رضایت آن‌ها را از شغل و حرفه‌شان افزایش می‌دهد (مصدق راد، ۱۳۹۱).

#### ۲-۴- عوامل فنی و نقش آن در بهینه‌سازی

عوامل فنی نیز به‌عنوان بخشی از بهینه‌سازی واحدهای نگهداری و تعمیر به شمار می‌روند. این عوامل شامل موارد زیر هستند:

##### الف) تجهیزات و ابزارآلات

تجهیزات و ابزارآلات، دسته‌ای از وسایل بادوام هستند که جهت نگهداشتن یا ادامه عملیات و آماده‌به‌کاری و نگهداری امکانات از آن‌ها استفاده می‌شود. یکی از عوامل مؤثر و مهم در دستیابی به توفیقات برای هر سازمانی، استفاده از ابزار و تجهیزات و فناوری‌های نوینی است که در عرصه‌های مختلف جهت انجام مأموریت‌های محوله به‌کارگیری می‌شوند. بعد از نیروی انسانی، تجهیزات اصلی‌ترین عاملی هستند که می‌توانند جهت انجام مأموریت‌ها و ارتقاء کارایی کمک کنند. کارایی افراد، علاوه بر عوامل دیگر، به ابزار کاری که مدام با آن‌ها کار می‌کنند بستگی دارد. اگر ابزارها با استعداد و ویژگی‌های شخصیتی انسان‌ها متناسب نباشد، کارایی پایین خواهد آمد. (فقیه، ۱۳۹۱).

##### ب) سامانه انبارداری نگهداری و تعمیر

انبار در صنایع تولیدی دو نقش بسیار حیاتی دارد: نقش اول آن تضمین استمرار تدارک و نقش دوم آن تضمین استمرار عملیات است. این دو نقش متضاد با یکدیگر هستند و تضمین صددرصد یکی باعث تضعیف صددرصد دیگری می‌شود. ذخیره‌سازی زیاد، اگرچه استمرار تدارک

را تضمین می‌کند، ولی به خاطر انباشته شدن زیاد در موجودی، مشکلاتی مانند کاهش کارایی و نیز کمبود نقدینگی به بار می‌آورد و این ممکن است به همان اندازه فقدان موجودی، استمرار عملیات صنعت را به خطر اندازد. از مدت‌ها قبل و از زمانی که احساس شد بالا رفتن هزینه بهره سرمایه ذخیره‌شده بقای رشد و توسعه صنایع را تهدید می‌کند، توجه به مدیریت انبار بسیار بیشتر از پیش شده است.

#### ج) سامانه تدارکات ابزارآلات و قطعات

تدارکات و آماد و پشتیبانی یک واحد ستاد «کمکی» و «خدماتی» به شمار می‌رود که برای خدمت و کمک به واحدهای اجرایی و عملیاتی و پشتیبانی از آن‌ها و فراهم کردن موجبات و تسهیلات لازم برای کار و سرپا نگه داشتن آن‌ها ایجاد می‌شود. معمولاً در سازمان‌ها به ازای هر نیاز عملیاتی، دو فرآیند تدارکات وجود دارد که اطمینان حاصل می‌کند تمامی ابزار و قطعات لازم به‌طور مؤثر برای حمایت از فعالیت‌های جاری در دسترس هستند

#### ۳-۴- عوامل اقتصادی و نقش آن در بهینه‌سازی

در اقتصادی که دچار رکود، باشد مسئله بیکاری به‌صورت یک مشکل حاد درمی‌آید و اخراج پی‌درپی افراد شاغل در سازمان‌ها از پیامدهای رکود اقتصادی است. در چنین حالتی کارکنان به دلیل استرس و فشارهای ناشی از ترس اخراج شدن نمی‌توانند بارروحیه عالی و درجه کارایی بالا کار کنند که نهایتاً باعث کاهش شدید راندمان فعالیت کارمندان و به دنبال آن باعث کاهش کارایی سازمان خواهد شد (سلطانی، ایرج، ۱۳۹۰).

بررسی‌های میدانی و مصاحبه با فرماندهان و کارکنان واحدهای نگهداری و تعمیر نشان می‌دهد که مشکلات اجرایی این یگان‌ها به چند عامل کلیدی مربوط می‌شود:

##### ۱- عوامل انسانی

##### - پایین بودن سطح آموزش تخصصی

آموزش کارکنان در بخش‌های مختلف تعمیراتی به‌طور کلی در سطح مطلوبی قرار ندارد. عدم تربیت نیروی فنی کارآمد باعث می‌شود که کارکنان نتوانند به‌خوبی از عهده وظایف خود برآیند و این موضوع به‌وضوح بر کارایی یگان‌ها تأثیر منفی می‌گذارد.

##### - نداشتن انگیزه کافی

- جلوگیری از تعمیرات باز و بسته کردن بی‌مورد قطعات سامانه.

- اجرای برنامه لازم جهت تعمیرات برای هر سامانه‌ای که احتیاج به نگهداری و تعمیرات داشته باشد دستورالعمل عملیات نگهداری و تعمیرات جهت‌دار جهت تضمین کارایی قابل‌اعتماد و مناسب موردنیاز می‌باشد.

## ۵- تجزیه و تحلیل کیفی اهداف

### ۵-۱- تجزیه و تحلیل کیفی هدف اول

برای بهینه‌سازی فرآیند نگهداری و تعمیر نیروهای مسلح، توجه به عوامل انسانی و مدیریتی نقش کلیدی دارد. در محیط‌های نظامی، بهره‌گیری از شیوه‌های نوین آموزشی، توانمندسازی کارکنان و اتخاذ سبک‌های مدیریتی مؤثر می‌تواند منجر به افزایش بهره‌وری و کارایی یگان‌های تعمیر و نگهداری شود.

۱- آموزش مستمر و هدفمند آموزش نه تنها به ارتقای مهارت‌های فنی کارکنان کمک می‌کند، بلکه موجب افزایش تعهد و انگیزه آنان می‌شود. برنامه‌های آموزشی باید به‌صورت مستمر و متناسب با نیازهای روز تدوین شوند. همچنین، استفاده از فناوری‌های نوین در آموزش، مانند شبیه‌سازی‌های فنی و دوره‌های تخصصی آنلاین، می‌تواند کارکنان را به‌روز نگه دارد.

۲- تقویت رضایت شغلی و انگیزش کارکنان رضایت شغلی تأثیر مستقیمی بر عملکرد افراد دارد. فراهم‌سازی شرایط کاری مطلوب، بهبود سیاست‌های جبران خدمات، ایجاد فضای کاری مناسب و توجه به نیازهای فردی کارکنان می‌تواند موجب افزایش بهره‌وری یگان‌های تعمیراتی شود.

۳- مشارکت محوری در تصمیم‌گیری‌ها حضور فعال کارکنان در فرآیند تصمیم‌گیری، به‌ویژه در بخش‌های فنی، می‌تواند اثربخشی اقدامات تعمیراتی را افزایش دهد. ایجاد ساختارهایی برای انتقال دانش و تجربیات میان سطوح مختلف سازمانی، منجر به اتخاذ تصمیمات بهینه‌تر و کاهش خطاهای عملیاتی می‌شود.

۴- توانمندسازی و پرورش نیروهای متخصص تقویت مهارت‌های فنی و مدیریتی کارکنان از طریق آموزش‌های تخصصی، کارگاه‌های عملی و اجرای پروژه‌های مهارتی، آن‌ها را قادر می‌سازد تا به‌طور مستقل در زمینه‌های

در برخی یگان‌ها، کارکنان تعمیراتی از انگیزه لازم برای انجام امور خود برخوردار نیستند. این عدم انگیزه، به‌ویژه زمانی که کارکنان خود را با تعمیرکاران هم‌تراز در سطح شهر مقایسه می‌کنند، شدت می‌گیرد. این موضوع نه تنها بر کیفیت کار آن‌ها تأثیر می‌گذارد، بلکه مشکلات و چالش‌هایی را نیز برای خود و یگان ایجاد می‌کند.

## - رضایت شغلی

رضایت شغلی به نگرش افراد نسبت به شغلشان اشاره دارد و تحت تأثیر ادراک آن‌ها از شرایط کاری‌شان قرار دارد. میل به رهایی از یگان‌های نگهداری و تعمیر و تمایل به پذیرش مشاغل غیر فنی ازجمله پیامدهای عدم رضایت شغلی است. کارکنان ممکن است به دلیل مقایسه خود با دیگران از لحاظ جایگاه شغلی و مزایای دریافتی، احساس نارضایتی کنند.

## ۲- عوامل فنی

- عدم وجود محل‌های مناسب نگهداری در هنگام نبودن تجهیزات در عملیات استفاده از تجهیزات در فضاهای غیر مناسب.

- عدم توجه جدی به تبیین فرآیند خرید تجهیزات و نحوه آن به سازمان وضعیت مطلوب سامانه نگهداری و تعمیر برای واحدهای نیروهای مسلح بررسی نظری منابع و ادبیات گویای این است که برای دستیابی به هدف مطلوب در نگهداری و تعمیر ابتدا باید سامانه درست و یکپارچه ایجاد نمود. هدف اصلی از ایجاد یک سامانه صحیح نگهداری و تعمیرات عبارت است از:

- رفع نواقص و معایب جزئی قبل از نیاز به تعمیرات کلی  
- افزایش طول عمر تجهیزات و در نتیجه صرفه‌جویی در خرید تجهیزات جدید  
- کاهش توقف تولید و جلوگیری از زبان‌های ناشی از وقفه در کار

مراحل اصلی این روش عبارت‌اند از:

- ۱- تهیه ساختار و داده‌های سامانه
  - ۲- مشخص کردن شرایط مطلوب سامانه
  - ۳- مقایسه شرایط مطلوب با موجود
  - ۴- بهینه‌سازی و حذف نقاط ضعف سامانه.
- با اجرای نگهداری و تعمیرات جهت‌دار می‌توان به منافع و مزایای زیر نائل گردید:
- استفاده از حداکثر عمر مفید سامانه

مختلف تعمیر و نگهداری عمل کنند. توانمندسازی نه تنها افزایش بهره‌وری را به دنبال دارد، بلکه نوآوری و خلاقیت را نیز در نیروهای فنی تقویت می‌کند.

۵- سبک‌های مدیریتی کارآمد و رهبری اثربخش فرماندهان و مدیران یگان‌های تعمیر و نگهداری باید علاوه بر مهارت‌های فنی، توانایی هدایت و مدیریت نیروهای انسانی را نیز داشته باشند. اتخاذ سبک‌های مدیریتی حمایتی و مشارکتی، ایجاد حس مسئولیت و همدلی در میان کارکنان و تقویت فرهنگ سازمانی از جمله عواملی هستند که می‌توانند تأثیر مثبتی بر عملکرد یگان‌های تعمیراتی داشته باشند.

با اجرای این راهکارها، می‌توان فرآیندهای تعمیر و نگهداری را در نیروهای مسلح بهینه‌سازی کرده و سطح کارآمدی و آماده‌به‌کاری تجهیزات را افزایش داد. توجه به سرمایه انسانی، آموزش مستمر و به‌کارگیری اصول مدیریتی صحیح، کلید موفقیت در این حوزه است.

## ۲-۵- تجزیه و تحلیل کیفی هدف دوم

برای بهینه‌سازی فرآیند تعمیر و نگهداری در نیروهای مسلح، توجه ویژه به عوامل فنی و مدیریتی امری ضروری است. بهینه‌سازی واحدهای تعمیراتی مستلزم بهره‌گیری صحیح از تجهیزات، سامانه‌های انبارداری و روش‌های تدارکاتی کارآمد است.

### ۱- تجهیزات و ابزارآلات

مدیریت بهینه تجهیزات و ابزارهای فنی نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد یگان‌های نگهداری و تعمیر دارد. در این زمینه، استفاده از فناوری‌های نوین و تجهیزات پیشرفته، امکان افزایش دقت و کارایی در فرایندهای عملیاتی را فراهم می‌کند. باین‌حال، هماهنگی میان دانش فنی کارکنان و پیچیدگی تجهیزات ضروری است، چراکه بدون مهارت کافی، هزینه‌های سازمان افزایش یافته و بهره‌وری کاهش می‌یابد.

### ۲- سامانه انبارداری و نگهداری

سامانه‌های انبارداری کارآمد به تسهیل فرآیند تأمین قطعات و تجهیزات ضروری کمک می‌کنند. تخصیص صحیح منابع، کاهش زمان انتظار برای دریافت قطعات و جلوگیری از انباشت بیش از حد موجودی‌ها از جمله اقدامات مؤثر در این حوزه است. مدیریت منطقی انبارها نه تنها هزینه‌های نگهداری را کاهش می‌دهد، بلکه امکان

دسترسی سریع به قطعات موردنیاز را برای یگان‌های عملیاتی فراهم می‌کند.

## ۳- سامانه تدارک ابزار و قطعات

سامانه‌های تدارکات و تأمین قطعات یکی از ارکان اساسی در حفظ آمادگی عملیاتی یگان‌های تعمیراتی محسوب می‌شوند. این سامانه‌ها باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که امکان تأمین قطعات از منابع داخلی و خارجی به‌صورت بهینه و در کمترین زمان ممکن فراهم شود. همچنین، هماهنگی میان واحدهای لجستیک و عملیاتی برای پیش‌بینی نیازهای آینده و جلوگیری از کمبود تجهیزات حیاتی ضروری است.

با اجرای راهبردهای مذکور، نیروهای مسلح می‌توانند به ارتقای سطح آمادگی تجهیزات و بهبود عملکرد یگان‌های نگهداری و تعمیر دست یابند. این اقدامات، علاوه بر افزایش بهره‌وری، موجب کاهش هزینه‌ها و افزایش طول عمر تجهیزات نیز خواهد شد.

## ۳-۵- تجزیه و تحلیل کیفی هدف سوم

دسته‌بندی داده‌ها برحسب اسناد و مدارک در رابطه باهدف سوم هدف سوم تبیین چگونگی بهینه‌سازی نگهداری و تعمیر در نیروهای مسلح با به‌کارگیری عوامل اقتصادی.

۱- اعتبارات سرمایه‌ای: عوامل اقتصادی از طریق عواملی مانند رکود و تورم بر سازمان‌ها تأثیر گذاشته و باعث افزایش و یا کاهش روحیه و نهایتاً کارایی نیروی انسانی سازمان را به دنبال دارد ماده ۷۹ قانون محاسبات سازمان‌ها را در معاملات دولتی اعم از خرید و فروش و اجاره و استجاره و پیمانکاری و اجرت کار و غیره ملزم مناقصه یا مزایده می‌نماید (شباهنگ رضا) (۱۳۹۲).

۲- اعتبارات جاری: اعتبارات هر یگان معمولاً سه ماه یکبار از طریق واپاشیگر نیروی مربوط به یگان واگذار می‌شود و بر اساس این اعتبار سه‌ماهه دارائی ۳/۱ آن را به حساب بانک در وجه دارایی یگان حواله می‌کند و هیچ‌یک از رده‌های فرماندهی مجاز نیستند بیش از اعتباری که در اختیار آن‌ها گذاشته می‌شود وجوهی را تعهد و هزینه نمایند.

## ۶- تجزیه و تحلیل کمی اهداف

فرضیه یکم: به نظر می‌رسد که آموزش و توانمندسازی کارکنان، (عوامل انسانی) کیفیت خدمات تعمیر و نگهداری در واحدهای نیروهای مسلح را افزایش می‌دهد.

جدول ۱- میانگین و شاخص‌های پراکندگی مؤلفه‌های بعد انسانی

| انحراف معیار | انحراف استاندارد | میانگین | شاخص‌های پراکندگی عوامل انسانی |
|--------------|------------------|---------|--------------------------------|
| ۰/۲۸         | ۱/۱۰             | ۴/۱۱    | آموزش                          |
| ۰/۳۲         | ۱/۱۸             | ۴/۵     | رضایت شغلی                     |
| ۰/۴۵         | ۱/۲۲             | ۳/۶۶    | مشارکت کارکنان                 |
| ۰/۴۴         | ۱/۱۸             | ۳/۹۶    | توانمندسازی کارکنان            |
| ۰/۳۹         | ۱/۲۱             | ۳/۹۴    | سبک‌های مدیریتی                |

نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد که از مؤلفه‌های مورد بررسی، مؤلفه آموزش با میانگین ۴/۱۱ در رتبه اول و مؤلفه رضایت شغلی با میانگین ۴/۵ در رتبه دوم و مؤلفه توانمندسازی کارکنان با میانگین ۳/۹۶ در رتبه سوم قرار داد.

فرضیه دوم: به نظر می‌رسد که به‌کارگیری فناوری‌های نوین، (عوامل فنی) بهینه‌سازی فرآیندهای تعمیر و نگهداری در نیروهای مسلح را تسهیل می‌کند.

جدول ۲- میانگین و شاخص‌های پراکندگی مؤلفه‌های بعد فنی

| انحراف معیار | انحراف استاندارد | میانگین | شاخص‌های پراکندگی عوامل فنی |
|--------------|------------------|---------|-----------------------------|
| ۰/۲۸         | ۱/۱۰             | ۴/۲۲    | تجهیزات و ابزارآلات         |
| ۰/۳۲         | ۱/۱۸             | ۳/۴۲    | سامانه انبارداری            |
| ۰/۴۵         | ۱/۲۲             | ۳/۶۰    | سامانه تدارک ابزار و قطعات  |

نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که از مؤلفه‌های مورد بررسی، مؤلفه تجهیزات و ابزارآلات با میانگین ۴/۲۲ در رتبه اول و مؤلفه سامانه تدارک ابزار و قطعات با میانگین ۳/۴۲ در رتبه دوم و مؤلفه سامانه انبارداری با میانگین ۳/۴۲ در رتبه سوم قرار داد.

فرضیه سوم: به نظر می‌رسد که مدیریت بهینه منابع و هزینه‌ها، (عوامل اقتصادی) عملکرد واحدهای تعمیر و نگهداری در نیروهای مسلح را بهبود می‌بخشد.

جدول ۳- میانگین و شاخص‌های پراکندگی مؤلفه‌های بعد اقتصادی

| انحراف معیار | انحراف استاندارد | میانگین | شاخص‌های پراکندگی عوامل اقتصادی |
|--------------|------------------|---------|---------------------------------|
| ۰/۴۴         | ۱/۲۲۲            | ۳/۹۰    | اعتبارات سرمایه‌ای              |
| ۰/۴۶         | ۱/۲۱۹            | ۳/۶۶    | اعتبارات جاری                   |

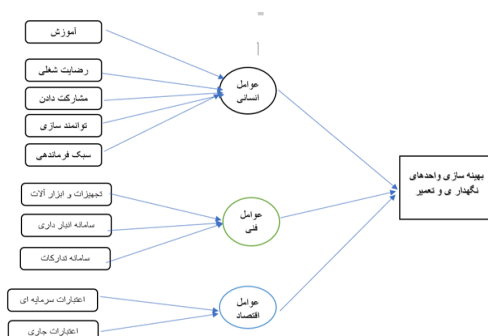
نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که از مؤلفه‌های مورد بررسی، مؤلفه اعتبارات سرمایه‌ای با میانگین ۳/۹۰ در رتبه اول و مؤلفه اعتبارات جاری با میانگین ۳/۶۶ در رتبه دوم قرار داد.

## ۷- مقایسه کلی ابعاد مورد بررسی

جدول ۴- میانگین و شاخص‌های پراکندگی ابعاد مورد بررسی

| ابعاد   | Min | Max | Mean  | Std. Deviation | Variance |
|---------|-----|-----|-------|----------------|----------|
| انسانی  | ۱   | ۵   | ۴/۰۵۲ | ۳/۹۰           | ۱۲/۹۹    |
| فنی     | ۱   | ۵   | ۳/۷۵  | ۳/۷۸           | ۱۲/۲۸    |
| اقتصادی | ۱   | ۵   | ۳/۷۸  | ۳/۸۰           | ۱۲/۲۶    |

نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که از ابعاد مورد بررسی، بعد انسانی با مؤلفه‌های آن از میانگین کلی بالاتری نسبت به سایر ابعاد در بهینه‌سازی واحدهای تعمیر و نگهداری برخوردار است.



شکل ۱- نمودار کلی مقایسه میانگین‌های ابعاد، مؤلفه‌ها با متغیر بهینه‌سازی واحدهای نگهداری و تعمیر

با توجه به مدل مفهومی که از نرم افزار اس پی اس استخراج گردید؛ نشان داد که تمام زیر مؤلفه های قید شده در بهینه سازی واحدهای نگهداری و تعمیر مؤثر می باشد که مهم ترین آن در بعد انسانی عامل آموزش می باشد و در بعد عوامل فنی عامل تجهیزات و ابزارآلات و در بعد اقتصادی عامل اعتبارات سرمایه ای می باشد.

## ۸- تجزیه و تحلیل استنباطی

### ۸-۱- تجزیه و تحلیل استنباطی فرضیه یکم تحقیق

- به نظر می رسد با به کارگیری مناسب عوامل انسانی بهینه سازی واحدهای نگهداری و تعمیر در نیروهای مسلح را ارتقاء نمی دهد.

- به نظر می رسد با به کارگیری مناسب عوامل انسانی بهینه سازی واحدهای نگهداری و تعمیر در نیروهای مسلح را ارتقاء می دهد.

در این پژوهش جهت بررسی تصادفی نبودن پاسخ های نمونه آماری فرضیه های تحقیق از آزمون خی ۲ استفاده شده است. این آزمون برای بررسی دو متغیر که دست کم یکی از آن ها کیفی است استفاده می شود. در این آزمون فراوانی های مشاهده شده با فراوانی های مورد انتظار استقلال دو متغیر مقایسه می شوند. از توزیع کای - مربع در آزمون فرضیه هایی که داده های مورد تجزیه و تحلیل به صورت فراوانی ارائه شده اند می توان استفاده کرد.

جدول ۵- جدول شماره محاسبه خی عوامل انسانی و بهینه سازی واحدهای نگهداری و تعمیر در نیروهای مسلح

| فرماندهی | سبک های | کارکنان | توانمندسازی | کارکنان | مشارکت | رضایت شغلی | آموزش |
|----------|---------|---------|-------------|---------|--------|------------|-------|
| ۱۶۵۴     | ۶۲۱     | ۳۲۲/۵۶۶ | ۱۲۲۰        | ۱۵۱۲    | ۷۷۷    | ۱۱۳        | ۶     |
| ۴        | ۴       | ۴       | ۴           | ۴       | ۴      | ۴          | ۴     |
| ۰        | ۰       | ۰       | ۰           | ۰       | ۰      | ۰          | ۰     |

با توجه مقدار کای اسکور مجذور کای دو محاسبه شده و میزان خطای به دست آمده در جدول ۵ که کمتر از سطح خطای ۰/۰۵ است فرض  $H_0$  رد شد و نشان می دهد که بین فراوانی مشاهده شده و مورد انتظار در مؤلفه آموزش، رضایت شغلی، مشارکت کارکنان، توانمندسازی کارکنان و

سبک های فرماندهی در بهینه سازی واحدهای نگهداری و تعمیر در نیروهای مسلح تفاوت وجود دارد.

### ۸-۲- تجزیه و تحلیل استنباطی فرضیه دوم تحقیق

- به نظر می رسد با به کارگیری مناسب عوامل فنی، بهینه سازی واحدهای نگهداری و تعمیر در نیروهای مسلح را ارتقاء نمی دهد.

- به نظر می رسد با به کارگیری مناسب عوامل فنی، بهینه سازی واحدهای نگهداری و تعمیر در نیروهای مسلح را ارتقاء می دهد.

در این پژوهش جهت بررسی تصادفی نبودن پاسخ های نمونه آماری فرضیه های تحقیق از آزمون خی ۲ استفاده شده است. این آزمون برای بررسی دو متغیر که دست کم یکی از آن ها کیفی است استفاده می شود. در این آزمون فراوانی های مشاهده شده با فراوانی های مورد انتظار استقلال دو متغیر مقایسه می شوند. از توزیع کای - مربع در آزمون فرضیه هایی که داده های مورد تجزیه و تحلیل به صورت فراوانی ارائه شده اند می توان استفاده کرد.

جدول ۶- جدول شماره محاسبه خی عوامل فنی و بهینه سازی واحدهای نگهداری و تعمیر در نیروهای مسلح

| سامانه  | تدارک ابزار | تجهیزات و | انبارداری |
|---------|-------------|-----------|-----------|
| ۲۹۸/۲۲۸ | ۶۱۰/۲۲۱     | ۶۴۵/۸۵۴   | ۲۹۸/۲۲۸   |
| ۴       | ۴           | ۴         | ۴         |
| ۰       | ۰           | ۰         | ۰         |

با توجه مقدار کای اسکور (مجذور کای دو) محاسبه شده و میزان خطای به دست آمده در جدول ۶ که کمتر از سطح خطای ۰/۰۵ است، فرض  $H_0$  رد شد و نشان می دهد که بین فراوانی مشاهده شده و مورد انتظار در مؤلفه تجهیزات و ابزارآلات، سامانه انبارداری و تدارک ابزار و قطعات یدکی در بهینه سازی واحدهای نگهداری و تعمیر در نیروهای مسلح تفاوت وجود دارد.

### ۸-۳- تجزیه و تحلیل استنباطی فرضیه سوم تحقیق

- به نظر می رسد با به کارگیری مناسب عوامل اقتصادی بهینه سازی واحدهای نگهداری و تعمیر در نیروهای مسلح را ارتقاء نمی دهد.

- به نظر می رسد با به کارگیری مناسب عوامل اقتصادی بهینه سازی واحدهای نگهداری و تعمیر در نیروهای مسلح را ارتقاء می دهد.

اهمیت بالایی برخوردار است. بازسازی انبارها از نظر ظاهری و استفاده از روش‌های نوین انبارداری، به همراه تأمین کافی قطعات تند مصرف و کند مصرف در شرایط حساس و بحرانی، از دیگر عوامل مؤثر در بهینه‌سازی این واحدها به شمار می‌آید.

در نهایت، در زمینه اقتصادی، تخصیص اعتبارات سرمایه‌ای به شکل‌های مختلف، از جمله خرید تجهیزات و ماشین‌آلات یگانی و ابزارآلات تعمیراتی، می‌تواند به بهینه‌سازی واحدهای نگهداری و تعمیر کمک کند. با پیش‌بینی و تنظیم دقیق بودجه سالیانه و اختصاص اعتبار لازم به این واحدها، امکان خروج تجهیزات فرسوده از چرخه کار فراهم می‌شود. به‌طور کلی، اجرای مؤثر این عوامل می‌تواند به پیشرفت قابل‌توجهی در راستای بهینه‌سازی واحدهای نگهداری و تعمیر بینجامد.

#### منابع و مآخذ

- [۱] جباری، ن. (۱۳۸۰) مدیریت منابع انسانی. تهران: انتشارات دانشگاه امام حسین (ع).
- [۲] جلالی، ت. (۱۳۸۴). نگهداری و تعمیرات بهره‌ور فراگیر. تهران: انتشارات عصر دانش.
- [۳] حاج شیرمحمدی، ع. (۱۳۹۰). نگهداری و تعمیرات بهره‌ور فراگیر. تهران: انتشارات سازمان مدیریت صنعتی.
- [۴] رضاییان، ع. (۱۳۸۰). مدیریت رفتار سازمانی. تهران: انتشارات سمت.
- [۵] سلطانی، ا. (۱۳۸۱). مدیریت عملکرد بستر ساز پرورش منابع انسانی. تهران: نشر ارکان.
- [۶] سیدجوادین، س. ر. (۱۳۸۵). مدیریت منابع انسانی. تهران: انتشارات ترمه.
- [۷] شباهنگ، ر. (۱۳۹۲). مدیریت مالی و بودجه‌ریزی دولتی. تهران: انتشارات شهر آشوب.
- [۸] شریفیان، م. (۱۳۸۰). نگهداری و نگهداری. تهران: انتشارات دانشگاه افسری امام علی (ع).
- [۹] طاهری، ش. (۱۳۸۹). بهره‌وری و تجزیه و تحلیل آن در سازمان‌ها: مدیریت بهره‌وری فراگیر (چاپ دوم). تهران: انتشارات هستان.
- [۱۰] عزیزی، غ. (۱۳۹۱). اصول تنظیم و کنترل بودجه دولتی. تهران: انتشارات شهر آشوب.
- [۱۱] فقیه، ن. و دیگران. (۱۳۹۱). برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات. تهران: انتشارات سمت.

در این پژوهش جهت بررسی تصادفی نبودن پاسخ‌های نمونه آماری فرضیه‌های تحقیق از آزمون خی ۲ استفاده شده است. این آزمون برای بررسی دو متغیر که دست کم یکی از آن‌ها کیفی است استفاده می‌شود در این آزمون فراوانی‌های مشاهده شده با فراوانی‌های مورد انتظار استقلال دو متغیر مقایسه می‌شوند از توزیع کای-مربع در آزمون فرضیه‌هایی که داده‌های مورد تجزیه و تحلیل به صورت فراوانی ارائه شده‌اند می‌توان استفاده کرد.

جدول ۷- جدول شماره محاسبه خی عوامل اقتصادی و بهینه‌سازی واحدهای نگهداری و تعمیر در نیروهای مسلح

| اعتبارات جاری | اعتبارات سرمایه‌ای |             |
|---------------|--------------------|-------------|
| ۳۲۲/۲۱۷       | ۴۵۰/۸۳۴            | Chi-Square  |
| ۴             | ۴                  | df          |
| ۰             | ۰                  | Asymp. Sig. |

با توجه مقدار کای اسکوائر (مجذور کای دو) محاسبه شده و میزان خطای به دست آمده در جدول ۶ که کمتر از سطح خطای ۰/۰۵ است، فرض  $H_0$  رد شد و نشان می‌دهد که بین فراوانی مشاهده شده و مورد انتظار در مؤلفه اعتبارات سرمایه‌ای، اعتبارات جاری در بهینه‌سازی واحدهای نگهداری و تعمیر در نیروهای مسلح تفاوت وجود دارد.

#### ۹- نتیجه‌گیری

با توجه به سه عامل انسانی، فنی و اقتصادی در بهینه‌سازی واحدهای نگهداری و تعمیر، مشخص شده است که آموزش می‌تواند با ایجاد تغییرات در رفتار کارکنان، به افزایش مهارت‌های فنی آن‌ها منجر شود. توسعه روش‌های آموزشی می‌تواند استعداد های نهفته و قدرت تخیل و خلاقیت کارکنان را به فعلیت درآورد که این امر در نهایت به کارایی بیشتر و بهینه‌سازی واحدهای نگهداری و تعمیر کمک می‌کند. همچنین، اعزام کارکنان به دوره‌های آموزشی فنی و حرفه‌ای که توسط شرکت‌های خودروساز داخلی و خارجی برای نیروهای مسلح برگزار می‌شود، می‌تواند به ارتقاء مهارت‌های آن‌ها کمک شایانی کند.

در بعد فنی، وجود تجهیزات و ماشین‌آلات استاندارد به لحاظ کیفیت و کمیت در واحدهای نگهداری و تعمیر از

[28] Mann, L. (2007). *Maintenance management*. Lexington Books.

[۱۲] فرهی بوزنجانی، ع. (۱۳۸۹). پژوهش‌های مدیریت منابع انسانی. فصلنامه مدیریت منابع انسانی، ۹۴۹، ۱۰۸-۱۲۵.

[۱۳] کیامنش، ع. (۱۳۸۵). روش‌های ارزشیابی آموزشی. تهران: انتشارات امیرکبیر.

[۱۴] محب علی، د. (۱۳۹۰). شیوه‌های ارتقاء بهره‌وری نیروی انسانی. تهران: مرکز آموزش مدیریت دولتی.

[۱۵] مصدق‌راد، ع. (۱۳۹۱). رهبری و مدیریت در سازمان‌های نظامی. تهران: انتشارات فرماندهی و ستاد.

[۱۶] صائمیان، ص. (۱۳۸۲). آموزش و آثار آن بر بهره‌وری. نشریه همشهری، (۸)، ۱۸-۲۴.

[۱۷] کاظمی، م. (۱۳۹۲). مشارکت کارکنان در تصمیم‌گیری‌های سازمانی. فصلنامه مطالعات مدیریت، ۲۱(۴)، ۴۵-۶۷.

[۱۸] سلطانی، ا. (۱۳۹۰). بررسی تأثیر عوامل اقتصادی بر بهره‌وری نیروی انسانی در سازمان‌های دولتی (پایان‌نامه کارشناسی ارشد). دانشگاه تهران، تهران.

[19] Smith, D. J. (2005). *Reliability, maintainability and risk: Practical methods for engineers* (7th ed.). Elsevier Butterworth-Heinemann.

[20] Moubray, J. (1997). *Reliability-centered maintenance* (2nd ed.). Industrial Press.

[21] Wireman, T. (2005). *Developing performance indicators for managing maintenance* (2nd ed.). Industrial Press.

[22] Kelly, A. (2006). *Strategic maintenance planning*. Elsevier Butterworth-Heinemann.

[23] Patton, J. D. (1995). *Maintainability and maintenance management* (4th ed.). Instrument Society of America.

[24] Blanchard, B. S., Verma, D., & Peterson, E. L. (1995). *Maintainability: A key to effective serviceability and maintenance management*. John Wiley & Sons.

[25] Pintelon, L., & Parodi-Herz, A. (2008). Maintenance: An evolutionary perspective. In K. A. H. Kobbacy & D. N. P. Murthy (Eds.), *Complex system maintenance handbook* (pp. 21-48). Springer.

[26] Campbell, J. D., & Jardine, A. K. S. (2001). *Maintenance excellence: Optimizing equipment life-cycle decisions*. Marcel Dekker.

[27] Levitt, J. (2003). *Complete guide to preventive and predictive maintenance*. Industrial Press.

# شایستگی‌های راهبردی مربیان نظامی در عصر جنگ ترکیبی: ارائه

## یک مدل یکپارچه از منظر نیروهای مسلح جمهوری اسلامی ایران

عباسعلی سلمانی<sup>۱</sup>، عبدالرضا دبستانی<sup>۲</sup>، مهدی نطاق پور نوری<sup>۳</sup>، سیدحمیدرضا قریشی<sup>۴</sup>، کاووس بورکی<sup>۵</sup>

<sup>۱،۲،۴</sup> استادیار دانشگاه جامع امام حسین (علیه‌السلام)

<sup>۲</sup> مربی دانشکده فرماندهی و ستاد ولایت

<sup>۵</sup> عضو هیئت علمی دانشگاه امام خامنه‌ای (مدظله‌العالی)

### چکیده:

هدف این پژوهش، طراحی و اعتبارسنجی الگوی راهبردی شایستگی‌های مربیان و فرماندهان مراکز آموزش عالی نیروهای مسلح جمهوری اسلامی ایران در مواجهه با پیچیدگی‌های عصر جنگ ترکیبی است. با توجه به تحول بنیادین در ماهیت تهدیدات، گسترش فضای سایبری، عملیات‌های شناختی و پیچیدگی محیط عملیاتی، نظام آموزشی نیروهای مسلح نیازمند تربیت مدیران و مربیانی است که از شایستگی‌های چندوجهی، عمیقاً ریشه‌دار در ارزش‌های اسلامی-انقلابی و همزمان مسلط بر فناوری‌ها و مفاهیم راهبردی نوین باشند. این پژوهش با رویکرد آمیخته اکتشافی متوالی (کیفی-کمی) و با روش توصیفی-تحلیلی انجام شده است. در مرحله کیفی، با تحلیل محتوای عمیق اسناد بالادستی (شامل بیانات فرماندهی معظم کل قوا، اسناد راهبردی نیروهای مسلح، متون اسلامی و تجارب دفاع مقدس) و نیز مصاحبه نیمه‌ساختاریافته با ۱۲ خبره صاحب‌نظر، چارچوب اولیه ابعاد و مؤلفه‌ها استخراج گردید. در مرحله کمی، پرسشنامه‌ای مبتنی بر یافته‌های کیفی میان ۳۳ نفر از فرماندهان و مدیران ارشد آموزشی نیروهای مسلح توزیع و داده‌ها با نرم‌افزار SmartPLS و به روش مدل‌سازی معادلات ساختاری (SEM) تحلیل شد. یافته‌ها منجر به طراحی الگوی نهایی با پنج بُعد اصلی، ۲۲ مؤلفه و ۱۰۴ شاخص عملیاتی گردید: (۱) شایستگی‌های فرهنگی-ارزشی، (۲) شایستگی‌های مدیریتی-ارتباطی، (۳) شایستگی‌های آموزشی-پژوهشی و فناوری، (۴) شایستگی‌های عملیاتی-نظامی، و (۵) شایستگی‌های راهبردی. نتایج تحلیل کمی نشان داد مدل از روایی همگرا و واگرایی مطلوب و پایایی ترکیبی بالایی برخوردار است (ضرایب CR بالاتر از ۰.۷ و AVE بالاتر از ۰.۵). شاخص‌های برازش مدل (مانند GOF) نیز وضعیت مطلوبی را نشان دادند. این مطالعه اثبات می‌کند که در عصر جنگ ترکیبی، علاوه بر شایستگی‌های پایه، مؤلفه‌های نوینی مانند «تفکر سیستمی و آینده‌نگری»، «مدیریت جنگ ترکیبی و عملیات چنددامنه»، «رهبری در فضای سایبری و شناختی» و «هوشمندی و تحلیل راهبردی» در کانون شایستگی‌های راهبردی مربیان قرار می‌گیرد. مدل ارائه‌شده چارچوبی بومی، جامع و عملیاتی برای بازنگری در نظام گزینش، تربیت، انتصاب و ارزیابی فرماندهان و مدیران آموزشی نیروهای مسلح فراهم می‌آورد و می‌تواند مبنای تحول در سرفصل‌ها و روش‌های آموزش عالی دفاعی کشور قرار گیرد.

### واژه‌های کلیدی:

شایستگی‌های راهبردی، مربیان نظامی، جنگ ترکیبی، آموزش عالی نظامی، نیروهای مسلح جمهوری اسلامی ایران، مدل معادلات ساختاری، هوشمندی سایبری

## Strategic Competencies of Military Instructors in the Era of Hybrid Warfare: Presenting an Integrated Model from the Perspective of the Armed Forces of the Islamic Republic of Iran

Abbas-Ali Salmani<sup>1</sup>, Abdolreza Dabestani<sup>2</sup>, Mehdi Nataqpour Nouri<sup>3</sup>, Seyed Hamidreza Ghorayshi<sup>4</sup>, Kavous Bouraki<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Assistant Professor, Imam Hossein Comprehensive University (AS), Iran

<sup>2</sup> Instructor, Velayat Command and Staff College, Iran

<sup>5</sup> Faculty Member, Imam Khamenei University, Iran

### Abstract

The aim of this research is to design and validate a strategic model of the competencies of instructors and commanders of higher education centers of the Islamic Republic of Iran Armed Forces in the face of the complexities of the era of hybrid warfare. Given the fundamental transformation in the

nature of threats, the expansion of cyberspace, cognitive operations, and the complexity of the operational environment, the armed forces educational system requires training managers and instructors who have multifaceted competencies, are deeply rooted in Islamic-revolutionary values, and are simultaneously proficient in new technologies and strategic concepts. This research was conducted with a mixed sequential exploratory approach (qualitative-quantitative) and a descriptive-analytical method. In the qualitative stage, an initial framework of dimensions and components was extracted by analyzing the in-depth content of upstream documents (including statements from the Supreme Commander-in-Chief, strategic documents of the armed forces, Islamic texts, and experiences of sacred defense) as well as semi-structured interviews with 12 experts. In the quantitative phase, a questionnaire based on qualitative findings was distributed among 33 commanders and senior education managers of the armed forces, and the data was analyzed using SmartPLS software and structural equation modeling (SEM).

### Keywords:

Strategic competencies, military trainers, hybrid warfare, higher military education, Armed Forces of the Islamic Republic of Iran, structural equation model, cyber intelligence

### ۱- مقدمه

جهان معاصر شاهد تحولات پارادایمی در عرصه منازعات، تضادها و شکل‌گیری مفاهیم نوین امنیتی است. پایان جنگ سرد و ظهور فناوری‌های ارتباطی و اطلاعاتی پیشرفته، عرصه نبرد را از محدوده میدان‌های رزم کلاسیک فراتر برده و مفهومی پیچیده و چندلایه تحت عنوان جنگ ترکیبی<sup>۱</sup> را به پارادایم مسلط قرن بیست و یکم تبدیل کرده است. این مفهوم، که ریشه در نظریه‌پردازی‌های استراتژیست‌هایی چون فرانک هافمن دارد، به استفاده هماهنگ، برنامه‌ریزی شده و یکپارچه از طیف وسیعی از ابزارهای متعارف و نامتعارف (نظامی، سایبری، اطلاعاتی-روانی، اقتصادی، سیاسی، فرهنگی و اجتماعی) برای دستیابی به اهداف راهبردی، بدون عبور از آستانه رسمی جنگ تمام‌عیار اشاره دارد. در این پارادایم، مرزهای میان جنگ و صلح، حقیقت و مجاز، نظامی و غیرنظامی و داخلی و بین‌المللی به شدت محو شده و دشمن در قالبی نامشخص، غیرمتمرکز و چندوجهی ظاهر می‌شود.

نیروهای مسلح جمهوری اسلامی ایران، به عنوان ستون فقرات امنیت ملی و مدافع ارزش‌های انقلاب اسلامی، همواره در معرض اینگونه تهدیدات پیچیده و چندبعدی بوده‌اند. تجربه سال‌های اخیر به وضوح نشان داده که دشمنان این نظام، از تاکتیک‌های جنگ ترکیبی به‌صورت گسترده بهره می‌برند. در چنین شرایطی، سرمایه

انسانی به ویژه فرماندهان و مدیران مراکز آموزش عالی نظامی به عنوان مجریان و طراحان اصلی تربیت نسل آینده رزمندگان و استراتژیست‌های دفاعی، نقشی بی‌بدیل می‌یابند. این مراکز، که وظیفه خطیر تربیت سرمایه انسانی متخصص، متعهد و خلاق را بر عهده دارند، نیازمند مدیران و مربیانی هستند که خود واجد عالی‌ترین سطوح شایستگی باشند. شایستگی در اینجا نه صرفاً یک مهارت فنی، بلکه ترکیبی پیچیده از «دانش»، «مهارت»، «نگرش» و «باورهای ارزشی» است که فرد را قادر می‌سازد در موقعیت‌های پیچیده و مبهم، عملکردی مطلوب و همسو با اهداف عالی سازمانی از خود نشان دهد.

با مرور ادبیات موجود، اگرچه تلاش‌های ارزشمندی در زمینه شناسایی شایستگی‌های مدیران و فرماندهان نظامی انجام شده (مانند آثار سجادی، ۱۳۹۸؛ مرادی و همکاران، ۱۳۹۷؛ سلمانی و پورالشریعه، ۱۴۰۲)، اما اغلب این پژوهش‌ها یا بر شایستگی‌های عمومی مدیریت متمرکز بوده‌اند، یا ناظر به سطوح میدانی و عملیاتی فرماندهی بوده‌اند و یا صرفاً به ترجمه و اقتباس مدل‌های غربی اکتفا کرده‌اند. خلأ یک الگوی راهبردی، بومی، یکپارچه و مبتنی بر مبانی اسلامی-انقلابی که به صورت خاص ویژگی‌ها و الزامات مراکز آموزش عالی نیروهای مسلح در شرایط جنگ ترکیبی را هدف قرار دهد، به وضوح احساس می‌شود. این خلأ می‌تواند به ناکارآمدی در فرایند گزینش، انتصاب، آموزش و ارزیابی این مدیران و در نهایت به کاهش کیفیت خروجی‌های نظام آموزشی و تضعیف اقتدار دفاعی کشور بینجامد.

<sup>۱</sup> Hybrid Warfare

در مبانی فکری نظام جمهوری اسلامی ایران، شایستگی مفهومی عمیقاً ارزش‌محور و مبتنی بر ولایت‌مداری است. در قرآن کریم، شرط اساسی برای تصدی مسئولیت، «قوت» و «امانت» دانسته شده است: «إِنَّ خَيْرَ مَنْ اسْتَأْجَرَ الْقَوِيَّ الْأَمِينُ» (قصص: ۲۶). در سیره عملی ائمه اطهار (ع) و همچنین در نامه ۵۳ نهج‌البلاغه (عهدنامه مالک اشتر)، امام علی (ع) ویژگی‌های حاکم شایسته را برمی‌شمارد که عدالت، تقوا، مشورت و مردم‌داری از ارکان آن است. در دوران معاصر، بیانات فرماندهی معظم کل قوا به عنوان مبنا و راهنمای عمل نیروهای مسلح، همواره بر تلفیق «تعهد» و «تخصص»، «خودباوری»، «روحیه جهادی» و «بصیرت سیاسی» به عنوان جوهره شایستگی یک مدیر و فرمانده نظامی تأکید داشته‌اند. کتاب چهارجلدی «مدیران و فرماندهان شایسته» اثر سجادی (۱۳۹۸) یکی از جامع‌ترین تلاش‌ها برای نظام‌مند کردن این مبانی در قالب یک الگوی نظری است که شایستگی را در سطوح فردی، سازمانی و راهبردی و با تکیه بر آموزه‌های اسلامی بررسی می‌کند.

### ۲-۳- پیشینه تجربی پژوهش‌های داخلی

پژوهش‌های متعددی در داخل کشور به موضوع شایستگی مدیران و فرماندهان پرداخته‌اند. از جمله این پژوهش‌ها می‌توان به موارد شاخص زیر اشاره کرد: مرادی و همکاران (۱۳۹۷) در رساله «الگوی شایستگی فرماندهی از منظر فرماندهی معظم کل قوا» با روش آمیخته به طراحی الگوی پنج‌حوزه‌ای (اعتقادی- اخلاقی، ارزشی، شناختی، عملکردی و رفتاری) دست یافتند که جامع‌تر از الگوهای موجود و دارای نقاط قوت مانند مبانی اعتقادی و انقلابی بود.

سلمانی و پورالشریعه (۱۴۰۲) در مقاله‌ای با عنوان «مؤلفه‌ها و سنجه‌های شایستگی‌های فرمانده مراکز آموزش عالی نیروهای مسلح»، شایستگی‌های ارزشی، حرفه‌ای، جهادی، تخصصی و سازمانی را شناسایی و «روحیه انقلابی» را در اولویت قرار دادند.

عبدالله‌پور (۱۳۹۳) در رساله «طراحی مدل شایستگی‌های حرفه‌ای مدیران و فرماندهان مراکز آموزش عالی سپاه» مؤلفه‌هایی مانند تعهد انقلابی، مهارت‌های مدیریتی و دانش فنی را استخراج کرد.

بر این اساس، مسئله اصلی این پژوهش آن است که الگوی راهبردی شایستگی‌های فرماندهان مراکز آموزش عالی نیروهای مسلح جمهوری اسلامی ایران در عصر جنگ ترکیبی چگونه باید باشد؟ این مقاله در پی پاسخ به این سؤال و با هدف کلی تدوین و اعتبارسنجی چنین الگویی به روش علمی است. ضرورت انجام این تحقیق، علاوه بر پر کردن خلأ نظری مذکور، پاسخگویی به تأکیدات مکرر فرماندهی معظم کل قوا بر لزوم «تحول در نظام آموزشی نیروهای مسلح» و «تربیت فرماندهان دارای بینش تمدنی» است. یافته‌های این تحقیق می‌تواند برای ستاد کل نیروهای مسلح، دانشگاه‌های نظامی و امنیتی، مراکز مطالعات راهبردی و برنامه‌ریزان آموزشی در سطح کلان مورد استفاده قرار گیرد.

## ۲- مروری جامع بر ادبیات و پیشینه پژوهش

### ۲-۱- مبانی مفهومی جنگ ترکیبی و دلالت‌های آن برای آموزش

مفهوم جنگ ترکیبی اگرچه در دهه اخیر بر سر زبان‌ها افتاده، اما ریشه در تاکتیک‌های تاریخی دارد. آنچه آن را امروزه متمایز می‌کند، مقیاس، سرعت، یکپارچگی و ابزارهای نوین آن است. «گری» (۲۰۲۰) بر این باور است که در جنگ ترکیبی، تمرکز از «تخریب فیزیکی» به سمت «تأثیرگذاری بر اراده، ادراک و رفتار» دشمن (دولت، نخبگان و مردم) انتقال می‌یابد. این جنگ در فضایی میان جنگ<sup>۲</sup> اتفاق می‌افتد و شناسایی مهاجم، زمان شروع و ابعاد آن را دشوار می‌سازد. در چنین محیطی، نیروی انسانی آموزش‌دیده و هوشمند به اصلی‌ترین سلاح تبدیل می‌شود. آموزش دیگر انتقال دانش ثابت نیست، بلکه فرایندی است برای پرورش تفکر انتقادی، توانایی حل مسئله در شرایط ابهام، انعطاف‌پذیری ذهنی و مهارت‌های نوآورانه. مطالعات «دیویس و ویلسون» (۲۰۱۸) نشان می‌دهد نظام‌های آموزشی موفق در عصر حاضر، به سمت یادگیری مبتنی بر سناریوهای پیچیده، شبیه‌سازی‌های چندحوزه‌ای و توسعه قابلیت‌های شناختی حرکت کرده‌اند.

### ۲-۲- شایستگی از دیدگاه اسلامی و انقلابی

<sup>2</sup> Gray Zone

شکوهی و چمنی (۱۴۰۰) الگوی فرمانده موفق در ارتش را در ۶ بعد بصیرتی-معنوی، مدیریتی، رهبری، فردی-اخلاقی، دانشی-مهارتی و روابط اجتماعی تبیین کردند.

با وجود این پژوهش‌های ارزشمند، نقد اساسی وارد بر اغلب آن‌ها این است که یا سطح تحلیل آن‌ها عمومی است (شایستگی هر مدیر نظامی) و نه مختص مراکز آموزش عالی، یا بُعد راهبردی و الزامات جنگ ترکیبی (مانند سایبر، شناخت، اطلاعات) در آن‌ها به صورت جامع و یکپارچه دیده نشده است.

#### ۲-۴- پژوهش‌های بین‌المللی و مدل‌های رایج

در سطح جهانی، رویکرد شایستگی‌محور<sup>۳</sup> در آموزش‌های نظامی و مدیریتی به شدت مورد توجه است. مدل شایستگی مدیران دولتی آمریکا (ECQ) شامل شایستگی‌های رهبری تغییر، رهبری افراد، رهبری کسب‌وکار و نتایج‌محوری است. ارتش آمریکا نیز مدل‌هایی برای رهبری در سطوح مختلف دارد که بر تفکر راهبردی، توسعه دیگران و انصاف تأکید می‌کند. آکادمی‌های نظامی اروپا نیز بر شایستگی‌هایی مانند تطبیق‌پذیری، تفکر انتقادی و هوش فرهنگی تمرکز دارند. با وجود غنای روش‌شناختی، این مدل‌ها مبتنی بر ارزش‌ها و اهداف راهبردی خاص غرب طراحی شده و فاقد وجوه ارزشی-اعتقادی متناسب با فرهنگ ایران اسلامی هستند. بنابراین، اقتباس صرف از آن‌ها نه تنها پاسخگو نیست، بلکه می‌تواند به تضعیف هویت سازمانی نیروهای مسلح بینجامد.

#### ۲-۵- جمع‌بندی خلا پژوهشی

با ترکیب مبانی نظری و مرور پیشینه، خلا اصلی پژوهش حاضر را می‌توان در چند محور زیر خلاصه کرد:

۱. فقدان یک الگوی بومی و راهبردی که مختص مربیان و فرماندهان مراکز آموزش عالی نیروهای مسلح طراحی شده باشد.

۲. نبود نگاهی یکپارچه که همزمان پنج حوزه فرهنگی-ارزشی، مدیریتی، آموزشی-پژوهشی، عملیاتی و راهبردی را پوشش دهد.

۳. کم‌توجهی به الزامات عصر جنگ ترکیبی و شایستگی‌های نوظهور مرتبط با فضای سایبری، عملیات شناختی و هوشمندی راهبردی.

۴. نیاز به اعتبارسنجی کمی مدل‌های پیشنهادی کیفی با استفاده از روش‌های آماری پیشرفته (مانند SEM) در جامعه آماری واقعی خبرگان. این پژوهش مستقیماً در صدد پر کردن این خلأهای چهارگانه است.

#### ۳- روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش از نظر هدف، کاربردی-توسعه‌ای و از نظر روش گردآوری داده‌ها، آمیخته (کیفی-کمی) از نوع اکتشافی متوالی است. نقشه راه اجرای پژوهش طی ۱۲ ماه طراحی و اجرا شد.

#### ۳-۱- مرحله کیفی (شناسایی ابعاد و مؤلفه‌ها)

روش تحقیق: تحلیل محتوای کیفی (مستندات و مصاحبه) با رویکرد استقرایی.

**جامعه و نمونه:** جامعه آماری، خبرگان و صاحب‌نظران حوزه آموزش عالی نیروهای مسلح بودند. معیارهای انتخاب: داشتن مدرک دکتری، حداقل ۲۰ سال سابقه خدمت و حداقل ۱۵ سال مسئولیت در حوزه مدیریت آموزشی. نمونه‌گیری به روش هدفمند و با معیار اشباع نظری انجام شد و پس از مصاحبه با ۱۲ نفر (مشمول بر ۳ نفر از ستاد کل، ۳ نفر از سپاه، ۲ نفر از ارتش و ۲ نفر از فراجا و ۲ نفر از اساتید دانشگاه‌های نظامی) اشباع حاصل گردید.

#### ابزار گردآوری داده‌ها

**مطالعه اسنادی:** بررسی بیانات رهبری، اسناد راهبردی نیروهای مسلح (مانند سند راهبردی آموزش)، متون اسلامی مرتبط (قرآن، نهج‌البلاغه)، کتب مرجع (مانند مدیران و فرماندهان شایسته)، و مقالات و رساله‌های پیشین.

**مصاحبه نیمه‌ساختاریافته عمیق:** طراحی پروتکل مصاحبه با سؤالات کلیدی مانند «مهم‌ترین شایستگی‌های یک فرمانده مرکز آموزش عالی نیروهای مسلح در شرایط کنونی چیست؟» و «مواجهه با جنگ ترکیبی چه توانمندی‌های جدیدی را طلب می‌کند؟». مصاحبه‌ها

<sup>3</sup> Competency-Based Approach

ضبط، پیاده‌سازی و برای تأیید نهایی در اختیار مصاحبه‌شوندگان قرار گرفت.

**روش تحلیل داده‌های کیفی:** داده‌های متنی حاصل از مصاحبه‌ها و اسناد، با استفاده از تکنیک تحلیل مضمون (تم) در نرم‌افزار NVivo مورد تحلیل قرار گرفت. فرایند کدگذاری در سه سطح کدهای باز، محوری و انتخابی انجام شد. برای افزایش اعتبارپذیری، از روش بازبینی توسط مشارکت‌کنندگان و توافق بین کدگذاران (با حضور دو پژوهشگر مستقل) استفاده گردید.

### ۳-۲- مرحله کمی (اعتبارسنجی مدل)

**روش تحقیق:** پیمایشی و از نوع مدل‌سازی معادلات ساختاری (SEM) با رویکرد حداقل مربعات جزئی (PLS).

**جامعه و نمونه:** جامعه آماری در این مرحله، کلیه فرماندهان، معاونان و مدیران ارشد آموزشی مراکز آموزش عالی نیروهای مسلح (ستاد کل، ارتش، سپاه، فراجا) با حداقل ۱۵ سال سابقه خدمت و تحصیلات کارشناسی ارشد به بالا بودند. با توجه به محدود بودن جامعه (تعداد ۳۹ نفر شناسایی شده)، از روش سرشماری استفاده و در نهایت ۳۳ پرسشنامه کامل و قابل تحلیل جمع‌آوری گردید (نرخ بازگشت حدود ۸۵٪).

**ابزار گردآوری داده‌ها:** پرسشنامه محقق‌ساخته که بر اساس مؤلفه‌ها و شاخص‌های استخراج شده در مرحله کیفی طراحی شد. پرسشنامه در مقیاس پنج‌درجه‌ای لیکرت (از خیلی کم=۱ تا خیلی زیاد=۵) تنظیم گردید و شامل دو بخش ویژگی‌های جمعیت‌شناختی و سؤالات تخصصی بود.

### روایی و پایایی ابزار

**روایی محتوا:** پرسشنامه توسط ۱۲ نفر از اساتید و خبرگان (غیر از افراد مرحله کیفی) مورد بررسی قرار گرفت و اصلاحات لازم اعمال شد.

**روایی صوری:** برای اطمینان از قابلیت فهم سؤالات، پرسشنامه بین ۵ نفر از جامعه هدف پیش‌آزمون شد.

**پایایی:** با استفاده از ضریب آلفای کرونباخ و پایایی ترکیبی (CR) در مرحله تحلیل نهایی سنجیده شد که مقادیر آن برای همه سازه‌ها بالاتر از ۰.۷ بود که نشان‌دهنده پایایی عالی است.

**روش تحلیل داده‌های کمی:** داده‌ها با نرم‌افزار SmartPLS نسخه ۳ تحلیل شدند. روش تحلیل به دو بخش تقسیم شد:

**بررسی مدل اندازه‌گیری (مدل بیرونی):** برای ارزیابی روایی همگرا (با شاخص‌های بار عاملی  $> 0.5$ ،  $AVE > 0.5$  و  $VCR > 0.7$ ) و روایی واگرا (با معیار فورنل-لارکر: جذر AVE هر سازه بیشتر از همبستگی آن با سایر سازه‌ها).

**بررسی مدل ساختاری (مدل درونی):** برای ارزیابی ضرایب مسیر، سطح معناداری (t-value) و ضریب تعیین ( $R^2$ ) متغیرهای وابسته. همچنین شاخص GOF (شاخص برازش کلی) نیز محاسبه گردید.

**آمار توصیفی:** برای توصیف ویژگی‌های نمونه آماری از جداول فراوانی و نمودار استفاده شد.

### ۴- یافته‌های پژوهش

#### الف) یافته‌های توصیفی

از بین ۳۳ پاسخ‌دهنده در مرحله کمی، ۷۹ درصد دارای سابقه خدمت بالای ۲۵ سال و ۶۷ درصد دارای مدرک دکتری بودند. همچنین ۸۸ درصد اظهار داشتند با موضوع تحقیق آشنایی زیاد یا خیلی زیادی دارند که نشان از تخصصی بودن نمونه آماری دارد.

#### ب) یافته‌های کیفی (الگوی نهایی):

تحلیل محتوای مصاحبه‌ها و اسناد، منجر به طراحی الگوی نهایی شد. خلاصه این الگو به شرح زیر است:

۱. بُعد شایستگی‌های فرهنگی-ارزشی (هسته مرکزی هویت‌ساز)

این بُعد به عنوان زیربنای همه شایستگی‌های دیگر شناسایی شد و مشتمل بر ۴ مؤلفه و ۱۸ شاخص است:

**مؤلفه ۱.۱:** ولایت‌مداری و بصیرت سیاسی: شامل شاخص‌هایی چون التزام عملی به ولایت فقیه، درک عمیق از نقش نیروهای مسلح در نظام اسلامی، تحلیل دقیق تحولات منطقه‌ای و جهانی، و حفظ جهت‌گیری انقلابی.

**مؤلفه ۱.۲:** تعهد عمیق به ارزش‌های اسلامی و انقلابی: شاخص‌ها: پایبندی به اصولی چون شهادت‌طلبی،

ایشان، استقلال طلبی، ساده‌زیستی و دفاع از حریم اسلام و میهن.

**مؤلفه ۱.۳:** اخلاق حرفه‌ای و عدالت‌محوری: شاخص‌ها: رعایت امانت، صداقت، انصاف، رعایت حقوق ذی‌نفعان (دانشجویان، کارکنان) و پرهیز از هرگونه تبعیض.

**مؤلفه ۱.۴:** الگوی بخشی و هویت‌سازی: شاخص‌ها: توانایی انتقال ارزش‌ها از طریق رفتار و گفتار، ساختن هویت اسلامی-انقلابی در دانشجویان، و داشتن سیره عملی قابل اقتدا.

**۲. بُعد شایستگی‌های مدیریتی-ارتباطی (ستون فقرات اداره سازمان)**

شامل ۴ مؤلفه و ۲۰ شاخص

**مؤلفه ۲.۱:** رهبری تحول‌آفرین و انگیزش: ایجاد بینش مشترک، الهام‌بخشی، توانمندسازی کارکنان، ایجاد اعتماد و انگیزه برای تغییرات مثبت.

**مؤلفه ۲.۲:** مدیریت منابع و تصمیم‌گیری راهبردی: برنامه‌ریزی اثربخش بلندمدت و کوتاه‌مدت، تخصیص بهینه منابع، اتخاذ تصمیمات به موقع، منطقی و مبتنی بر شواهد.

**مؤلفه ۲.۳:** مدیریت بحران و تاب‌آوری سازمانی: حفظ آرامش و مدیریت اثربخش در شرایط غیرمنتظره، پیش‌بینی بحران‌های احتمالی، طراحی برنامه‌های واکنش و تقویت تاب‌آوری واحد تحت امر.

**مؤلفه ۲.۴:** ارتباطات و تعامل اثربخش: برقراری ارتباط شفاف، مؤثر و سازنده در سطوح مختلف (بالادست، هم‌تراز، زیردست، نهادهای بیرونی)، مهارت مذاکره و گوش‌دادن فعال.

**۳. بُعد شایستگی‌های آموزشی-پژوهشی و فناوری (هسته تخصصی مأموریت)**

شامل ۴ مؤلفه و ۲۲ شاخص

**مؤلفه ۳.۱:** تسلط بر علوم تربیتی و روش‌های نوین آموزش: آگاهی از نظریه‌های یادگیری بزرگسالان، طراحی آموزشی (Instructional Design)، تسلط بر روش‌های فعال (مبتنی بر مسئله، پروژه، شبیه‌سازی) و ارزشیابی آموزشی.

**مؤلفه ۳.۲:** توانایی پژوهش و تولید علم بومی دفاعی: هدایت و راهنمایی پایان‌نامه‌ها و طرح‌های پژوهشی کاربردی، تولید مقالات و کتب علمی متناسب با نیازهای راهبردی کشور، مشارکت در شبکه‌های علمی ملی و بین‌المللی.

**مؤلفه ۳.۳:** تسلط بر فناوری‌های آموزشی و فضای مجازی: بهره‌گیری از سامانه‌های مدیریت یادگیری (LMS)، آموزش الکترونیک، کلاس‌های معکوس، واقعیت افزوده/مجازی، و مدیریت مؤثر فضای مجازی آموزشی.

**مؤلفه ۳.۴:** توسعه حرفه‌ای مستمر و یادگیری مادام‌العمر: اشتیاق به به‌روزرسانی مستمر دانش و مهارت، مشارکت در دوره‌های آموزشی تکمیلی، مطالعه مستمر و انعکاس تجربیات.

**۴. بُعد شایستگی‌های عملیاتی-نظامی (وجه تمایز مربی نظامی)**

شامل ۴ مؤلفه و ۲۰ شاخص

**مؤلفه ۴.۱:** دانش عمیق علوم نظامی، دفاعی و امنیتی: تسلط بر استراتژی‌های کلان دفاعی، دکترین‌های رزم، تاکتیک‌های حوزه‌های مختلف (زمینی، دریایی، هوایی، دفاع سایبری) و تحولات فناوری‌های نظامی.

**مؤلفه ۴.۲:** تجربه میدانی و درک واقعیت‌های رزم: برخورداری از سوابق عملیاتی واقعی (مانند دفاع مقدس، مأموریت‌های امنیتی)، توانایی تحلیل وقایع رخ داده و انتقال درس‌های آموخته به محیط آموزشی.

**مؤلفه ۴.۳:** توان رهبری و فرماندهی در عملیات‌های پیچیده: مهارت در فرماندهی و کنترل یگان در سناریوهای مبهم و پویا، تصمیم‌گیری تحت فشار و هدایت تیم‌های چندتخصصی.

**مؤلفه ۴.۴:** آمادگی رزمی، جسمانی و روحیه جنگندگی: حفظ آمادگی بدنی مطلوب، روحیه سلحشوری، شجاعت و توانایی تحمل سختی‌ها به عنوان یک الگو برای دانشجویان.

**۵. بُعد شایستگی‌های راهبردی (پاسخ به جنگ ترکیبی)**

این بُعد که نوآوری اصلی مدل را تشکیل می‌دهد، شامل ۶ مؤلفه و ۲۴ شاخص است:

**مؤلفه ۵.۱:** تفکر سیستمی و آینده‌نگری: درک پیوند و تعامل پیچیده اجزای مختلف نظام امنیت ملی (سیاسی، اقتصادی، فرهنگی، نظامی)، شناسایی روندهای کلان و پیش‌بینی سناریوهای آینده تهدید.

**مؤلفه ۵.۲:** هوشمندی و تحلیل راهبردی: توانایی گردآوری اطلاعات از منابع متنوع، تحلیل عمیق آنها برای شناسایی نیات، نقاط ضعف و قوت دشمن، و ارائه ارزیابی‌های راهبردی به تصمیم‌گیران.

**مؤلفه ۵.۳:** مدیریت جنگ ترکیبی و عملیات چنددامنه: درک عمیق از ابعاد و ابزارهای جنگ ترکیبی (سایبری، اطلاعاتی، روانی، اقتصادی، نظامی متعارف) و توانایی طراحی، هماهنگی و هدایت پاسخ‌های یکپارچه و متناسب در این عرصه‌ها.

**مؤلفه ۵.۴:** رهبری در فضای سایبری و عملیات شناختی: آگاهی از تهدیدات سایبری (جاسوسی، تخریب، جنگ اطلاعاتی) و شناختی (دخالت در ادراک و باورها)، توانایی هدایت عملیات دفاعی و تهاجمی در این فضاها و حفاظت از نیروهای خودی در مقابل جنگ روانی دشمن.

**مؤلفه ۵.۵:** خلاقیت و نوآوری راهبردی: توانایی خلق راه‌حل‌ها، روش‌ها، تاکتیک‌ها و سازوکارهای جدید و غیرمنتظره برای غلبه بر چالش‌های پیچیده و خنثی‌سازی ابتکارات دشمن.

**مؤلفه ۵.۶:** سازماندهی شبکه‌ای و مدیریت دانش راهبردی: ایجاد و هدایت شبکه‌های دانشی غیرمتمرکز و چابک در درون و بیرون نیروهای مسلح، تسهیم تجربیات، مستندسازی درس‌آموخته‌ها و خلق دانش جمعی برای مقابله با تهدیدات نوین.

### ج) یافته‌های کمی (اعتبارسنجی مدل)

نتایج تحلیل داده‌ها در نرم‌افزار SmartPLS به شرح زیر بود:

**مدل اندازه‌گیری:** تمامی بارهای عاملی شاخص‌ها بر سازه‌های مربوطه، بالاتر از ۰.۵ و اغلب بالاتر از ۰.۷ بودند. میانگین واریانس استخراج شده (AVE) برای همه پنج سازه بین ۰.۵۲ تا ۰.۶۸ به دست آمد که نشان‌دهنده روایی همگرایی مطلوب است. پایایی ترکیبی (CR) نیز بین ۰.۸۷ تا ۰.۹۳ بود که حاکی از پایایی عالی درونی مدل است. آزمون فورنل-لارکر نیز تأیید کرد که جذر

AVE هر سازه از همبستگی آن با سایر سازه‌ها بیشتر است که روایی واگرا را اثبات می‌کند.

**مدل ساختاری:** ضرایب مسیر ( $\beta$ ) بین سازه‌ها مثبت و معنادار بودند. به عنوان مثال، ضریب مسیر شایستگی‌های فرهنگی-ارزشی شایستگی‌های راهبردی (۰.۴۳) و شایستگی‌های عملیاتی-نظامی شایستگی‌های راهبردی (۰.۳۹) با سطح معناداری بالا ( $p < 0.01$ ) به دست آمد. ضریب تعیین ( $R^2$ ) برای سازه شایستگی‌های راهبردی برابر با ۰.۶۲ محاسبه شد که نشان می‌دهد ۶۲٪ از واریانس این سازه متغیر وابسته، توسط سایر سازه‌های وارد شده به مدل تبیین می‌شود. شاخص برازش کلی (GOF) نیز مقدار ۰.۵۱ داشت که نشان‌دهنده برازش قوی مدل است.

**تحلیل فرعی:** بررسی جداول ۱۲-۴ و ۱۳-۴ رساله نشان می‌دهد مؤلفه‌هایی مانند «ولایت‌مداری»، «تفکر سیستمی» و «مدیریت جنگ ترکیبی» دارای بالاترین بار عاملی و بیشترین تأثیر در مدل نهایی هستند.

### ۵- بحث و نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف طراحی الگوی شایستگی‌های راهبردی مربیان نظامی در عصر جنگ ترکیبی انجام شد. یافته‌ها به وضوح نشان می‌دهد که نقش مدیران و فرماندهان مراکز آموزش عالی نیروهای مسلح، نقشی چندبعدی، پیچیده، راهبردی و هویت‌ساز است. مدل نهایی ارائه‌شده، حاصل تلفیق مبانی اسلامی-انقلابی، تجربیات ارزشمند دفاع مقدس، دانش مدیریت و آموزش مدرن و تحلیل عمیق الزامات جنگ ترکیبی است.

#### ۱. بحث کلیدی یافته‌ها

**اولویت ارزش‌ها به عنوان زیربنا:** تأیید بالاترین بار عاملی برای مؤلفه‌های فرهنگی-ارزشی (به ویژه ولایت‌مداری) در تحلیل کمی، همسو با دیدگاه اسلام و رهبری انقلاب است. این بدان معناست که بدون این هسته سخت ارزشی، دیگر شایستگی‌ها ممکن است به انحراف کشیده شده یا در خدمت اهداف غیرسازمانی قرار گیرند.

**یکپارچگی پنج بُعد:** مدل نشان می‌دهد این پنج بُعد در عمل مجزا نیستند، بلکه به صورت سیستمی درهم‌تنیده عمل می‌کنند. یک مربی راهبردی باید بتواند

دانش عملیاتی خود (بعد چهارم) را با استفاده از روش‌های آموزشی نوین (بعد سوم) و در چارچوب ارزشی مشخص (بعد اول) به دانشجویان منتقل کند، در حالی که سازمان آموزشی را به خوبی مدیریت می‌کند (بعد دوم) و چشم‌انداز راهبردی کلان را مدنظر دارد (بعد پنجم).

**راهبردی بودن به مثابه یک بعد مستقل:** نوآوری اصلی این پژوهش، ارتقای «راهبردی بودن» از یک ویژگی پراکنده به یک بعد مستقل با ۶ مؤلفه تفصیلی است. این امر نشان می‌دهد که در عصر حاضر، «تفکر راهبردی» به تنهایی کافی نیست و نیاز به مهارت‌های عملیاتی مشخصی در حوزه‌های سایبر، شناخت، اطلاعات و مدیریت پیچیدگی است.

**بومی بودن مدل:** شاخص‌هایی مانند «روحیه جهادی»، «بصیرت سیاسی» و «تولید علم بومی دفاعی» که در مدل‌های خارجی یافت نمی‌شوند، نشان از انطباق کامل مدل با فرهنگ سازمانی نیروهای مسلح جمهوری اسلامی ایران دارد.

## ۲. مقایسه با پیشینه پژوهش

مدل حاضر همسو با یافته‌های سجادی (۱۳۹۸) در اهمیت شایستگی‌های ارزشی، و همسو با مرادی و همکاران (۱۳۹۷) در جامع‌نگر بودن است. اما با تمایز آشکار در این که: اولاً مخاطب آن مخصوص مراکز آموزش عالی است؛ ثانیاً بعد راهبردی با مؤلفه‌های جنگ ترکیبی را به صورت تفصیلی گنجانده؛ ثالثاً آن را با روش آمیخته و تحلیل کمی SEM اعتبارسنجی کرده است. همچنین، در مقایسه با مدل‌های بین‌المللی، این مدل بر ارزش‌ها و هویت اسلامی-ایرانی تأکید می‌کند در حالی که از وجوه مدیریتی و فناورانه آن‌ها نیز بهره برده است.

## ۳. پیامدهای نظری و کاربردی

### پیامدهای نظری:

- ۱) غنای ادبیات بومی مدیریت و رهبری در نیروهای مسلح با ارائه یک مدل یکپارچه.
- ۲) ارائه چارچوبی برای تلفیق نظریه‌های مدیریت راهبردی، آموزش عالی و علوم دفاعی در یک الگوی عملیاتی.

- ۳) ایجاد مبنایی برای پژوهش‌های آتی در زمینه سنجش، آموزش و توسعه این شایستگی‌ها.

## پیامدهای کاربردی و پیشنهادها

### ۱. برای سطوح سیاستگذاری کلان (ستاد کل نیروهای مسلح)

- ۱) پیشنهاد می‌شود این مدل به عنوان سند معیار شایستگی برای انتصاب فرماندهان و روسای دانشگاه‌ها و مراکز آموزش عالی نظامی تصویب و ابلاغ گردد.
- ۲) بازنگری اسناد راهبردی آموزشی (مانند سند تحول آموزش نیروهای مسلح) بر مبنای ابعاد و مؤلفه‌های این مدل.

### ۲. برای مراکز آموزش عالی نیروهای مسلح (دانشگاه فرماندهی و ستاد، دانشگاه افسری، دانشگاه علوم نظامی و...)

- ۱) بازطراحی برنامه‌های درسی دوره‌های تربیت مربی و فرماندهی: گنجانیدن دروس و کارگاه‌های تخصصی مبتنی بر مؤلفه‌های بعد پنجم (مانند «آشنایی با جنگ ترکیبی»، «رهبری در فضای سایبری»، «تحلیل راهبردی») در کنار دروس موجود.
- ۲) طراحی و اجرای «دوره‌های تعالی مدیریت راهبردی آموزشی» برای مدیران فعلی بر اساس این مدل.
- ۳) استقرار سامانه ارزیابی ۳۶۰ درجه: طراحی پرسشنامه‌ای بر اساس ۱۰۴ شاخص این پژوهش برای ارزیابی دوره‌ای مدیران آموزشی توسط مافوق، همکاران، زیردستان و دانشجویان.
- ۴) تغییر در روش‌های گزینش: استفاده از مراکز ارزیابی (Assessment Centers) و سناریوهای شبیه‌سازی شده پیچیده برای سنجش شایستگی‌های راهبردی داوطلبان تصدی پست‌های مدیریت آموزشی.

### ۳. برای پژوهش‌های آتی

- ۱) اعتبارسنجی مدل در هر یک از نیروها به صورت جداگانه: انجام پژوهشی تطبیقی برای بررسی

شباهت‌ها و تفاوت‌های الزامات شایستگی در ارتش، سپاه و فراجا.

۲) طراحی ابزارهای سنجش عینی: برای هر یک از ۱۰۴ شاخص، ابزارهای مشاهده، مصاحبه ساختاریافته یا آزمون‌های عملی طراحی و اعتبارسنجی شود.

۳) پژوهش طولی: بررسی تأثیر اجرای مدل بر شاخص‌های عملکرد سازمانی مراکز آموزشی (مانند رضایتمندی دانشجویان، کیفیت پژوهش‌ها، موفقیت فارغ‌التحصیلان) در یک بازه زمانی چندساله.

#### ۶- جمع‌بندی

در فضای پرابهام، پیچیده و به شدت رقابتی عصر جنگ ترکیبی، امتیاز رقابتی اصلی نیروهای مسلح در کیفیت نیروی انسانی آن است و کیفیت نیروی انسانی، محصول نظام آموزشی کارآمد و مربیان شایسته آن است. این پژوهش با ارائه مدلی بومی، یکپارچه، مبتنی بر ارزش و معطوف به آینده، چارچوبی علمی برای پرورش چنین مربیانی ارائه کرده است. به کارگیری این الگو می‌تواند گامی بلند در مسیر تحقق چشم‌انداز «نیروهای مسلح تراز انقلاب اسلامی» و تضمین امنیت و اقتدار ملی در برابر پیچیده‌ترین تهدیدات باشد. همان‌گونه که در رساله اشاره شده، «تدوین این اثر علمی تقدیم می‌شود به شهدای انقلاب اسلامی به‌ویژه شهدای اقتدار»، و چه سرمشقی بالاتر از آنان که خود، تجسم عینی شایستگی‌های ارزشی، مدیریتی، عملیاتی و راهبردی بودند.

#### ۷- منابع و مآخذ

- [۱] قرآن کریم.
- [۲] نهج‌البلاغه. (۱۳۹۵). ترجمه و شرح: سیدجعفر شهیدی. تهران: انتشارات علمی و فرهنگی.
- [۳] امام خامنه‌ای، سید علی. (بیانات مختلف در دیدار با فرماندهان و اعضای هیئت‌های علمی نیروهای مسلح). قابل دسترسی در سایت دفتر مقام معظم رهبری.
- [۴] سجادی، سید احمد. (۱۳۹۸). مدیران و فرماندهان شایسته: الگوی جامع شایستگی در نظام اسلامی (جلد ۱-۴). قم: پژوهشگاه علوم اسلامی نور.

[۵] مرادی آیدیشه، م.، حسنقلی‌پور، ر.، سیدجوادین، س. ر.، و همکاران. (۱۳۹۷). الگوی شایستگی فرماندهی از منظر فرماندهی معظم کل قوا. پایان‌نامه دکتری، دانشگاه عالی دفاع ملی.

[۶] سلمانی، ع.، و پورالشریعه، ع. (۱۴۰۲). مؤلفه‌ها و سنجه‌های شایستگی‌های فرمانده مراکز آموزش عالی نیروهای مسلح. فصلنامه علمی-پژوهشی مدیریت نظامی، ۲۳(۱)، ۵-۳۲.

[۷] عبدالله‌پور، م. (۱۳۹۳). طراحی مدل شایستگی‌های حرفه‌ای مدیران و فرماندهان مراکز آموزش عالی سپاه. پایان‌نامه دکتری، دانشگاه جامع امام حسین(ع).

[۸] شکوهی، ح.، و چمنی، م. (۱۴۰۰). الگوی فرمانده و مدیر موفق در ارتش ج.ا.ایران مبتنی بر اندیشه‌های فرماندهی معظم کل قوا. فصلنامه علمی راهبرد دفاعی، ۱۹(۷۳)، ۱-۲۸.

[9] Hoffman, F. G. (۲۰۰۷). Conflict in the ۲۱st Century: The Rise of Hybrid Wars. Arlington, VA: Potomac Institute for Policy Studies.

[10] Gray, C. S. (۲۰۲۰). The Future of Strategy. Cambridge: Polity Press.

[12] Davis, M., & Wilson, P. (۲۰۱۸). Strategic Competencies for Military Educators in the Digital Age. Journal of Military Education, ۴۵-۶۷, ۳(۴۲).

# الگوی نگارش مقاله در دوفصلنامه «مهندسی شناورهای تندرو»

نام و نام خانوادگی نویسنده

Author@Email، سازمان متبوع نویسنده،

چکیده:

چکیده حداکثر شامل ۳۰۰ کلمه در یک یا دو پاراگراف بوده با قلم BNazanin-11- Bold برای نوشتار فارسی و با قلم Times New Roman-10- Bold برای لغات انگلیسی و به صورت تک ستونی آورده شود.

واژه‌های کلیدی:

مجرا شده با ویرگول، با قلم BNazanin-11 برای نوشتار فارسی و با قلم Times New Roman-10 برای لغات انگلیسی.

## ۱- مقدمه

۲۷mm

عنوان فارسی مقاله بایستی با قلم B Triffic-18- Bold بوده و از دو خط تجاوز نکرده و نام نویسندگان مقاله با قلم B Nazanin-12- Bold و رتبه علمی آنها با قلم B Nazanin-10 فارسی و Times New Roman-9 لاتین به ترتیب در زیر عنوان مقاله آورده شود. بقیه تیترهای اصلی بایستی با قلم B Nazanin-12- Bold و تیترهای فرعی (زیربخش‌ها) با قلم B Nazanin-11- Bold متن مقاله، با قلم BNazanin-12 و قلم Times New Roman-11 برای لغات انگلیسی، با نرم افزار Word 2007 یا Word 2003 تحت ویندوز XP و با فواصل بین خطوط به صورت (Single) نوشته شود. عنوان بخش‌ها باید با قلم BNazanin-12- Bold و شماره گذاری شده با شروع از ۱ و با تورفتگی از ابتدای خط و فضای سفید ۶ نقطه با بخش بالایی نوشته شود.

## ۲- فرمت مقاله

مقالات باید در اندازه صفحه A4 چاپ شده باشند. مقاله بایستی بین ۱۰ تا ۱۵ صفحه دوسطونی بوده و شکل‌ها و جدول‌های آن داخل متن آورده شود. این تعداد صفحات با در نظر گرفتن تمامی شکل‌ها، جدول‌ها و مراجع مقاله می‌باشد. هر مقاله باید به صورت‌های Word و PDF تهیه و ارسال شود.

## ۳- حاشیه‌ها

حاشیه بالا و چپ ۲/۵ سانتی‌متر و حاشیه راست و پایین ۲/۷ سانتی‌متر باشد. این حاشیه برای تمام صفحات شامل صفحه اول نیز اعمال می‌گردد. متن باید در دو ستون با عرض هر کدام ۷/۴ سانتی‌متر و با فاصله بین دو ستون ۱/۰ سانتی‌متر تنظیم شود. تورفتگی پاراگراف‌های بعدی ۰/۵ سانتی‌متر است.

## ۴- جدول‌ها و شکل‌ها (نمودارها و عکس‌ها)

هر جدول یا شکل باید دارای شماره، عنوان و توضیح بوده و با قلم BNazanin-12 نوشته شود. عنوان جداول به صورت وسط چین در بالای جدول و عنوان شکل‌ها به صورت وسط چین در زیر شکل نوشته شود. ذکر واحد کمیت‌ها در جدول و شکل الزامی است. در متن مقاله باید به همه جدول‌ها یا شکل‌ها ارجاع داده شود. در صورتی که ناچار به استفاده از شکل‌های بزرگ‌تر از یک ستون هستید شکل را در بالا یا پایین صفحه مورد نظر قرار دهید. شکل‌ها و جدول‌ها نباید پیش از اولین اشاره به آنها در متن مقاله ظاهر شوند. هیچ‌گاه عناوین را به عنوان قسمتی از شکل به صورت تصویری ذخیره نکنید. همچنین، اطراف عنوان‌ها، شکل‌ها و جدول‌ها از کادر اضافی استفاده نکنید.

## ۵- فرمول‌ها و معادلات

معادلات باید به ترتیب از ابتدا تا انتها شماره گذاری شوند. شماره معادلات باید در انتهای سمت راست هر ستون و در امتداد خط حاوی معادلات در پرانتز قید شود. تمام متغیرها، پارامترها و نمادهای یک عبارت ریاضی باید

۲۵mm

۱۰mm

[2] Family, F., and Family, J., Principles of solar engineering, Hemisphere-McGraw Hill. 1978.

[3] Family, R. R., Family, M. X., and Family, M. J., "Fundamental studies of transition-metal sulfide catalytic materials," In *Advances in Catalysis*, Vol. 40, edited by D. D., Eley, H., Pines, and W. O., Haag, Burlington, Mass, Academic press. 1994.

[۴] سیف محمدسعید، سالاری محمود، تیموری مهدی، «کاهش مقاومت در شناورهای تندرو با استفاده از جدایش جریان به کمک پله‌های عرضی»، اولین همایش ملی هیدرودینامیک کاربردی، تهران، دانشگاه علم و صنعت، ۱۳۸۹.

[5] Family, C. H., Family, B. X., and Family, X. F., "Experimental investigation on boiling of nano-particle suspension," Boiling Heat Transfer Conference, Jamaica, 2003.

[6] <http://www.website.com>

توضیح داده شوند. کلمات و یا عبارت لاتین (غیر از اختصارات) فقط می‌تواند در زیرنویس ظاهر شود.

## ۶- سیستم واحدها

سیستم واحد قابل قبول، سیستم بین‌المللی (SI) بوده و در مواقع ضروری معادل آن در سیستم واحدهای دیگر در داخل پرانتز به کار رود.

## ۷- نتایج

این بخش شامل ارائه نتایج تحقیق و مباحث مربوط به آنها می‌باشد.

## ۸- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

جمع‌بندی نتایج حاصل از تحقیق در این بخش ذکر شود.

## ۹- تشکر و قدردانی (در صورت لزوم)

در صورت لزوم نویسندگان می‌توانند مراتب تشکر و قدردانی خود را از حامیان تحقیق در این قسمت درج کنند.

## ۱۰- فهرست علائم (در صورت لزوم)

محل فهرست علائم قبل از مراجع است. ابتدا علائم انگلیسی به ترتیب الفبا و سپس علائم یونانی به ترتیب الفبا تایپ شود.

مساحت،  $A \quad m^2$

چگالی،  $\rho \quad kg/m^3$

## ۱۱- مراجع

منابع اشاره‌شده در متن باید توسط شماره‌هائی مانند [۱] در داخل کروشه نشان داده شوند. بدیهی است مشخصات کامل مقاله در بخش مراجع با ذکر همان شماره آورده می‌شود. ترتیب قرار گرفتن مقالات در بخش مراجع همانند ترتیب رجوع به آن مقالات در متن مقاله می‌باشد. به جز مراجع نامبرده شده در متن، مرجع دیگری در بخش مراجع نوشته نشود. نحوه نوشتن عنوان مراجع بر حسب اینکه مقاله مجله [۱]، کتاب [۲]، مطلبی متعلق به کتابی که توسط افراد مختلف نوشته شده باشد [۳] یا مقاله کنفرانس [۴،۵] باشد، به ترتیب زیر خواهد بود:

[1] Family, M. M., and Family, J. G., "The concepts of energy, environment, and cost for process design," *International Journal of Green Energy*, Vol. 1, pp. 137-151, 2004.