

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.

۱- مقدمه

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 انجام 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 به واسطه مکانیزم‌های ادغام چندحسی^۱ 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^۲ 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

¹ Multi-Sensor Fusion

² 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^۳

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^۴، 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^۵

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

³ Computational Load Distribution

⁴ Edge Computing

⁵ Cognitive Load Reduction

و پهباد (پیشنهادی)				
500-650	10-20	80-150	300-500	پوشش منطقه‌ای (km ² /h)
5-15	45-60	30-45	5-10	زمان استقرار (min)
20-30	80-100	50-70	25-40	هزینه عملیاتی (USD/km ²)
90-95%	65-70%	60-75%	70-80%	دقت شناسایی هدف (%)
80-90%	50-60%	45-55%	40-50%	مقاومت در 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 بازیابی 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	پهپاد	معیار
سطحی بدون سرنشین، شناور زیرسطحی بدون سرنشین	شناور سطحی بدون سرنشین	شناور زیرسطحی 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 -ضعف در شرایط پیچیده و متغیر	-اجرای بسیار سریع -پیاده‌سازی ساده -نیاز کم به منابع محاسباتی	الگوریتم مبتنی بر قواعد
تخصیص ابتدایی وظایف در شروع مأموریت یا بازآرایی سریع	-مقیاس‌پذیری ضعیف برای تعداد زیاد دارایی‌ها -غیرتطبیقی نسبت به تغییرات محیطی	-یافتن تخصیص بهینه با حداقل هزینه کل -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 -نیاز به توان پردازشی بالاتر -حساس به انتخاب معیارهای پاداش	-قابلیت تطبیق با شرایط متغیر -یادگیری مستقل از محیط -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^۶ 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

^۶ 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^۷: سیستم‌های چندعامله به مجموعه‌ای از عامل‌ها^۸ 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، 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

⁷ Multi-Agent Systems - MAS

⁸ 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^۹ 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

^۹ 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^{۱۰}

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].

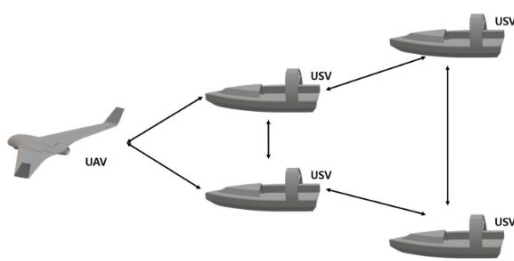
▪ **کنترل مقاوم:** این نوع کنترل به‌ویژه در شرایطی که سیستم‌ها دچار عدم قطعیت یا اختلال می‌شوند، مفید است. این الگوریتم‌ها به سامانه‌ها این امکان را می‌دهند که در برابر تغییرات غیرمنتظره در دینامیک‌های محیطی یا سامانه‌ای مقاوم بمانند. در سناریوهای نظارتی یا جستجو که ممکن است اطلاعات حسی مختل شود، کنترل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

¹⁰ Wide-Area Coastal Patrol and Surveillance



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

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

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 ساحلی)

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^{۱۱} 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.

¹¹ Edge Computing Nodes

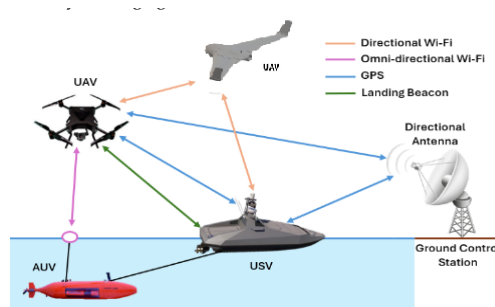
توسعه شبکه‌های مش مقاوم، استفاده از لینک‌های چندفرکانسی، بازاریابی بلادرنگ شبکه	زیاد	زیاد	اختلال در ارتباط سکوها بدون سرنشین هواپایه و سطحی و زیرسطحی
استفاده از پهپادهای دورپرواز با بهره‌وری انرژی بالا، تعبیه ایستگاه‌های شارژ دریایی	متوسط	زیاد	تخلیه سریع باتری پهپادها
بهبود پیش‌بینی وضعیت جوی و تعریف 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^{۱۳} 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^{۱۴} 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^{۱۲}



¹³ Predictive Control

¹⁴ Shared Situational Awareness

¹² Converged Target Tracking and Pursuit

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

سناریوی ۳: بازرسی دقیق زیرساخت‌های دریایی و ارزیابی ساختاری^{۱۵}

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

¹⁵ 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 سر نشین 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^{۱۶}
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 چنددامنه‌ای 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

¹⁶ 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^{۱۷}

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

¹⁷ 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/TH.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
- [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.