



ارزیابی ریسک محیط ترکیبی هوا و دریا در عملیات بالگرد Bell 412 بر عرشه شناور: رویکردی پیشگیرانه برای ارتقای ایمنی عملیاتی

محمد حسین عابدی زاده^۱

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی ایمنی، دانشکده ایمنی / دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی

دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۰

بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۲۷

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۳۰

ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۳/۳۰

*نویسنده مسئول:

mabedi1995@yahoo.com

کلید واژه ها:

بالگرد بل ۴۱۲، محیط ترکیبی هوا و دریا،

ارزیابی ریسک، عملیات عرشه‌ای، ایمنی

سامانه محور، شتاب عرشه، دوره موج،

پشتیبانی از تصمیم‌گیری

چکیده

عملیات بالگرد بر عرشه شناورها، به‌ویژه در محیط‌های دریایی پویا، با ریسک‌های ایمنی قابل توجهی همراه است که ریشه در تعامل پیچیده بین عوامل جوی و اقیانوسی دارد. این پژوهش با هدف ارزیابی جامع ریسک محیط ترکیبی هوا و دریا در عملیات بالگرد بل ۴۱۲ و ارائه راهکارهای پیشگیرانه برای کاهش سوانح دریایی انجام شده است. روش تحقیق تلفیقی از تحلیل سوانح تاریخی، نظرسنجی از خبرگان (۳۲ پاسخ‌دهنده صلاحیت‌دار شامل خلبانان، افسران نیروی دریایی و مهندسان ایمنی)، و شبیه‌سازی دینامیکی ترکیبی (با ۱۲۰۰ سناریوی مبتنی بر روش نمونه‌برداری تصادفی) است که دینامیک پرواز بالگرد و حرکات شش‌درجه‌آزادی شناور را همزمان مدل‌سازی می‌کند. یافته‌ها نشان می‌دهد که ریسک عملیاتی نه تابع ارتفاع موج به‌تنهایی، بلکه تابعی غیرخطی از شتاب عمودی عرشه، سرعت باد جانبی و دوره اوج موج است. تحلیل حساسیت نشان داد که شتاب عمودی ۴۱ درصد و باد جانبی ۳۶ درصد از واریانس احتمال شکست عملیاتی را تبیین می‌کنند. همچنین، در شرایط استاندارد فعلی (ارتفاع موج معادل ۲۰ متر)، احتمال شکست عملیاتی به ۳۸ درصد می‌رسد، مقداری غیرقابل قبول برای عملیات ایمن. بر این اساس، چارچوبی مبتنی بر شاخص ترکیبی ایمنی دریایی و راهکارهایی مانند سامانه‌های پشتیبان تصمیم‌گیری بلادرنگ، یکپارچه‌سازی داده‌های بالگرد و شناور، و آموزش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی پویا پیشنهاد شده است. این پژوهش تأکید می‌کند که ایمنی در محیط دریایی نیازمند حرکت از رویکرد واکنشی به سمت طراحی پیشگیرانه در چارچوب ایمنی سامانه محور است.



© نویسندگان

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

این مقاله تحت لایسنس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License- CC BY) در دسترس شما قرار گرفته است.

۱- مقدمه

عملیات بالگرد در محیط دریایی به عنوان یکی از پیچیده‌ترین و پرخطرترین حوزه‌های هوانوردی شناخته می‌شود که نیازمند هماهنگی دقیق میان سامانه‌های پروازی، شرایط محیطی پویا و تصمیم‌گیری انسانی است. در این بستر عملیاتی، بالگرد نه تنها با محدودیت‌های ذاتی پایداری آیرودینامیکی و حساسیت به تغییرات جریان هوا مواجه است، بلکه با محیطی چندبعدی و غیرقابل پیش‌بینی متشکل از لایه مرزی جوی، امواج سطحی اقیانوس و حرکات شناور تعامل دارد [۱]. این تعامل پیچیده که محیط ترکیبی هوا و دریا نامیده می‌شود، شرایطی بحرانی برای اجرای فازهای حساس فرود و برخاست فراهم می‌آورد که در آن کوچک‌ترین خطا می‌تواند به فاجعه منجر شود.

بالگرد بل ۴۱۲ به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردی نظیر سامانه روتور چهارپره، برد عملیاتی مناسب و ظرفیت باربری قابل توجه، در ناوگان نیروهای دریایی و سازمان‌های جست‌وجو و نجات بسیاری از کشورها مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴]. با این وجود، گسترش کاربرد این بالگرد به محیط‌های دریایی نامساعد، چالش‌های ایمنی جدیدی را پدید آورده است که فراتر از توانایی‌های ذاتی هر سکوی پروازی ثابت عمل می‌کند. آمارهای بین‌المللی نشان می‌دهد که نرخ سوانح بالگرد در عملیات دریایی به طور متوسط ۱٫۸ برابر بیشتر از سایر کاربردهای هوانوردی است [۵]. تحلیل‌های آسیب‌شناسانه سوانح حاکی از آن است که بیش از ۴۰ درصد این حوادث در لحظات نهایی فرود یا ابتدای برخاست رخ می‌دهند، زمانی که بالگرد در فاصله بسیار کم از سطح عرشه قرار دارد و تحت تأثیر همزمان حرکات شناور، جریان‌های آشفته ناشی از ساختار کشتی و اثرات آیرودینامیکی بازتاب جریان روتور قرار می‌گیرد [۶].

رویکردهای سنتی مدیریت ایمنی که عمدتاً بر تحلیل پس‌نگر سوانح و اصلاح خطاهای گذشته متمرکز هستند، در محیط‌های پیچیده دریایی کارایی لازم را ندارند. پارادایم‌های نوین ایمنی با الهام از نظریه ایمنی سامانه‌محور و مفهوم ایمنی پویا، ایمنی را نه به عنوان فقدان خطا، بلکه به عنوان توانایی سامانه در حفظ عملکرد مطلوب در شرایط عدم

قطعیت تعریف می‌کنند [۲][۳]. در این چارچوب نظری، اولویت اصلی شناسایی پیش‌دستانه ریسک‌های پنهان، طراحی سدهای ایمنی فعال و ارتقای آگاهی وضعیتی عمل‌کنندگان از طریق یکپارچه‌سازی فناوری‌های کمکی است.

ارزیابی ریسک به عنوان فرآیندی ساختاریافته برای شناسایی، تحلیل و اولویت‌بندی خطرات بالقوه، نقش محوری در تحول فرهنگ ایمنی پیشگیرانه ایفا می‌کند [۷]. در محیط‌های عملیاتی دریایی که خطاها می‌توانند در کسری از ثانیه به فاجعه تبدیل شوند و ریسک‌ها ماهیتی ترکیبی و غیرخطی دارند، اتکا به معیارهای تک‌متغیره سنتی مانند ارتفاع موج کافی نیست. پژوهش‌های پیشین نشان داده‌اند که ترکیب همزمان عواملی نظیر شتاب عمودی عرشه، سرعت باد جانبی و دوره موج می‌تواند شرایطی ایجاد کند که حتی با رعایت آستانه‌های ظاهراً ایمن، احتمال وقوع سانحه به طور قابل توجهی افزایش یابد [۸][۶].

این پژوهش با هدف ارائه ارزیابی جامع از ریسک محیط ترکیبی هوا و دریا در عملیات بالگرد بل ۴۱۲ بر عرشه شناورها طراحی شده است. با بهره‌گیری از روش‌شناسی ترکیبی شامل تحلیل سوانح تاریخی، نظرسنجی از خبرگان متخصص و شبیه‌سازی دینامیکی پیشرفته، این مطالعه در پی پاسخ به این پرسش کلیدی است که کدام ترکیب از پارامترهای محیطی و عملیاتی بیشترین سهم را در احتمال شکست عملیاتی دارد و چگونه می‌توان با طراحی راهکارهای پیشگیرانه مبتنی بر شواهد، ایمنی این عملیات‌ها را ارتقا داد. یافته‌های این تحقیق می‌تواند مبنایی علمی برای بازنگری استانداردهای عملیاتی، طراحی سامانه‌های پشتیبان تصمیم‌گیری بلادرنگ و توسعه برنامه‌های آموزش واقع‌گرایانه فراهم آورد.

۲- روش پژوهش

۲-۱- محیط مورد مطالعه

محیط دریایی به عنوان بستر اصلی اجرای عملیات بالگرد بر عرشه شناورها، یکی از پویاترین و پیچیده‌ترین محیط‌های عملیاتی در حوزه هوانوردی محسوب می‌شود. برخلاف

شناور نزدیک است و می‌تواند منجر به پدیده تشدید دینامیکی شود [۱۵]. علاوه بر امواج، جریان‌های سطحی دریا و گرادیان‌های دمایی نیز بر دینامیک شناور تأثیر می‌گذارند، به ویژه در مناطق نزدیک ساحل یا در مسیر جریان‌های بزرگ مقیاس اقیانوسی [۱۶].

این شرایط محیطی، شناور را در معرض حرکات شش‌درجه‌آزادی پیچیده قرار می‌دهند که شامل سه حرکت انتقالی (حرکت طولی، حرکت عرضی، حرکت عمودی) و سه حرکت دورانی (غلطش، چرخش حول محور عرضی، چرخش حول محور عمودی) است [۱۷]. در عملیات بالگرد، حرکات عمودی و غلطش بیشترین تأثیر را بر ایمنی فرود دارند، زیرا مستقیماً سطح مرجع فرود را در حال تغییر قرار می‌دهند. شتاب عمودی ناشی از حرکت عمودی (که در شرایط طوفانی می‌تواند از ۳۰۰ برابر شتاب گرانش فراتر رود) و سرعت زاویه‌ای غلطش، از معیارهای کلیدی تصمیم‌گیری برای اجازه فرود محسوب می‌شوند [۱۸]. این حرکات، در ترکیب با جریان‌های باد، باعث ایجاد جریان‌های آشفته ناشی از شناور می‌شوند؛ یعنی گردابه‌های نامنظمی که پس از عبور باد از دکل‌ها و سازه‌های فوقانی کشتی در ناحیه فرود شکل می‌گیرند و کنترل بالگرد را در لحظات حساس دشوار می‌سازند [۱۹].

در نهایت، شرایط مرزی بین جو و دریا—که شامل رطوبت بالا، پدیده نمک‌زدگی، دمای سطحی متغیر و انتقال تکانه بین دو محیط است عواملی هستند که نه تنها بر عملکرد حسگرها و سامانه‌های الکترونیکی تأثیر می‌گذارند، بلکه می‌توانند در شرایط سرد و مرطوب منجر به یخ‌زدگی موقت پره‌های روتور شوند [۲۰]. این پدیده، که در دریاهای عرض‌های جغرافیایی بالا به ویژه شایع است، می‌تواند ظرف چند ثانیه تقارن آیرودینامیکی روتور را از بین ببرد و منجر به از دست رفتن کنترل شود [۲۱]. بنابراین، محیط دریایی نه تنها یک فضای فیزیکی برای عملیات است، بلکه سامانه‌ای پیچیده و پویا محسوب می‌شود که درک جامع آن از لایه‌های پایینی جو تا ویژگی‌های دینامیکی امواج پیش‌نیاز اساسی برای ارزیابی دقیق ریسک و پیشگیری از سوانح در عملیات بالگرد بر عرشه شناور است [۲۲].

محیط‌های خشکی که از پایداری نسبی برخوردارند، این فضای عملیاتی به طور مداوم در حال تغییر است؛ نه تنها به دلیل حرکت خود شناور، بلکه به واسطه تعامل پیوسته و دوسویه بین لایه‌های پایینی جو، سطح اقیانوس و ساختارهای فراسازه‌ای کشتی [۹]. در این محیط، ایمنی عملیات بالگرد—به ویژه در فازهای حساس فرود و برخاست، به طور همزمان تحت تأثیر عوامل هواشناسی، اقیانوسی، دینامیکی و آیرودینامیکی قرار می‌گیرد که هر یک به تنهایی قابل مدیریت هستند، اما در ترکیب با یکدیگر می‌توانند منجر به شرایط بحرانی و غیرقابل پیش‌بینی شوند [۱۰].

شرایط هواشناسی دریایی، به ویژه در لایه مرزی جوی با ضخامت ۱۰ تا ۱۰۰ متر، ویژگی‌های منحصر به فردی دارد که مستقیماً بر عملکرد بالگرد تأثیر می‌گذارد. بادهای سطحی—شامل باد جلو، باد عقب و باد جانبی—ناهنجاری‌های قابل توجهی در کنترل‌پذیری بالگرد ایجاد می‌کنند، به ویژه هنگامی که سرعت آن‌ها از ۲۵ گره فراتر رود [۱۱]. علاوه بر سرعت باد، پایداری جوی و آشفتگی نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در ایمنی پرواز دارند. لایه مرزی دریایی به دلیل وجود رطوبت بالا، اختلاف دمای سطح آب و هوا، و پدیده نمک‌زدگی، ساختار پایداری حرارتی خاصی دارد که جریان‌های کوچک مقیاس را تشدید می‌کند [۱۲]. در شرایط خاص—مانند تشکیل مه دریایی یا ابرهای کم‌ارتفاع—دید بصری محدود شده و همزمان گرادیان‌های چگالی غیریکنواخت در جریان هوا، دقت حسگرهای آیرودینامیکی بالگرد را دچار خطا می‌کند [۱۳].

از سوی دیگر، شرایط اقیانوسی از طریق امواج و جریان‌های دریایی، تأثیر مستقیمی بر پایداری سکوی عملیاتی (یعنی شناور) می‌گذارند. امواج دریا توسط پارامترهایی مانند ارتفاع معادل موج، دوره اوج موج و طیف جهت‌دار انرژی توصیف می‌شوند [۱۴]. تجربه عملیاتی و مطالعات آزمایشگاهی نشان داده‌اند که امواج کوتاه‌دوره (با دوره اوج کمتر از ۶ ثانیه) حتی در ارتفاع متوسط، خطرناک‌تر از امواج بلند هستند، زیرا فرکانس آن‌ها به فرکانس طبیعی حرکات حول محورهای طولی و عرضی

۲-۲- بالگرد مورد مطالعه: بل ۴۱۲

بالگرد بل ۴۱۲، یکی از موفق‌ترین و پرکاربردترین مدل‌های بالگرد چندمنظوره در تاریخ هوانوردی، در دهه ۱۹۸۰ توسط شرکت بل هلیکوپتر (اکنون بل تکسترون) توسعه یافت و به دلیل ترکیب منحصر به فردی از قابلیت اطمینان، کارایی عملیاتی و انعطاف‌پذیری مأموریتی، در ناوگان نیروهای مسلح و سازمان‌های غیرنظامی بیش از ۵۰ کشور جهان به کار گرفته شده است [۲۳]. این بالگرد دارای مشخصات فنی برجسته‌ای است که آن را برای عملیات دریایی مناسب می‌سازد: سامانه روتور اصلی چهارپره با مکانیزم کنترل چهارمحوره، برد عملیاتی حدود ۶۵۰ کیلومتر، ظرفیت حمل بار مفید تا ۲۰۰۰ کیلوگرم، و توانایی عملکرد در طیف وسیعی از شرایط آب‌وهوایی—از دمای زیر صفر در دریاهای شمالی تا گرمای مرطوب مناطق استوایی [۲۴].

سامانه پیش‌رانه بل ۴۱۲ متشکل از دو موتور توربوشفت است که توان لازم برای پرواز در شرایط بارگیری سنگین و ارتفاع‌های بالا را فراهم می‌آورد [۲۵]. سامانه روتور چهارپره این بالگرد، نسبت به مدل‌های دوپره نسل قبل، مزایای قابل توجهی در کاهش ارتعاشات، افزایش پایداری آیرودینامیکی و بهبود کنترل‌پذیری در شرایط آشفته‌گی جوی ارائه می‌دهد [۲۶]. با این وجود، همین ویژگی‌های فنی پیشرفته، کاربرد بل ۴۱۲ را به سرعت به محیط‌های عملیاتی پیچیده‌ای مانند عرشه شناورهای در حال حرکت گسترش داده است؛ محیطی که در آن چالش‌های ایمنی فراتر از محدوده طراحی اولیه هر سکوی پروازی ثابت عمل می‌کند.

برخلاف تصور رایج، بالگرد بل ۴۱۲ با وجود پیشرفت‌های فنی در برابر اغتشاشات محیطی دریایی بسیار حساس است. سامانه روتور چهارپره این بالگرد، هرچند پایداری بهتری نسبت به پیکربندی‌های ساده‌تر ارائه می‌دهد، اما در ارتفاع‌های پایین (کمتر از یک قطر روتور، تقریباً ۱۴ متر) تحت تأثیر شدید پدیده‌های آیرودینامیکی خاصی قرار می‌گیرد که مهم‌ترین آن‌ها اثر عرشه و بازتاب جریان پایین‌سوی روتور از سطح فلزی شناور است [۲۷]. این پدیده‌ها، به ویژه در شرایطی که عرشه در حال حرکت

باشد، می‌توانند منجر به کاهش ناگهانی رانش مؤثر، نوسانات غیرخطی در پاسخ‌های کنترلی و از دست رفتن پایداری طولی یا عرضی بالگرد شوند [۲۸].

تجربه تاریخی سوانح، این آسیب‌پذیری‌ها را به وضوح تأیید می‌کند. بر اساس بررسی ۲۴ حادثه گزارش‌شده مربوط به بالگرد بل ۴۱۲ در محیط دریایی طی بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴، بیش از ۶۰ درصد این حوادث در فاز فرود رخ داده‌اند و ریشه اصلی آن‌ها ترکیبی از عوامل محیطی، فنی و انسانی بوده است [۲۹]. به عنوان مثال، در سانحه دریای نروژ در سال ۲۰۱۹، یک بالگرد بل ۴۱۲ در حین فرود بر عرشه کشتی تحقیقاتی، به دلیل حرکت غلطش شدید شناور و باد جانبی با سرعت ۳۰ گره که با ساختار دکل کشتی تداخل آیرودینامیکی ایجاد کرده بود، دچار نوسان کنترل‌نشده شد و با لبه عرشه برخورد نمود [۳۰]. در سانحه دیگری در خلیج عدن در سال ۲۰۲۰، شتاب عمودی بالای عرشه همراه با عدم هماهنگی زمانی بین داده‌های حسگرهای بالگرد و شناور، منجر به فرود ناامن و سقوط به آب شد [۳۱].

از دیدگاه ایمنی سامانه‌محور، بالگرد بل ۴۱۲ در محیط دریایی، یک زیرسامانه درون یک سامانه اجتماعی، فنی پیچیده محسوب می‌شود [۲]. ایمنی در این بستر، صرفاً به عملکرد فنی بالگرد یا مهارت فردی خلبان وابسته نیست، بلکه حاصل هماهنگی ظریف میان چند لایه حیاتی است: طراحی عرشه و سامانه‌های جبران حرکت شناور، دقت و همزمانی سامانه‌های ناوبری و حسگری، آگاهی وضعیتی پویای خلبان، و کیفیت ارتباط و هماهنگی بین تیم پرواز و تیم عرشه [۳۲]. شکست در هر یک از این لایه‌ها—که در چارچوب نظری «مدل پنیر سوئیسی» به عنوان سدهای دفاعی متوالی شناخته می‌شوند—می‌تواند مسیر را برای وقوع سانحه هموار کند [۳۳]. به ویژه، خطاهای ادراکی خلبان در تشخیص دقیق حرکت عرشه (به ویژه در شرایط دید محدود یا شب) و انحراف از آستانه‌های عملیاتی تحت فشار مأموریت، از عوامل تکرارشونده در تحلیل سوانح بل ۴۱۲ بوده‌اند [۳۴].

مطالعات آسیب‌شناسانه سوانح بالگرد بل ۴۱۲ در محیط دریایی، الگوهای تکرارشونده‌ای را آشکار کرده است. بررسی ۲۴ حادثه گزارش‌شده بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ نشان می‌دهد که ۶۰ درصد این حوادث در فاز فرود و ۷۵ درصد آن‌ها با ترکیبی از حداقل سه عامل محیطی، فنی، انسانی رخ داده‌اند [۳۹]. به عنوان نمونه، سانحه بالگرد بل ۴۱۲ در دریای مدیترانه در اکتبر ۲۰۱۹ که منجر به فرود اضطراری در آب شد، ناشی از ترکیب باد جانبی شدید، حرکت غلط شناور و خطای ادراکی خلبان در تشخیص موقعیت نسبی عرشه بود [۴۰]. گزارش رسمی این حادثه تأکید کرد که معیارهای عملیاتی مبتنی بر ارتفاع موج به‌تنهایی، قادر به پیش‌بینی چنین سناریوهای ترکیبی نیستند.

پژوهش‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی نیز به درک مکانیزم‌های فیزیکی مؤثر در سوانح کمک شایانی کرده‌اند. هیوستون و نیومن با توسعه مدل دینامیکی ترکیبی بالگرد و شناور نشان دادند که جریان‌های آشفته ناشی از سوپراستراکچر کشتی می‌تواند پایداری بالگرد را در ارتفاع‌های کمتر از یک قطر روتور به شدت کاهش دهد [۴۱]. یافته‌های آن‌ها تأیید کرد که اثر عرشه و بازتاب جریان پایین‌سوی روتور، پدیده‌هایی غیرخطی هستند که با معیارهای خطی سنتی قابل توصیف نیستند. مطالعه مشابهی توسط ژو و همکاران با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی نشان داد که ترکیب دوره موج کوتاه و باد جانبی می‌تواند منجر به تشدید دینامیکی حرکات شناور و افزایش ۳ برابری احتمال برخورد بالگرد با عرشه شود [۴۲].

گزارش‌های ایمنی نهادهای نظارتی بین‌المللی نیز بینش‌های ارزشمندی ارائه داده‌اند. بررسی ایمنی بالگردهای دریایی توسط اداره هوانوردی غیرنظامی بریتانیا مشخص کرد که ۶۷ درصد خلبانان در شرایط عملیاتی واقعی، به دلیل فشار مأموریت، از آستانه‌های ایمنی رسمی تجاوز می‌کنند [۴۳]. این گزارش پیشنهاد کرد که معیارهای عملیاتی باید مبتنی بر شاخص‌های ترکیبی و بلادرنگ باشند، نه آستانه‌های ثابت و تک‌متغیره. مطالعه ایمنی بالگردهای نروژ نیز بر نقش حیاتی یکپارچه‌سازی داده‌های بالگرد و شناور در کاهش خطاهای ناوبری تأکید نمود و نشان داد که تأخیر بیش از

علاوه بر این، محدودیت‌های ذاتی سامانه فرود بل ۴۱۲ نیز در محیط دریایی تشدید می‌شود. این بالگرد از نوع ارابه فرود لغزشی (اسکید) بهره می‌برد که اگرچه برای عملیات در سطوح ناهموار خشکی مناسب است، اما در برابر ضربات جانبی ناشی از حرکت عرشه در شرایط دریای موج، مقاومت کمتری دارد و خطر لغزش یا واژگونی پس از تماس اولیه را افزایش می‌دهد [۳۵]. همچنین، حساسیت سامانه‌های الکترونیکی و حسگرهای این بالگرد به رطوبت بالا، نمک‌زدگی و نوسانات دمایی محیط دریایی، نیازمند برنامه‌های نگهداری و بازرسی فشرده‌تری نسبت به عملیات در محیط خشکی است [۳۶].

در نتیجه، مدیریت ایمنی بالگرد بل ۴۱۲ در محیط دریایی نیازمند رویکردی فراتر از تعمیر و نگهداری فنی متعارف است. این رویکرد باید شامل ارزیابی ساختاریافته ریسک‌های ترکیبی، آموزش خلبانان در شبیه‌سازهای واقع‌گرایانه با سناریوهای دریایی پویا، یکپارچه‌سازی داده‌ای و کنترلی میان سامانه‌های بالگرد و شناور، و طراحی معیارهای عملیاتی چندمتغیره مبتنی بر شواهد باشد—نه صرفاً اتکا به معیارهای سنتی تک‌عاملی مانند «ارتفاع موج کمتر از ۲ متر» [۳۷]. تنها با اتخاذ چنین رویکرد جامع و پیشگیرانه‌ای می‌توان از تکرار سوانح گذشته جلوگیری کرد و بالگرد بل ۴۱۲ را نه تنها به عنوان یک ابزار عملیاتی کارآمد، بلکه به عنوان یک سامانه ایمن و تاب‌آور در محیط پیچیده دریایی به کار گرفت.

۲-۳- پیشینه پژوهش: تحلیل سوانح و حوادث عملیات بالگرد بر عرشه شناورها

تحلیل سوانح تاریخی نشان می‌دهد که عملیات بالگرد در محیط دریایی همواره با نرخ بروز حوادث بالاتری نسبت به عملیات در خشکی همراه بوده است. بر اساس گزارش تیم ایمنی بالگردهای اروپایی، نرخ سوانح بالگردهای دریایی به طور متوسط ۱۰۸ برابر بیشتر از سایر کاربردهای بالگرد است و بیش از ۴۰ درصد این حوادث در فازهای حساس فرود و برخاست رخ می‌دهند [۳۸]. این آمار، ضرورت تمرکز پژوهشی بر شناسایی ریشه‌های ترکیبی سوانح در محیط پویای هوا و دریا را برجسته می‌سازد.

کیفی برای شناسایی و اولویت‌بندی خطرات و روش‌های کمی برای اندازه‌گیری احتمال وقوع و شدت پیامد را در بر می‌گیرد. این فرآیند با الهام از استانداردهای بین‌المللی مدیریت ریسک، ارزیابی ایمنی سامانه‌های هوافضا و دستورالعمل‌های عملیات بالگرد بر عرشه شناور تدوین شده است [۴۷] تا [۴۹]. رویکرد چندلایه به کار گرفته شده، امکان گذار از ادراک کیفی ریسک به تصمیم‌گیری کمی مبتنی بر شواهد را فراهم می‌آورد.

۳-۱- چارچوب نظری و استانداردهای مرجع

فرآیند ارزیابی ریسک حاضر بر سه پایه استوار است: استاندارد مدیریت ریسک برای ارائه ساختار کلی شناسایی و پایش خطرات، راهنمای ارزیابی ایمنی سامانه‌های هواپیما برای تطبیق روش‌های تحلیل با الزامات هوانوردی، و استاندارد عملیات بالگرد بر عرشه شناور برای تضمین انطباق با شرایط خاص محیط دریایی [۴۷] تا [۴۹]. این چارچوب سه‌لایه اطمینان می‌دهد که هم اصول کلی مدیریت ریسک و هم ملاحظات تخصصی هوانوردی دریایی در تحلیل لحاظ شوند.

۳-۲- مرحله اول: شناسایی خطرات

شناسایی خطرات با استفاده از چهار منبع داده مکمل انجام پذیرفت:

بررسی اسناد سوانح: تحلیل محتوای ۲۴ گزارش رسمی سانحه و حادثه بالگرد دریایی مربوط به بالگرد بل ۴۱۲ در بازه زمانی سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴. این گزارش‌ها از پایگاه‌های داده نهادهای ملی ایمنی حمل و نقل و سازمان‌های منطقه‌ای هوانوردی استخراج شدند [۵۰].

نظرسنجی از خبرگان: انجام مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته و توزیع پرسشنامه تخصصی میان ۳۲ خبره دارای صلاحیت شامل خلبانان با سابقه عملیات دریایی، افسران عملیاتی نیروی دریایی و مهندسان ایمنی هوانوردی. معیار ورود خبرگان حداقل ده سال سابقه مرتبط و گواهی صلاحیت حرفه‌ای بود.

تحلیل وظیفه عملیاتی: تجزیه سیستماتیک مراحل فرود و برخاست بالگرد بر عرشه شناور با استفاده از روش تحلیل

۰۰۳ ثانیه در همگام‌سازی حسگرها می‌تواند منجر به خطای موقعیتی ۱۵ تا ۲۰ درصدی شود [۴۴].

از منظر عوامل انسانی، پژوهش‌های متعددی بر نقش آگاهی وضعیتی و تصمیم‌گیری خلبان در شرایط پیچیده دریایی تمرکز کرده‌اند. ریزن در مدل «پنیر سوئیسی» خود نشان داد که سوانح معمولاً حاصل عبور همزمان خطا از چندین لایه دفاعی سیستم هستند، نه یک خطای منفرد [۴۵]. در محیط دریایی، این لایه‌ها شامل طراحی عرشه، سامانه‌های جبران حرکت، آموزش خلبان، و پروتکل‌های ارتباطی هستند. مطالعه‌ای توسط آژانس ایمنی هوانوردی اروپا بر روی ۱۵۰ خلبان بالگرد دریایی نشان داد که آموزش در شبیه‌سازهای پویا با سناریوهای ترکیبی، خطاهای ادراکی را تا ۶۰ درصد کاهش می‌دهد، در حالی که آموزش‌های سنتی مبتنی بر مانورهای ایزوله، تأثیر معناداری بر عملکرد در شرایط واقعی ندارند [۴۶].

با وجود پیشرفت‌های پژوهشی فوق، شکاف‌های مهمی در ادبیات موضوع باقی است. نخست، اکثر مطالعات پیشین بر تحلیل تک‌عاملی سوانح متمرکز بوده‌اند و تعامل غیرخطی پارامترهای محیطی را به صورت جامع مدل‌سازی نکرده‌اند. دوم، معیارهای عملیاتی فعلی همچنان بر پایه شاخص‌های ساده‌ای مانند ارتفاع موج استوارند، در حالی که شواهد تجربی نشان می‌دهد پارامترهایی مانند شتاب عمودی عرشه و دوره اوج موج پیش‌بینی‌کننده‌های قوی‌تری از ریسک هستند. سوم، کمبود پژوهش‌هایی که راهکارهای پیشگیرانه مبتنی بر شواهد را در چارچوب ایمنی سامانه‌محور ارائه دهند، احساس می‌شود.

این پژوهش با هدف پر کردن این شکاف‌ها طراحی شده است. با بهره‌گیری از روش‌شناسی ترکیبی شامل تحلیل سوانح تاریخی، نظرسنجی از خبرگان و شبیه‌سازی دینامیکی پیشرفته، این مطالعه در پی ارائه چارچوبی جامع برای ارزیابی ریسک ترکیبی و طراحی راهکارهای پیشگیرانه در عملیات بالگرد بل ۴۱۲ بر عرشه شناورها است.

۳- روش‌شناسی ارزیابی ریسک

ارزیابی ریسک در این پژوهش بر اساس چارچوبی تلفیقی و چندمرحله‌ای طراحی شده است که ترکیبی از روش‌های

۳-۴- مرحله سوم: تحلیل ریسک کمی با شبیه سازی دینامیکی ترکیبی

برای کمی سازی احتمال شکست عملیاتی، یک مدل دینامیکی ترکیبی با دقت بالا توسعه داده شد که قادر به مدل سازی همزمان دینامیک پرواز بالگرد و حرکات شناور است.

مدل بالگرد: از مدل غیرخطی شش درجه آزادی بالگرد بل ۴۱۲ استفاده از نرم افزار تخصصی دینامیک پرواز بهره گرفته شد. این مدل شامل معادلات حرکت انتقالی و دورانی، دینامیک روتور اصلی و دم، اثرات آیرودینامیکی بدنه و مدل موتور توربوشفت است [۵۲].

مدل شناور: حرکات شناور با استفاده از مدل شش درجه آزادی مبتنی بر نظریه پتانسیل خطی و طیف موج استاندارد شبیه سازی شد. پارامترهای هیدرودینامیکی شناور از داده های آزمایشگاهی و محاسبات دینامیک سیالات استخراج گردید [۵۳].

مدل محیط: شرایط محیطی با متغیرهای تصادفی کنترل شده مدل سازی شدند: ارتفاع معادل موج از ۰.۵ تا ۳.۰ متر، سرعت باد جانبی از صفر تا ۴۰ گره، و دوره اوج موج از ۴ تا ۱۰ ثانیه. توزیع احتمالی هر پارامتر بر اساس داده های اقلیمی مناطق عملیاتی متداول تعیین شد [۵۴].

روش نمونه برداری: برای هر ترکیب از شرایط محیطی، ۱۰۰ تکرار شبیه سازی با اعمال نویز تصادفی در پارامترهای مربوط به پاسخ خلبان و خطای حسگرها انجام پذیرفت. در مجموع ۱۲۰۰ سناریوی مستقل شبیه سازی شد.

معیار شکست: فرود ناامن زمانی تعریف شد که حداقل یکی از سه شرط زیر در لحظه تماس اولیه رخ دهد: شتاب عمودی بیشتر از ۲.۵ برابر شتاب گرانش، سرعت جانبی نسبی نسبت به عرشه بیشتر از ۲ متر بر ثانیه، یا زاویه غلطش نسبی بالگرد نسبت به عرشه بیشتر از ۸ درجه [۵۵]. احتمال شکست عملیاتی برای هر شرایط محیطی با نسبت تعداد شبیه سازی های منجر به شکست به کل تکرارها محاسبه گردید.

۳-۵- مرحله چهارم: تحلیل حساسیت جهانی

وظیفه سلسله مراتبی برای شناسایی نقاط بحرانی و گلوگاه های تصمیم گیری [۵۱].

بازبینی ادبیات فنی: مرور نظام مند مطالعات آزمایشگاهی و شبیه سازی های پیشین مرتبط با دینامیک ترکیبی بالگرد و شناور.

خروجی این مرحله، فهرستی از ۲۸ خطر اولیه بود که در سه دسته کلی طبقه بندی شدند: خطرات محیطی ناشی از شرایط جوی و اقیانوسی، خطرات انسانی مرتبط با عوامل ادراکی و تصمیم گیری، و خطرات فنی مربوط به سامانه های بالگرد و شناور.

۳-۳- مرحله دوم: تحلیل ریسک کیفی با روش تحلیل شکست حالات و اثرات آن

برای هر یک از ۲۸ خطر شناسایی شده، سه شاخص کلیدی بر اساس مقیاس ده درجه ای لیکرت امتیازدهی شد: شدت پیامد: از یک برای پیامد جزئی تا ده برای پیامد فاجعه بار با تلفات انسانی

احتمال وقوع: از یک برای وقوع بسیار نادر تا ده برای وقوع بسیار مکرر

قابلیت تشخیص: از یک برای تشخیص آسان قبل از وقوع تا ده برای تشخیص بسیار دشوار

شاخص اولویت ریسک برای هر خطر با حاصل ضرب این سه شاخص محاسبه گردید. بر اساس راهنمای استاندارد ارزیابی ایمنی، خطرات با شاخص اولویت ریسک بالاتر از ۸۰ در دسته ریسک غیرقابل قبول و خطرات با شاخص بین ۴۰ تا ۸۰ در دسته ریسک قابل کنترل با نظارت طبقه بندی شدند [۴۸].

نتایج این تحلیل نشان داد که ۱۲ خطر از ۲۸ خطر در دسته ریسک غیرقابل قبول قرار می گیرند که مهم ترین آنها عبارتند از: تداخل جریان پایین سوی روتور با سطح عرشه در شرایط غلطش شدید، خطای ادراکی خلبان در تشخیص حرکت عرشه در شرایط دید محدود، ناهماهنگی زمانی بین سامانه های ناوبری بالگرد و شناور، و شتاب عمودی بالای عرشه در لحظه تماس اولیه.

کوچک در شرایط واقعی دریایی همچنان چالش برانگیز است [۵۹]. همچنین، تعمیم‌پذیری یافته‌ها به سایر انواع بالگردها نیازمند تطبیق پارامترهای مدل با مشخصات فنی آن سامانه‌ها است.

۴- یافته‌های پژوهش

این بخش به ارائه نتایج حاصل از اجرای چارچوب ارزیابی ریسک ترکیبی شامل تحلیل شکست حالات و اثرات آن، شبیه‌سازی‌های دینامیکی گسترده، تحلیل حساسیت جهانی و نظرسنجی از خبرگان می‌پردازد. داده‌های استخراج‌شده بینش‌های عمیقی را درباره ماهیت غیرخطی ریسک در محیط ترکیبی هوا و دریا آشکار می‌سازند.

۴-۱- اولویت‌بندی ریسک‌های کلیدی بر اساس تحلیل کیفی

از میان ۲۸ خطر اولیه شناسایی‌شده، تحلیل کمی با استفاده از شاخص اولویت ریسک منجر به تفکیک خطرات به دو دسته «غیرقابل قبول» و «قابل کنترل با نظارت» شد. دوازده خطر با شاخص اولویت ریسک بالاتر از ۸۰ در دسته ریسک غیرقابل قبول طبقه‌بندی شدند که پنج مورد برتر آن به شرح جدول زیر است:

جدول ۱. اولویت بندی ریسک

رتبه	توصیف ریسک	قابلیت تشخیص	احتمال وقوع	شدت پیامد	شاخص اولویت ریسک
۱	تداخل جریان پایین‌سوی روتور با عرشه در شرایط غلطش شدید	۲	۸	۹	۱۴۴
۲	خطای ادراکی خلبان در تشخیص حرکت عرشه در شرایط دید محدود	۳	۵	۸	۱۲۰
۳	ناهماهنگی زمانی بین سامانه‌های ناوبری بالگرد و شناور	۳	۶	۷	۱۰۸
۴	شتاب عمودی بالای عرشه در لحظه تماس اولیه	۲	۶	۸	۹۶
۵	جریان‌های آشفته ناشی از برخورد باد با سازه‌های فوقانی شناور	۳	۵	۷	۹۰

برای درک سهم نسبی هر پارامتر ورودی در واریانس احتمال شکست، از روش تحلیل حساسیت جهانی با شاخص‌های سوپول استفاده شد [۵۶]. این روش دو نوع شاخص ارائه می‌دهد: شاخص مرتبه اول که سهم مستقیم هر پارامتر را نشان می‌دهد و شاخص کل که سهم مستقیم به علاوه تمام تعاملات آن پارامتر با سایر متغیرها را در بر می‌گیرد.

محاسبه شاخص‌های سوپول با استفاده از روش نمونه‌برداری مبتنی بر توالی‌های کم‌تناقض انجام پذیرفت که کارایی محاسباتی بالاتری نسبت به نمونه‌برداری تصادفی ساده دارد [۵۷]. این تحلیل امکان شناسایی پارامترهای کلیدی که بیشترین تأثیر را بر ریسک عملیاتی دارند و همچنین شناسایی تعاملات مهم بین پارامترها را فراهم آورد.

۳-۶. مرحله پنجم: اعتبارسنجی مدل

اعتبارسنجی مدل توسعه‌یافته از سه طریق انجام شد: مقایسه با داده‌های واقعی: نتایج شبیه‌سازی برای شرایط محیطی مشابه با سانحه دریای نروژ در سال ۲۰۱۹ بازتولید و با گزارش رسمی حادثه مقایسه شد. خطای مدل در پیش‌بینی پارامترهای کلیدی حرکت کمتر از ۱۲ درصد بود [۵۸].

آزمون پایداری: حساسیت خروجی مدل نسبت به تغییرات کوچک در پارامترهای ورودی با اعمال نوسان مثبت و منفی ۱۰ درصدی در ضرایب آیرودینامیکی و هیدرودینامیکی ارزیابی شد. تغییرات احتمال شکست کمتر از ۸ درصد بود که نشان‌دهنده پایداری مناسب مدل است.

بازبینی خبرگان: نتایج تحلیل حساسیت و سناریوهای بحرانی شناسایی‌شده با پنل خبرگان مستقل متشکل از پنج متخصص با سابقه عملیاتی دریایی مورد بحث و تأیید قرار گرفت.

۳-۷. ملاحظات اخلاقی و محدودیت‌های روش شناختی

کلیه داده‌های مربوط به سوانح با رعایت حریم خصوصی و حذف اطلاعات شناسایی‌کننده افراد مورد تحلیل قرار گرفتند. مشارکت خبرگان در نظرسنجی با رضایت آگاهانه و تضمین ناشناس ماندن پاسخ‌ها انجام شد.

محدودیت اصلی این روش شناسی، وابستگی مدل دینامیکی به فرضیات ساده‌سازی‌شده در توصیف جریان‌های آشفته پیچیده نزدیک عرشه است. اگرچه از مدل‌های پیشرفته آشفستگی استفاده شده، اما بازتولید کامل پدیده‌های مقیاس

۴-۳- نتایج تحلیل حساسیت جهانی

تحلیل حساسیت با استفاده از شاخص‌های سوبول نشان داد که سهم هر پارامتر ورودی در واریانس احتمال شکست عملیاتی به شرح زیر است:

جدول ۴. تحلیل شاخص‌ها

شاخص مرتبه اول	شاخص کل	پارامتر ورودی
۰,۳۲	۰,۴۱	شتاب عمودی عرشه
۰,۲۸	۰,۳۶	سرعت باد جانبی
۰,۱۸	۰,۲۵	دوره اوج موج
۰,۱۵	۰,۲۲	زاویه غلطش شناور
۰,۱۲	۰,۱۸	ارتفاع موج معادل

دو نکته اساسی از این تحلیل استخراج می‌شود: نخست، شتاب عمودی عرشه مهم‌ترین عامل تکی در تبیین واریانس ریسک است و به‌تنهایی ۴۱ درصد از تغییرات احتمال شکست را توضیح می‌دهد. دوم، تفاوت قابل توجه بین شاخص مرتبه اول و شاخص کل برای پارامترهایی مانند باد جانبی و دوره موج، نشان‌دهنده نقش مهم تعاملات غیرخطی بین متغیرها است [۶۲]. به ویژه، تعامل بین باد جانبی و زاویه غلطش شناور با شاخص تعامل ۰,۱۹، نقش بحرانی در ایجاد شرایط ناپایدار دارد.

۴-۴. یافته‌های نظرسنجی از خبرگان

نظرسنجی از ۳۲ خبره دارای صلاحیت شامل خلبانان، افسران عملیاتی و مهندسان ایمنی، بینش‌های ارزشمندی درباره درک عملیاتی از آستانه‌های ایمنی فراهم آورد.

۴-۴-۱. آستانه‌های ایمنی درک‌شده توسط خلبانان

جدول ۵. آستانه‌های ایمنی درک‌شده توسط خلبانان

پارامتر	انحراف معیار	میانگین آستانه ایمنی گزارش‌شده
ارتفاع موج معادل	۰,۳ متر	۱,۴ متر
سرعت باد جانبی	۴ گره	۲۰ گره
زاویه غلطش شناور	۱,۱ درجه	۵,۲ درجه
شتاب عمودی عرشه	۰,۰۶	۰,۲۴ برابر شتاب گرانش

تفاوت معناداری بین آستانه‌های درک‌شده توسط خلبانان و معیارهای رسمی موجود مشاهده شد. به عنوان مثال، در حالی که استاندارد عملیات بالگرد بر عرشه شناور ارتفاع موج

نکته حائز اهمیت آن است که ۶۷ درصد سوانح گزارش‌شده در پایگاه‌های داده ایمنی، ترکیبی از حداقل دو مورد از ریسک‌های فوق بوده‌اند [۶۰]. این یافته تأکیدی است بر محدودیت ذاتی رویکردهای تک‌عاملی در ارزیابی ریسک محیط‌های پیچیده دریایی.

۴-۲- نتایج شبیه‌سازی دینامیکی: احتمال شکست عملیاتی

با اجرای ۱۲۰۰ سناریوی شبیه‌سازی مبتنی بر روش نمونه‌برداری تصادفی در ترکیب‌های مختلف پارامترهای محیطی، احتمال شکست عملیاتی برای بالگرد بل ۴۱۲ به صورت کمی محاسبه شد.

۴-۲-۱. شرایط بدون سامانه جبران حرکت عرشه

جدول ۲. احتمال شکست عملیاتی بدون سامانه جبران حرکت عرشه

شرایط محیطی	احتمال شکست عملیاتی
ارتفاع موج معادل $\geq 1,2$ متر و باد جانبی ≥ 18 گره	کمتر از ۵٪
ارتفاع موج معادل $= 1,8$ متر و باد جانبی $= 22$ گره	حدود ۲۲٪
ارتفاع موج معادل $= 2,0$ متر و باد جانبی $= 25$ گره	حدود ۳۸٪
ارتفاع موج معادل $\leq 2,5$ متر یا باد جانبی ≤ 30 گره	بیشتر از ۷۰٪

۴-۲-۲. شرایط با سامانه جبران حرکت عرشه فعال

جدول ۳. احتمال شکست عملیاتی با سامانه جبران حرکت عرشه فعال

شرایط محیطی	احتمال شکست عملیاتی
ارتفاع موج معادل $\geq 2,0$ متر و باد جانبی ≥ 25 گره	کمتر از ۸٪
ارتفاع موج معادل $= 2,5$ متر و دوره اوج موج < 8 ثانیه	حدود ۱۲٪
ارتفاع موج معادل $= 2,8$ متر و دوره اوج موج $= 5$ ثانیه	حدود ۴۵٪

یافته کلیدی این بخش آن است که دوره اوج موج تأثیر تعیین‌کننده‌تری نسبت به ارتفاع موج به‌تنهایی دارد. به عنوان مثال، در ارتفاع موج معادل ۱,۵ متر اما با دوره اوج موج ۵ ثانیه، احتمال شکست عملیاتی حدود ۲۲٪ محاسبه شد، در حالی که در ارتفاع موج معادل ۱,۸ متر اما با دوره اوج موج ۹ ثانیه، این احتمال تنها ۹٪ بود [۶۱]. این نتیجه نشان می‌دهد که فرکانس امواج و نزدیکی آن به فرکانس طبیعی حرکات شناور، عاملی بحرانی‌تر از دامنه امواج است.

در دمای هوا کمتر از ۵ درجه سانتی-گراد و رطوبت نسبی بیشتر از ۸۵ درصد، احتمال تشکیل یخ موقت بر لبه‌های پیشرو پره‌های روتور وجود دارد. این پدیده می‌تواند ظرف چند ثانیه تقارن آیرودینامیکی روتور را مختل کند و منجر به نوسانات کنترل‌نشده شود [۶۶]. تحلیل سوانح نشان می‌دهد این شرایط عامل شش حادثه در مناطق سردسیر دریایی بوده است.

سناریوی سوم: تغییر ناگهانی جهت باد
تغییر جهت باد بیش از ۳۰ درجه در بازه زمانی کمتر از ۲ دقیقه، الگوی جریان آشفته حول سوپراستراکچر شناور را به سرعت تغییر می‌دهد و می‌تواند منجر به خطای ادراکی خلبان در تخمین مسیر فرود شود [۶۷]. این سناریو به ویژه در مناطق ساحلی با توپوگرافی پیچیده محتمل‌تر است.

۴-۶- ناهماهنگی بین استانداردهای فعلی و واقعیت عملیاتی

مقایسه یافته‌های این پژوهش با معیارهای استاندارد موجود، شکاف ایمنی قابل توجهی را آشکار می‌سازد. استاندارد عملیات بالگرد بر عرشه شناور شرایط ارتفاع موج معادل ۲٫۰ متر و زاویه غلطش $\pm 5^\circ$ درجه را «قابل قبول» اعلام می‌کند [۴۹]. با این حال، نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در این شرایط، احتمال شکست عملیاتی حدود ۳۲ درصد است؛ به این معنا که تقریباً یک از هر سه فرود در این شرایط ظاهراً مجاز، ناامن خواهد بود.

علاوه بر این، ۶۹ درصد خلبانان مشارکت‌کننده در نظرسنجی گزارش دادند که در عملیات واقعی، به دلیل فشار مأموریت یا محدودیت‌های لجستیکی، گاهی از آستانه‌های رسمی تجاوز می‌کنند [۶۸]. این یافته نشان می‌دهد که معیارهای استاتیک نه تنها از نظر فنی ناکافی هستند، بلکه از نظر رفتاری نیز قابل اجرا نیستند.

۴-۷- جمع‌بندی یافته‌های کلیدی

۱. ریسک در محیط دریایی پدیده‌ای ترکیبی و غیرخطی است و نمی‌توان آن را با معیارهای تک‌متغیره مانند ارتفاع موج به‌تنهایی ارزیابی کرد.

۲. شتاب عمودی عرشه و سرعت باد جانبی مهم‌ترین پیش‌بینی‌کننده‌های احتمال شکست عملیاتی هستند

معادل ۲٫۰ متر را به عنوان آستانه مجاز اعلام می‌کند [۴۹]. خلبانان با تجربه عملیاتی، این آستانه را در حدود ۱٫۴ متر متوقف می‌کنند. این شکاف نشان‌دهنده ناکارآمدی معیارهای استاتیک در بازتاب پیچیدگی‌های عملیاتی واقعی است [۶۳].

۴-۴-۲- مؤثرترین سدهای ایمنی از دیدگاه خبرگان

خبرگان در پاسخ به پرسش درباره مؤثرترین راهکارهای کاهش ریسک، گزینه‌های زیر را به ترتیب اولویت انتخاب کردند:

۱. آموزش تخصصی در شبیه‌سازهای پرواز با سناریوهای دریایی پویا (۷۸ درصد انتخاب)
۲. سامانه هشدار حرکت عرشه بالادرنگ با نمایش گرافیکی وضعیت نسبی (۶۵ درصد)
۳. نمایشگر سرخود با خط راهنمای فرود نسبی و هشدارهای زمینه‌ای (۵۹ درصد)
۴. یکپارچه‌سازی داده‌های ناوبری بالگرد و شناور با همگام‌سازی زمانی دقیق (۵۶ درصد)

نکته هشداردهنده آن بود که ۸۱ درصد خلبانان گزارش دادند عدم یکپارچه‌سازی سامانه‌های بالگرد و شناور را یک شکاف ایمنی اساسی می‌دانند که در شرایط عملیاتی واقعی، بار شناختی اضافی بر خلبان تحمیل می‌کند [۶۴].

۴-۵- شناسایی سناریوهای بحرانی پنهان

تحلیل ترکیبی داده‌های شبیه‌سازی و نظرات خبرگان، سه سناریوی بحرانی را آشکار ساخت که در استانداردهای فعلی کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند:

سناریوی اول: ترکیب دوره موج کوتاه و باد جانبی
وقتی دوره اوج موج در بازه ۵ تا ۶ ثانیه و سرعت باد جانبی بین ۲۰ تا ۲۵ گره باشد، احتمال شکست عملیاتی به حدود ۴۵ درصد می‌رسد. مکانیزم فیزیکی این پدیده، تشدید دینامیکی حرکات شناور ناشی از نزدیکی فرکانس موج به فرکانس طبیعی غلطش است [۶۵]. این سناریو عامل سه سانحه گزارش‌شده در دریای شمال طی دهه گذشته بوده است.

سناریوی دوم: شرایط یخ‌زدگی موقت روتور

از منظر نظریه «ایمنی پویا»، یافته‌های این مطالعه بر ضرورت گذار از «کنترل خطا» به «تقویت تاب‌آوری» تأکید دارد [۷۱]. به عنوان مثال، شناسایی سناریوهای بحرانی پنهان مانند ترکیب دوره موج کوتاه و باد جانبی، نشان می‌دهد که سامانه‌های ایمنی باید قادر باشند نه تنها شرایط شناخته‌شده، بلکه تعاملات غیرمنتظره پارامترها را نیز پیش و پاسخ دهند. این نیازمند طراحی سدهای ایمنی فعال و انطباق‌پذیر است، نه صرفاً اجرای پروتکل‌های از پیش تعریف‌شده.

همچنین، یافته مربوط به نقش حیاتی یکپارچه‌سازی داده‌ای بالغرد و شناور، هم‌راستا با اصل «هم‌ترازی سامانه‌ای» در چارچوب ایمنی سامانه‌محور است [۷۲]. وقتی ۸۱ درصد خلبانان ناهماهنگی سامانه‌ها را به عنوان ریسک مستقل گزارش می‌کنند، این نشان‌دهنده آن است که شکست در لایه ارتباطی می‌تواند تمام سدهای ایمنی دیگر را بی‌اثر کند. بنابراین، سرمایه‌گذاری در فناوری‌های کمکی بدون توجه به معماری یکپارچه سامانه، ممکن است به پیچیدگی افزوده و سدهای ایمنی شکننده منجر شود.

۵-۲- مقایسه با پژوهش‌های پیشین و تبیین تفاوت‌ها

یافته‌های این پژوهش در چند محور با مطالعات پیشین هم‌راستا و در برخی موارد تکمیل‌کننده آن‌ها است:

هم‌راستایی با مطالعات دینامیکی: نتایج مربوط به تأثیر تعیین‌کننده شتاب عمودی عرشه با یافته‌های هیوستون و نیومن [۴۱] و ژو و همکاران [۴۲] هم‌خوانی دارد. هر سه مطالعه بر نقش غیرخطی اثر عرشه و جریان‌های آشفته ناشی از سوپراستراکچر تأکید کرده‌اند. با این حال، پژوهش حاضر با افزودن تحلیل حساسیت جهانی و کمی‌سازی سهم تعاملات پارامترها، درک دقیق‌تری از مکانیزم‌های ترکیبی ریسک ارائه می‌دهد.

تکمیل مطالعات عوامل انسانی: یافته‌های مربوط به آستانه‌های ایمنی درک‌شده توسط خلبانان، نتایج گزارش ایمنی بالگردهای اروپایی [۳۸] را تأیید و گسترش می‌دهد. در حالی که مطالعات پیشین بر وجود شکاف بین معیارهای رسمی و عمل واقعی تأکید کرده بودند، پژوهش حاضر با

و Together با دوره اوج موج، بیش از ۷۵ درصد واریانس ریسک را تبیین می‌کنند.

۳. فناوری‌های کمکی مانند سامانه‌های جبران حرکت عرشه می‌توانند پنجره عملیاتی ایمن را تا سه برابر گسترش دهند، اما این توانایی منحصراً وابسته به یکپارچه‌سازی کامل داده‌ای و کنترلی بین بالغرد و شناور است.

۴. آموزش مبتنی بر شبیه‌سازی پویای ترکیبی، تأثیر بیشتری نسبت به سرمایه‌گذاری صرف در تجهیزات سخت‌افزاری دارد و می‌تواند خطاهای ادراکی خلبان را در شرایط مرزی تا ۶۰ درصد کاهش دهد [۶۹].

۵. استانداردهای فعلی نیازمند بازنگری فوری مبتنی بر شاخص‌های ترکیبی و بلادرنگ هستند تا بتوانند پیچیدگی‌های محیط عملیاتی واقعی را بازتاب دهند.

۵- بحث و تفسیر یافته‌ها

یافته‌های این پژوهش، فراتر از ارائه اعداد و آستانه‌های فنی، بینش‌های بنیادینی درباره ماهیت ریسک در محیط‌های پیچیده دریایی فراهم می‌آورد. در این بخش، نتایج کمی و کیفی در چارچوب نظریه‌های ایمنی سامانه‌محور تفسیر شده، با پژوهش‌های پیشین مقایسه گردیده، پیامدهای عملیاتی آن تبیین شده و محدودیت‌های مطالعه همراه با جهت‌گیری‌های آتی بیان می‌شود.

۵-۱- تفسیر یافته‌ها در چارچوب ایمنی سامانه‌محور

یافته کلیدی این پژوهش مبنی بر غیرخطی و ترکیبی بودن ریسک عملیاتی، تأییدی تجربی بر اصول ایمنی سامانه‌محور است که ایمنی را نه به عنوان فقدان خطا، بلکه به عنوان توانایی سامانه در حفظ عملکرد مطلوب تحت شرایط عدم قطعیت تعریف می‌کند [۷۰]. تحلیل حساسیت نشان داد که شتاب عمودی عرشه و باد جانبی به‌تنهایی ۷۷ درصد از واریانس احتمال شکست را تبیین می‌کنند، در حالی که ارتفاع موج معادل—که در استانداردهای فعلی معیار اصلی است، تنها ۱۸ درصد سهم دارد. این ناهماهنگی، شکاف ایمنی ساختاری در معیارهای استاتیک فعلی را آشکار می‌سازد.

توسعه معماری یکپارچه داده‌ای بین بالگرد و شناور با همگام‌سازی زمانی زیر ۰,۳ ثانیه برای کاهش خطاهای ناوبری

بهینه‌سازی سامانه‌های جبران حرکت عرشه برای کاهش شتاب عمودی در بازه فرکانسی ۰,۲ تا ۱,۰ هرتز که بیشترین تأثیر را بر ریسک دارد [۷۴].

برای سیاست‌گذاران و نهادهای استانداردسازی:

بازنگری فوری در معیارهای عملیاتی مبتنی بر ارتفاع موج و جایگزینی آن‌ها با شاخص‌های چندمتغیره پویا

الزام به انجام ارزیابی ریسک ترکیبی در فرآیند صدور مجوز عملیات دریایی برای انواع بالگردها

توسعه چارچوب‌های نظارتی که یکپارچه‌سازی سامانه‌ای و آموزش مبتنی بر شبیه‌سازی پویا را به عنوان پیش شرط ایمنی الزامی کند [۷۵]

۵-۴- محدودیت‌های پژوهش و پیشنهادهایی برای مطالعات آتی

با وجود جامعیت روش‌شناسی و عمق تحلیل، این پژوهش با محدودیت‌هایی همراه است که تعمیم‌پذیری یافته‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد:

محدودیت‌های مدل‌سازی دینامیکی:

مدل دینامیکی ترکیبی از فرضیات ساده‌سازی‌شده در توصیف جریان‌های آشفته مقیاس کوچک نزدیک عرشه استفاده می‌کند. اگرچه از مدل‌های پیشرفته آشفتگی بهره گرفته شده، اما بازتولید کامل پدیده‌های گذرا و غیرایستا در شرایط واقعی دریایی همچنان چالش‌برانگیز است [۵۹]. پارامترهای پاسخ خلبان در شبیه‌سازی‌ها بر اساس توزیع‌های احتمالی عمومی مدل‌سازی شده‌اند و ممکن است تنوع فردی در سبک‌های تصمیم‌گیری و تحمل ریسک را به طور کامل بازتاب ندهند.

محدودیت‌های داده‌ای:

تحلیل سوانح تاریخی متکی بر گزارش‌های رسمی منتشرشده است که ممکن است تحت‌گزارش‌دهی یا سوگیری انتخابی داشته باشند. حوادث با پیامدهای کمتر

ارائه داده‌های کمی درباره میزان این شکاف و پیامدهای ریسکی آن، مبنایی علمی برای بازنگری استانداردها فراهم می‌آورد.

نوآوری در شناسایی سناریوهای پنهان: شناسایی سناریوهای بحرانی پنهان مانند ترکیب دوره موج کوتاه و باد جانبی، contribution متمایز این پژوهش است. اگرچه مطالعات آزمایشگاهی پیشین اثرات تک‌عاملی این پارامترها را بررسی کرده بودند [۶۵]، اما تحلیل ترکیبی و شبیه‌سازی گسترده این مطالعه، تعاملات غیرخطی را که در شرایط واقعی منجر به سوانح می‌شوند، آشکار ساخته است.

تفاوت در روش‌شناسی: برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین که بر تحلیل پس‌نگر سوانح یا شبیه‌سازی‌های تک‌بعدی متمرکز بودند، روش‌شناسی ترکیبی این پژوهش شامل تحلیل سوانح، نظرسنجی خبرگان، شبیه‌سازی دینامیکی و تحلیل حساسیت-امکان اعتبارسنجی متقابل یافته‌ها و کاهش سوگیری‌های روش‌شناختی را فراهم آورده است [۷۳].

۵-۳- پیامدهای عملیاتی برای ذینفعان

یافته‌های این پژوهش پیامدهای عملیاتی ملموسی برای سه گروه اصلی ذینفع دارد:

برای خلبانان و تیم‌های پرواز:

جایگزینی قضاوت ذهنی مبتنی بر معیارهای تک‌عاملی با تصمیم‌گیری آگاهانه مبتنی بر شاخص‌های ترکیبی بلادرنگ

اولویت‌دهی به پایش شتاب عمودی عرشه و باد جانبی در لحظات حساس فرود، به جای تمرکز صرف بر ارتفاع موج بهره‌گیری از آموزش‌های شبیه‌سازی‌محور با سناریوهای ترکیبی برای ارتقای آگاهی وضعیتی پویا در شرایط غیرمنتظره [۶۹]

برای طراحان سامانه و مهندسان ایمنی:

طراحی سامانه‌های پشتیبان تصمیم‌گیری بلادرنگ که شاخص ترکیبی ایمنی دریایی را محاسبه و به صورت بصری به خلبان ارائه دهند

هم‌افزایی بین چهار رکن است: ارزیابی ریسک مبتنی بر شواهد، طراحی سامانه‌های یکپارچه و تاب‌آور، آموزش واقع‌گرایانه مبتنی بر سناریوهای ترکیبی، و سیاست‌گذاری منعطف مبتنی بر شاخص‌های پویا.

این تحول نه یک انتخاب، بلکه یک الزام اجتناب‌ناپذیر برای هر سازمانی است که در محیط پیچیده دریایی عمل می‌کند. ایمنی پیشگیرانه نه تنها جان انسان‌ها را حفظ می‌کند، بلکه با کاهش سوانح و افزایش قابلیت اطمینان عملیاتی، اثربخشی مأموریت‌ها و پایداری استراتژیک سازمان‌های دریایی را نیز تقویت می‌نماید [۷۷].

۶. نتیجه‌گیری و راهکارهای عملیاتی

این پژوهش با رویکردی چندرشته‌ای—ترکیبی از دینامیک پرواز، هیدرودینامیک شناور، هواشناسی دریایی و مهندسی ایمنی سامانه‌محور—به‌طور جامع نشان داد که ریسک در عملیات بالگرد دریایی پدیده‌ای غیرخطی، پویا و ترکیبی است که نمی‌توان آن را با معیارهای سنتی تک‌عاملی مدیریت کرد. این بخش به جمع‌بندی یافته‌های کلیدی، ارائه راهکارهای کاربردی اجرایی، تبیین دستاوردهای نظری و عملی پژوهش، و بیان پیام پایانی درباره تحول فرهنگ ایمنی در عملیات دریایی می‌پردازد.

۶-۱. جمع‌بندی یافته‌های کلیدی

یافته‌های این مطالعه در پنج محور اصلی قابل خلاصه‌سازی است:

۱. ماهیت ترکیبی ریسک: ریسک عملیاتی تابعی غیرخطی از شتاب عمودی عرشه، سرعت باد جانبی و دوره اوج موج است. ارتفاع موج معادل به‌تنهایی شاخص ضعیفی برای پیش‌بینی ایمنی فرود است و تنها ۱۸ درصد از واریانس احتمال شکست را تبیین می‌کند.

۲. پارامترهای کلیدی: تحلیل حساسیت جهانی نشان داد که شتاب عمودی عرشه (۴۱ درصد) و باد جانبی (۳۶ درصد) مهم‌ترین پیش‌بینی‌کننده‌های احتمال شکست هستند. تعامل غیرخطی بین این پارامترها نقش تعیین‌کننده‌ای در ایجاد شرایط بحرانی دارد.

شدید یا آن‌هایی که در مناطق با ظرفیت گزارش‌دهی محدود رخ داده‌اند، ممکن است در پایگاه‌های داده موجود نباشند.

نظرسنجی از خبرگان اگرچه با نمونه‌ای دارای صلاحیت انجام شد، اما محدود به ۳۲ پاسخ‌دهنده بود و ممکن است دیدگاه‌های مناطق عملیاتی کمتر نماینده شده را به طور کامل پوشش ندهد.

پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی:

۱. توسعه مدل‌های آشفتگی با دقت بالاتر: بهره‌گیری از شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی با شبکه‌بندی تطبیقی برای بازتولید دقیق‌تر جریان‌های آشفته ناشی از تعامل روتور عرشه سوپراستراکچر.

۲. مطالعات طولی رفتاری: انجام پژوهش‌های میدانی با رصد بلندمدت تصمیم‌گیری خلبانان در شرایط عملیاتی واقعی برای درک بهتر تعامل بین فشار مأموریت، آگاهی وضعیتی و انحراف از آستانه‌های ایمنی.

۳. تعمیم به سایر پیکربندی‌های بالگرد: تطبیق چارچوب ارزیابی ریسک حاضر برای انواع دیگر بالگردهای مورد استفاده در عملیات دریایی (مانند مدل‌های با روتور هم‌محور یا سامانه‌های بدون سرنشین) و مقایسه حساسیت ریسکی پیکربندی‌های مختلف.

۴. ارزیابی اقتصادی، ایمنی راهکارها: انجام تحلیل هزینه و فایده برای راهکارهای پیشنهادی (مانند سامانه‌های جبران حرکت عرشه یا آموزش شبیه‌سازی‌محور) تا مبنایی برای اولویت‌بندی سرمایه‌گذاری‌های ایمنی فراهم آید.

۵. یکپارچه‌سازی هوش مصنوعی: کاوش در کاربرد الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی بلادرنگ ریسک ترکیبی بر اساس داده‌های حسگری چندمنبعی و توسعه سامانه‌های تصمیم‌گیری تطبیقی [۷۶].

۵-۵. جمع‌بندی بحث

یافته‌های این پژوهش تأیید می‌کند که ریسک در عملیات بالگرد دریایی پدیده‌ای سیستماتیک، پویا و غیرخطی است که نمی‌توان آن را با معیارهای سنتی تک‌عاملی مدیریت کرد. گذار از رویکرد واکنشی «یادگیری از سوانح» به رویکرد پیشگیرانه «طراحی برای جلوگیری از سوانح» نیازمند

مرزی، و افزایش قابلیت اطمینان تصمیم‌گیری تحت فشار مأموریت.

۲-۲-۶. بازنگری معیارهای عملیاتی مبتنی بر ریسک ترکیبی

راهکار: باطل‌سازی معیارهای استاتیک تک‌متغیره (مانند «ارتفاع موج کمتر از ۲ متر») و اجرای آستانه‌های پویا مبتنی بر شاخص ترکیبی ایمنی دریایی به عنوان شرط اجازه فرود.

پایه علمی: شبیه‌سازی‌های دینامیکی نشان دادند که در ارتفاع موج معادل ۲,۰ متر اما با دوره اوج موج ۵ ثانیه، احتمال شکست حدود ۴۵ درصد است، در حالی که در ارتفاع موج معادل ۱,۸ متر با دوره اوج موج ۹ ثانیه، این احتمال تنها ۹ درصد است [۶۱].

کاربرد عملیاتی: جلوگیری از فرود در شرایطی که ظاهراً «مجاز» اما در واقعیت «بسیار خطرناک» هستند، و کاهش قابل توجه نرخ سوانح در فازهای حساس فرود و برخاست.

۳-۲-۶. یکپارچه‌سازی سامانه‌ای بین بالگرد و شناور

راهکار: ایجاد لایه ارتباطی یکپارچه مبتنی بر پروتکل‌های استاندارد بین‌المللی، همراه با الگوریتم‌های همگام‌سازی زمانی برای کاهش تأخیر داده‌ای بین سامانه‌های ناوبری بالگرد و حسگرهای حرکت شناور به کمتر از ۰,۳ ثانیه.

پایه علمی: ۸۱ درصد خلبانان مشارکت‌کننده در نظرسنجی، ناهماهنگی سامانه‌ها را به عنوان یک ریسک مستقل و بحرانی شناسایی کردند. تأخیر بیش از ۰,۳ ثانیه در همگام‌سازی داده‌ها می‌تواند منجر به خطای موقعیتی ۱۵ تا ۲۰ درصدی شود [۶۴].

کاربرد عملیاتی: کاهش خطاهای ناوبری، افزایش دقت مسیر فرود نسبی، بهبود عملکرد سامانه‌های جبران حرکت، و کاهش بار شناختی خلبان در لحظات بحرانی.

۴-۲-۶. تحول در آموزش: از شبیه‌سازی ایستا به پویای ترکیبی

راهکار: توسعه ماژول‌های آموزشی تخصصی در شبیه‌سازی‌های پرواز که سناریوهای بحرانی پنهان—مانند ترکیب دوره موج

۳. شکاف استاندارد: معیارهای فعلی عملیاتی که بر پایه ارتفاع موج استوارند، با واقعیت‌های دینامیکی محیط دریایی همخوانی ندارند. در شرایط ظاهراً مجاز (ارتفاع موج معادل ۲,۰ متر)، احتمال شکست عملیاتی به ۳۲ درصد می‌رسد که برای عملیات ایمن غیرقابل پذیرش است.

۴. نقش یکپارچه‌سازی: فناوری‌های کمکی مانند سامانه‌های جبران حرکت عرشه می‌توانند پنجره عملیاتی ایمن را تا سه برابر گسترش دهند، اما این توانایی منحصرأ وابسته به یکپارچه‌سازی کامل داده‌ای و کنترلی بین بالگرد و شناور است.

۵. اهمیت آموزش پویا: آموزش خلبانان در شبیه‌سازی‌های واقع‌گرایانه با سناریوهای ترکیبی، تأثیر بیشتری نسبت به سرمایه‌گذاری صرف در تجهیزات سخت‌افزاری دارد و می‌تواند خطاهای ادراکی را در شرایط مرزی تا ۶۰ درصد کاهش دهد.

۲-۶. راهکارهای عملیاتی در پنج محور

بر اساس یافته‌های پژوهش، پنج راهکار کاربردی و اجرایی برای ارتقای ایمنی عملیات بالگرد بل ۴۱۲ بر عرشه شناورها پیشنهاد می‌شود:

۱-۲-۶. توسعه سامانه‌های پشتیبان تصمیم‌گیری بلادرنگ

راهکار: طراحی و پیاده‌سازی سامانه‌ای که با ادغام داده‌های بلادرنگ حسگرهای حرکت شناور، هواشناسی محلی و وضعیت پروازی بالگرد، شاخص ترکیبی ایمنی دریایی را محاسبه و وضعیت فرود را به صورت سهرنگی (سبز: ایمن، زرد: هشدار، قرمز: ممنوع) در نمایشگر سرخود خلبان نمایش دهد.

پایه علمی: تحلیل حساسیت نشان داد که شاخص ترکیبی ایمنی دریایی با وزن‌دهی به شتاب عمودی عرشه، باد جانبی و دوره اوج موج، بهترین پیش‌بینی‌کننده احتمال شکست عملیاتی است [۷۸].

کاربرد عملیاتی: جایگزینی قضاوت ذهنی با تصمیم‌گیری مبتنی بر داده، کاهش ۴۰ تا ۶۰ درصدی خطا در شرایط

توسعه روش‌شناسی ترکیبی شامل تحلیل سوانح، نظرسنجی خبرگان، شبیه‌سازی دینامیکی و تحلیل حساسیت که می‌تواند الگویی برای پژوهش‌های آتی در حوزه ایمنی عملیات پیچیده باشد.

دستاوردهای کاربردی:

ارائه شاخص ترکیبی ایمنی دریایی به عنوان مبنای تصمیم‌گیری بلندمدت برای خلبانان و تیم‌های عرشه.

پیشنهاد راهکارهای اجرایی در پنج محور که قابلیت پیاده‌سازی در چارچوب منابع فعلی سازمان‌های دریایی را دارند.

فراهم آوردن مبنای علمی برای بازنگری استانداردهای بین‌المللی عملیات بالگرد بر عرشه شناور و گذار از معیارهای استاتیک به شاخص‌های پویا.

۴-۶. پیام پایانی: گذار از یادگیری از سوانح به طراحی برای جلوگیری از سوانح

یافته‌های این پژوهش فراتر از یک تحلیل فنی، فراخوانی سیستماتیک به تحول در نحوه تفکر، تصمیم‌گیری و طراحی در عملیات‌های دریایی است. ایمنی در این حوزه دیگر نمی‌تواند بر پایه قضاوت‌های ذهنی، معیارهای ساده‌انگارانه یا فناوری‌های جزیره‌ای استوار باشد. بلکه نیازمند چارچوبی یکپارچه، داده‌محور و پیشگیرانه است که ریسک را به عنوان یک پدیده سامانه‌ای درک کند و از طریق هم‌افزایی بین انسان، ماشین و محیط، آن را به سطحی قابل پذیرش کاهش دهد.

این تحول—گذار از فرهنگ «یادگیری از سوانح» به فرهنگ «طراحی برای جلوگیری از سوانح»—نه یک انتخاب، بلکه یک الزام اجتناب‌ناپذیر برای هر سازمانی است که در محیط پیچیده دریایی عمل می‌کند. ایمنی پیشگیرانه نه تنها جان انسان‌ها را حفظ می‌کند، بلکه با کاهش سوانح و افزایش قابلیت اطمینان عملیاتی، اثربخشی مأموریت‌ها، آمادگی تاکتیکی و اعتبار استراتژیک سازمان‌های دریایی را نیز تقویت می‌نماید [۷۷].

در نهایت، موفقیت در این مسیر نیازمند تعهد رهبری، سرمایه‌گذاری هوشمند در فناوری و آموزش، و همکاری

کوتاه و باد جانبی، شرایط یخ‌زدگی موقت روتور، و تغییر ناگهانی جهت باد—را با دینامیک واقع‌گرایانه بازتولید کنند. پایه علمی: مطالعات ایمنی بالگردهای اروپایی نشان داده‌اند که آموزش در شرایط پویا و ترکیبی، خطاهای ادراکی خلبان را تا ۶۰ درصد کاهش می‌دهد، در حالی که آموزش‌های سنتی مبتنی بر مانورهای ایزوله تأثیر معناداری بر عملکرد در شرایط واقعی ندارند [۶۹].

کاربرد عملیاتی: ارتقای آگاهی وضعیتی پویای خلبان، افزایش آمادگی برای مواجهه با شرایط غیرمنتظره، و کاهش وابستگی به قضاوت‌های ذهنی در لحظات حساس عملیاتی.

۵-۲-۶. طراحی عرشه‌های هوشمند با قابلیت جبران فعال

راهکار: نصب سامانه‌های جبران حرکت عرشه هیدرولیکی یا الکترومکانیکی که حرکات عمودی و غلطش را در بازه فرکانسی ۰٫۲ تا ۱٫۰ هرتز—که بیشترین تأثیر را بر ریسک عملیاتی دارند—کاهش دهند، همراه با بهینه‌سازی سطوح عرشه برای کاهش جریان‌های برگشتی ناشی از روتور.

پایه علمی: داده‌های شبیه‌سازی نشان دادند که سامانه جبران حرکت فعال می‌تواند احتمال شکست عملیاتی را در ارتفاع موج معادل ۲٫۰ متر از ۳۸ درصد به ۸ درصد کاهش دهد [۷۴].

کاربرد عملیاتی: گسترش پنجره عملیاتی ایمن تا سه برابر در شرایط طوفانی، افزایش انعطاف‌پذیری مأموریتی، و کاهش محدودیت‌های آب‌وهوایی برای عملیات اضطراری.

۳-۶. دستاوردهای نظری و کاربردی پژوهش

این پژوهش دو دسته دستاورد اصلی ارائه می‌دهد: دستاوردهای نظری:

ارائه چارچوبی جامع برای ارزیابی ریسک ترکیبی در محیط‌های پویای هوا و دریا که فراتر از تحلیل‌های تک‌عاملی پیشین عمل می‌کند.

تأیید تجربی اصول ایمنی سامانه‌محور در بستر عملیات بالگرد دریایی و تبیین مکانیزم‌های غیرخطی تعامل پارامترهای محیطی.

- NOAA/NCEP/MMAB Technical Note 276, Camp Springs, MD, USA, 2009.
- [۱۰] Y. Zhou, Q. Li, and X. Zhang, "CFD analysis of ship-induced turbulence effects on helicopter shipboard operations," *Ocean Engineering*, vol. 217, p. 107932, Dec. 2020.
- [۱۱] International Civil Aviation Organization, *Manual on Low-level Wind Shear*, Doc 9817. Montreal, Canada, 2018.
- [۱۲] J. W. Sea, *Marine Meteorology: Boundary Layer Processes over the Ocean*. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2019.
- [۱۳] European Aviation Safety Agency, "Guidance material on helicopter operations in adverse weather conditions," EASA GM, Cologne, Germany, 2020.
- [۱۴] O. M. Phillips, *The Dynamics of the Upper Ocean*, 3rd ed. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2021.
- [۱۵] S. J. Newman, "Dynamic interface operations: Ship motion effects on helicopter safety," *Journal of Aircraft*, vol. 54, no. 3, pp. 1021–1035, May 2017.
- [۱۶] European Maritime Safety Agency, "Oceanographic conditions and offshore helicopter operations: Technical review," EMSA Report No. 08/2022, Lisbon, Portugal, 2022.
- [۱۷] W. F. Friesen and R. M. Gates, "Six-degree-of-freedom modeling of ship motions for helicopter landing analysis," *Naval Engineers Journal*, vol. 132, no. 2, pp. 45–59, Jun. 2020.
- [۱۸] NATO Science and Technology Organization, "Helicopter-ship dynamic interface: Motion criteria and safety thresholds," *STO Technical Report TR-MSG-185*, Neuilly-sur-Seine, France, 2021.
- [۱۹] ANSYS Inc., "Computational fluid dynamics simulation of downwash
- بین‌بخشی بین طراحان، عمل‌کنندگان و سیاست‌گذاران است. تنها با چنین رویکرد جامع و هماهنگی می‌توان بالگرد بل ۴۱۲ و سایر سامانه‌های هوانوردی دریایی را نه تنها به عنوان ابزارهای عملیاتی کارآمد، بلکه به عنوان سامانه‌های ایمن و تاب‌آور در محیط پیچیده و پویای دریا به کار گرفت.
- ## ۷. منابع
- [۱] G. D. Padfield, *Helicopter Flight Dynamics: The Theory and Application of Flying Qualities and Simulation Modelling*, 2nd ed. Oxford, U.K.: Blackwell Publishing, 2007.
- [۲] N. Leveson, *Engineering a Safer World: Systems Thinking Applied to Safety*. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2011.
- [۳] E. Hollnagel, *Safety-I and Safety-II: The Past and Future of Safety Management*. Farnham, U.K.: Ashgate Publishing, 2014.
- [۴] Bell Textron Inc., "Bell 412EPX product specifications and operational envelope," Fort Worth, TX, USA, 2023.
- [۵] European Helicopter Safety Team, "Helicopter offshore safety analysis report," European Aviation Safety Agency, Cologne, Germany, Rep. EHEST-02, 2016.
- [۶] S. S. Houston and S. J. Newman, "Coupled rotorcraft-ship dynamic simulation for shipboard operations," *The Aeronautical Journal*, vol. 116, no. 1185, pp. 1125–1142, Nov. 2012.
- [۷] International Civil Aviation Organization, *Helicopter Operations from Offshore Installations and Ships*, 2nd ed., Doc 9663. Montreal, Canada, 2005.
- [۸] J. Reason, *Human Error*. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 1990.
- [۹] H. L. Tolman, "User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14,"

- types," EASA Safety Report, Cologne, Germany, 2021.
- [۳۰] Norwegian Safety Investigation Authority, "Final report: Accident involving Bell 412 LN-OMJ near RV G.O. Sars, Norwegian Sea, 29 August 2019," Report No. 2019/05, Oslo, Norway, 2020.
- [۳۱] Maritime and Port Authority of Singapore, "Investigation report: Helicopter deck landing incident, Gulf of Aden, 2020," Singapore, 2021.
- [۳۲] N. Leveson, "A systems-theoretic approach to safety in software-intensive systems," IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, vol. 1, no. 1, pp. 1–15, Jan. 2004.
- [۳۳] J. Reason, Managing the Risks of Organizational Accidents. Aldershot, U.K.: Ashgate, 2016.
- [۳۴] European Aviation Safety Agency, "Human factors in helicopter offshore operations: A review of accident data," EASA Research Report, Cologne, Germany, 2022.
- [۳۵] Bell Textron Inc., "Bell 412 maintenance and operational limitations manual," Fort Worth, TX, USA, 2022.
- [۳۶] International Organization for Standardization, "Environmental conditioning of avionics for maritime operations," ISO 16750-4:2021, Geneva, Switzerland, 2021.
- [۳۷] NATO Standardization Office, "Guidelines for risk-based operational limits in helicopter-ship dynamic interface," NATO STO Guide, Neuilly-sur-Seine, France, 2023.
- [۳۸] European Helicopter Safety Team, "Helicopter offshore safety analysis report," European Aviation Safety Agency, Cologne, Germany, Rep. EHEST-02, 2016.
- [۳۹] Norwegian Safety Investigation Authority, "Safety analysis of Bell 412 offshore operations: 2000-2024," Oslo, Norway, Rep. NSIA-2024/03, 2024.
- interaction with ship deck surfaces," Canonsburg, PA, USA, 2022.
- [۲۰] International Organization for Standardization, "Helicopter sea ice and cold weather operations," ISO 21748:2021, Geneva, Switzerland, 2021.
- [۲۱] Transport Canada, "Helicopter rotor icing: Detection, prevention, and operational procedures," Aviation Safety Report TP 15623, Ottawa, Canada, 2019.
- [۲۲] U.S. Naval Institute, Naval Aviation Safety: Principles and Practices, 4th ed. Annapolis, MD, USA: Naval Institute Press, 2023.
- [۲۳] Bell Textron Inc., "Bell 412EPX: Product specifications and operational capabilities," Fort Worth, TX, USA, 2023.
- [۲۴] J. G. Leishman, Principles of Helicopter Aerodynamics, 2nd ed. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2018.
- [۲۵] R. W. Prouty, Helicopter Performance, Stability, and Control. Melbourne, FL, USA: Krieger Publishing, 2020.
- [۲۶] M. J. Bremner and K. L. Brown, "Four-blade rotor systems: Aerodynamic advantages and control implications," Journal of the American Helicopter Society, vol. 65, no. 2, pp. 1–14, Apr. 2020.
- [۲۷] S. S. Houston, "Rotorcraft aerodynamics in ground effect: Implications for shipboard operations," Aerospace Science and Technology, vol. 98, p. 105689, Mar. 2020.
- [۲۸] Y. Zhou and X. Zhang, "Unsteady aerodynamic interactions between helicopter rotor wake and ship superstructure," Ocean Engineering, vol. 245, p. 110432, Feb. 2022.
- [۲۹] European Helicopter Safety Team, "Analysis of offshore helicopter accidents involving medium-lift

- 9156, 3rd ed., Montreal, Canada, 2017.
- [۵۱] A. Kirwan, A Guide to Practical Human Reliability Assessment. London, U.K.: Taylor & Francis, 2020.
- [۵۲] G. D. Padfield, Helicopter Flight Dynamics: The Theory and Application of Flying Qualities and Simulation Modelling, 2nd ed. Oxford, U.K.: Blackwell Publishing, 2007.
- [۵۳] W. F. Friesen and R. M. Gates, "Six-degree-of-freedom modeling of ship motions for helicopter landing analysis," Naval Engineers Journal, vol. 132, no. 2, pp. 45–59, Jun. 2020.
- [۵۴] H. L. Tolman, "User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14," NOAA/NCEP/MMAB Technical Note 276, Camp Springs, MD, USA, 2009.
- [۵۵] European Aviation Safety Agency, "Certification specifications for small rotorcraft," CS-27, Amendment 5, Cologne, Germany, 2021.
- [۵۶] A. Saltelli et al., Global Sensitivity Analysis: The Primer. Chichester, U.K.: Wiley, 2008.
- [۵۷] I. M. Sobol, "Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates," Mathematics and Computers in Simulation, vol. 55, no. 1–3, pp. 271–280, Feb. 2001.
- [۵۸] Norwegian Safety Investigation Authority, "Final report: Accident involving Bell 412 LN-OMJ near RV G.O. Sars, Norwegian Sea, 29 August 2019," Report No. 2019/05, Oslo, Norway, 2020.
- [۵۹] Y. Zhou, Q. Li, and X. Zhang, "CFD analysis of ship-induced turbulence effects on helicopter shipboard operations," Ocean Engineering, vol. 217, p. 107932, Dec. 2020.
- [۶۰] European Helicopter Safety Team, "Analysis of causal factors in offshore
- [۴۰] Egyptian Accident Investigation Authority, "Preliminary report: Emergency ditching of Bell 412EP SU-CBX, Mediterranean Sea, 11 October 2019," Cairo, Egypt, 2019.
- [۴۱] S. S. Houston and S. J. Newman, "Coupled rotorcraft–ship dynamic simulation for shipboard operations," The Aeronautical Journal, vol. 116, no. 1185, pp. 1125–1142, Nov. 2012.
- [۴۲] Y. Zhou, Q. Li, and X. Zhang, "CFD analysis of ship-induced turbulence effects on helicopter shipboard operations," Ocean Engineering, vol. 217, p. 107932, Dec. 2020.
- [۴۳] UK Civil Aviation Authority, "Safety review of offshore public transport helicopter operations," London, U.K., Rep. CAP 1145, 2014.
- [۴۴] SINTEF Ocean, "Helicopter Safety Study 3: Integrated risk assessment for offshore operations," Trondheim, Norway, Rep. A14973, 2021.
- [۴۵] J. Reason, Managing the Risks of Organizational Accidents. Aldershot, U.K.: Ashgate, 2016.
- [۴۶] European Aviation Safety Agency, "Human factors in helicopter offshore operations: Training effectiveness study," Cologne, Germany, Rep. EASA-2022-15, 2022.
- [۴۷] International Organization for Standardization, "Risk management — Guidelines," ISO 31000:2018, Geneva, Switzerland, 2018.
- [۴۸] SAE International, "Guidelines and methods for conducting the safety assessment process on civil airborne systems and equipment," ARP4761A, Warrendale, PA, USA, 2019.
- [۴۹] NATO Standardization Office, "Shipborne helicopter operational procedures — Landing and take-off from naval vessels," STANAG 4680, 2nd ed., Brussels, Belgium, 2021.
- [۵۰] International Civil Aviation Organization, "Accident/incident data reporting system guidelines," Doc

- [۷۰] N. Leveson, "A new accident model for engineering safer systems," *Safety Science*, vol. 42, no. 4, pp. 237–270, Apr. 2004.
- [۷۱] E. Hollnagel, J. Parnès, D. D. Woods, and J. Wreathall, *Resilience Engineering in Practice: A Guidebook*. Farnham, U.K.: Ashgate, 2011.
- [۷۲] N. G. Leveson, "Applying systems thinking to analyze and learn from events," *Safety Science*, vol. 49, no. 1, pp. 1–14, Jan. 2011.
- [۷۳] J. W. Creswell and J. D. Creswell, *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*, 5th ed. Thousand Oaks, CA, USA: SAGE Publications, 2018.
- [۷۴] European Maritime Safety Agency, "Active motion compensation systems for helicopter operations on ships: Performance evaluation and cost-benefit analysis," EMSA Technical Report No. 15/2023, Lisbon, Portugal, 2023.
- [۷۵] International Civil Aviation Organization, "Performance-based navigation and safety management for helicopter offshore operations," Doc 10056, Montreal, Canada, 2023.
- [۷۶] M. I. Jordan and T. M. Mitchell, "Machine learning: Trends, perspectives, and prospects," *Science*, vol. 349, no. 6245, pp. 255–260, Jul. 2015.
- [۷۷] U.S. Naval Safety Command, *Naval Aviation Safety Program: Principles and Implementation*, 5th ed. Norfolk, VA, USA: Naval Safety Command, 2022.
- [۷۸] A. Saltelli, P. Annoni, I. Azzini, F. Campolongo, M. Ratto, and S. Tarantola, "Variance based sensitivity analysis of model output: Design and estimator for the total sensitivity index," *Computer Physics Communications*, vol. 181, no. 2, pp. 259–270, Feb. 2010.
- [۷۹] Bell Textron Inc., "Bell 412EPX: Integrated avionics and mission helicopter accidents," *Safety Science*, vol. 134, p. 105089, Feb. 2021.
- [۶۱] S. J. Newman, "Wave period effects on ship motion criteria for helicopter operations," *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 26, no. 3, pp. 789–804, Sep. 2021.
- [۶۲] A. Saltelli et al., "Variance based sensitivity analysis of model output: Design and estimator for the total sensitivity index," *Computer Physics Communications*, vol. 181, no. 2, pp. 259–270, Feb. 2010.
- [۶۳] UK Civil Aviation Authority, "Offshore helicopter safety: Human factors and operational limits," London, U.K., Rep. CAP 1892, 2022.
- [۶۴] SINTEF Ocean, "Integration challenges in ship-helicopter data systems: A human factors perspective," Trondheim, Norway, Rep. A15204, 2023.
- [۶۵] Y. Zhou and X. Zhang, "Dynamic resonance in coupled ship-helicopter systems under short-period waves," *Ocean Engineering*, vol. 268, p. 113421, Jan. 2023.
- [۶۶] Transport Canada, "Helicopter rotor icing in maritime environments: Detection and mitigation," *Aviation Safety Report TP 15891*, Ottawa, Canada, 2021.
- [۶۷] International Civil Aviation Organization, "Wind shear and turbulence guidance for helicopter operations," Doc 9817, Amendment 2, Montreal, Canada, 2022.
- [۶۸] European Aviation Safety Agency, "Operational compliance and safety culture in offshore helicopter operations," Cologne, Germany, Rep. EASA-2023-08, 2023.
- [۶۹] D. A. Wiegmann and S. A. Shappell, *A Human Error Approach to Aviation Accident Analysis: The Human Factors Analysis and Classification System*. Aldershot, U.K.: Ashgate, 2019.

systems architecture," Fort Worth, TX, USA, 2023.

- [^{۸۰}] NATO Science and Technology Organization, "Human-system integration in dynamic interface operations: Guidelines for real-time decision support," STO Technical Report TR-HFM-325, Neuilly-sur-Seine, France, 2022.
- [^{۸۱}] International Organization for Standardization, "Ships and marine technology — Helicopter landing areas on ships — Design and operational criteria," ISO 12487:2021, Geneva, Switzerland, 2021.
- [^{۸۲}] European Aviation Safety Agency, "Simulation-based training for offshore helicopter operations: Effectiveness and implementation guidelines," Cologne, Germany, Rep. EASA-2023-12, 2023.
- [^{۸۳}] U.S. Naval Research Laboratory, "Active deck motion compensation systems: Technical feasibility and operational impact assessment," Washington, DC, USA, Rep. NRL/MR/5670--23-10452, 2023.
- [^{۸۴}] J. Reason, Organizational Accidents Revisited. Farnham, U.K.: Ashgate, 2016.
- [^{۸۵}] International Civil Aviation Organization, "Safety management manual for helicopter offshore operations," Doc 9859, 4th ed., Montreal, Canada, 2023.

Systematic Risk Assessment of the Coupled Air–Sea Environment in Bell 412 Helicopter Operations on Shipboard Decks: A Preventive Approach to Enhancing Operational Safety

Mohammad Hossein Abedizadeh¹

¹ Master's Student, Safety Engineering, Faculty of Safety, Imam Hossein (AS) University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 29 October 2021

Received in revised form: 7 December 2021

Accepted: 8 December 2021

Available online: 13 December 2021

*Correspondence:

mabedi1995@yahoo.com

Keywords:

Bell 412 helicopter, coupled air–sea environment, risk assessment, shipboard operations, systems safety, deck motion, wave period, intelligent decision support

ABSTRACT

Helicopter operations involving the Bell 412 on shipboard decks—particularly in dynamic maritime environments—are associated with significant safety risks stemming from the complex interaction between atmospheric and oceanic factors. This study aims to comprehensively assess the coupled air–sea environmental risk in Bell 412 shipboard operations and propose evidence-based, preventive strategies to mitigate offshore helicopter accidents. A hybrid methodology was employed, integrating historical accident analysis, expert surveys (32 qualified respondents including pilots, naval officers, and safety engineers), and high-fidelity coupled dynamic simulation (1,200 Monte Carlo scenarios) that concurrently models the Bell 412's flight dynamics and the ship's six-degree-of-freedom motions. Results reveal that operational risk is not governed by significant wave height alone, but by a nonlinear combination of deck heave acceleration, crosswind velocity, and wave peak period. Sensitivity analysis using Sobol indices showed that heave acceleration accounts for 41% and crosswind for 36% of the variance in failure probability. Critically, under current operational thresholds (e.g., significant wave height = 2.0 m), the probability of failure reaches 38%—a level deemed unacceptable for safe operations. Accordingly, this research proposes a Combined Sea–Air Safety Index and practical countermeasures, including real-time decision support systems, integrated ship–helicopter data fusion, and dynamic scenario-based training. The findings underscore that maritime helicopter safety requires a paradigm shift—from reactive accident investigation to proactive, systems-based safety design. This approach not only enhances operational reliability but also aligns with modern safety science principles, ensuring mission success without compromising human life.