

ارائه روش و معیارهایی جدید جهت هدایت ایمن شناورهای سطحی در فرآیند چهارم از چرخه فرماندهی و کنترل

صادق فاضل^۱، ناصر پریرز^۲، سعید بلوچیان^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۱۴

چکیده

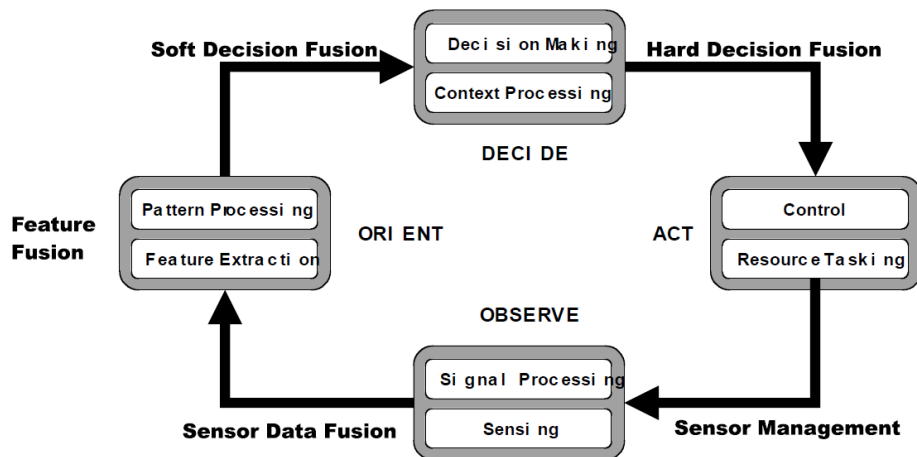
معمولا در شناورها برای مقابله با تهدیدات از چرخه فرماندهی و کنترل استفاده می‌شود. اگر در فرآیندهای مشاهده، جهت‌یابی و تصمیم‌گیری از این حلقه ریسک یک تهدید خارجی بیش از حد مجاز ارزیابی شود، مطابق رویه‌های معمول کنونی فرمانده در فرآیند چهارم که اقدام نامیده می‌شود، با تخصیص سلاح مناسب با آن مقابله می‌کند. در این مقاله راهکاری جدید و کنشی با عنوان "هدایت ایمن" برای به‌کارگیری در فرآیند چهارم از چرخه فرماندهی و کنترل پیشنهاد شده که در آن فرمانده قبل از تخصیص و استفاده از هرگونه سلاح، از "مسیریابی ایمن و بهینه" به‌عنوان اولین زیرفرآیند و از "سامانه‌های رانش و هدایت و کنترل شناور" به‌عنوان مهمترین ابزار مواجهه با تهدید استفاده می‌کند. همچنین برای پیاده‌سازی روش هدایت ایمن ابتدا تعاریف و شاخص‌هایی جدید برای تعیین نقاط، نواحی و مسیرهای ایمن و ناایمن معرفی شده و سپس معیارهای عملکردی جدیدی برای تعیین ایمن‌ترین مسیر از بین مسیرهای ایمن موجود، و همچنین تعیین مسیر ایمن مطلوب با ایجاد توازن بین مسائل مهم ایمنی و طول مسیر پیشنهاد شده‌اند. در انتها نیز ایده‌های مطرح شده در مورد یک کشتی که در معرض ترکیبی از تهدیدات نظامی و غیرنظامی قرار دارد پیاده‌سازی شده‌اند. استفاده از این روش نه تنها برای شناورهای نظامی مزایای زیادی نسبت به روش استفاده از تسلیحات دارد، بلکه برای شناورهای غیرنظامی مانند شناورهای نفتی و تجاری نیز به‌عنوان تنها راه مواجهه با تهدید قابل استفاده است. در حالت کلی تر هم این روش می‌تواند برای هدایت ایمن بهینه هر سامانه دیگری که در یک فضای دوبعدی کار می‌کند نیز به‌کار رود.

واژگان کلیدی: فرماندهی و کنترل، هدایت ایمن، ارزیابی تهدید، مسیریابی، ریسک، مسیر بهینه

^۱ دانشجوی دکتری، گروه کنترل، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه فردوسی مشهد، S.fazel@mail.um.ac.ir

^۲ استاد، گروه کنترل، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه فردوسی مشهد، نویسنده مسئول n-pariz@um.ac.ir

^۳ دانشیار، گروه کنترل، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد گناباد، saeed.balochian@gmail.com



شکل ۱: مدل چرخه فرماندهی و کنترل با فرآیندهای OODA [۱]

۱. کلیات

از آنجایی که شناورهای سطحی بزرگ معمولاً شامل تنوع و تعداد زیادی از سنسورها و تجهیزات دفاعی هستند، ممکن نیست که بدون وجود یک فرآیند منظم از پیش تعریف شده و سامانه‌های تصمیم یار، فرمانده بتواند در مواجهه با انبوه تهدیدات تصمیم به موقع و موثری بگیرد. به این فرآیند و چرخه منظم، فرآیند "فرماندهی و کنترل"^۲ گفته شده و با نماد C2 نمایش داده می‌شود.

چرخه فرماندهی و کنترل مطابق شکل (۱) با حلقه OODA^۳ مدل‌سازی می‌شود. این حلقه شامل چهار زیرفرآیند اصلی است [۲-۱]، که عبارتند از: (۱) مشاهده^۴: فرآیند جمع آوری داده‌های مربوط به وضعیت خود، تهدیدات و محیط اطراف در میدان عملیات. معمولاً این فرآیند شامل آشکارسازی، اندازه گیری ویژگی‌ها و ردیابی موقعیت تهدیدات و ترکیب و نمایش داده‌ها در یک محیط نمایشی تاکتیکی است، (۲) جهت‌یابی^۵: فرآیند شناختی^۶ که به آن "آگاهی وضعیت"^۷ هم گفته شده و شامل کلاسه‌بندی، ارزیابی و شناسایی تهدیدات، و تحلیل رفتار و ارتباطات میان اشیاء

(برای مثال تحلیل میزان نزدیکی فیزیکی اشیاء به هم، پیش بینی قصد هر یک از اشیاء و سایر وابستگی‌های آنها با هم) است، (۳) تصمیم‌گیری^۸: طرح‌ریزی اقدامات لازم جهت دستیابی به هدف مطلوب. این فرآیند شامل اولویت‌بندی تهدیدات موجود و انجام تصمیمات لازم جهت تخصیص منابع موجود برای کاهش ریسک آنها است، و (۴) اقدام^۹: که شامل دو زیرفرآیند کنترل وضعیت و مدیریت منابع موجود است. کنترل عبارت است از تغییر بی‌درنگ شرایط موجود (خطرناک) به شرایط مطلوب (ایمن)، با انجام اقدامات یا صدور فرامین لازم برای مدیریت منابع تخصیص یافته در مرحله قبل و مشاهده و پایش مداوم نتایج اقدامات انجام شده [۲-۱].

با مطالعه تحقیقات انجام شده تاکنون [۳-۴] ملاحظه می‌کنیم که در فرآیند اقدام از چرخه فرماندهی و کنترل، غالباً "تخصیص سلاح" به عنوان مهم‌ترین زیرفرآیند و "تسلیمات شناور" به عنوان مهم‌ترین ابزار شناورها جهت مقابله با تهدیدات معرفی شده‌اند. اما بررسی سوانح پیش‌آمده برای شناورهای نظامی و غیرنظامی در سال‌های اخیر (مانند کشتی دماوند و کشتی نفت‌کش ایرانی با نام سانچی) نشان می‌دهد که علت اصلی غرق شدن تعدادی از آنها برخورد موشک یا پرتابه‌ای دیگر به آنها نبوده است، بلکه ناوبری و هدایت ناپایمن

^۲ Command and Control (C2)

^۳ Observe, Orient, Decide and Act (OODA)

^۴ Observe

^۵ Orient

^۶ Cognitive

^۷ Situation Awareness

^۸ Decide

^۹ Act

مقابله یا خشتی‌سازی اثر تهدیدات بر تخصیص و استفاده از سنسورها و تسلیحات شناور که استفاده از آن هزینه‌های سنگین مالی و حتی جانی در بردارد تمرکز داشته‌اند.

به‌طور نمونه در مرجع [۳] مدل‌های استاتیکی و دینامیکی تخصیص سلاح-هدف^{۱۰} (WTA) ارائه شده و مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. همچنین در مرجع [۴] روش‌های مختلف و مزایای برجسته راهکارهای ارائه‌شده در ۱۵۶ عنوان مقاله در حوزه ارزیابی تهدید و تخصیص سلاح^{۱۱} (TEWA)، که از سال ۱۹۷۵ تا سال ۲۰۱۶ میلادی منتشر شده‌اند، مورد بازنگری جامع قرار گرفته‌اند.

به‌عنوان نمونه‌هایی دیگر از این تحقیقات می‌توان به روش‌های WTA با دو هدف [۵]، سه هدف [۶] و چند هدف بهینه‌سازی [۷] اشاره کرد. معمولاً اهداف بهینه‌سازی عبارتند از بیشینه‌سازی میزان آسیب مورد انتظار دشمن، کمینه‌سازی احتمال بقاء^{۱۲} دشمن و کمینه‌سازی هزینه‌های ناشی از استفاده از منابع خودی مانند سلاح‌ها و سنسورها. همچنین برای حل مسائل WTA با ابعاد بزرگ در زمانی کوتاه، در [۸] روش خطی و در [۹] الگوریتم جستجوی بلادرنگ با قابلیت کاهش اندازه فضای حل مسئله ارائه شده‌اند. راهکارهای ارائه‌شده در مرجع [۱۰-۱۱] نیز به حل مسئله تخصیص سلاح-هدف با در نظر گرفتن قیود ارتباطی بین سلاح‌ها و سنسورها و سایر منابع موجود پرداخته‌اند.

از طرف دیگر با مرور جامع و مقایسه نظریه‌های اصلی مورد استفاده در چرخه فرماندهی و کنترل [۱۲-۳۳] نتیجه می‌گیریم که تحقیقات و مقالات موجود در این حوزه را می‌توان به دو گروه اصلی تقسیم‌بندی کرد. گروه اول مقالاتی هستند که از شاخص احتمال یا ارزش وقوع و گروه دوم مقالاتی هستند که تنها از شاخص ریسک برای ارزیابی تهدیدات و کنترل سامانه‌ها در مقابل آنها استفاده کرده‌اند. در مرجع [۱۲] خالقی و همکارانش تئوری‌های عمده آنالیز عدم

این شناورها منجر به وقوع این حوادث فاجعه‌انگیز شده است. از طرف دیگر نیز شناورهای غیرنظامی هم با تهدیدات زیادی در صحنه عملیات خود مواجه هستند. چون این شناورها مجهز به سلاح نیستند چنانچه در سطح چهار OODA اقدامات پیشگیرانه جهت جلوگیری از ورود آنها به نواحی پرخطر صورت نگیرد، احتمال رخداد این حوادث برای آنها روز به روز افزایش می‌یابد.

در این مقاله راهکاری جدید با عنوان "هدایت ایمن" پیشنهاد شده است که می‌تواند در فرآیند چهارم از چرخه فرماندهی و کنترل، به‌عنوان ارزان‌ترین راهکار و روشی موثر جهت مواجهه با تهدیدات، پیاده‌سازی شده و به‌کار گرفته شود. روش پیشنهادی روشی کنشی است، به این معنا که با اجرای آن قبل از اینکه یک تهدید بالقوه به تهدید بالفعل تبدیل شود، از وقوع آن پیشگیری می‌شود.

از مزایای مهم این روش این است که از یک طرف هم در شناورهای نظامی و هم در شناورهای غیرنظامی قابل استفاده است، و از طرف دیگر در مواجهه با تهدیدات هم نظامی و هم غیر نظامی کاربرد دارد، زیرا ابزار اصلی مورد نیاز اجرای این روش سامانه‌های رانش و هدایت و کنترل شناور هستند.

از آنجایی که اساس روش پیشنهادی بر پایه تضمین ایمنی شناور بوده و تضمین ایمنی سیستم تنها با کاهش سطح ریسک تهدیدات به مقادیر کمتر از یک سطح مجاز امکان‌پذیر است، برای ارائه تمامی تعاریف، شاخص‌ها و معیارهای عملکردی جدید پیشنهادی از شاخص ریسک تهدید که شاخصی جامع‌تر از احتمال وقوع آن است، استفاده شده است.

در انتها نیز ایده‌های مطرح‌شده در مورد یک شناور سطحی پیاده‌سازی شده و نتایج حاصله در چند سناریوی مختلف ارائه شده‌اند.

۱-۱. مقدمه

با مروری جامع بر مقالاتی که مربوط به آخرین فرآیند از چرخه فرماندهی و کنترل که فرآیند "اقدام" نامیده می‌شود، متوجه می‌شویم که در اکثر آنها روش‌های ارائه‌شده جهت

¹⁰ Weapon-threat assignment (WTA)

¹¹ Threat evaluation and weapon assignment (TEWA)

¹² Survivability

در این مقاله روش و شاخص‌هایی جدید جهت مسیریابی ایمن شناورها پیشنهاد شده‌اند که به کمک آنها می‌توان از "سامانه‌های رانش و هدایت و کنترل شناور" به عنوان اولین، مهم‌ترین و ارزان‌ترین ابزار مقابله با تهدید استفاده کرد. با توجه به اینکه اساس الگوریتم جدید هدایت ایمن شناور بوده و تضمین ایمنی نیز تنها به کمک شاخص ریسک امکان‌پذیر است، در تمامی تعاریف و معیارهای جدید معرفی شده در این مقاله از شاخص ریسک جهت ارزیابی تهدیدات استفاده شده، که این مزیت روش پیشنهادی بر روش‌های مبتنی بر احتمالات است.

برای توسعه روش پیشنهادی ابتدا نیاز به ارائه تعاریفی جدید، ریسک پایه و استاندارد برای نقاط و نواحی و همچنین مسیرهای ایمن و نایمن بود که این تعاریف در بخش سوم این مقاله ارائه شده‌اند. سپس دو شاخص جدید برای ارزیابی ایمنی و ریسک هر مسیر معرفی شده‌اند. نهایتاً با توجه به اینکه ممکن است تعداد مسیرهای ایمن نه تنها منحصر به فرد نبوده بلکه بی‌نهایت باشند، یک تابع معیاری جدید نیز معرفی شده است که به کمک آن می‌توان از بین مسیرهای ایمن موجود، ایمن‌ترین مسیر را انتخاب کرد. اما چون ممکن است ایمن‌ترین مسیر، مسیری دورتر و در نتیجه پرهزینه‌تر و زمان برتر باشد، تابع معیاری ترکیبی دیگری نیز پیشنهاد شده که به کمک آن می‌توان با ایجاد توازن بین مسائل مهم ایمنی و طول مسیر، مسیر ایمن مطلوب را انتخاب کرد. بدیهی است هر چه طول یک مسیر کمتر باشد، زمان، انرژی و هزینه لازم جهت طی آن کمتر خواهد بود.

مهم‌ترین مزایای استفاده از راهکار و معیارهای جدید ارائه شده در این مقاله در مقایسه با روش‌های قبلی عبارتند از:

(۱) روش پیشنهادی پیشگیرانه و کنشی است که هدف اصلی آن جلوگیری از تبدیل یک تهدید بالقوه به تهدید بالفعل است، درحالی‌که معمولاً روش استفاده از سلاح روشی واکنشی است که تنها در مواجهه با تهدیدات بالفعل استفاده می‌شود.

قطعیت مورد استفاده در ارزیابی و کنترل تهدیدات را معرفی و ویژگی‌ها، قابلیت‌ها و محدودیت‌های آنها را بررسی و مقایسه کرده‌اند.

مهم‌ترین روش‌های موجود در گروه اول مقالات عبارتند از شبکه‌های بیزین^{۱۳} [۱۴-۱۵]، روش‌های مبتنی بر مدل‌های مارکوف^{۱۴} [۱۶-۱۷]، روش‌های مبتنی بر منطق فازی [۱۸-۲۱]، روش‌های مبتنی بر شبکه‌های هوشمند مانند شبکه‌های عصبی [۲۲-۲۴]، روش‌های مبتنی بر تئوری قرائن^{۱۵} [۲۵-۲۶]، ترکیبی از روش‌های مذکور [۲۷-۳۱] و سایر روش‌های دیگر [۳۲-۳۳]. اما با توجه به تعریف ایمنی در استانداردها، تضمین حرکت ایمن سیستم به تنهایی با استفاده از شاخص ارزش یا احتمال وقوع امکان‌پذیر نبوده و در این زمینه باید تنها از شاخص ریسک استفاده شود.

اما تعداد مقالات ارائه شده در گروه دوم از روش‌ها که در چرخه فرماندهی و کنترل از شاخص ریسک برای کنترل سامانه‌ها در مقابل تهدیدات استفاده می‌کنند، در مقایسه با گروه اول خیلی کمتر هستند. به‌طور مثال در [۳۴] آقای بلدرهیج راهکاری شیء‌گرا مبتنی بر شاخص ریسک تهدید، جهت کنترل و مدیریت سنسورهای نوعی شناور سطحی ارائه کرده است. در این تحقیق اشیاء تهدیدکننده شناور دو سایت موشکی متحرک مستقر در ساحل و یک ناو هواپیمابر کوچک هستند.

همچنین کمار و همکارانش [۳۵-۳۶] نیز برای ارزیابی برآیند ریسک تهدیدات نوعی شناور مانند هواپیماها، موشک‌ها و هلی‌کوپترها، از شاخص میانگین ریسک هر یک از تهدیدات استفاده کرده‌اند. در مرجع [۳۵] روش بیزین و در مرجع [۳۶] منطق فازی برای محاسبه ارزش وقوع هر یک از تهدیدات به کار رفته‌اند. در مرجع [۳۴] برای ارزیابی برآیند همزمان ریسک همه تهدیدات سیستم‌ها شاخص "مجموع ریسک هر یک از تهدیدات" و در مراجع [۳۵-۳۶] از شاخص "میانگین ریسک هر یک از تهدیدات" استفاده شده است.

¹³ Bayesian Network

¹⁴ Markov Model

¹⁵ Evidence theory

مطابق شکل (۲) در این سناریو یک کشتی که دارای^{۱۶} نامیده می‌شود، قصد دارد در میدان عملیاتی که محدوده آن با رابطه زیر تعیین می‌شود در لحظه t_0 از نقطه شروع X_0 شروع به حرکت کرده و در حضور تعدادی شیء تهدیدکننده، در لحظه t_f به نقطه نهایی X_f برسد. در مطالعه موردی پیاده‌سازی شده در این مقاله اشیاء تهدیدکننده یک جزیره و یک سایت نظامی دیگر با قابلیت پرتاب پرتابه به سمت شناور هستند.

$$D = \{(x, y) \in R^2 | (x_{min} \leq x \leq x_{max}) \text{ and } (y_{min} \leq y \leq y_{max})\} \quad (1)$$

در این مسئله هدف یافتن مسیری ایمن بین مبدا و مقصد برای شناور سطحی از نوع کلاس سنگین است، که با ایجاد توازن بین مسئله ایمنی و مسائل دیگری مانند طول و زمان مسیر و با رعایت کلیه قیود مسئله تعیین شده باشد. معادلات دینامیکی حرکت شناور سطحی با روابط زیر توصیف می‌شوند.

$$\dot{x}_a(t) = \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |\bar{v}_a| \cdot \cos(u(t)) \\ |\bar{v}_a| \cdot \sin(u(t)) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$u(t) = \angle \bar{v}_a(t) = \alpha(t) \quad (3)$$

$$0 \leq |\bar{v}_a(t)| \leq v_m \quad (4)$$

که در آن

$x_a(t)$: بردار حالت موقعیت شناور

$\alpha(t)$: زاویه بردار سرعت شناور نسبت به محور x

$u(t)$: زاویه بردار سرعت شناور نسبت به محور x

و v_m حداکثر سرعت شناور هستند.

در مسئله تعیین مسیر، برای تضمین پایداری شناور باید قید زیر که مربوط به انحنای مسیر^{۱۷}، $C(t)$ ، شناور است برآورده شود.

$$0 \leq |C(t)| \leq C_{max}(|\bar{v}_a(t)|) \quad (5)$$

$$C(t) = \frac{d\alpha(t)}{dl(t)}$$

که در این رابطه:

$l(t)$: طول مسیر طی شده توسط شناور تا لحظه t

و $C_{max}(|\bar{v}_a(t)|)$ حداکثر مقدار انحنای مسیر در لحظه t

است که تابعی از سرعت شناور در آن لحظه است.

(۲) برای شناورهای غیرنظامی که مجهز به تسلیحات نمی‌باشند، روش پیشنهادی می‌تواند با صرف هزینه کمی به عنوان مهمترین ابزار مواجهه با تهدیدات پیاده‌سازی شود. برای شناورهای نظامی هم روش پیشنهادی می‌تواند به عنوان اولین اقدام برای مقابله با تهدیدات استفاده شود. در این صورت گزینه تخصیص سلاح تنها در صورت ضرورت و برای مقابله با تهدیداتی استفاده می‌شود که زمان کافی برای گریز از آنها با روش پیشنهادی وجود ندارد.

(۳) آثار سوء مالی، جانی و محیط زیستی ناشی از استفاده از روش پیشنهادی بسیار کمتر از روش استفاده از تسلیحات است.

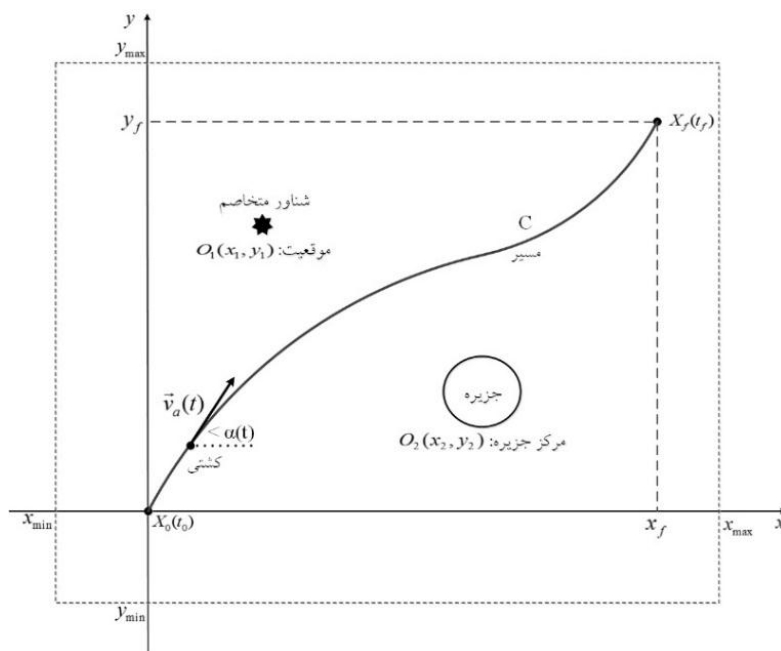
(۴) تعاریف و معیارهای جدید معرفی شده در این مقاله براساس شاخص ریسک هستند، و چون شاخص ریسک علاوه بر احتمال وقوع تهدید دربرگیرنده شدت اثر تهدید نیز می‌باشد شاخصی جامع‌تر و کامل‌تر نسبت به احتمال وقوع تهدید است. بنابراین استفاده از روش و معیارهای جدید بر همه روش‌هایی که تنها از شاخص ارزش یا احتمال وقوع تهدید استفاده می‌کنند مزیت و ارجحیت دارد.

تمامی ایده‌های مطرح شده در این مقاله به عنوان مورد مطالعاتی درمورد کشتی که در صحنه عملیات دریایی در معرض ریسک تهدیدات ایجاد شده توسط یک شیء تهدیدکننده غیرنظامی (جزیره) و یک شیء تهدیدکننده نظامی (سایت نظامی با قابلیت پرتاب پرتابه به سمت کشتی) قرار دارد پیاده‌سازی شده است. در این مطالعه موردی ابتدا ریسک هر یک از تهدیدات موجود در صحنه مدل‌سازی و ارزیابی شده و سپس برآیند ریسک همزمان همه تهدیدات کشتی به کمک روش آنالیز درخت محاسبه شده است. در نهایت نیز ایمن‌ترین کوتاه‌ترین و مطلوب‌ترین مسیرهای ایمن با استفاده از معیارها و روش پیشنهادی برای شناور موردنظر تعیین شده‌اند.

۲. طرح مسئله

¹⁶ Asset

¹⁷ Curvature



شکل ۲: سناریوی تعیین مسیر ایمن بهینه شناور (شامل دو شیء تهدیدکننده شامل یک جزیره و یک سایت نظامی با قابلیت پرتاب پرتابه به سمت شناور)

منجر به مرگ، صدمه شغلی و صدمه یا از بین رفتن تجهیزات یا ویژگی‌ها، یا صدمه به محیط زیست شود." و ایمنی سیستم به صورت "استفاده از اصول، معیارها و تکنیک‌های مهندسی و مدیریتی برای دستیابی به سطح قابل قبولی از ریسک برای تهدید/خطر، با رعایت کلیه قیود مربوط به اثربخشی عملکردی، هزینه و زمان در طول همه فازهای چرخه عمر سیستم" تعریف شده‌اند.

بنابراین اگر میدان عملیات قابل قبول برای فعالیت سیستمی با نماد D ، و مجموعه مسیرهای قابل قبول برای آن با نماد C نشان داده شوند، بر مبنای تعاریف ارائه شده در مراجع مذکور می‌توان نقطه، ناحیه و مسیر ایمن عملکرد آن سیستم را به صورت‌های جدید زیر تعریف کرد.

تعریف (نقطه ایمن): به هر نقطه از میدان عملیات، مانند $x_a = [x, y]^T$ ، برای حضور سیستمی خاص در لحظه مشخص t ایمن گفته می‌شود اگر و فقط اگر اولاً ریسک هر یک از تهدیدات، $r_k(x_a, t)$ ، و دوماً برآیند ریسک همه تهدیدات، $r_t(x_a, t)$ سیستم مورد نظر در آن نقطه در لحظه t از یک سطح قابل پذیرش ریسک، r_m ، کمتر باشد. بنابراین اگر تعداد تهدیدات یک سیستم برابر m بوده و T_{x_a} مجموعه همه

در صحنه عملیات اشیاء تهدیدکننده ثابت مانند سایت یا شناور نظامی متخاصم با یک نقطه، و عوارض جغرافیایی مانند یک جزیره با سطح دایره شکلی از نقاط به مرکز (x_i, y_i) و با معادله زیر در صفحه مدل‌سازی می‌شوند.

$$\begin{aligned} 0 \leq |r_i| \leq R_i \\ |r_i| = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \leq R_i \end{aligned} \quad (6)$$

در بخش‌های بعد برای حل مسئله مذکور ابتدا تعاریف، معیارها و راهکار جدید معرفی شده و سپس در طول مقاله شاخص‌ها و روش معرفی شده در سناریوی نشان داده شده در شکل (۲) پیاده‌سازی می‌شوند.

۳. تعاریف استاندارد نقطه ایمن، ناحیه ایمن و مسیر ایمن

در این بخش تعاریفی جدید برای نقطه ایمن، ناحیه ایمن و مسیر ایمن بر اساس مفهوم ریسک ارائه شده‌اند که با تعاریف ارائه شده در استانداردها برای ایمنی انطباق کامل دارد. ارائه این تعاریف برای حل مسئله طرح شده در بخش قبل لازم است. اساس تعاریف ارائه شده در این بخش، تعاریف ایمنی و ایمنی سیستم در استانداردها و مراجع مهم بین المللی است [۳۸-۴۱]. در معروف‌ترین استاندارد بین المللی مرتبط با ایمنی سیستم [۳۸] ایمنی به صورت "رهایی از شرایطی که می‌تواند

$$(0 \leq \bar{r}_l(C_s) \leq 1)$$

که در این رابطه:

$l(t)$: طول مسیر طی شده توسط سیستم تا لحظه t است.

منظور از میانگین وزنی طولی نیز این است که در رابطه فوق تابع $dl(t)/l(t_f) -$ با نسبت وزنی $r_t(x(t), y(t), t)$ ($l(t_0)$ انتگرال گیری شده، و بنابراین معیار فوق عددی نرمالیزه است.

معیار پیشنهادی ارزیابی ایمنی مسیر $[\bar{S}_l(C_s)]$: این معیار مطابق رابطه زیر برابر مقدار مکمل معیار ارزیابی ریسک مسیر، $\bar{r}_l(C_s)$ است.

$$\bar{S}_l(C_s) = 1 - \bar{r}_l(C_s), (0 \leq \bar{S}_l(C_s) \leq 1) \quad (12)$$

تابع معیار پیشنهادی برای انتخاب مسیر با حداکثر ایمنی $[J_S(C_s)]$: این تابع معیار با رابطه زیر تعریف می شود.

$$J_S(C_s) = \int_{l(t_0)}^{l(t_f)} r_t(x(t), y(t), t) dl(t) \quad (13)$$

قضیه (۱): اگر مسیر ایمن C_s تابع معیار $J_S(C_s)$ را کمینه کند، C_s ایمن ترین مسیر مطابق معیار $\bar{S}_l(C_s)$ خواهد بود.

اثبات: اگر مسیر ایمن C_s تابع معیار $J_S(C_s)$ را کمینه کند، آنگاه مطابق رابطه (۱۱) معیار $\bar{r}_l(C_s)$ کمینه شده و در نتیجه مطابق رابطه (۱۲) معیار $\bar{S}_l(C_s)$ بیشینه خواهد شد. بنابراین C_s ایمن ترین مسیر مطابق معیار $\bar{S}_l(C_s)$ خواهد بود.

اما باید توجه کرد که همیشه ایمن ترین مسیر بهترین مسیر نیست، زیرا ممکن است مسیری دورتر و در نتیجه پرهزینه تر و زمان برتر باشد. در مراجع کنترل بهینه تابع معیار زیر برای انتخاب مسیر با حداقل طول معرفی شده، اما تابع معیاری برای ایجاد توازن بین مسئله ایمنی مسیر و سایر مسایل معمول در انتخاب بهینه یک مسیر مانند زمان، طول، هزینه و انرژی لازم برای طی یک مسیر ارائه نشده است.

$$J_L(C_s) = \int_{t_0}^{t_f} dl(t) \quad (14)$$

لحظاتی باشد که سیستم در موقعیت x_a قرار می گیرد، شرایط لازم و کافی برای تضمین ایمن بودن نقطه x_a برای حضور یک سیستم در هر لحظه از زمان $t \in T_{x_a}$ را می توان با قیود زیر بیان کرد.

$$r_k(x_a, t) \leq r_m \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, m\} \quad (7)$$

$$r_t(x_a, t) \leq r_m \quad (8)$$

تعریف (ناحیه ایمن): هر زیرمجموعه ای از میدان عملیات سیستم مانند $D_s \in D$ که تمامی نقاط آن در لحظه t برای حضور سیستم ایمن هستند. بنابراین ناحیه ایمن با رابطه زیر توصیف شده و در لحظه t در هر نقطه از آن ریسک ناشی از تهدیدات حاضر در میدان عملیات در قیود ایمنی که با معادلات (۷) و (۸) بیان شده اند، صدق می کنند.

$$D_s(t) = \{x_a \in D | (r_t(x_a, t) \leq r_m) \text{ and } (r_k(x_a, t) \leq r_m) \forall k\} \quad (9)$$

تعریف (مسیر ایمن): مسیر قابل قبولی مانند $C_s \in C$ که در هر نقطه از آن ریسک ناشی از تهدیدات حاضر در میدان عملیات در قیود ایمنی که با معادلات (۷) و (۸) بیان شده اند، صدق کند.

$$C_s(t) = \{x_a \in D | y = f(x) \text{ and } (r_t(x, y, t) \leq r_m) \text{ and } (r_k(x, y, t) \leq r_m) \forall k, t \in T_{x_a}\} \quad (10)$$

۴. پیشنهاد معیارهایی جدید برای ارزیابی ایمنی و ریسک هر مسیر

با توجه به اینکه معمولا تعداد مسیرهای ایمن منحصربه فرد نبوده و حتی گاهی بی شمار است، در این بخش ابتدا دو معیار جدید برای ارزیابی مقدار ریسک و ایمنی مسیر، و یک تابع معیار جدید جهت انتخاب ایمن ترین مسیر ممکن از بین مسیرهای ایمن موجود معرفی می شوند.

معیار پیشنهادی ارزیابی ریسک مسیر $[\bar{r}_l(C_s)]$: این معیار مطابق رابطه زیر برابر میانگین وزنی طولی تابع برآیند ریسک تهدیدات، $r_t(x(t), y(t), t)$ در هر نقطه از مسیر C_s است.

$$\bar{r}_l(C_s) = \frac{1}{(l(t_f) - l(t_0))} \int_{l(t_0)}^{l(t_f)} r_t(x(t), y(t), t) dl(t) \quad (11)$$

اما چون مطابق فرض اول تابع برآیند ریسک تهدیدات فقط به صورت ضمنی تابع زمان است نه به صورت مستقیم، می توان با حذف زمان و انتخاب x به عنوان متغیر مستقل انتگرال، به راحتی به رابطه (۱۵) رسید. استفاده از فرم (۱۵) تابع معیار پیشنهادی ترکیبی، تاثیر زیادی در ساده سازی محاسبات مربوط به پیدا کردن مسیر ایمن بهینه خواهد داشت. بنابراین در این مقاله از این معیار جدید برای انجام فرآیند بهینه سازی استفاده می شود.

۵. روش پیشنهادی گام به گام جهت هدایت ایمن شناور

با توجه به تعاریف، معیارها و شاخص های عملکردی ارائه شده در بخش های قبل، روش گام به گام هدایت ایمن شناور در هر لحظه از زمان به شرح زیر است.

- ۱- قیود مربوط به میدان عملیات را تعیین کنید.
- ۲- معادلات حرکت و قیود عملکردی شناور را تعیین کنید.
- ۳- تهدیدات شناور را شناسایی کرده و ریسک آنها را در هر نقطه از میدان عملیات شناور ارزیابی کنید.
- ۴- برآیند ریسک تهدیدات را در هر نقطه از میدان عملیات شناور ارزیابی کنید.

۵- با کمک تعاریف (۱) و (۲) و با در نظر گرفتن یک سطح قابل پذیرش ریسک، r_m ، نواحی ناایمن و ایمن را مشخص و از یکدیگر جدا کنید. توجه کنید که در مسئله تعیین مسیر ایمن، ناحیه نا ایمن خود به صورت یک قید که سیستم نمی تواند در آن وارد شود اعمال می شود.

۶- یکی از شاخص عملکردی (۱۲) یا (۱۴) را برای انتخاب مسیر ایمن بهینه انتخاب کرده و با انتخاب وزن مناسب بین مسئله ایمنی و طول مسیر توازن ایجاد کنید.

۷- مسیر ایمن بهینه را به کمک یکی از روش های تحلیلی یا شبیه سازی به نحوی تعیین کنید که اولاً شاخص عملکردی انتخابی کمینه سازی شده و ثانیاً تمامی قیود مربوط به میدان عملیات، قیود عملکردی سیستم، قیود مربوط به نواحی ناایمن و سایر قیود برآورده شوند.

۸- برای تعیین مسیر در لحظات بعد مراحل (۲) تا (۸) را تکرار کنید.

به همین دلیل در ادامه شاخص ترکیبی جدید دیگری نیز معرفی می شود که به کمک آن می توان مسیر ایمنی مطلوبی را با ایجاد توازن بین مسئله مهم ایمنی و سایر مسائل معمول در علم بهینه سازی انتخاب کرد.

تابع معیار پیشنهادی ترکیبی متوازن کننده ایمنی و طول مسیر $[J_{SL}(C_s)]$: این تابع معیار پیشنهادی در واقع ترکیب وزنی دو تابع معیار $J_S(C_s)$ و $J_L(C_s)$ است که می تواند بایکی از دو فرم زیر تعریف شود. این دو فرم تابع معیار با هم برابر بوده و فقط در فرم اول زمان و در فرم دوم طول مسیر به عنوان متغیر مستقل انتگرال هستند.

$$J_{SL}(C_s) = \int_{l(t_0)}^{l(t_f)} [w_s \cdot r_t(x(t), y(t), t) + w_l] dl(t) \quad (15)$$

$$(w_s + w_l = 1), (0 \leq w_s, w_l \leq 1)$$

قضیه (۲): در فضای دوبعدی R^2 اگر (۱) تابع برآیند ریسک تهدیدات به فرم $r_t(x(t), y(t))$ بوده و در هر نقطه از میدان عملیات فقط تابع موقعیت آن نقطه بوده، و (۲) مسیر ایمن C_s با تابعی از متغیر مستقل x به فرم $y = y(x)$ توصیف شود، آنگاه تابع معیار ترکیبی فوق را می توان به صورت زیر نوشت.

$$J_{SL}(C_s) = \int_{x(t_0)}^{x(t_f)} [w_s \cdot r_t(x, y(x)) + w_l] \cdot \sqrt{1 + \dot{y}(x)^2} dx \quad (16)$$

$$\dot{y}(x) = \frac{d}{dx}[y(x)]$$

اثبات: در فضای دوبعدی R^2 می توان $dl(t)$ را به یکی از فرم های زیر نوشت.

$$dl(t) = \sqrt{dx(t)^2 + dy(t)^2} = \sqrt{\dot{x}(t)^2 + \dot{y}(t)^2} \cdot dt = \sqrt{1 + \dot{y}(x(t))^2} \cdot dx(t) \quad (17)$$

با جایگذاری $dl(t)$ از رابطه بالا و فرم $r_t(x(t), y(t))$ و تابع $y = y(x)$ در رابطه (۱۴)، به رابطه زیر می رسیم که به صورت ضمنی تابعی از زمان است.

$$J_{SL}(C_s) = \int_{t_0}^{t_f} [w_s \cdot r_t(x(t), y(t)) + w_l] \cdot \sqrt{1 + \dot{y}(x(t))^2} \cdot dx(t) \quad (18)$$

۶. پیاده‌سازی روش پیشنهادی

در این مقاله نیز فرض می‌شود که احتمال رخداد تهدید k تابعی از فاصله دارایی با تهدید بوده و با معادله جدید زیر مدل‌سازی می‌شود، و پارامترهای این مدل شامل R_k ، α_k ، r_{0k} قبلاً در فرآیند ارزیابی تهدید محاسبه شده، و به‌عنوان ورودی به فرآیند تعیین مسیر ایمن بهینه وارد می‌شوند. در جدول (۱) مقادیر این پارامترها برای تهدیدات مختلف ارائه شده‌اند.

$P_k(d_k(x(t), y(t))) = \begin{cases} 1 & d_k(x(t), y(t)) \leq R_k \\ \alpha_k \cdot e^{-\frac{(d_k(x(t), y(t)) - R_k)^2}{r_{0k}}} & R_k < d_k(x(t), y(t)) \\ 0 & 0 \leq \alpha_k \leq 1 \end{cases} \quad (20)$	(۲۰)
$d_k(x(t), y(t)) = \sqrt{(x(t) - x_k)^2 + (y(t) - y_k)^2} \quad (21)$	(۲۱)

اما برای تعیین مسیر ایمن بهینه باید مطابق رابطه (۸) برآیند ریسک تهدیدات برای شناور از سطح مجاز تعیین شده کمتر باشد. در این مقاله برای تعیین برآیند ریسک تهدیدات برای شناور از روش ترکیب رویدادها به کمک "آنالیز درخت خطا (FTA)"^{۱۸} استفاده شده است. به این ترتیب که ابتدا مطابق شکل (۳) نمودار FTA تهدیدات تشکیل و با ترکیب همه رویدادها با یکدیگر یک "تهدید معادل همه تهدیدات"، که در نمودار FTA با شناسه T_{00} مشخص شده، ایجاد شده است. در این صورت برآیند ریسک تهدیدات در هر لحظه از زمان و در هر نقطه با روابط غیرخطی زیر مدل‌سازی می‌شود.

$r_t(t) = S_t(t) \cdot P_t(t) \quad (0 \leq r_t(t) \leq 1) \quad (22)$	(۲۲)
$S_t(t) = S[T_{00}] \quad (0 \leq S_t(t) \leq 1) \quad (23)$	(۲۳)
$P_t(t) = O[T_{00}] = f(P_k(t), t) \quad (0 \leq P_t(t) \leq 1), k \in \{1, 2, \dots, m\} \quad (24)$	(۲۴)

در روابط بالا شدت، $S_t(t)$ ، و احتمال وقوع، $P_t(t)$ ، معادل همه تهدیدات برابر شدت و احتمال وقوع "تهدید معادل همه تهدیدات" در نظر گرفته شده است. فرض می‌شود مقدار شدت معادل همواره برابر مقدار بیشینه آن باشد ($S_t(t) = 1$).

اما تابع $f(P_k(t), t)$ تابعی غیرخطی از احتمال وقوع هر یک از تهدیدات است. برای محاسبه مقدار این تابع ابتدا در نمودار FTA احتمال وقوع رویدادهای میانی و در نهایت احتمال

در این بخش نحوه پیاده‌سازی روش پیشنهادی در بخش قبل برای حل مسئله مطرح شده در بند (۲) ارائه خواهد شد. در رابطه (۱) محدوده میدان عملیات و در روابط (۲) تا (۵) قیود عملکردی شناور شده‌اند. همچنین در جدول (۱) لیست تهدیدات استخراج شده متناظر با دوشیء تهدیدکننده شناور (جزیره و سایت نظامی) ارائه شده‌اند. پس از شناسایی تهدیدات لازم است ریسک هر کدام از آنها مدل‌سازی و ارزیابی شود.

در استاندارد بین المللی ایزو [۴۱] ریسک به عنوان "اثر عدم قطعیت بر اهداف" تعریف شده و تصریح شده است که ریسک معمولاً با ترم‌های منابع وقوع، رویدادهای بالقوه و اثرات و احتمال وقوع آنها ارزیابی می‌شود. در استاندارد مرجع [۵۰] ریسک تهدید به صورت "بیان اثر و احتمال وقوع یک تهدید بر حسب شدت و احتمال رخداد بالقوه آن" تعریف شده است.

با جمع‌بندی تعاریف ارائه شده در مراجع مختلف می‌توان نتیجه گرفت که ریسک معیاری برای ارزیابی میزان (سطح یا درصد) پذیرش هم‌زمان میزان اثرات و ارزش وقوع (مانند احتمال وقوع) یک رویداد غیرقطعی (مانند تهدید، خطر یا خرابی) است [۳۸-۴۱]. بنابراین در این مطالعه مقدار ریسکی که هر یک از تهدیدات به صورت بالقوه برای شناور ایجاد می‌کنند، مطابق رابطه زیر به صورت تابعی از دو عدد شدت تهدید k ، $S_k(t)$ ، و احتمال وقوع تهدید k ، $P_k(t)$ ، است.

$$r_k(t) = S_k(t) \cdot P_k(t) \quad (0 \leq S_k(t) \leq 1) \&\& (0 \leq P_k(t) \leq 1) \quad (19) \\ \forall k \in \{1, 2, \dots, m\}$$

احتمال وقوع تهدید خود تابعی از بردار حالت تهدیدشونده و اشیاء تهدیدکننده و برخی از مشخصات آنها و عوامل و پارامترهای متعدد دیگری است که بعضی از آنها در مورد یک تهدید در جدول (۱) ارائه شده‌اند. در مرجع [۳۴] بلدرهیج نشان داده است که چگونه می‌توان با بعضی از پیش‌فرض‌ها تابع احتمال رخداد را بر حسب فاصله کشتی تا تهدید مدل‌سازی کرد.

¹⁸ Fault Tree Analysis (FTA)

$$E_k = k^{th} \text{ threat (or event);}$$

$$P_k = P(E_k) = \text{probability of the } k^{th} \text{ threat;}$$

۷. ارائه نتایج



در این بخش نتایج تعیین مسیر ایمن بهینه برای شناور تشریح شده در بخش (۲)، به کمک توابع معیار پیشنهادی در بخش (۴)، همراه با مقادیر شاخص‌های ایمنی، ریسک، طول و زمان مسیر ارائه می‌شوند. برای دستیابی به این نتایج یک برنامه بهینه‌سازی مقید به زبان **Matlab** نوشته شده است. در جدول (۳) مقادیر پارامترهای ورودی α_k ، R_k و r_{ok} مربوط به احتمال وقوع تهدیدات پایه و در جدول (۴) مقادیر سایر پارامترهای ورودی به برنامه شبیه‌سازی ارائه شده‌اند.

سناریوهای شبیه‌سازی: در جدول (۵) سه سناریوی شبیه‌سازی برای تعیین مسیر ایمن بهینه به کمک معیار ترکیبی متوازن‌کننده ایمنی و طول مسیر، $J_{SL}(C_s)$ (رابطه (۲۴))، و مقادیر وزن‌های w_s و w_l در هر سناریو ارائه شده‌اند.

خروجی‌های شبیه‌سازی: خروجی‌های برنامه شبیه‌سازی عبارتند از: (۱) نمودار سه بعدی برآیند ریسک تهدیدات در صحنه عملیات برای کشتی که در شکل (۴) ارائه شده است. (۲) نمودار مسیر ایمن بهینه (مسیرهای به هم پیوسته) و مسیر اولیه ورودی به برنامه شبیه‌سازی (مسیرهای خط‌چین) که روی نقشه ریسک-پایه صحنه عملیات در سه سناریوی مختلف

وقوع "تهدید معادل همه تهدیدات"، به کمک روابط استاندارد موجود بین احتمالات وقوع رویدادهای ورودی و خروجی هر یک از گیت‌ها در نمودار **FTA**، که خلاصه آنها در جدول (۳) ارائه شده است، محاسبه می‌شوند. برای آشنایی کامل با آنالیز **FTA** و مثال‌های عملی در مورد روش‌های کیفی و کمی تحلیل آن به مراجع [۳۸-۴۴] مراجعه کنید.

جدول ۳: روابط استاندارد موجود بین احتمالات وقوع رویدادهای خروجی و ورودی گیت‌های **AND** و **OR** در مدل **FTA** در دو حالت

نوع گیت	ورودی‌ها		احتمال وقوع رویداد خروجی برحسب احتمالات ورودی‌ها
	ارتباط	تعداد	
 OR	دو به دو	n	$P_T = \sum_{k=1}^n P_k$
	ناسازگار	2	$P_T = P_1 + P_2$
	مستقل	n	$P_T = 1 - \prod_{k=1}^n (1 - P_k)$
		2	$P_T = P_1 + P_2 - P_1 \cdot P_2$
	وابسته	n	$P_T = P(\bigcup_{k=1}^n E_i)$
		2	$P_T = P_1 + P_2 - P(E_1 \cap E_2)$
 AND	دو به دو	n	$P_T = 0$
	ناسازگار	2	$P_T = 0$
	مستقل	n	$P_T = \prod_{k=1}^n P_i$
		2	$P_T = P_A \cdot P_B$
	وابسته	n	$P_T = P(\bigcap_{k=1}^n E_k)$
		2	$P_T = P(E_1)P(E_2 E_1) = P(E_2)P(E_1 E_2)$

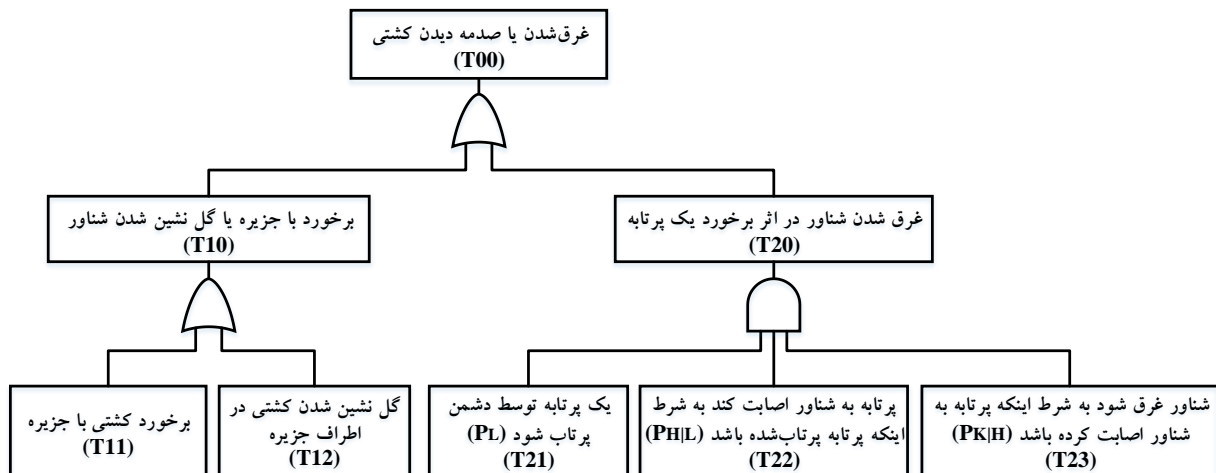
جدول ۱: لیست تهدیدات مرتبط دو تهدیدکننده شناور شامل یک جزیره و یک سایت نظامی

تهدید معادل	تهدیدات میانی	تهدیدات مستقل یا پایه	شناسه	α_k	$R_k (m)$	$r_{ok} (m)$
غرق شدن یا صدمه دیدن کشتی (T00)	برخورد یا گل نشین شدن کشتی (T10)	برخورد کشتی با جزیره	T11	1	8000	0
		گل نشین شدن کشتی در اطراف جزیره	T12	1	8000	2000
	غرق شدن کشتی در اثر برخورد یک پرتابه (T20)	یک پرتابه توسط دشمن پرتاب شود (P_L)	T21	1	1000	15000
		پرتابه به شناور اصابت کند به شرط اینکه پرتابه پرتاب شده باشد (P_{HL})	T22	1	0	∞
		شناور غرق شود به شرط اینکه پرتابه به شناور اصابت کرده باشد (P_{KH})	T23	1	0	∞

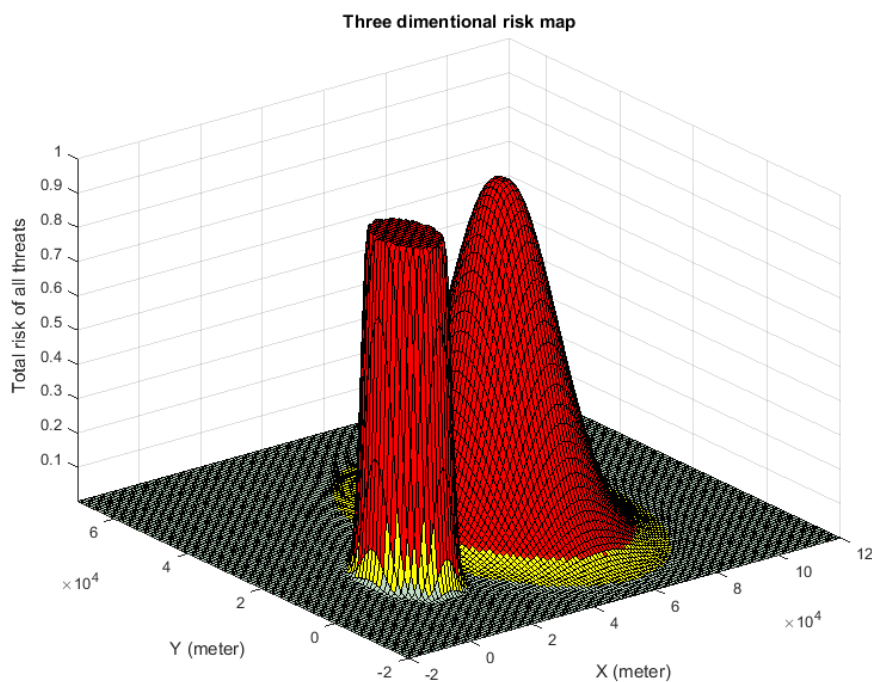
جدول ۲: تعدادی از پارامترهای موثر در ارزیابی تهدید

ردیف	نام پارامتر	نماد	توضیحات	ردیف	نام پارامتر	نماد	توضیحات
۱	Number	N	تعداد اهداف	۱۱	Platform	PF	نوع و کلاس هدف
۲	Position	P	موقعیت شناور و تهدیدات	۱۲	Range	R	فاصله نسبی دارایی با تهدید
۳	Velocity	V	اندازه بردار سرعت تهدید	۱۳	Course	C	زاویه بردار سرعت تهدید
۴	Bearing	B	زاویه نسبی تهدید با دارایی	۱۴	Height	H	ارتفاع هدف
۵	Closing Point Approach	CPA	تابع فاصله، سرعت و جهت تهدید	۱۵	Closing	CL	شاخص دور یا نزدیک شدن تهدید

IFB	نشان دهنده خروجی حسگر	۱۶	شاخص مانور هدف	MNV	Maneuver	۶
FM	Friendly Mode	۱۷	شرایط سیاسی صحنه نبرد	PC	Political Climate	۷
SC	Sea Condition	۱۸	روشن بودن رادار کنترل آتش تهدید	FCR	Fire Control Radar	۸
JM	Jamming	۱۹	انواع آلام ESM	EA	ESM Alarm	۹
VC	Voice Communication	۲۰	برد تخریب تسلیحات هدف	WR	Weapon Range	۱۰
WD	Weapon Destruction					



شکل ۳: مدل درخت خطا جهت ترکیب تهدیدات (شناور نظامی دیگر و جزیره) شناور



شکل ۴: نمودار سه بعدی برآیند ریسک تهدیدات در صحنه عملیات

r_m	0.1
(x_1, y_1)	(15000 m, 10000 m)
(x_2, y_2)	(58000 m, 20000 m)
(x_{min}, x_{max})	(00000 m, 100000 m)
(y_{min}, y_{max})	(-20000 m, 70000 m)

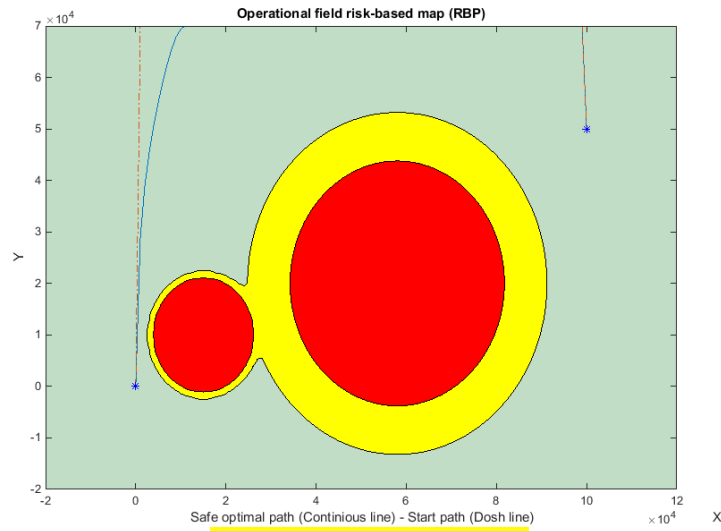
جدول ۴: پارامترهای ورودی برنامه شبیه سازی

پارامتر	مقدار
(x_0, y_0)	(0, 0)
(x_f, y_f)	(100000 m, 50000 m)
v_{max}	30 (m/s)
C_{max}	0.088 (Deg/m)

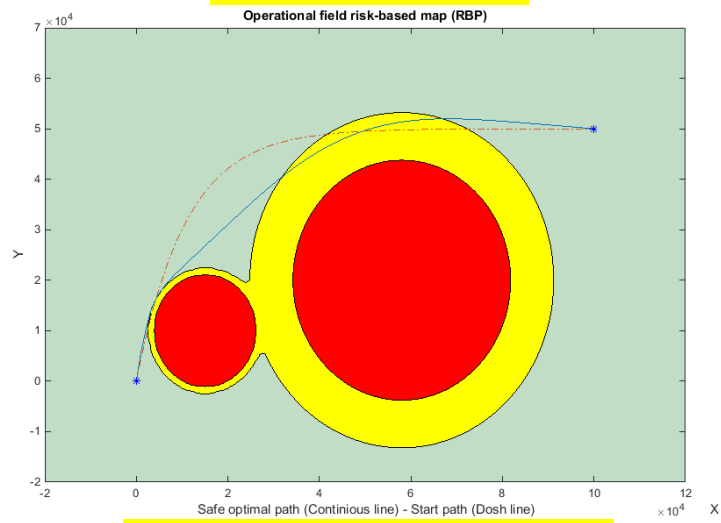
$w_s = 0.8,$ $w_l = 0.2$	تعیین مسیر ایمن با ایجاد توازن بین ایمنی و طول مسیر	دوم
$w_s = 0.0,$ $w_l = 1.0$	تعیین کوتاه‌ترین مسیر ایمن	سوم

جدول ۵: سناریوهای مختلف تعیین مسیر ایمن بهینه به کمک معیار $J_{SL}(C_s)$ (رابطه (۲۴))

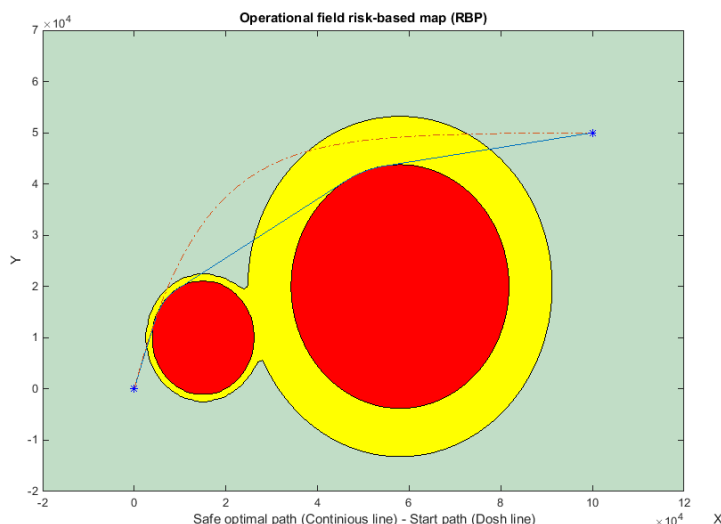
سناریو	مسئله	وزن‌ها
اول	تعیین ایمن‌ترین مسیر ایمن	$w_s = 1.0,$ $w_l = 0.0$



(الف) سناریوی اول (ایمن‌ترین مسیر)



(ب) سناریوی دوم (مسیر ایمن متوازن‌کننده ایمنی و طول)



(پ) سناریوی سوم (کوتاه‌ترین مسیر ایمن)

شکل ۵: نمودار مسیرهای ایمن بهینه (مسیرهای به هم پیوسته) و مسیر اولیه برنامه شبیه‌سازی (مسیرهای خط‌چین)

روی نقشه ریسک-پایه صحنه عملیات در سه سناریوی مختلف

جدول ۶: مقادیر معیارهای ریسک، ایمنی، طول، زمان و هزینه مسیر برای سه سناریوی شبیه‌سازی شده

معیار مسیر	نماد	واحد	سناریو		
			اول	دوم	سوم
			حداکثر ایمنی	سیاست میانه	حداقل طول
			$w_1 = 1, w_2 = 0$	$w_1 = 0.8, w_2 = 0.2$	$w_1 = 0, w_2 = 1$
ایمنی مسیر	$\bar{S}_l(C)$	Percent	99.9998	99.6629	97.9535
ریسک مسیر	$\bar{r}_l(C)$	Percent	0.0002	0.3371	2.0465
طول مسیر	L	Km	181.630	124.42	119.46
زمان مسیر	T	Sec.	10035.0	5626.7	5152.6
تابع معیار (هزینه)	J	-	6.3702e+21	2.5080e+26	1.1708e+27

تحلیل نتایج شبیه‌سازی: ایمن‌ترین مسیر ایمن و کوتاه

ترین مسیر ایمن به ترتیب در اولین و سومین سناریو تعیین شده‌اند. مشاهده می‌کنیم که براساس معیار $\bar{r}_l(C)$ میزان ریسک ایمن‌ترین مسیر تقریباً ۷۳۲۳ برابر کمتر از ریسک کوتاه‌ترین مسیر است. اما طول و زمان طی این مسیر نیز به ترتیب ۵۲٪ و ۹۴٫۶٪ بیشتر از کوتاه‌ترین مسیر ایمن است.

با مشاهده مسیرهای ارائه‌شده در شکل (۵) مشاهده می‌کنیم توابع معیار جدید پیشنهادی به‌خوبی توانسته‌اند در تعیین مسیرهای ایمن بهینه در سه سناریوی پیشنهادی نقش ایفا نمایند. چرا که در سناریوی اول مسیر ایمن از مرکز تهدیدات بسیار دور شده است، در سناریوی دوم مسیر با توازن بین دو مسئله ایمنی و طول مسیر تعیین‌شده و در سناریوی سوم مسیر

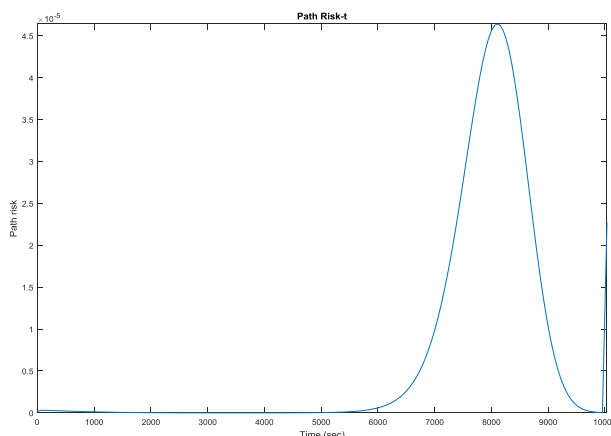
در شکل (۵) ارائه شده‌اند. در این شکل ناحیه قرمز رنگ ناحیه نایمن است که برآیند ریسک در همه نقاط آن بیشتر از حد مجاز است ($r_f > 0.1$)، ناحیه زرد رنگ ناحیه ایمن با ریسک متوسط است که ورود شناور به این ناحیه ممنوع نیست اما بهتر است شناور تا حد امکان از ورود به این ناحیه بپرهیزد، و ناحیه سبز رنگ ناحیه ایمن با ریسک پایین است. (۳) نمودار ریسک مسیر برحسب زمان در سه سناریوی مختلف که در شکل (۶) ارائه شده است. (۴) مقادیر معیارهای ایمنی، ریسک، طول، زمان $(T = t_f - t_0)$ و هزینه مسیرهای ایمن بهینه تعیین‌شده در سه سناریوی شبیه‌سازی که در جدول (۶) ارائه شده‌اند. زمان لازم برای طی مسیرها با این فرض محاسبه شده که شناور با سرعت ثابت حداکثر v_{max} طی مسیر کند.

ضمن اینکه وارد ناحیه نایمن نشده کمترین طول را دارد. نمودارهای ارائه شده برای تابع برآیند ریسک دارایی برحسب زمان در مسیرهای مختلف نیز در شکل (۶) همین نتایج را تایید می‌کنند.

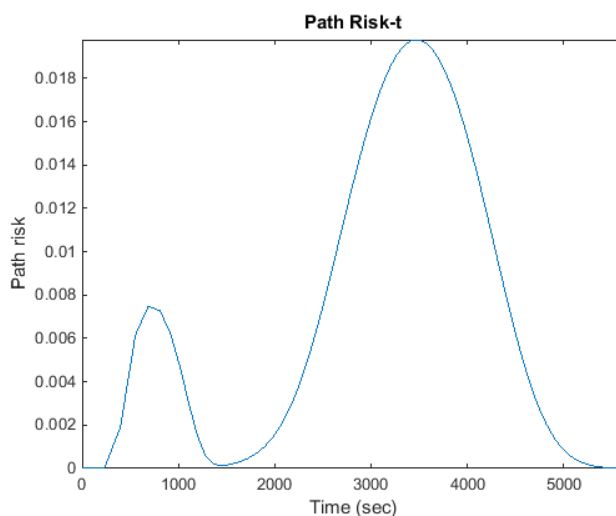
۸. نتیجه گیری

در این مقاله تعاریفی جدید، استاندارد و ریسک-پایه برای نقطه، مسیر و ناحیه ایمن ارائه گردید. همچنین دو شاخص جدید جهت ارزیابی ایمنی و ریسک هر مسیر پیشنهاد شدند. به کمک این معیارها و تعاریف می‌توان به خوبی اولای ایمن یا نایمن بودن یک مسیر را تعیین کرده و دوما درجه ایمنی یا ریسکی بودن یک مسیر را تعیین کنیم.

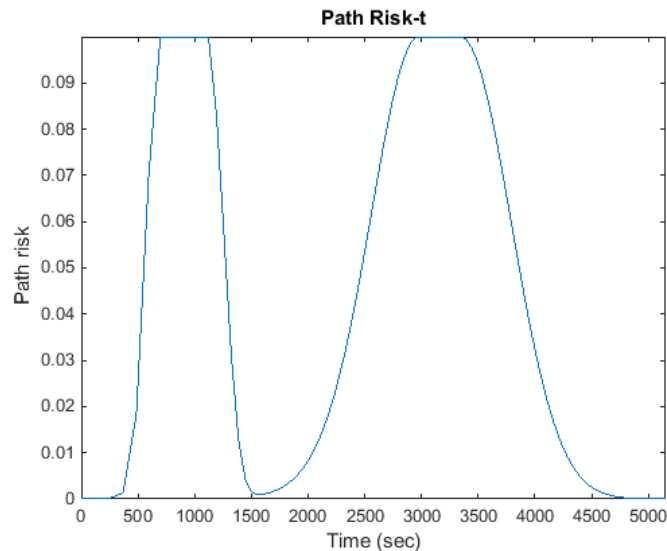
همچنین در این مقاله یک تابع معیار ریسک-پایه جهت انتخاب ایمن‌ترین مسیر و تابع معیار ترکیبی دیگری جهت



(الف) سناریوی اول (مربوط به ایمن‌ترین مسیر رسم شده در شکل ۵-الف)



(ب) سناریوی دوم (مربوط به مسیر ایمن متوازن‌کننده ایمنی و طول رسم شده در شکل ۵-ب)



شکل ۵: سناریوی سوم (مربوط به کوتاه‌ترین مسیر ایمن رسم شده در شکل ۵-پ)
شکل ۶: نمودار مسیر ریسک مسیر بر حسب زمان در سه سناریوی مختلف

۹. مراجع

- [10] N. Li, W. Huai, and S. Wang (2016), "The solution of target assignment problem in command and control decision-making behavior simulation", *Enterprise Information Systems*, doi: 10.1080/17517575.2016.1177207.
- [11] A. Naseem, S. A. Khan, and A. W. Malik (2017), "A real-time man-in-loop threat evaluation and resource assignment in defense", *Journal of the Operational Research Society*, vol. 68, no. 6, pp. 725-738.
- [12] B. Khaleghi, A. Khamis, F. O. Karray, and S. N. Razavi (2013), "Multisensor data fusion: A review of the state-of-the-art", *Information fusion*, vol. 14, pp. 28-44.
- [۱۳] فاضل، صادق (بهار ۱۳۹۳)، "مهندسی قابلیت اعتماد، روش‌های پیشگویی"، انتشارات دانش‌نگار با همکاری سازمان صنایع دریایی.
- [14] X. Ximeng, Y. Rennong, and F. Ying (2018), "Situation assessment for air combat based on novel semi-supervised naive Bayes", *Journal of Systems Engineering and Electronics*, vol. 29, no. 4, pp. 768-779.
- [15] W. Xing-zhu (2016), "Network information security situation assessment based on bayesian network", *International Journal of Security and its Applications*, vol. 10, no. 5, pp. 129-38.
- [16] L. Snidaro, I. Visentini, and K. Bryan (2015), "Fusing uncertain knowledge and evidence for maritime situational awareness via Markov Logic Networks", *Information Fusion*, vol. 21, pp. 159-172.
- [17] F. Liu, D. Deng, and P. Li (2017), "Dynamic context-aware event recognition based on Markov logic networks", *Sensors*, vol. 17, no. 3, p. 491.
- [18] Z. Kun, K. Weiren, L. Peipei, S. Jiao, L. Yu, and Z. Jie (2018), "Assessment and sequencing of air target threat based on intuitionistic fuzzy entropy and
- [1] M. Liggins II, D. Hall, and J. Llinas (2008), *Handbook of multisensor data fusion: theory and practice*, Second edition ed. CRC press.
- [2] S. K. Das (2008), *High-level data fusion*. Artech House.
- [3] A. Kline, D. Ahner, and R. Hill (2018), "The weapon-target assignment problem", *Computers and Operations Research*, doi:10.1016/j.cor.2018.10.015.
- [4] A. Naseem, S. T. H. Shah, S. A. Khan, and A. W. Malik (2017), "Decision support system for optimum decision making process in threat evaluation and weapon assignment", *Annual Reviews in Control*, pp. 1-10, doi: 10.1016/j.arcontrol.2017.03.003.
- [5] Y. Li, Y. Kou, Z. Li, A. Xu, and Y. Chang (2017), "A modified pareto ant colony optimization approach to solve biobjective weapon-target assignment problem", *International Journal of Aerospace Engineering*, vol. 2017.
- [6] D. Lotter and J. Van Vuuren (2016), "A tri-objective, dynamic weapon assignment model for surface-based air defence", *ORiON*, vol. 32, no. 1, pp. 1-22.
- [7] K. ZHANG, D. ZHOU, Z. YANG, Q. PAN, and W. KONG (2019), "Constrained multi-objective weapon target assignment for area targets by efficient evolutionary algorithm", *IEEE Access*, vol. 7, doi:10.1109/ACCESS.2019.2955482.
- [8] Y. Lu and D. Z. Chen (2019), "A new exact algorithm for the weapon-target assignment problem", *Omega*, doi: 10.1016/j.omega.2019.102138.
- [9] A. R. Kosari, N. Feghhi, and M. A. Atashgah (2019), "A real-time exhaustive search algorithm for the weapon-target assignment problem", *International journal of science and technology*, vol. 2019, doi: 10.24200/SCI.2019.52324.2662.

Engineering and Electronics, vol. 30, no. 2, pp. 297-307.

[33] S. Ma, H. Zhang, and G. Yang (2017), "Target threat level assessment based on cloud model under fuzzy and uncertain conditions in air combat simulation", Aerospace Science and Technology, vol. 67, pp. 49-53.

[34] F. Bolderheij, F. G. Absil, and P. van Genderen (2005), "A risk-based object-oriented approach to sensor management", In 7th International Conference on Information Fusion, 2005: IEEE.

[35] S. Kumar and B. K. Tripathi (2016), "Modelling of threat evaluation for dynamic targets using bayesian network approach", Procedia Technology, vol. 24, pp. 1268-1275.

[36] S. Kumar, A. M. Dixit (2012), "Threat evaluation modelling for dynamic targets using fuzzy logic approach", International conference on computer science and engineering.

[37] M. Stamatelatos, W. Vesely, J. Dugan, J. Fragola, J. Minarick, and J. Railsback (2002), "Fault tree handbook with aerospace applications", Nasa Office of safety and mission assurance.

[38] U. DoD (2012), "Mil-std-882e, department of defense standard practice for system safety", US Department of Defense.

[39] C. A. Ericson (2015), Hazard analysis techniques for system safety, Second edition ed. John Wiley & Sons.

[۴۰] [فاضل، صادق (پاییز ۱۳۸۸)، "آنالیز و کنترل خطا و

خطر از دیدگاه قابلیت اطمینان و ایمنی"، انتشارات سرونگار با همکاری پژوهشکده مصباح.

[41] B. ISO (2018), "31000, (2018) Risk management-Principles and guidelines", International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

[42] Z. Zhou and Q. Zhang (2017), "Model event/fault trees with dynamic uncertain causality graph for better probabilistic safety assessment", IEEE Transactions on Reliability, vol. 66, no. 1, pp. 178-188.

[43] S. Kabir (2017), "An overview of fault tree analysis and its application in model based dependability analysis", Expert Systems with Applications, vol. 77, pp. 114-135.

[۴۱] [فاضل، صادق و کمالی، علی (۱۳۸۷)، "ارزیابی و

بهبود ضریب ایمنی سیستم بالابر هیدرولیکی از سامانه FCS

یک نوع پرتابه کروز به روش FTA"، دومین همایش ملی سامانه‌های کروز، تهران.

[۴۲] [بهادری نوغانی، وحید و فاضل، صادق (۱۳۸۷)،

"مدل سازی و ارزیابی قابلیت اطمینان سامانه پیشرانس سوخت جامد به روش آنالیز درخت خطا"، هشتمین کنفرانس

بین المللی انجمن هوافضای ایران، IAS2009، اصفهان، شاهین‌شهر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر.

dynamic VIKOR", Journal of Systems Engineering and Electronics, vol. 29, no. 2, pp. 305-310.

[19] F. Jinfu, Z. Qiang, H. Junhua, and L. An (2019), "Dynamic assessment method of air target threat based on improved GIFSS", Journal of Systems Engineering and Electronics, vol. 30, no. 3, pp. 525-534.

[20] J. Chen, G.-h. Yu, and X.-g. Gao (2012), "Cooperative threat assessment of multi-aircrafts based on synthetic fuzzy cognitive map", Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), vol. 17, no. 2, pp. 228-232.

[21] E. Azimirad and J. Haddadnia (2015), "A new data fusion instrument for threat evaluation using of fuzzy sets theory", International Journal of Computer Science and Information Security, vol. 13, no. 4.

[22] L. Yue, R. Yang, J. Zuo, H. Luo, and Q. Li (2019), "Air target threat assessment based on improved moth flame optimization-gray neural network model", Mathematical Problems in Engineering, vol. 2019.

[23] G. Wang, L. Guo, and H. Duan (2013), "Wavelet neural network using multiple wavelet functions in target threat assessment", The Scientific World Journal, vol. 2013.

[24] M. K. Allouche (2005), "Real-time use of Kohonen's self-organizing maps for threat stabilization", Information Fusion, vol. 6, no. 2, pp. 153-163.

[25] Y. Zhou, Y. Tang, and X. Zhao (2019), "A novel uncertainty management approach for air combat situation assessment based on improved belief entropy", Entropy, vol. 21, no. 5, p. 495.

[26] A. Benavoli, B. Ristic, A. Farina, M. Oxenham, and L. Chisci (2009), "An application of evidential networks to threat assessment", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 45, no. 2, pp. 620-639.

[27] Y. Jinyong, L. Keke, and W. Wenjing (2017), "Ship-aircraft joint situation assessment by using fuzzy dynamic Bayesian network", In 2017 IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS), 2017: IEEE, pp. 220-224.

[28] M. Yazdi, F. Nikfar, and M. Nasrabadi (2017), "Failure probability analysis by employing fuzzy fault tree analysis", International Journal of System Assurance Engineering and Management, vol. 8, pp. 1177-1193.

[29] B. Li (2018), "Navigation risk assessment scheme based on fuzzy Dempster-Shafer evidence theory", International Journal of Advanced Robotic Systems, vol. 15, no. 5.

[30] E. Azimirad and J. Haddadnia (2016), "A new model for threat assessment in data fusion based on fuzzy evidence theory", International Journal of Advances in Intelligent Informatics, vol. 2, no. 2, pp. 54-64.

[31] H. Lee, B. J. Choi, C. O. Kim, J. S. Kim, and J. E. Kim (2017), "Threat evaluation of enemy air fighters via neural network-based Markov chain modeling", Knowledge-Based Systems, vol. 116, pp. 49-57.

[32] S. Haiwen and X. Xiaofang (2019), "Threat evaluation method of warships formation air defense based on AR (p)-DITOPSIS", Journal of Systems