Developing a Threat-Tolerability Bilateral Concept within a Differential Game for the Analysis of the Insider/Adversary Behavior in Operational environment

S. Kamelian , A. Karimpour, N. Pariz*

*Professor, Ferdowsi University, Mashhad, Iran

(Received: 07/12/2021, Accepted: 31/12/2022)

ABSTRACT

Threat-tolerability as an innovative bilateral concept that focuses on the analysis of insider/adversary behavior is proposed. A zero sum differential game is designed to model the interaction between the two introduced state variables, threat and tolerability. A Lanchester-type equations is used to present the dynamics of threat-tolerability due to contradictory behavior of insider and adversary. The main advantage of the proposed method is that it could help to optimize the two side player's strategies and actions during the game period based on threat-tolerability dynamic. As the game progresses each player observes game position, i.e., the threat level for targets and tolerability level for insider and tries to schedule its resources to influence final game' profits. Player could resolve offensive, defensive and maneuvering share on total available resources. Deciding on extent resources used for each strategy can be considered as control input for each player to change game's profits. A simple tracking scenario is used to demonstrate how threat and tolerability dynamics could be used as a tool for optimal resource assignment.

Keywords: Differential game, Lanchester equation, Resource assignment, Threat evaluation, , Tolerability.

*Corresponding Author Email: N-pariz@um.ac.ir

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University © Authors

نشریه علمی "پدافند الکترونیکی و سایبری"
سال یازدهم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۲، ص ۱۵-۲۹

علمی – پژوهشی

تحلیل رفتار دشمن – خودی در صحنه نبرد با استفاده از مفهوم دوگانه تهدید - تحمل‌پذیری در قالب بازی دیفرانسیلی

سعید کاملیان[1]، علی کریم‌پور[2]، ناصر پریز[3]*

۱- دانشجوی دکترا، ۲- دانشیار، ۳- استاد، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۱۶، پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۰)

چکیده

دوگانه تهدید - تحمل‌پذیری به‌عنوان یک مفهوم دووجهی نوآورانه که بر تحلیل رفتار دشمن - خودی در صحنه نبرد تمرکز دارد، در این پژوهش معرفی شده است. قرارگرفتن مفهوم بدیع تحمل‌پذیری در کنار مفهوم تهدید، رویکرد ارزیابی تهدید را که پیش‌تر تنها متمرکز بر اهداف متخاصم و ویژگی‌های آن‌ها بود، به سمت خودی متمایل می‌کند. ویژگی‌های اهداف متخاصم که برخاسته از ماهیت و اقدامات آن‌هاست، در اختیار ما نیستند و لذا در بسیاری از موارد نمی‌توان با تغییر در استراتژی‌های مورد استفاده در اختصاص منابع اندازه‌گیری خودی، تهدید را مدیریت کرد. علاوه بر این بسیاری از استراتژی‌هایی که بازیگران خودی برای مدیریت منابع سنسوری خود بکار می‌گیرند را نمی‌توان با متغیر تهدید توجیه کرد. با شکل‌گیری مفهوم دوسویه تهدید - تحمل‌پذیری امکان تحلیل رفتار خودی - دشمن در صحنه نبرد به شکل پویا فراهم می‌آید که امکان مدیریت منابع سنسوری را بر پایه رفتارهای تهدیدی اهداف متخاصم و مطلوبیت تحمل‌پذیری برای خودی فراهم می‌آورد. یک بازی دیفرانسیلی با مجموع صفر برای مدل‌سازی برهم‌کنش‌های دو متغیر حالت که تهدید و تحمل‌پذیری هستند طراحی شده است. معادلات دینامیکی به دلیل سایشی بودن رفتارهای متقابل خودی و دشمن با استفاده از روابط لانچستر، پیاده‌سازی شده‌اند. مزیت اصلی روش پیشنهادی این است که می‌تواند به بهینه‌سازی استراتژی‌ها و اقدامات بازیگران صحنه نبرد در طول دوره بازی بر اساس معادلات دینامیکی تهدید - تحمل‌پذیری کمک کند. همان‌طور که بازی پیشرفت می‌کند، هر بازیگر با ارزیابی وضعیت بازی، سعی می‌کند منابع خود را برای تأثیرگذاری بر نتیجه نهایی بازی، برنامه‌ریزی کند. این برنامه‌ریزی با اختصاص میزان منابع در دسترس به هریک از استراتژی‌های تهاجمی، دفاعی و یا مانوری انجام می‌شود. بازآرایی معادلات لانچستر به گونه‌ای انجام شده است که سازگاری مناسبی با تاکتیک‌های سه‌گانه قابل انتخاب توسط بازیگران دارد. در انتها از یک سناریوی ردیابی ساده استفاده شده است تا نشان داده شود چگونه دینامیک تهدید و تحمل‌پذیری می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای تخصیص بهینه منابع اندازه‌گیری مورد استفاده قرار گیرد. نتایج شبیه‌سازی در این سناریو نشان می‌دهد که افزودن مفهوم تحمل‌پذیری چگونه می‌تواند شاخص‌های رهگیری را ارتقا بخشد. شاخص‌های استانداردی نظیر خطای سرعت و خطای موقعیت به طرز قابل توجهی بهبود یافته‌اند.

کلید واژه‌ها: ارزیابی تهدید، بازی دیفرانسیلی، تحمل‌پذیری، تخصیص منابع، معادلات لانچستر

۱- مقدمه

تخصیص منابع یکی از کلیدی‌ترین فرایندهایی است که در سامانه‌های فرماندهی و کنترل به شکل پیوسته اجرا می‌شود [۱-۴]. پیچیدگی روزافزون محیط‌های عملیاتی نظیر تعدد اهداف و تنوع مأموریت‌ها موجب می‌شود که بار ادراکی و محاسباتی زیادی برای اجرای بهینه و کارآمد مدیریت منابع[1] صرف شود. ازاین‌رو تلاش برای خودکارسازی تمام و یا بخش‌هایی از این فرایند بسیار مطلوب خواهد بود. منابع سنسوری یکی از اصلی‌ترین مواردی هستند که در فرایند تخصیص باید موردتوجه قرار گیرند. اینکه توان و ظرفیت سنسورها به چه ترتیبی و با چه کیفیتی و به کدام وظایف اختصاص یابد چالشی است که پژوهش‌های گسترده‌ای پیرامون آن انجام شده است [۱]. این موضوع که منابع سنسوری بر پایه چه مفاهیمی تخصیص داده شوند موجب شکل‌گیری رویکردهای مختلف در زمینه مدیریت سنسورها شده است. رویکرد مبتنی بر تهدید یکی از شاخص‌ترین رویکردهای مدیریت سنسور است و سازگاری بیشتری با حوزه‌های نظامی و دفاعی دارد [۵-۸]. مدیریت سنسور مبتنی بر تهدید به این معناست که منابع سنسوری باید به گونه تنظیم و سازماندهی شود تا مقادیر عدم قطعیت تهدید ارزیابی شده برای موجودیت[2]های حاضر در محیط عملیات[3] کاهش یابند [۹]. در نظر گرفتن عدم قطعیت برای تهدید را می‌توان در عوامل زیر جستجو نمود:

۱- بسیاری از اهداف در محیط عملیات به دلیل کمبود و یا ناکارآمدی منابع اندازه‌گیری قابل آشکارسازی نیستند.

* رایانامه نویسنده مسئول: N-pariz@um.ac.ir

[1] Resource management

[2] Entities

[3] Operation environment

* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY) توزیع شده است.

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

© نویسندگان

۲- بسیاری از اهداف آشکار شده قابل شناسایی نیستند تا بتوان در مورد قصد، توانمندی و فرصت آن‌ها اظهار نظر کرد.
۳- ویژگی‌های اهداف که برخاسته از ماهیت و اقدامات آن‌هاست (منجر به ارزیابی تهدید می‌شوند) در اختیار ما نیستند و لذا در بسیاری از موارد نمی‌توان با تغییر استراتژی‌های اندازه‌گیری، تهدید را مدیریت کرد.
۴- بسیاری از استراتژی‌هایی که بازیگران خودی برای مدیریت منابع خود بکار می‌گیرند را نمی‌توان با متغیر تهدید توجیه کرد.
۵- در بسیاری از موارد تغییر استراتژی‌های به‌کارگیری منابع اندازه‌گیری و اقدامات سنسوری منجر به کاهش تهدید نخواهد شد.

تهدید به‌عنوان یک مفهوم شناخته شده در پژوهش‌های بسیاری مورد توجه قرار گرفته و تکنیک‌های متنوعی برای ارزیابی و تحلیل آن توسعه‌یافته است. اما نقطه مشترک تمامی این رویکردها تمرکز بر اهداف است. رویکردهایی نظیر شبکه بیزی و مدل JDL در ارزیابی تهدید در مورد نقش خودی و دارایی‌های خودی در تعیین تاکتیک‌های نبرد و تولید و تنظیم برنامه عملیاتی سکوت کرده‌اند. این در حالی است که تحمل‌پذیری به‌عنوان مفهومی که می‌تواند با افزوده‌شدن به مفهوم تهدید مدل کامل‌تری برای تحلیل و ارزیابی صحنه نبرد فراهم آورد، چندان مورد توجه قرار نگرفته است [۸]. همچنین رویکرد مدیریت سنسور صرفاً بر اساس تهدید نیز خلأهایی در حوزه رهگیری داشته و تضعیف شاخص‌های آن در پی دارد [۹, ۱۰].

مفهوم تحمل‌پذیری که این پژوهش توسعه یافته است طرح کامل‌تری از ایده مطرح شده در پژوهش [۸] است. تحمل‌پذیری میزان آسیب‌پذیری خودی در برابر اقدامات تهدیدی اهداف متخاصم است. در حقیقت تحمل‌پذیری میزان تاب‌آوری خودی در برابر میزان تهدیدهای موجود در محیط عملیاتی است. ممکن است تهدیدهایی در صحنه عملیات وجود داشته باشند اما قابل شناسایی و تشخیص نباشند اما دارایی‌های خودی که در صحنه نبرد حضور دارند کاملاً مشخص هستند و میزان آسیب‌پذیری این دارایی‌ها در برابر رفتارهای موجودیت‌های متخاصم حاضر در صحنه نبرد می‌تواند متفاوت باشد. ویژگی تاب‌آوری در برابر تهدید یا تحمل‌پذیری به صورت اختصاصی برای هر دارایی و با ماهیتی سایشی و متضاد با تهدید تعریف می‌شود و حاکی از این است که هر دارایی در صورت مواجه و رویارویی با یک موجودیت تهدیدی چه میزان از آسیب را متوجه خود خواهد دید.

تلاش‌های بسیار ارزشمندی برای کمی‌سازی تهدید و ارزیابی آن درگذشته صورت پذیرفته است. از آن جمله می‌توان به استفاده از شبکه‌های بیزی برای ارزیابی تهدید در منابع [۵, ۱۱-۱۶] اشاره کرد. همچنین ارزیابی تهدید بر اساس قواعد از پیش تعیین شده، یکی دیگر از رویکردهای کلاسیک در موضوع تهدید است که در مراجع [۱۶-۱۸] به طور کامل مورد بررسی قرار گرفته است. محاسبه مقدار تهدید از طریق کمی‌سازی عناصر کلیدی آن یعنی: انگیزه یا قصد، توانمندی و فرصت در مراجع [۱۹-۲۱] انجام شده است. برای یک موجودیت تهدیدی، قصد به معنای وجود انگیزه و جدیت در واردآوردن صدمه و آسیب به دارایی‌های رقیب است. توانمندی به معنای این است که آیا موجودیت متخاصم توانایی و امکانات لازم برای عملی‌کردن قصد خود را دارد یا خیر. فرصت به این معناست که آیا پیوستگی و تجمیع موقعیت‌ها و شرایط صحنه عملیات به‌گونه‌ای هست که آن موجودیت تهدیدی بتواند قصد خود را عملی کند یا خیر. استفاده از اطلاعات و نتایج رهگیری رویکردی است که در پژوهش [۲۲] برای ارزیابی تهدید مورداستفاده قرار گرفته است. در این رویکرد با استفاده از تکنیکی موسوم به استخراج رفتار هدف[1] از روی داده‌های سنسوری که در پژوهش اکسنهام و همکاران به تفضیل شرح داده شده ، روشی برای محاسبه تهدید اهداف هوایی ارائه شده است [۲۳]. ارزیابی تهدید برای شناورهای دریایی در رویارویی با تهدیدات هوایی در پژوهش‌های [۲۴, ۲۵] مورد توجه قرار گرفته است. همچنین ارزیابی تهدید هوایی از دید مشاهده‌گر زمینی در پژوهش [۲۶] بررسی شده است. ارزیابی تهدید برای ایجاد و کنترل برنامه آتش[2] در پژوهش [۲۷] طرح شده است. ارزیابی تهدید با رویکرد مدیریت استراتژیک برای تحلیل تهدیدات نامتقارن با استفاده از مدل‌های هوشمند و بر اساس تئوری تداخل[3] در منبع [۲۸] دنبال شده است.

مفهوم تهدید همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد به اهداف و ویژگی‌های آنها اشاره دارد و بر اساس ماهیت و رفتار اهداف متخاصم ارزیابی می‌شود [۱۵, ۲۰]، اما در بسیار از موارد نگاه انحصاری به اهداف و ویژگی‌های آنها بینش صحیح و عمیقی برای اقدام و تعیین رفتارهای خودی ایجاد نمی‌کند. اهداف با تهدید یکسان از دید شاخص‌های توانمندی، قصد و فرصت موجب سردرگمی فرماندهان خودی در تصمیم‌گیری و اتخاذ استراتژی‌های نامناسب و خطا در انتخاب رفتار مطلوب خواهد شد. از این جهت با توجه به نقایصی که در تعاریف و مدل‌های تهدید وجود داشت، مفهوم توسعه‌یافته تحمل‌پذیری در این پژوهش تعریف و ارائه شده است. مفهوم تحمل‌پذیری بر ویژگی-های خودی و ماهیت دارایی‌های آن استوار است. دارایی‌هایی که تحت مراقبت و صیانت خودی هستند ممکن است ارزش و اولویت متفاوتی داشته باشند درحالی‌که با تنها با درنظرگرفتن اهداف این اولویت‌بندی در تعیین برنامه عملیاتی و تاکتیک‌های نبرد نادیده گرفته می‌شود. ازاین‌رو با تعریف مفهوم دوگانه تهدید

[1] extracting target behaviors
[2] Fire plan
[3] Interference theory

- تحمل‌پذیری مدل جامع‌تری برای تحلیل و مدیریت نبرد ایجاد می‌شود.

مفهوم تحمل‌پذیری پیش‌تر در پژوهش [۸] به‌عنوان بخشی از فرایند ارزیابی تهدید معرفی شده است اما در این پژوهش تحمل‌پذیری به‌عنوان عاملی مستقل با ماهیتی که در تقابل و سایش با تهدید موجودیت‌های متخاصم حاضر در صحنه عملیات، معرفی و مدل‌سازی شده است. در مدل پیشنهادی این پژوهش تحمل‌پذیری با قرارگرفتن در کنار تهدید، دوگانه تهدید - تحمل-پذیری را ایجاد می‌کند و سپس از ساختار بازی دیفرانسیلی که به‌خوبی با ماهیت یک تقابل و برخورد نظامی سازگار است برای نمایش آن استفاده می‌شود. تحمل‌پذیری می‌تواند به‌عنوان یک شاخص مؤثر رابطه میان حوزه سنجش و ارزیابی تهدید را با حوزه نظریه بازی‌ها برقرار کند. در این صورت می‌توان از تکنیک‌های این حوزه برای تحلیل و آنالیز تهدید استفاده کرد. ازآنجایی‌که ماهیت تقابل‌های نظامی از نوع موقعیت‌های رقابتی است، سازگاری بسیار مناسبی میان این دو حوزه با تعریف تحمل‌پذیری ایجاد خواهد شد.

این پژوهش به‌صورت زیر تنظیم شده است. در بخش دوم به بیان و تشریح کامل مسئله پرداخته شده است و جوانب مختلف آن مورد اشاره قرار گرفته است. بخش سه به تشریح رویکرد این پژوهش در شکل‌دهی به مفهوم دوگانه تهدید - تحمل‌پذیری می‌پردازد. در بخش چهار، مدل پیشنهادی در قالب یک بازی دیفرانسیلی برای تحلیل رفتار خودی و دشمن در صحنه نبرد در یک سناریو رهگیری چندهدفه مورداستفاده قرار گرفته است. در نهایت در بخش پنج به جمع‌بندی نکات پرداخته شده و مسیرهایی برای پژوهش‌های آتی ترسیم شده است.

۲- بیان مسئله

در یک موقعیت تهدیدی دو طرف وجود دارد. بازیگر خودی که در پی حفاظت و صیانت از دارایی‌های خودی و کاهش آسیب-هایی است که متوجه تمامی مایملک خودی می‌شود و بازیگر دشمن یا متخاصم که اقدامات و رفتارهای او در صحنه عملیات دارایی‌های خودی را تهدید می‌کند [۳۰]. بازیگرانی که در صحنه رویارویی نظامی حضور دارند مجموعه‌ای از اهداف و برنامه‌های عملیاتی را دنبال می‌کنند. برنامه عملیاتی در حقیقت همان تاکتیک نبرد و زنجیره‌ای از اقدامات مرتبط است که توسط یک بازیگر صحنه نبرد اجرا می‌شود. تخصیص منابع تاکتیکی یکی از بارزترین مصداق‌های برنامه‌ریزی عملیاتی است [۳۲، ۳۱]. هر رفتار یا اقدامی که یک بازیگر در صحنه نبرد از خود نشان می‌دهد به طور ذاتی اثرات و تبعاتی را ایجاد می‌کند که محیط عملیات را تحت تأثیر قرار داده و موقعیت‌های آن را دچار تغییر می‌نماید. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد یک موجودیت با قرارگرفتن در یک موقعیت تاکتیکی برنامه عملیاتی خاص خود را به اجرا خواهد گذاشت. اما وقوع رخدادهای تهدیدی و یا پیش-بینی آن‌ها توسط هر موجودیت می‌تواند این برنامه عملیاتی را دستخوش تغییر کند. بنابراین برای داشتن یک برنامه عملیاتی و تاکتیکی مؤثر لازم است که هر موجودیتی به طور مداوم تهدیدات ناشی از اهداف متخاصم و تحمل‌پذیری مایملک خودی را ارزیابی و تحلیل کرده تا زنجیره اقداماتش را در راستای کاهش تهدید و یا به‌حداقل‌رساندن آسیب‌های ناشی از رخدادهای تهدیدآمیز طرح‌ریزی کند [۳۳, ۳۴]. این نگرش موجب شکل-گیری مفهوم دوگانه تهدید - تحمل‌پذیری می‌شود. خودی در صحنه نبرد لازم است تا به ارزیابی و محاسبه مقدار تهدید متناظر با هر بازیگر متخاصم حاضردرصحنه عملیات مبادرت نماید، اما همان‌طور که اشاره شد درنظرنگرفتن ویژگی‌های اختصاصی و تاکتیکی دارایی‌ها در معادلات ارزیابی تهدید ممکن است به تعیین برنامه عملیاتی نامطلوبی منجر شود.

ارزیابی اثر[1] عنوان کل‌تری است که در مدل تلفیق داده برای آنالیز برهم‌کنش‌های بازیگران حاضر در محیط عملیات مورداستفاده قرار گرفته است. بر اساس مدل JDL برای تلفیق داده، ارزیابی اثر شامل تحلیل معادلات و برهم‌کنش‌های میان‌برنامه‌ها، تاکتیک‌ها و اهداف عملیاتی موجودیت‌های مختلفی خواهد بود که در صحنه عملیات حضور دارند [۳۵]. ازاین‌رو خودی و دارایی‌های مرتبط با آن نیز که یکی از موجودیت‌های اصلی حاضردرصحنه عملیات هستند می‌بایست نقش خود را در این برهم‌کنش‌ها داشته باشند. ارزیابی تحمل‌پذیری دارایی‌ها نسبت به اهداف تهدیدی که در این پژوهش ارائه شده است هنگامی که در کنار ارزیابی تهدید متناظر با اهداف متخاصم قرار می‌گیرد، می‌تواند به مدل کامل‌تری منجر شود و با ورود دارایی‌ها به معادلات، عینیت بیشتری به تعریف ارزیابی اثر بخشیده شود.

موقعیت یک شناور خودی[2] را در پهنه دریا تصور کنید. فرض می‌شود خودی مسئولیت صیانت از دارایی‌های مشخصی را برعهده دارد. موقعیت خودی در هر لحظه و موقعیت دارایی‌های مرتبط با او نیز در هر لحظه به شکل قطعی[3] مشخص است. خودی و دارایی‌های خودی می‌توانند متحرک باشند یا نباشند. همچنین موجودیت‌های دیگری که در دسته‌بندی عملیاتی دوست تلقی نمی‌شوند نیز وجود دارند. این موجودیت‌ها اهداف[4] نامیده می‌شوند. موقعیت اهداف و مشخصات سینماتیکی آن‌ها نیز به‌صورت غیرقطعی[5] از طریق سیستم رهگیری در دسترس

[1] Impact assessment
[2] Ownship
[3] Deterministic
[4] Targets
[5] Nondeterministic or Probabilistic

است. حضور بازیگر خودی به‌عنوان یکی از بازیگران اصلی حاضردرصحنه به همراه موجودیت‌های دیگری که در ارتباط با او قرار می‌گیرند منجر به شکل‌گیری یک موقعیت تاکتیکی[1] خواهد شد [۳۶]. چنانچه احتمال متخاصم بودن موجودیت‌های حاضردرصحنه قابل‌توجه باشد یک موقعیت تهدیدی[2] شکل خواهد گرفت.

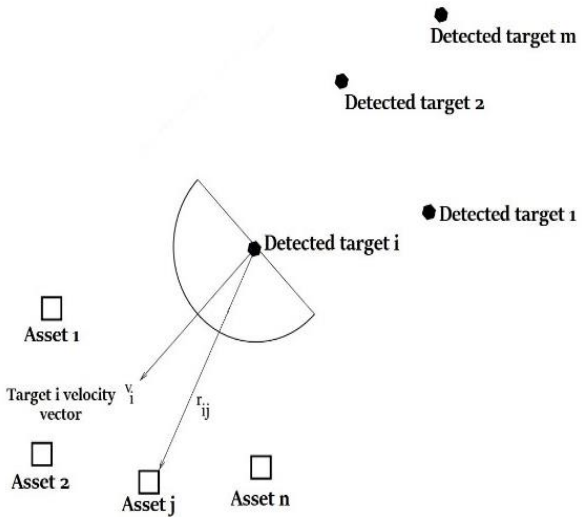
همان‌طور که اشاره شد این پژوهش در پی ایجاد ساختاری برای برنامه‌ریزی و مدیریت منابع اندازه‌گیری در دسترس به شکل پویاست بطوریکه هر بازیگر بتواند با توجه به میزان مطلوبیت خود در صحنه عملیات بهینه‌ترین استراتژی‌ها را برای تقابل با بازیگر رقیب اتخاذ کند. در یک محیط عملیاتی بازیگران متعدد نظیر خودی، بی‌طرف و دشمن (رقیب) وجود دارد و هرکدام از بازیگران سعی دارند از دارایی‌های خود محافظت نمایند. در چنین محیطی مسئله ارزیابی تهدید - تحمل‌پذیری عبارت از اختصاص یافتن یک مقدار برداری $\theta_{ij} \in$ ، [2] به هر زوج مرتب (T_i, A_j) که بیانگر میزان تهدید برای هر عامل تهدیدکننده T_i و میزان تحمل‌پذیری برای هر دارایی خودی A_j است.

یک صحنه عملیات تاکتیکی را مطابق شکل (۱) در نظر بگیرید. موجودیت‌هایی که در صحنه عملیات حاضر هستند شامل مجموعه دارایی‌هایی است که باید از آنها محافظت شود. این مجموعه شامل تمامی مایملکی هستند که خودی در پی مراقبت و صیانت از آنها است. این مجموعه به‌صورت $A = \{A_1, ..., A_n\}$ نشان داده می‌شود. اهداف دیگر موجودیت‌هایی هستند که در صحنه عملیات حضور دارند. منظور از اهداف در اینجا تمامی موجودیت‌هایی هستند که در محیط عملیاتی مطلوب کشف و آشکار شده‌اند. مجموعه اهداف نیز به‌صورت $T = \{T_1, ..., T_m\}$ نشان داده میشوند. مسأله‌ای که لازم است بدان پرداخته شود این است که برای هر زوج مرتب (T_i, A_j) که در آن $A_j \in A$ و $T_i \in T$ است کمیتی دو مقداره اختصاص داده شود که درایه اول آن نشان دهنده میزان تهدیدی است که از سوی بازیگر متخاصم T_i متوجه دارایی A_j میشود. و درایه دوم آن نشان‌دهنده تحمل‌پذیری دارایی A_j نسبت به تهدید بازیگر متخاصم T_i است. مطابق رابطه (۱) فرایند اختصاص دادن یک مقدار برداری به هر زوج مرتب (T_i, A_j) نیازمند تعریف یک تابع با عنوان تابع تهدید و یک تابع با عنوان تابع تحمل‌پذیری است. تابع تهدید $\theta_{ij}^{threat}(T_i, A_j): T \times A$ a [0,1] تابعی است که به هر زوج مرتب اشاره شده مقداری مابین صفر (فاقد تهدید) تا یک (حداکثر تهدید) نسبت می‌دهد [۳۷]. تابع تحمل‌پذیری $\theta_{ij}^{tolerability}(T_i, A_j): T \times A$ a [0,1] تابعی است که به هر زوج مرتب هدف-دارایی مقداری مابین صفر (فاقد تحمل‌پذیری) تا یک (حداکثر تحمل‌پذیری) نسبت می‌دهد.

$$\begin{cases} \theta_{ij}^{threat}(T_i, A_j): T \times A \text{ a } [0,1] \\ \theta_{ij}^{tolerability}(T_i, A_j): T \times A \text{ a } [0,1] \end{cases} \Rightarrow \theta_{ij}(t): T \times A \text{ a } ، ^{[0,1]} \times ، ^{[0,1]} \quad (۱)$$

مقادیر دوگانه تهدید - تحمل‌پذیری باتوجه‌به هر دارایی و هر دشمن تعیین می‌شود. به این معنا که یک بازیگر متخاصمِ مشخص در صحنه عملیات، ممکن است برای دو دارایی متفاوت دارای مقادیر متفاوتی از تهدید باشد و به شکل متناظر یک دارایی مشخص نیز نسبت به اهداف مختلف دارای تحمل-پذیری‌های متفاوت است.

باید توجه داشت که در یک مسئله مدیریت سنسور چندهدفه که مجموعه‌ای از دارایی‌ها در صحنه عملیات حضور دارند[3]، تنها دانستن میزان تهدید اهداف برای اقدام و اتخاذ استراتژی مناسب کفایت نمی‌کند و باید هرکدام از دارایی‌هایی خودی نیز از حیث تحمل‌پذیری مورد آنالیز قرار بگیرد. در این صورت با داشتن دوگانه تهدید - تحمل‌پذیری به‌ازای هر زوج دشمن - دارایی می‌توان چهارچوب دقیق‌تری برای مدیریت سنسور تعریف کرد.



شکل (۱). هندسه مسئله و موقعیت اهداف و دارایی‌ها [۱۱]

۳- مدل‌سازی دوگانه تهدید - تحمل‌پذیری

این بخش به بیان ریاضی مفهوم دوگانه تهدید - تحمل‌پذیری اختصاص دارد. ابتدا مفهوم تحمل‌پذیری معرفی خواهد شد و سپس ارتباط میان دو مفهوم تهدید و تحمل‌پذیری ارائه می‌شود. سپس مدلی برای دوگانه تهدید - تحمل‌پذیری ارائه می‌شود تا یک چهارچوب ریاضیاتی کامل برای نمایش و تحلیل این دو

[1] Tactical situation
[2] Threatening situation
[3] MultiTarget – MultiAsset Sensor management

مفهوم در صحنه نبرد شکل گیرد. در نهایت با استفاده از ساختار بازی دیفرانسیلی غالبی برای حل بهینه این مسئله با استفاده از تکنیک‌های نظریه بازی‌ها ارائه شده است.

۳-۱- تحمل‌پذیری و ارتباط آن با تهدید

تمام بازیگران حاضردرصحنه نبرد یک برنامه عملیاتی و تاکتیکی ویژه برای خود دارند که با به‌کاربستن آن در پی دستیابی به آگاهی وضعیتی بهتر و دقیق‌تر هستند. برای کسب آگاهی وضعیتی بالاتر هر بازیگر می‌بایست به رصد دقیق رخدادهای محیط عملیات بپردازد و چنانچه این رخدادها و مجموعه شرایطِ محیطی[1] که متأثر از اقدامات و رفتارهای سایر بازیگران حاضردرصحنه است تهدیدآمیز باشند، بازیگر موردنظر باید میزان تحمل‌پذیری خود را در برابر عوامل تهدیدآمیز برآورد کند. کاهش تحمل‌پذیری یک بازیگر نسبت به یک رخداد یا وضعیت خاص به معنای نزدیکی او به شکست یا آسیب جدی است.

ارزیابی تحمل‌پذیری به این معناست که هر بازیگر باتوجه‌به موقعیت تاکتیکی که در آن قرار گرفته شروع به مشاهده رخدادها و شرایط محیطی می‌کند. لازم است این بازیگر میزان تهدید موجودیت‌هایی که پیرامون او هستند و به شکل مداوم بر محیط عملیاتی اثر می‌گذارند را تحلیل کند. همچنین بازیگر خودی باید تمام دارایی‌های که در پی صیانت از آن‌هاست را به طور هم‌عرض در نظر بگیرد. به‌عنوان‌مثال در یک محیط عملیاتی قیود توپوگرافی که برای یک دارایی خودی وجود دارد باعث کاهش شدید تحمل‌پذیری این دارایی خودی می‌شود. شرایط توپوگرافی موجب می‌شود خودی در تعیین خط سیر مناسب و یا انتخاب تاکتیک و مانور دلخواه دچار محدودیت شود این محدودیت را می‌توان به‌سادگی با کاهش تحمل‌پذیری انطباق داد. از دیگر مواردی که در کاهش تحمل‌پذیری خودی مؤثر هستند می‌توان به گم‌کردن یک هدف در هنگام رهگیری یا رهگیری بادقت بسیار پایین اشاره کرد [۳۸]. همچنین توانایی یک بازیگر متخاصم در انجام مانور[2] موجب می‌شود که منابع سنسوری خودی بیش از حد صرف رهگیری این هدف شوند و یا میزان بار محاسباتی زیادی در نتیجه رهگیری این هدف بر بازیگر خودی تحمیل شود. ازاین‌رو می‌توان هزینه اندازه‌گیری و محاسباتی لازم برای یک هدف را از جمله مواردی دانست که تحمل‌پذیری خودی را دستخوش تغییر می‌کند. رهگیری اهداف با مانور بالا باعث کاهش تحمل‌پذیری خودی می‌شود چرا که منابع اندازه‌گیری و محاسباتی کمتری برای رصد، آشکارسازی، رهگیری و درگیری با سایر اهداف در اختیار خواهد داشت. همچنین بازیگر خودی تمایل دارد تا عدم قطعیت‌هایی را که با آن روبروست تاحدامکان کاهش دهد لذا عدم قطعیت بالا در تخمین‌هایی که برای تعداد، نوع و مشخصات سینماتیکی اهداف نظیر موقعیت و سرعت به دست می‌آید موجب کاهش تحمل‌پذیری خودی است.

بازیگر خودی برای تعیین رفتارهای خود که برنامه عملیاتی نامیده می‌شود، لازم است تا از دو منظر به موقعیت تاکتیکی که در آن قرار دارد نگاه کند:

- نگاه به بازیگران متخاصم برای ارزیابی میزان تهدید هر هدف برای هر دارایی باتوجه‌به سه عنصر قصد، توانمندی و فرصت.
- نگاه به دارایی‌ها برای ارزیابی میزان تحمل‌پذیری هر دارایی نسبت به هر هدف.

خودی برای ارزیابی تهدید هر هدف لازم است تا سه عنصر قصد، توانمندی و فرصت را برای آن هدف نسبت به دارایی موردنظر ارزیابی کند. همچنین خودی برای ارزیابی تحمل‌پذیری هر دارایی لازم است که فاکتورهای زیر را به‌دقت ارزیابی کند تا بتواند به درک درستی از میزان تحمل‌پذیری هر دارایی نسبت به هر بازیگر متخاصم برسد [۲۹]:

- میزان منابعی که آن هدف متخاصم برای اجرای حمله خود اختصاص داده است.
- میزان ارزش هدف متخاصمی که در پی برنامه‌ریزی و انجام برای یک حمله است.
- میزان هزینه‌ای که خودی می‌بایست برای رهگیری (هزینه اندازه‌گیری[3] و هزینه محاسباتی[4]) صرف کند.
- ارزش تسلیحات لازم برای نابودی آن هدف توسط خودی.
- ارزش دارایی که آن هدف در پی حمله و تخریب یا نابودی آن است.
- هزینه و ارزش گزینه‌های پیشروی خودی برای صیانت از دارایی اعم از فرار یا مانور

باید اشاره کرد که همان‌طور که شاخص‌های تهدید برای هر هدف وابسته به موقعیت تاکتیکی آن هدف و توانمندی آن است، تحمل‌پذیری هر دارایی نیز باتوجه‌به موقعیت تاکتیکی آن دارایی و گزینه‌های پیشروی خودی برای محافظت از آن دارایی سنجیده می‌شود. بدین جهت لازم است تا در کنار ارزیابی تهدید برای هر زوج هدف - دارایی، تحمل‌پذیری هر دارایی نیز باتوجه‌به هدف متناظر ارزیابی شود. این رویکرد که برای اولین‌بار در این پژوهش مطرح شده است منجر به شکل‌گیری چهارچوبی برای تحلیل مسئله مدیریت سنسور چند هدف - چند دارایی مبتنی بر دوگانه تهدید - تحمل‌پذیری خواهد شد.

[1] Environmental conditions
[2] Maneuverability
[3] Observation cost (load)
[4] Computation cost (load)

۳-۲- ارائه مدل ریاضی پویا برای مفهوم دوگانه تهدید - تحمل‌پذیری

برای مدل‌سازی ریاضی دوگانه تهدید-تحمل‌پذیری از ساختار فضای حالت کمک گرفته شده است. در این صورت به‌ازای هر زوج مرتب هدف - دارایی (T_i, A_j) یک زوج متغیر حالت تهدید-تحمل‌پذیری $(\theta_{ij}^{threat}, \theta_{ij}^{tolerability})$ وجود خواهد داشت. بنابراین می‌توان مدل فضای حالتی مطابق با رابطه (۲) برای مسئله مدیریت سنسور چند هدف- چند دارایی پیشنهاد داد که در آن θ_{ij}^{threat} متغیر حالتی است که میزان تهدید هدف i را برای دارایی متناظر j نشان می‌دهد و $\theta_{ij}^{tolerability}$ متغیر حالتی است که میزان تحمل‌پذیری دارایی j را در مقابل هدف i نشان می‌دهد. بنابراین چنانچه تعداد اهداف برابر n و تعداد دارایی‌ها برابر m باشد، تعداد متغیرهای حالت برابر $2\times m\times n$ خواهد بود. با در نظر گرفتن این نکات معادلات فضای حالت به فرم رابطه (۲) خواهد بود:

$$\theta(0)=\theta_0,\ \dot{\theta}(t)=f\left(t,\theta(t),u_i(t),u_{-i}^{*}(t)\right)\ \ t\in[0,T] \tag{۲}$$

در این مدل فضای حالت $\theta(t)\in \mathbb{R}^{d}$ بردارحالت است که در این مسئله ما دوگانه تهدید-تحمل‌پذیری را به‌عنوان دو متغیر حالت اصلی در نظر گرفته می‌شود. بردار $u_k(t),\ k=i\ or\ j$ بردار ورودی‌های کنترلی است که در اینجا کنترل‌ها اقداماتی هستند که بازیگر خودی و یا دشمن توسط موجودیت‌های مربوط به خود در صحنه نبرد انجام می‌دهند. در اینجا فرض می‌شود که $U\subseteq \mathbb{R}^{d}$ یک مجموعه فشرده است. فشردگی مجموعه اقدامات یا رفتارهای خودی و دشمن در صحنه نبرد موجب می‌شود تا وجود جواب بهینه تضمین شود. از آنجایی که قصد این پژوهش این است تا در نهایت از مدل توسعه‌یافته تهدید-تحمل‌پذیری برای تولید استراتژی بهینه جهت بکارگیری سنسورها یا همان مدیریت سنسور استفاده گردد، لازم است تا حتما این قید در تعریف ورودی‌های کنترلی لحاظ شود. حال با در نظر گرفتن موارد ذکر شده در بالا می‌توان یک مسئله کنترل بهینه به‌صورت زیر تعریف کرد که در آن هدف کاهش تهدید و یا افزایش تحمل‌پذیری باشد و این مهم از طریق اعمال ورودی‌های کنترلی که همان اقدامات خودی و دشمن در صحنه نبرد است تحقق می‌پذیرد.

نکته دیگری که قبل از اقدام به مدل‌سازی می‌بایست در نظر گرفت این است که باتوجه‌به رویکردی که برای مدیریت سنسور در نظر گرفته‌ایم که همان تهدید است و نیز باتوجه‌به زمینه مسئله که بیانگر یک تقابل نظامی است، می‌توان به این تقابل و این موقعیت شکل‌گرفته به شکل یک بازی استراتژیک نگاه کرد. مسئله دارای دو طرف درگیر با مطلوبیت‌های متعارض و متضاد است. بازیگر (خودی و دشمن) که هرکدام می‌توانند رفتار و اقداماتی از خود بروز دهند (مجموعه اقدامات خودی و دشمن[1]) که این اقدامات موجب تغییر در محیط عملیات و نیز موجب تغییر در متغیرهای حالت تعریف شده یعنی دوگانه تحمل‌پذیری - تهدید می‌شود. این خصوصیت‌ها این امکان را فراهم می‌آورد تا مسئله پیشروی را از یک فرم ساده معادلات حالت به شکل یک بازی استراتژیک دیفرانسیلی مدل‌سازی کنیم.

اگر $\theta\in \mathbb{R}^{d}$ بردار حالت باشد و $u_k\in U_k$ $\underset{k=i\ or\ j}{}$ کنترل بازیگر k ام که $k=i,j$ است، باشد و همچنین $U_k\subseteq \mathbb{R}^{d}$ یک مجموعه بسته باشد و طبق رابطه (۳) یک دینامیک کنترلی به فرم زیر در اختیار باشد:

$$\begin{cases}\dot{\theta}(t)=f\left(t,\theta(t),u_i(t),u_j(t)\right)\ ,\ u_i(t)\in U_i,\ U_i\subseteq \mathbb{R}^{d}\\ \dot{\theta}=\begin{bmatrix}\dot{\theta}_{ij}^{threat}\\ \dot{\theta}_{ij}^{tolerability}\end{bmatrix}=f\left(t,\theta_{ij}^{threat}(t),\theta_{ij}^{tolerability}(t),u_i(t),u_j(t)\right)\\ u_i\in U_i\ ,\ u_j\in U_j\ ,U_i,U_j\subseteq \mathbb{R}^{d}\ \text{and be compact set}\end{cases} \tag{۳}$$

مسئله بهینه‌سازی برای بازیگر i ام به‌صورت رابطه (۴) خواهد بود:

$$\max_{u_i} J_i(u_1,u_2)=\psi_i(\theta(T))-\int_{t_0}^{T}L_i(t,\theta(t),u_1(t),u_2(t))dt \tag{۴}$$

در این رابطه J_i تابع هزینه ای است که با توجه به دو ورودی کنترلی تعریف شده است و $\psi_i(.)$ هزینه نهایی و $L_i(.)$ هزینه به‌ازای هر مرحله از بازی است.

باتوجه‌به این نکته که آیا بازیگران پیش از اقدام تنها از مقدار اولیه حالت‌ها یعنی θ_0 اطلاع دارند و یا در هر لحظه از مقدار حالت فعلی مطلع هستند می‌توان دو استراتژی متفاوت چید:

- استراتژی حلقه باز: در استراتژی حلقه باز بازی‌گران تنها از حالت اولیه $\theta_0=\theta(t_0)$ باخبرند.
- استراتژی حلقه بسته: در استراتژی حلقه بسته بازی‌گران علاوه بر حالت اولیه اطلاعات متغیرهای حالت را در هر لحظه از زمان یعنی $\theta(t)$ را در اختیار دارند.

برای ساده‌تر شدن بحث فرض می‌شود تنها اطلاعات حالت اولیه در اختیار بازیگران قرار دارد در این صورت یک بازی دیفرانسیلی حلقه باز وجود خواهد داشت برای حل بهینه این بازی و یافتن واکنش‌های بهینه برای هر بازیگر باید نقطه نش بهینه را بیابیم.

نقطه نش بهینه: زوج $(u_1^{*}(t),u_2^{*}(t))$ یک نقطه تعادل نش است اگر $u_i^{*}(.)$ برای $i=1,2$ مطابق رابطه (۵) یک بیشینه

[1] Ownship/Hostile Action profile

کننده برای مسئله تابع هزینه زیر باشد [۳۹]:

$$\begin{cases} J_i(u_i, u_{-i}^*) = \psi_i(\theta(T)) - \int_{t_0}^{T} L_i(t, \theta(t), u_i(t), u_{-i}^*(t))dt \\ \theta(0) = \theta_0,\ \dot{\theta}(t) = f(t, \theta(t), u_i(t), u_{-i}^*(t)) \quad t \in [0,T] \end{cases} \quad (۵)$$

که به معنای این است که $u_2^*(t)$ بهترین پاسخ برای $u_1^*(t)$ است و بالعکس.

حال که ساختاری برای نمایش دوگانه تهدید - تحمل‌پذیری برای زوج هدف - دارایی پدید آمده است، باید به سراغ یافتن دینامیکی رفت که بتواند میزان دوگانه تهدید - تحمل‌پذیری را به‌خوبی مدل کند. برای این منظور باید چند نکته را در نظر بگیریم. مفهوم تهدید از خصوصیات اهداف متخاصم نشئت می‌گیرد و مقداری میان صفر و یک دارد به این ترتیب که عدد یک بیشترین میزان تهدید برای اهداف را از دید بازیگر خودی نشان می‌دهد. تهدید کمیتی پیوسته است. بازیگر متخاصم تمایل دارد که حداکثر تهدید را ایجاد کند چرا که میزان تهدید بیشتر برای بازیگر خودی به معنای مخاطره و ریسک بیشتر است. بازیگر خودی تمایل دارد رفتار و اقداماتش در راستای کاهش تهدید ارزیابی شده باشد و برنامه عملیاتی خود را بر این اساس طراحی می‌کند. در مقابل تحمل‌پذیری از خصوصیات بازیگر خودی و دارایی‌های او نشئت می‌گیرد. تحمل‌پذیری هم مقداری میان صفر و یک دارد و کمیتی پیوسته در نظر گرفته می‌شود. عدد یک حاکی از بیشترین میزان تحمل‌پذیری است و بازیگر خودی تمایل دارد رفتار و اقداماتش در راستای افزایش تحمل‌پذیری باشد و برنامه عملیاتی خود را بر این اساس تنظیم می‌کند. پیداست که تهدید و تحمل‌پذیری علی‌رغم انتساب به دو مبدأ متفاوت، از یکدیگر تأثیر می‌پذیرند. یک هدف با توانمندی زیاد نظیر مانورپذیری بالا سیستم رهگیری خودی را به‌شدت به چالش می‌کشد و با مصرف بیش از حد منابع اندازه‌گیری و محاسباتی تحمل‌پذیری خودی را کاهش می‌دهد. درحالی‌که مانورپذیری خودی تا حدی به شرایط توپوگرافی و جغرافیایی وابسته است و اهداف نقش زیادی در آن ندارند. نسبت پوش تسلیحاتی[1] خودی به دشمن از دیگر گزینه‌هایی است که تحمل‌پذیری خودی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. اگر پوش تسلیحاتی خودی نسبت به دشمن کم‌تر باشد تحمل‌پذیری به شدت کاهش می‌یابد. از طرفی این ویژگی میزان تهدیدی بودن هدف را نیز متأثر می‌کند [۸]. با توجه به تعریفی که از تحمل‌پذیری و تهدید ارائه شده است می‌توان دریافت که این دو مفهوم در جهت تقابل یا به عبارت دیگر سایش[2] یکدیگر عمل می‌کنند. این ویژگی‌ها در جدول (۱) جمع بندی شده است.

جدول (۱): مشخصات دو مفهوم تهدید و تحمل‌پذیری

تحمل‌پذیری	تهدید
تحمل‌پذیری از خصوصیات خودی نشئت می‌گیرد.	تهدید از خصوصیات اهداف نشئت می‌گیرد.
تحمل‌پذیری برای خودی مقداری بین صفر و یک دارد. $\theta^{Tolerability} \in [0,1]$	تهدید برای اهداف مقداری بین صفر و یک دارد. $\theta^{Threat} \in [0,1]$
تحمل‌پذیری ۱ به معنای بیشینه تحمل‌پذیری برای خودی است.	تهدید یک به معنای بیشینه تهدید برای هدف است.
برای خودی مطلوب است که تحمل‌پذیری‌اش در هر لحظه از عملیات بیشترین میزان ممکن باشد	برای دشمن مطلوب است که تحمل‌پذیری خودی در هر لحظه از عملیات کمترین میزان ممکن باشد.
برای خودی مطلوب است که میزان تهدید اهداف در هر لحظه کمترین میزان ممکن باشد.	برای دشمن مطلوب است که میزان تهدید اهداف در هر لحظه بیشترین میزان ممکن باشد.
بازیگر خودی سعی می‌کند با اقدامات خویش از میزان تهدید اهداف بکاهد.	دشمن تلاش می‌کند با اقدامات خود از میزان تحمل‌پذیری خودی بکاهد.
تحمل‌پذیری در جهت کاهش تهدید عمل می‌کند.	تهدید در جهت کاهش تحمل‌پذیری عمل می‌کند.

از دید بازیگر خودی شرایطی بهتر است که میزان تهدید اهداف در کمترین حالت و میزان تحمل‌پذیری خودی در بیشترین میزان خود باشد در حالیکه بازیگر متخاصم درست عکس این وضعیت را شرایط مطلوب تلقی کرده و به دنبال تحقق آن است.با توجه به ماهیت سایشی[3] دو متغیر تهدید و تحمل‌پذیری در قبال هم، می‌توان از معادلات لانچستر[4] برای مدل‌سازی تغییرات دوگانه تهدید-تحمل‌پذیری استفاده کرد [۳۹, ۴۰]. برای داشتن یک مدل عملی و معتبر لازم است نکات زیر را در نظر بگیریم:

- بازی دیفرانسیلی در صحنه نبرد به صورت تقابلی است. به این معنا که پیروزی برای یک بازیگر به معنای شکست برای بازیگر دیگر است.
- مجموع مطلوبیت[5] (منفعت) در کل بازی ثابت است.
- دو متغیر حالت تهدید و تحمل‌پذیری اثر سایشی متقابل بر هم دارند و در جهت کاهش یکدیگر عمل می‌کند.
- مطلوبیت برای بازیگر خودی در قالب تحمل‌پذیری بیشتر و برای بازیگر متخاصم در قالب تهدید بیشتر تعریف می‌شود.
- محدود بودن میزان کلی مطلوبیت و تقابلی بودن ماهیت بازی موجب می‌شود که بازی دیفرانسیلی از نوع با مجموع صفر[6] شکل بگیرد؛ بنابراین باتوجه‌به تعریف مطلوبیت‌های اشاره شده برای بازیگر خودی و متخاصم مطابق با رابطه (۶) این گزاره

[1] Weapon envelop
[2] Attrition
[3] Atritional
[4] Lanchester equation
[5] Payoff
[6] Zero-sum differential game

حاصل می‌شود که مجموع تحمل‌پذیری و تهدید ثابت و برابر کل مطلوبیت‌های موجود در بازی است. با درنظرگرفتن تنها دو بازیگر معادلات بازی دیفرانسیلی با دینامیکی از نوع لانچستر به‌صورت رابطه (۶) خواهد بود [۴۱, ۴۲]:

$$\dot{\theta}=\begin{bmatrix}\dot{\theta}_1^{threat}\\ \dot{\theta}_2^{tolerability}\end{bmatrix}=f\left(\theta_1^{threat}(t),\theta_2^{tolerability}(t),u_1(t),u_2(t)\right)$$
$$\begin{cases}\dot{\theta}_1^{threat}=f_1(\theta_2^{tolerability}(t),u_1(t),u_2(t))-f_2(\theta_1^{threat}(t),u_1(t),u_2(t))\\ \dot{\theta}_2^{tolerability}=f_2(\theta_1^{threat}(t),u_1(t),u_2(t))-f_1(\theta_2^{tolerability}(t),u_1(t),u_2(t))\end{cases} \quad (۶)$$

معادلات (۶) کنترل‌ها $u_i(t)$ در حقیقت همان رفتارها و اقداماتی هستند که یک بازیگر می‌تواند در محیط عملیات انجام دهد. در یک رویارویی با ماهیت نظامی و تقابلی میان دو بازیگر خودی و متخاصم می‌توان سه دسته کنترل برای هریک در نظر گرفت. هر اقدام بازیگر خودی (و متقابلاً بازیگر متخاصم) را می‌توان در یکی از سه دسته حمله، دفاع یا مانور جای داد. تفکیک این سه کنترل به دلیل ماهیت متفاوت آن‌ها و نیز به دلیل ظاهرشدن منحصربه‌فرد آن‌ها در معادلات لانچستر است. یک بازیگر با اقدام به حمله در پی کسب منفعت و مطلوبیت بیشتر است و ازآنجایی‌که مجموع میزان مطلوبیت در کل بازی ثابت و محدود است این اقدام به معنای کاستن از میزان مطلوبیت بازیگر متقابل خواهد بود. همچنین یک بازیگر با اقدام به دفاع در برابر حمله بازیگر متقابل در پی حفظ مطلوبیت‌های موجود خود است. مانور یک بازیگر به معنای این است که بازیگر قصد تثبیت و حتی ارتقای مطلوبیت‌های خود را دارد اما این قصد بدون آسیب به بازیگر مقابل صورت می‌پذیرد. با توجه به ماهیت بازی، متغیرهای تعریف شده و نوع ورودی‌های کنترلی و اثر آن‌ها می‌توان معادلات دینامیکی بازی غیر تعاملی دیفرانسیلی با مجموع صفر موردنظر را به‌صورت رابطه (۷) پیشنهاد داد:

$$\theta_1(t)=\text{Target Threat level},\ \theta_2(t)=\text{Ownship Tolerability level}$$
$$\begin{aligned}\dot{\theta}_i(t)&=f_i(a_i(t),d_j(t),m_i(t),m_j(t),\theta_i(t))\\&\quad -f_j(a_j(t),d_i(t),m_j(t),m_i(t),\theta_i(t))\end{aligned}$$
$$\begin{cases}\dot{\theta}_1(t)=f_1(a_1(t),d_2(t),m_1(t),m_2(t),\theta_2(t))\\ \qquad -f_2(a_2(t),d_1(t),m_2(t),m_1(t),\theta_1(t))\\ \dot{\theta}_2(t)=f_2(a_2(t),d_1(t),m_2(t),m_1(t),\theta_1(t))\\ \qquad -f_1(a_1(t),d_2(t),m_1(t),m_2(t),\theta_2(t))\end{cases} \quad (۷)$$

که در آن $\theta_1(t)$ متغیر تهدید با نگاه به اهدف متخاصم و $\theta_2(t)$ متغیر تحمل‌پذیری با نگاه به دارایی‌ها است. همچنین $a_{i=1,2}(t)$ اقدام (بازی) یک بازیگر در راستای حمله و $d_{i=1,2}(t)$ اقدام یک بازیگر در راستای دفاع است. همچنین $m_{i=1,2}(t)$ به معنای اقدام بازیگر به مانور در صحنه عملیات است. توابع $f_{i,j}(.)$ در معادلات لانچستر توابع جذب نامیده می‌شوند. اینکه هریک از متغیرهای اشاره شده با چه کیفیتی در معادلات ظاهر می‌شوند موضوعی بسیار جذاب و نیازمند پژوهش‌های بیشتر است. آنچه در پیشینه پژوهشی پیرامون کاربست معادلات لانچستر در حوزه‌های مختلف وجود دارد حاکی این مطلب است که ورودی‌های کنترلی یا همان اقدامات بازیگران به‌صورت خطی و متغیرهای حالت به‌صورت غیر خطی در معادلات ظاهر می‌شوند. اقدام به حمله در جهت افزایش مطلوبیت و اقدام به دفاع در راستای تثبیت مطلوبیت فعلی است. همچنین اقدام به مانور در راستای تثبیت و یا ارتقای مطلوبیت بدون استفاده از تسلیحات است. در دینامیک لانچستر توابع جذب می‌بایست مثبت باشند و همچنین مشتقات جزئی این توابع نسبت به ورودی‌ها باید در رابطه (۸) صدق کند.

$$\partial f_i/\partial a_i>0\ ,\quad \partial f_i/\partial d_j<0 \quad (۸)$$

توابع $a_{i,j}(t)$ و $d_{i,j}(t)$ در معادلات لانچستر به ترتیب میزان نرخ تلاش برای حمله یا دفاع[1] است. تلاش برای حمله یا دفاع به این معناست که یک بازیگر چه میزان از منابع خود را برای عملیاتی کردن اقدام خود بکار می‌بندد. تغییرات نرخ تلاش برای اقدام به معنای این است که در هر لحظه تا پایان سناریو، روند تغییرات اختصاص منابع به حمله یا دفاع را مشخص می نماید. همچنین توابع $m_{i,j}(t)$ نشان دهنده نرخ تلاش برای اجرای مانور است. جذابیت لحاظ کردن مانور به‌صورت یک ورودی در معادلات لانچستر از آنجاست که می توان با حل معادلات به شکل بهینه مانوری را که ارتقای تحمل‌پذیری را به همراه داشته باشد به دست آورد. در نظر گرفتن ورودی مانور به‌صورت کسری حاکی از این حقیقت است که بازیگری که مانور مطلوب‌تری داشته باشد می تواند در کسب مطلوبیت بیشتر موفق‌تر باشد. بازیگر در لحظه میزان منابع محدودی برای حمله، دفاع و یا مانور خواهد داشت بنابراین قیدی که حاکی مجموع ثابت این ورودی‌ها باشد باید به معادلات بهینه‌سازی اضافه شود. با در نظر گرفتن این مفاهیم می‌توان معادلات را به‌صورت رابطه (۹) بازنویسی کرد:

$$\begin{cases}\dot{\theta}_1(t)=(\beta a_1(t)-\lambda d_2(t))\left(\frac{m_1(t)}{m_2(t)}\right)\sqrt{\theta_2(t)}-(\beta a_2(t)-\lambda d_1(t))\left(\frac{m_2(t)}{m_1(t)}\right)\sqrt{\theta_1(t)}\\ \dot{\theta}_2(t)=(\beta a_2(t)-\lambda d_1(t))\left(\frac{m_2(t)}{m_1(t)}\right)\sqrt{\theta_1(t)}-(\beta a_1(t)-\lambda d_2(t))\left(\frac{m_1(t)}{m_2(t)}\right)\sqrt{\theta_2(t)}\end{cases} \quad (۹)$$

که در آن λ و β ثوابت مثبتی هستند. عبارت $f_i(a_i(t),d_j(t),m_i(t),m_j(t))=(\beta a_i(t)-\lambda d_j(t))\frac{m_i(t)}{m_j(t)}$ نرخ جذب نامیده می شود. در دینامیک لانچستر نرخ جذب برای حصول اطمینان از اینکه متغیرهای حالت در معادله حالتی که در ساختار لانچستر نوشته شده است در بازه $[0,1]$ باشند باید مثبت باشد. تابع نرخ جذب $f_{i,j}(.)$ مثبت است اگر و تنها اگر

[1] Attack effort/Defend Effort

مشتقات جزئی این تابع نسبت به ورودی‌ها در رابطه (۸) صدق کند.

ماهیت تقابلی بازی ایجاب می‌کند که دو بازیگر در طی بازی که از نوع دیفرانسیلی غیرتعاملی با مجموع صفر است، استراتژی مارکووین[1] را بکار برند[۴۳, ۴۴]. استراتژی مارکووین به این معناست که اقدامات بازیگران بر اساس شرایط بازی[2] یا جایگاه فعلی تعیین می‌شود و هر بازیگر با دانستن میزان مطلوبیت خود در حقیقت شرایط بازی را به طور کامل خواهد دانست. در این پژوهش دو بازیگر که عبارت‌اند از خودی و متخاصم به ترتیب با دانستن میزان تحمل‌پذیری و تهدید خود در هر لحظه جایگاه بازی را به طور کامل خواهند دانست. با در نظر گرفتن معادلات به‌دست‌آمده در رابطه (۹) توابع هدف بازی و در نهایت مسئله کنترل بهینه که شامل یافتن بهترین ورودی‌ها برای یافتن بهترین مطلوبیت‌هاست به‌صورت رابطه (۱۰) خواهند بود:

$$\max J_i(a_i,d_i,m_i)=\int_0^T[(\theta_i(t))-c_a(a_i(t))-c_d(d_i(t))-c_m(m_i(t))]dt \quad \text{for } i=1,2$$

$$\Rightarrow\begin{cases}J_1(a_1,d_1,m_1)=\int_0^T[(\theta_1(t))-\frac{C_a}{2}a_1^2(t)-\frac{C_d}{2}d_1^2(t)-\frac{C_m}{2}m_1^2(t)]dt\\ J_2(a_2,d_2,m_2)=\int_0^T[(\theta_2(t))-\frac{C_a}{2}a_2^2(t)-\frac{C_d}{2}d_2^2(t)-\frac{C_m}{2}m_2^2(t)]dt\end{cases}$$

$$\text{s.t.}\begin{cases}a_i(t)\ge 0,\ d_i(t)\ge 0,\ m_i(t)\ge 0,\ 0\le\theta_i(t)\le 1\\ (\beta a_i-\lambda d_j)\ge 0 \qquad \text{for all } t \text{ and } i\\ a_i(t)+d_i(t)+m_i(t)=1\end{cases}$$

(۱۰)

که در آن C_a، C_d و C_m ثوابت مثبتی هستند. ورودی‌های کنترلی می‌توانند به همراه دینامیک اشاره شده در مرحله بعد در قالب یک مسئله کنترل بهینه یا همان بازی استراتژیک دیفرانسیلی که دارای دو بازیگر با مطلوبیت‌های کاملا متضاد است مورداستفاده قرار بگیرد. مسئله کنترل بهینه یا همان اقدام یا بازی بهینه برای هر بازیگر با توجه به بازی طرف مقابل تعیین می‌شود. سپس می‌توان به شکل پیوسته و مداوم این فرایند را تکرار کرد تا سناریو به پایان برسد. برای یافتن اقدامات کنترلی بهینه برای هر بازیگر باید برای بازی دیفرانسیلی فوق یک نقطه تعادل نش مارکووین مشخص شود تا بر اساس آن استراتژی‌های مربوط به دفاع، حمله و مانور مشخص شود. شرایط بهینگی چنانچه از دید کنترل بهینه به بازی دیفرانسیلی بنگریم بر اساس معادلات همیلتون-جاکوبی-بلمن تعیین می‌شود. بررسی روش‌های تحلیلی حل این معادلات موضوعی فوق اهداف این پژوهش است. ازاین‌رو برای مطالعات بیشتر در این زمینه می‌توان به [۴۲, ۴۴, ۴۵] مراجعه نمود.

۴- شبیه‌سازی یک سناریو رهگیری

در این بخش یک سناریوی رهگیری هوایی معرفی شده است که از آن برای ارزیابی اینکه چگونه می‌توان از دوگانه تهدید–تحمل‌پذیری برای تخصیص بهینه منابع بهره برد، استفاده شده است. این سناریو نشان می‌دهد که چگونه مفهوم دوگانه تهدید–تحمل‌پذیری می‌تواند به شکل مؤثری در تعیین رفتار دشمن - خودی مورداستفاده قرار بگیرد و در تعیین یک طرح عملیاتی در قالب یک بازی دیفرانسیلی تقابلی با مجموع صفر بکار بسته شود. هدف از این شبیه‌سازی این است که نشان دهد چگونه یک بازیگر در محیط عملیاتی در مورد منابع در اختیار خود تصمیم می‌گیرد و چگونه این منابع محدود می‌تواند به شکل مؤثری به سه تاکتیک متفاوت تهاجمی، دفاعی و یا مانوری که بیشتر ذکر شد به شکل بهینه‌ای اختصاص یابد تا دستاورد هر بازیگر در طی بازی ارتقای یابد. چنانچه بازی از دید بازیگر خودی مورد توجه قرار گیرد، که بازیگر خودی به دنبال بیشینه‌کردن منفعت خود از بازی است. منفعت بازیگر خودی در ارتقای (و یا با نگاه حداقلی ثابت نگه‌داشتن) میزان تحمل‌پذیری است. خودی این هدف را از طریق انتخاب تاکتیک مناسب در محیط عملیات دنبال می‌کند. بازیگر خودی به طور پیوسته منابع در دسترس خود را که میزان محدود و مشخصی دارند در طی یک فرایند بهینه‌سازی فی‌مابین سه تاکتیک تهاجم، دفاع و مانور تقسیم می‌کند. فرایند بهینه‌سازی طوری طراحی شده است که سعی در کاهش هزینه‌های عملیاتی هر بازیگر دارد. به عبارت بهتر هر بازیگر با تغییر تاکتیک‌های خود به شکل دینامیک در طی هر دوره از بازی سعی در ارتقای بهره خود از بازی و کاهش هزینه‌های عملیاتی خود دارد. تابع هزینه عملیاتی طوری طراحی شده است که بیشترین تحمل‌پذیری برای خودی و یا بیشترین تهدید را برای بازیگر متخاصم داشته باشد. در پایان هر دوره از بازی، هر بازیگر میزان متغیر حالت مربوط به خود را (تهدید برای بازگیر متخاصم و تحمل‌پذیری برای خودی) ارزیابی می‌کند و بر اساس میزان جدید این متغیرها بازی جدید شکل می‌گیرد و بازیگران با تغییر میزان منابعی که به تاکتیک‌های خود اختصاص داده‌اند سعی در بهبود منفعت دریافتی خود از بازی خواهند کرد. این فرایند به طور مداوم در طول مدت‌زمان سناریو تکرار می‌شود و در نهایت خروجی شبیه‌سازی این سناریوی یک طرح عملیاتی برای خودی است که او از تحلیل روابط دینامیکی میان تهدید و تحمل‌پذیری به دست آورده است.

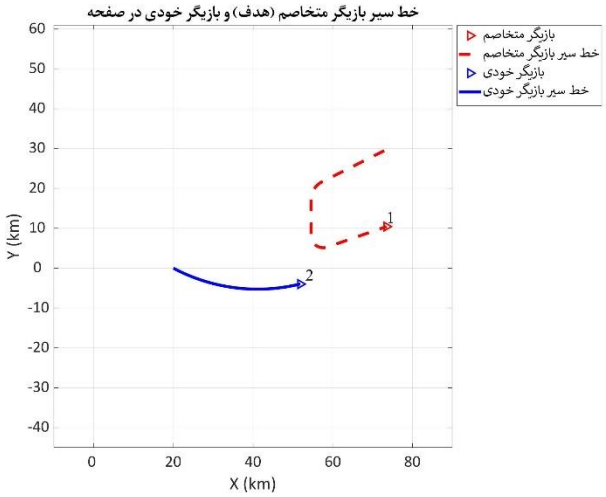
در این سناریو یک شناور دریایی تهاجمی، به‌عنوان بازیگر متخاصم در نظر گرفته شده است. بازیگر خودی نیز یک شناور شناسایی - تدافعی از نوع ناوچه است. خط سیر این دو موجودیت در صفحه x-y در طی زمان شبیه‌سازی سناریو در شکل (۲) نشان داده شده است. منحنی خط‌چین خط سیر بازیگر متخاصم

[1] Markovian strategy
[2] Position of the game

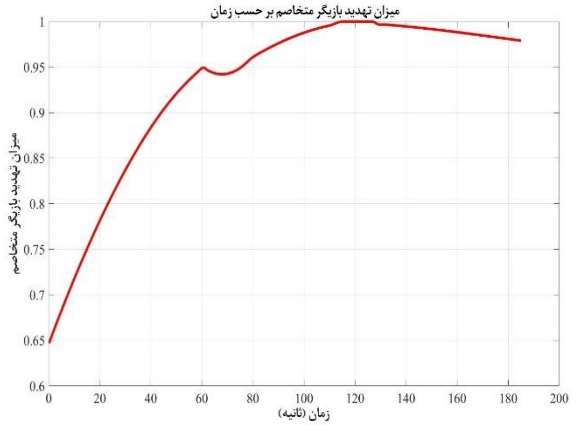
است و منحنی خط کامل، خط سیر بازیگر خودی است. مدت‌زمان سناریو ۱۸۶ ثانیه است و هر بازی دینامیک از ابتدا تا انتها تنها ده ثانیه طول می‌کشد. میزان تهدید برای بازیگر متخاصم و میزان تحمل‌پذیری برای خودی در ابتدای سناریو دارای یک مقدار اولیه است ولی این دو متغیر حالت به‌صورت دینامیکی در طی مدت‌زمان سناریو در حال تغییر هستند. تغییرات تهدید متخاصم و تحمل‌پذیری خودی به ترتیب در شکل (۳) و شکل (۴) نشان داده شده است. تخصیص تاکتیکی منابع در طی هر دوره از بازی ثابت است و در انتهای بازی با محاسبه مقادیر جدید برای تهدید و تحمل‌پذیری یک مسئله بهینه‌سازی بروز شده شکل می‌گیرد و یک بازی جدید تعریف می‌شود. با شکل‌گیری یک بازی جدید تاکتیک‌های بازیگران تغییر می‌کند و میزان منابعی که به هر تاکتیک اختصاص‌یافته است بر اساس شرایط جدید بهینه می‌شود.

کنش‌های بازیگران یا به عبارت بهتر (ورودی‌های) کنترلی هر بازیگر که از حل عددی مسئله بهینه‌سازی حاصل شده است، در معادلات لانچستر رابطه جای‌گذاری می‌شود و مقادیر جدید تهدید و تحمل‌پذیری برای شکل‌گیری بازی بعدی به دست می‌آید. ورودی‌های کنترلی بهینه شده در شکل (۵) نشان داده شده است. این مقادیر میزان تخصیص منابع به هر تاکتیک را برای خودی و متخاصم نشان می‌دهد.

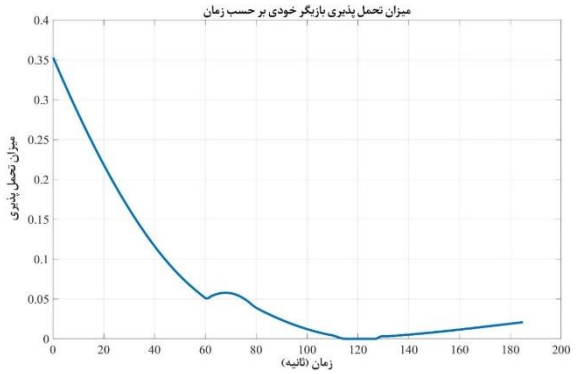
در شکل (۳) مشاهده می‌شود که در لحظات اولیه شبیه‌سازی، بازیگر متخاصم تلاش دارد که میزان تهدیدات را برای دارایی‌های بازیگر خودی افزایش دهد. این امر با تخصیص سهم بیشتری از منابع در دسترس به تاکتیک تهاجمی محقق می‌شود. هنگامی که بازیگر دشمن به میزان تهدید دلخواه دست یافت سعی در تثبیت این میزان تهدید و کاهش هزینه‌های عملیاتی خود از طریق اعمال سهم بیشتری از منابع تاکتیکی به مانور و دفاع دارد. به‌خاطر هزینه‌های بسیار بالایی که انتخاب تاکتیک تهاجمی برای هر دو بازیگر دارد، این تاکتیک به‌ندرت توسط بازیگران مورد استفاده قرار می‌گیرد. همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است هنگامی که سطح تهدید هدف متخاصم در لحظه صدم شبیه‌سازی به مقدار بحرانی خود یعنی یک می‌رسد، بازیگر خودی تاکتیک‌های خود را برای مقابله با این میزان تهدید تغییر می‌دهد. این امر با اختصاص منابع بیشتر به تاکتیک دفاعی محقق می‌شود. بازیگر خودی سعی می‌کند تا سطح تحمل‌پذیری خود را با میزان بهینه شده‌ای از تاکتیک‌های مانور و دفاع ارتقای بخشد. بازیگر خودی همچنین سعی می‌کند تا با تعقیب بازیگر متخاصم، او را مجبور به تغییر تاکتیک‌های خود برای کاهش سطح تهدید کند. پس از اینکه بازیگر متخاصم با دور زدن و دور شدن از خودی میزان تهدید خود را کاهش می‌دهد، بازیگر خودی نیز برای کاهش هزینه‌های عملیاتی، منابع تاکتیکی خود را به سمت مانور بیشتر هدایت می‌کند.



شکل (۲). موقعیت و خط سیر هدف متخاصم و خودی در صفحه x-y



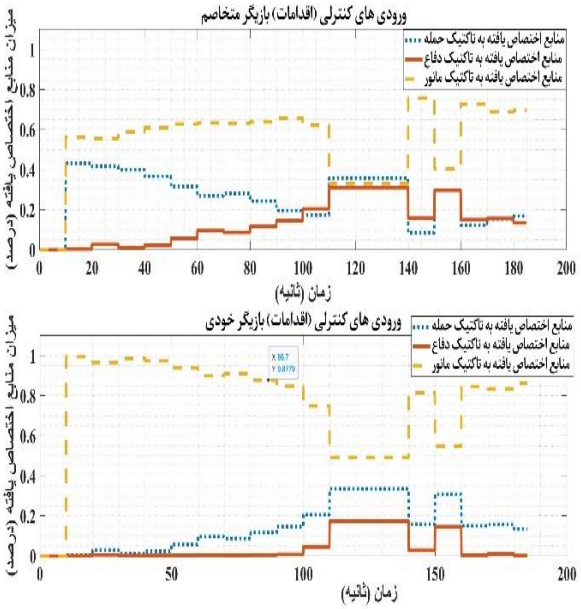
شکل (۳). میزان تهدید بازیگر متخاصم در طی زمان شبیه‌سازی



شکل (۴). میزان تحمل‌پذیری خودی در طی زمان شبیه‌سازی

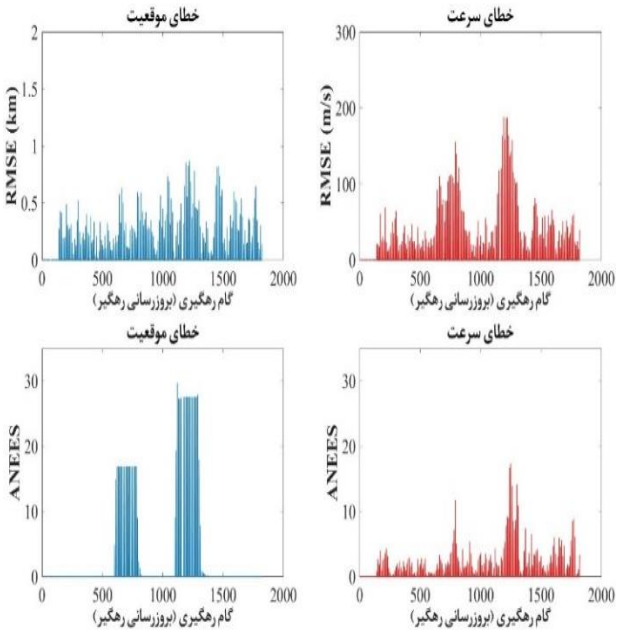
تخصیص تاکتیکی منابع در طی هر دوره از بازی ثابت است و در انتهای بازی با محاسبه مقادیر جدید برای تهدید و تحمل‌پذیری یک مسئله بهینه‌سازی بروز شده شکل می‌گیرد و یک بازی جدید

تعریف می‌شود. با شکل‌گیری یک بازی جدید تاکتیک‌های بازیگران تغییر می‌کند و میزان منابعی که به هر تاکتیک اختصاص‌یافته است بر اساس شرایط جدید بهینه می‌شود. کنش‌های بازیگران یا به عبارت بهتر (ورودی‌های) کنترلی هر بازیگر که از حل عددی مسئله بهینه‌سازی حاصل شده است، در معادلات لانچستر شماره (۸) جای‌گذاری می‌شود و مقادیر جدید تهدید و تحمل‌پذیری برای شکل‌گیری بازی بعدی به دست می‌آید. ورودی‌های کنترلی بهینه شده در شکل (۵) نشان‌داده‌شده است. این مقادیر میزان تخصیص منابع به هر تاکتیک را برای خودی و متخاصم نشان می‌دهد.

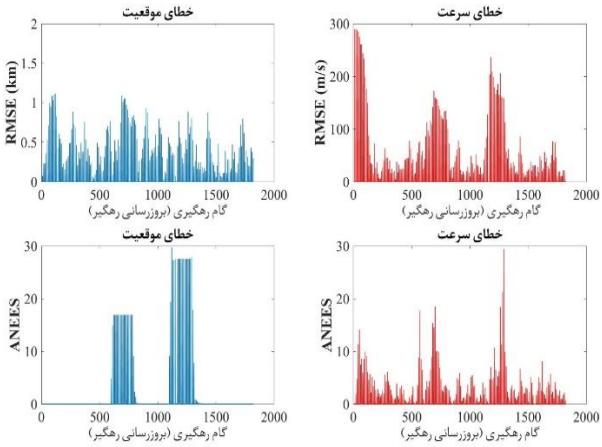


شکل (۵). منابع تخصیص‌یافته به سه نوع تاکتیک حمله، دفاع و مانور توسط خودی و متخاصم در طی سناریو

در شکل (۵) مشاهده می‌شود که در لحظات اولیه شبیه‌سازی، بازیگر متخاصم تلاش دارد که میزان تهدیدش را برای دارایی‌های بازیگر خودی افزایش دهد. این امر با تخصیص سهم بیشتری از منابع در دسترس به تاکتیک تهاجمی محقق می‌شود. هنگامی که بازیگر دشمن به میزان تهدید دلخواه دست‌یافت سعی در تثبیت این میزان تهدید و کاهش هزینه‌های عملیاتی خود از طریق اعمال سهم بیشتری از منابع تاکتیکی به مانور و دفاع دارد. به‌خاطر هزینه‌های بسیار بالایی که انتخاب تاکتیک تهاجمی برای هر دو بازیگر دارد، این تاکتیک به‌ندرت توسط بازیگران مورداستفاده قرار می‌گیرد. همان‌طور که در شکل (۵) نشان‌داده‌شده است هنگامی که سطح تهدید هدف متخاصم در لحظه صدم شبیه‌سازی به مقدار بحرانی خود یعنی ۱ می‌رسد، بازیگر خودی تاکتیک‌های خود را برای مقابله با این میزان تهدید تغییر می‌دهد. این امر با اختصاص منابع بیشتر به تاکتیک دفاعی محقق می‌شود. بازیگر خودی سعی می‌کند تا سطح تحمل‌پذیری خود را با میزان بهینه شده‌ای از تاکتیک‌های مانور و دفاع ارتقای بخشد. بازیگر خودی همچنین سعی می‌کند تا با تعقیب بازیگر متخاصم، او را مجبور به تغییر تاکتیک‌های خود برای کاهش سطح تهدید کند. پس از اینکه بازیگر متخاصم با دورزدن و دور شدن از خودی میزان تهدید خود را کاهش می‌دهد، بازیگر خودی نیز برای کاهش هزینه‌های عملیاتی، منابع تاکتیکی خود را به سمت مانور بیشتر هدایت می‌کند. با تخصیص منابع تاکتیکی هنگامی که تحمل‌پذیری خودی نیز در نظر گرفته شود، شاخص‌های استاندارد رهگیری عملکرد بهتری را نسبت به زمانی که تنها از تهدید برای تخصیص منابع تاکتیکی استفاده می‌شود نشان می‌دهد. شکل (۶) و شکل (۷) نیز شاخص‌های استاندارد رهگیری هنگامی که دوگانه تهدید - تحمل‌پذیری در نظر گرفته می‌شود و هنگامی که تنها تهدید در نظر گرفته می‌شود نشان می‌دهد. محاسبه شاخص‌های رهگیری با استفاده از تکنیک تحلیل مونت‌کارلو و با استفاده از نرم‌افزار متلب نسخه ۲۰۱۹ بتا انجام شده است. این تحلیل‌ها نشان می‌دهد که در مجموع هنگامی که تحمل‌پذیری برای تخصیص منابع تاکتیکی در نظر گرفته می‌شود رهگیری بهتری خواهیم داشت.



شکل (۶). شاخص‌های استاندارد ارزیابی رهگیری هنگامی که تحمل‌پذیری در نظر گرفته می‌شود.



شکل (۷). شاخص‌های استاندارد ارزیابی رهگیری هنگامی که تنها تهدید در نظر گرفته می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

در بخش‌های پیشین با استناد به نقصی که در ماهیت مفهوم تهدید برای مدیریت و تخصیص سنسورها و منابع دارایی‌های خودی وجود داشت به این حقیقت دست یافتیم که برای اثربخشی و کارایی بیشتر مدیریت منابع سنسوری بر مبانی تهدید، نیاز به توسعه این مفهوم و بازآرایی آن وجود دارد. این رویکرد پیش‌تر با در نظر گرفتن مفهومی به نام تحمل‌پذیری به‌عنوان یکی از ارکان ارزیاب تهدید مورد توجه قرار گرفته بود. اما با توجه به طبیعت تقابلی که میان این مفهوم وجود داشت، مفهوم دوگانه‌ای با عنوان تهدید - تحمل‌پذیری توسعه یافت و بر مبنای یک دینامیک غیرخطی کیفیت رفتار این مفهوم دوگانه مورد تحلیل قرار گرفت. مشاهده شد که مدیریت منابع با در نظر گرفتن اثرات تقابلی تهدید و تحمل‌پذیری شاخص‌های بالاتری را در حوزه رهگیری از خود نشان می‌دهد. برای ایجاد رویکرد نوآورانه برای مدیریت منابع تاکتیکی و سنسوری لازم است تا نگاه به مفهوم توسعه‌یافته تحمل‌پذیری را دقیق‌تر و عمیق‌تر نموده و به آن به‌عنوان یک مبنای کامل برای اجرای فرایند مدیریت و تخصیص منابع نگریست. در این پژوهش با معرفی مفهوم تحمل‌پذیری و طرح آن در کنار مفهوم تهدید و شکل‌گیری دوگانه تهدید - تحمل‌پذیری یک چهارچوب سیستماتیک نوآورانه برای تحلیل رفتارهای خودی/دشمن در صحنه رویارویی نظامی ایجاد شد. ماهیت تقابلی و اهداف متعارض بازیگران در صحنه رویارویی نظامی نقطه شروعی برای ورود مفاهیم نظریه بازی‌ها قرار گرفت. در نهایت با درنظرگرفتن تحمل‌پذیری برای بازیگر خودی و تهدید برای بازیگر متخاصم به‌عنوان مطلوبیت، یک بازی استراتژیک غیرتعاملی با مجموع صفر برای تعیین بهینه رفتارها و اقدامات خودی و دشمن که در سه کلاس تهاجم (حمله)، دفاع و مانور دسته‌بندی شده بودند ایجاد شد. بازی استراتژیک با درنظرگرفتن یک افق محدود، با استفاده از تئوری‌های کنترل بهینه قابل تحلیل و ارزیابی است و می‌توان اقدامات بهینه برای هریک از بازیگران را در طی بازه زمانی مشخص به دست آورد. مدل‌سازی بدیعی برای منظورکردن سه استراتژی تهاجم، دفاع و مانور در ساختار بازی دیفرانسیلی ارائه شده که پیش از این وجود نداشته است. نتایج شبیه‌سازی برای یک سناریو متشکل از یک هدف متخاصم و یک دارایی حاکی از کارایی رویکرد ارائه شده در تحلیل اقدامات خودی و دشمن است که تاکنون به این شکل وجود نداشته است. نکات کلیدی و برجسته این پژوهش در این را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

• معرفی مفهومی به نام تحمل‌پذیری که قابلیت بازتاب خصوصیات بازیگر خودی را در صحنه نبرد داراست.

• پیشنهاد یک بازی دیفرانسیلی با مجموع صفر به‌عنوان یک قالب توانمند برای نمایش تقابل میان مفهوم تهدید و تحمل‌پذیری از یک سو و رقابت میان بازیگران خودی و متخاصم در کسب مطلوبیت بیشتر در صحنه عملیات از سوی دیگر.

• امکان تحلیل دینامیکی دو متغیر تهدید و تحمل‌پذیری (به‌عنوان مطلوبیت) و کنش‌ها و اقدامات بازیگران (به‌عنوان ورودی‌های کنترلی) با استفاده از معادلات پیشنهادی لانچستر.

• آرایش نوآورانه معادلات لانچستر برای سازگاری با تاکتیک‌های سه‌گانه قابل انتخاب توسط بازیگران در صحنه نبرد.

• ایجاد ارتباط میان مفهوم تحمل‌پذیری به‌عنوان مطلوبیت و اقدامات کنترلی بازیگران جهت بهینه‌سازی شیوه تخصیص و مدیریت منابع تاکتیکی در دسترس.

در آینده می‌توان مدل ریاضی ارائه شده را با افزودن انواع دیگری از تاکتیک‌ها تکمیل کرد. همچنین می‌توان بازی را به شکل حلقه بسته در نظر گرفت و این امکان را فراهم آورد که بازیگران با درک و مشاهده نتایج انتخاب تاکتیک‌های خود بتواند در زنجیره‌های بعدی بازی استراتژی‌های متنوع‌تری را انتخاب نمایند.

۷- مراجع

[1] A. Benaskeur, "Combat Resource Management (11bm) Applied Research Project (ARP)," DEFENCE RESEARCH AND DEVELOPMENT CANADA VALCARTIER (QUEBEC)2009.

[2] D. Akselrod, T. Lang, M. McDonald, and T. Kirubarajan, "Markov decision process-based resource and information management for sensor networks," in *Sensor Networks*: Springer, 2010, pp. 167-216.

[3] B. Kovalerchuk and L. Perlovsky, "Sensor Resource Management: Intelligent Multi-objective Modularized Optimization Methodology and Models," in *Recent Advances in Computational Intelligence in Defense and Security*: Springer, 2016, pp. 695-726.

[4] T. H. de Groot, O. A. Krasnov, and A. G. J. I. S. J. Yarovoy, "Mission-driven resource management for reconfigurable sensing systems," vol. 12, no. 2, pp. 1531-1542, 2018.

[5] S. F. Page, J. P. Oldfield, and P. Thomas, "Towards integrated threat assessment and sensor management: Bayesian multi-target search," in *Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI), 2016 IEEE International Conference on*, 2016, pp. 44-51: IEEE.

[6] S. Page *et al.*, "Threat assessment and sensor management in a modular architecture," in *Optics and Photonics for Counterterrorism, Crime Fighting, and Defence XII*, 2016, vol. 9995, p. 99950W: International Society for Optics and Photonics.

[7] F. Katsilieris, H. Driessen, and A. Yarovoy, "Threat-based sensor management for joint target tracking and classification," in *Information Fusion (Fusion), 2015 18th International Conference on*, 2015, pp. 435-442: IEEE.

[8] S. kamelian, n. Pariz, and A. Karimpor, "Threat concept development based on tolerability and a decision support system for threat evaluation using logical statements and discrete-Value evidences %J Journal of Command and Control," (in eng), Research vol. 3, no. 1, pp. 1-24, 2019.

[9] F. Katsilieris, "Sensor management for surveillance and tracking: An operational perspective," 2015.

[10] F. Katsilieris, Y. Boers, and H. Driessen, "Optimal search: A practical interpretation of information-driven sensor management," in *FUSION*, 2012, pp. 439-446.

[11] N. Okello and G. Thoms, "Threat assessment using Bayesian networks," in *Proceedings of the 6th International Conference on Information fusion*, 2003, pp. 1102-1109.

[12] Y. Hou, W. Guo, and Z. Zhu, "Threat assessment based on variable parameter dynamic Bayesian network," in *Proceedings of the 29th Chinese Control Conference*, 2010, pp. 1230-1235: IEEE.

[13] W. Mei, "Air Defense Threat Evaluation using Fuzzy Bayesian Classifier," in *IJCCI*, 2013, pp. 227-232.

[14] S. Kumar and B. K. J. P. T. Tripathi, "Modelling of threat evaluation for dynamic targets using bayesian network approach," vol. 24, pp. 1268-1275, 2016.

[15] A. N. Costa and P. C. Costa, "Simulation-based air mission evaluation with Bayesian threat assessment for opposing forces," in *Disciplinary Convergence in Systems Engineering Research*: Springer, 2018, pp. 281-295.

[16] M. Yadegary, and S. A. Seideyn, "Threat evaluation using joint fuzzy and probablistic network based on rules," in *Electronic and Cyber Defense Quarterly*, 2019, vol 6, Issue 4. (in persian)

[17] M. Nilsson, J. Van Laere, T. Ziemke, and J. Edlund, "Extracting rules from expert operators to support situation awareness in maritime surveillance," in *2008 11th International conference on information fusion*, 2008, pp. 1-8: IEEE.

[18] W. Elahsoumi, I. Boujelben, and I. Keskes, "Rule Based Method for Terrorism, Violence and Threat Classification: Application to Arabic Tweets," in *International Conference on Automatic Processing of Natural-Language Electronic Texts with NooJ*, 2019, pp. 209-219: Springer.

[19] Y. Liang, J. Lee, B. Hong, and W. Kim, "Design and Implementation of Rule-based CEP for Threat Detection and Defense," in *2019 IEEE International Symposium on INnovations in Intelligent SysTems and Applications (INISTA)*, 2019, pp. 1-6: IEEE.

[20] [20] A. N. Steinberg, "A model for threat assessment," in *Fusion Methodologies in Crisis Management*: Springer, 2016, pp. 313-340.

[21] A. N. J. H. o. m. d. f. t. Steinberg and practice, "Foundations of situation and threat assessment," pp. 437-501, 2009.

[22] A. N. Steinberg, "Threat assessment technology development," in *International and Interdisciplinary Conference on Modeling and Using Context*, 2005, pp. 490-500: Springer.

[23] M. Oxenham, "Enhancing situation awareness for air defence via automated threat analysis," in *Proceedings of the Sixth International Conference on Information Fusion*, 2003, vol. 2, pp. 1086-1093.

[24] M. G. Oxenham, "Using contextual information for extracting air target behavior from sensor tracks," in *Signal Processing, Sensor Fusion, and Target Recognition XII*, 2003, vol. 5096, pp. 482-493: International Society for Optics and Photonics.

[25] H. Irandoust, A. Benaskeur, F. Kabanza, and P. Bellefeuille, "A mixed-initiative advisory system for threat evaluation," in *Proceedings of the 15th International Command and Control Research and Technology Symposium: The Evolution of C*, 2010, vol. 2, pp. 2-3.

[26] M. J. Liebhaber, D. Kobus, and B. J. S. Feher, "Studies of US Navy air defense threat assessment: Cues, information order, and impact of conflicting data," 2002.

[27] R. Roux and J. H. J. O. van Vuuren, "Real-time threat evaluation in a ground based air defence environment," vol. 24, no. 1, pp. 75-101, 2008.

[28] M. Yoon, J. Park, and J. J. I. J. o. C. Yi, "An Effective Threat Evaluation Algorithm for Multiple Ground Targets in Multi-target and Multi-weapon Environments," vol. 15, no. 1, 2019.

[29] I. Dimitrijević and N. Stekić, "Intelligence Analysis Models for Asymmetric Threats," Strategic Research Institute & National Defence School, 2018.

[30] T. Hamilton and R. Mesic, "A simple game-theoretic approach to suppression of enemy defenses and other time critical target analyses," RAND CORP SANTA MONICA CA2004.

[31] E. G. Little and G. L. Rogova, "An ontological analysis of threat and vulnerability," in *2006 9th*

International Conference on Information Fusion, 2006, pp. 1-8: IEEE.

[32] S. M. R. Mousavi, and H. Alimohammadi, "Optimized allocation for radar jamming resources.," in *Electronic and Cyber Defense Quarterly*, 2015, vol 3, Issue 7. (in persian)

[33] N. Le Guillarme, A.-I. Mouaddib, S. Gatepaille, and A. Bellenger, "Adversarial intention recognition as inverse game-theoretic planning for threat assessment," in *2016 IEEE 28th International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI)*, 2016, pp. 698-705: IEEE.

[34] G. Chen, D. Shen, C. Kwan, J. B. Cruz, and M. Kruger, "Game theoretic approach to threat prediction and situation awareness," in *2006 9th International Conference on Information Fusion*, 2006, pp. 1-8: IEEE.

[35] J. Roy, S. Paradis, and M. Allouche, "Threat evaluation for impact assessment in situation analysis systems," in *Signal processing, sensor fusion, and target recognition XI*, 2002, vol. 4729, pp. 329-341: International Society for Optics and Photonics.

[36] N. Le Guillarme, "A Game-Theoretic Planning Framework for Intentional Threat Assessment," Thèse de doctorat, Université de Caen, 2016.

[37] M. J. Liebhaber and B. Feher, "Air threat assessment: Research, model, and display guidelines," SPACE AND NAVAL WARFARE SYSTEMS COMMAND SAN DIEGO CA2002.

[38] S. Blackman and R. J. A. h. Popoli, "Design and Analysis of Modern Tracking Systems (Artech House Radar Library)," 1999.

[39] D. Bauso, *Game theory with engineering applications*. SIAM, 2016.

[40] M. Kress, "Lanchester Models for Irregular Warfare," vol. 8, no. 5, p. 737, 2020.

[41] J. G. Taylor, "Lanchester-type models of warfare and optimal control," vol. 21, no. 1, pp. 79-106, 1974.

[42] S. Jørgensen and S. Sigué, "A lanchester-type dynamic game of advertising and pricing," in *Games in Management Science*: Springer, 2020, pp. 1-14.

[43] S. Jørgensen and S.-P. Sigué, "Defensive, Offensive, and Generic Advertising in a Lanchester Model with Market Growth," *Dynamic Games and Applications*, vol. 5, no. 4, pp. 523-539, 2015/12/01 2015.

[44] G. M. J. M. L. Erickson, "Offensive and defensive marketing: Closed-loop duopoly strategies," pp. 285-295, 1993.

[45] G. J. J. o. E. D. Sorger and Control, "Competitive dynamic advertising: A modification of the Case game," vol. 13, no. 1, pp. 55-80, 1989.

۸- پیوست‌ها

جدول نمادها

نماد	مفهوم نماد	نماد	مفهوم
θ_{ij}	مقدار برداری شامل میزان تهدید هدف (Target) i ام در کنار تحمل‌پذیری دارایی (Asset) j ام	$[0,1]$ ،	مجموعه بسته از اعداد حقیقی در بازه مابین صفر و یک
T_i	هدف تهدیدی i ام در اینجا اهداف (Targets) به معنای موجودیت‌های تهدیدی هستند	$u_i(t)$ $u_k \in U_k$ $k=i \text{ or } j$	اقدام کنترلی بازیگر i ام
A_j	دارایی یا موجودیتی ارزشمند که در پی صیانت از آن هستیم	U_i	مجموعه فشرده بسته شامل تمام اقدامات کنترلی قابل انتخاب توسط بازیگران
θ_{ij}^{threat}	تابعی که به‌ازای هر زوج مرتب هدف - دارایی یک مقدار عددی مابین صفر و یک به‌عنوان تهدید نسبت می‌دهد	J_i	تابع هزینه برای مسئله بهینه‌سازی مطلوبیت بازیگر i ام
$\theta_{ij}^{tolerability}$	تابعی که به‌ازای هر زوج مرتب هدف - دارایی یک مقدار عددی مابین صفر و یک به‌عنوان تحمل‌پذیری نسبت می‌دهد	$\psi_i(.)$	هزینه نهایی بازیگر i ام
$\theta(t)$	بردار حالت شامل دو متغیر تهدید و تحمل‌پذیری	$L_i(.)$	هزینه بازیگر i ام به‌ازای هر مرحله از بازی