نشریه علمی «علوم و فناوری‌های پدافند نوین»
سال سیزدهم، شماره ۱، بهار ۱۴۰۱؛ ص ۱۱- ۱

علمی- پژوهشی

مدیریت نبردهای پویا با استفاده از الگوریتم‌های فوق‌یافتاری، سامانه‌های استنتاج فازی و درخت تصمیم

عبدالرضا اسدی‌قنبری[۱]، سیدعباس ساداتی‌نژاد[۲]، موسی محمدنیا[۳]، حسین علایی[۴*]

۱ و ۳- استادیار آکادمی هوش مصنوعی و فناوری‌های نوین، ۲- دانشگاه علم و صنعت ایران، ۴- استاد دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت:۲۵ /۰۹ /۱۴۰۰، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۱۷)

چکیده

امروزه تهدیدات ناشی از اهداف هوایی از مهم‌ترین چالش‌ها به شمار می‌آیند. دو مؤلفه اصلی در مدیریت این تهدیدات، تصویرسازی و تصمیم‌گیری بر اساس تصاویر ترسیم شده از آن‌ها است. در این فرآیند، تصمیمات بر اساس مدل‌سازی انجام شده از ارزیابی تهدیدات و تخصیص منابع اتخاذ می‌شوند. در همین راستا، به‌منظور تصویرسازی دقیق‌تر شرایط، ماهیت دنباله‌ای تخصیص منابع درنظر گرفته می‌شود. از این رو مدلی چند هدفه چند مرحله‌ای بر اساس سامانه استنتاج فازی و درخت تصمیم ارائه شده است. مهم‌ترین مزیت سامانه استنتاج فازی در قابلیت کار کردن آن با مقادیر زبانی نهفته است. مزیت اصلی درخت‌های تصمیم نیز ساختار گرافیکی و توانایی کار کردن آن‌ها با داده‌ها غیر کامل یا غیر استاندارد است. همچنین، از دو الگوریتم NSGA-II و SPEA-II برای یافتن راه‌حل‌های پارتو استفاده می‌شود. هر دو الگوریتم با استفاده سه معیار فاصله نسلی به‌عنوان معیار همگرایی، گستردگی به‌عنوان معیار تنوع و زمان محاسبات واقعی مقایسه می‌گردند. در پایان از روش TOPSIS جهت انتخاب تصمیم نهایی استفاده می‌شود، در حالی که نتایج با استفاده از یک سناریو شبیه‌سازی شده مورد تحلیل و بررسی قرار خواهند گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که SPEA-II دارای همگرایی و تنوع بهتری است، درحالی‌که NSGA-II سریع‌تر بوده و زمان اجرای آن دارای میزان انحراف از معیار کمتری است. ما معتقد هستیم که استفاده از سیستم سامانه استنتاج فازی برای کاربردهای عملی این حوزه مناسب‌تر از درخت تصمیم است. قطعاً در مواردی که با کمبود یا عدم‌هماهنگی در داده‌های ورودی روبه‌رو هستیم، درخت تصمیم می‌تواند انتخاب ارجح باشد.

کلیدواژه‌ها: تخصیص پویای منابع، الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیر مغلوب، الگوریتم تکاملی قدرت پارتو، سامانه‌های استنتاج فازی، درخت تصمیم

Dynamic Battle Management Using Meta-Heuristic Algorithms, Fuzzy Inference Systems and the Decision Tree

A. R. Asadi Ghanbari, S. A. Sadatinejad, M. Mohammadnia, H. Alaei*
Imam Hossein University
(Received: 16 /12 /2021; Accepted: 07 / 06 /2022)

Abstract

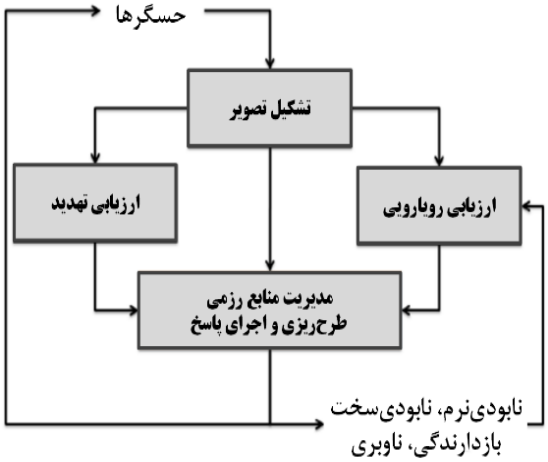
Nowadays, the threats caused by aerial targets are among the most critical challenges. Two main components in threat management are visualization and decision-making based on compiled pictures. In this process, the decisions are made based on threat evaluation and resource allocation modelling. To do so, the sequential nature of resource allocation is considered to provide a more accurately visualized situation. Here, a multi-stage multi-objective model is constructed based on the fuzzy inference system and the decision tree. Also, NSGA-II and SPEA-II are used to find Pareto solutions. Both Algorithms have been compared based on generational distance as a convergence measure, spread as a diversity measure, and the actual computational time. Ultimately, the TOPSIS method is used to make the final decision while the results are reported using a simulated scenario. The simulation results show that the SPEA-II has better convergence and spread, while NSGA-II is faster and has less standard deviation in the execution time. We believe that the fuzzy inference system is more suitable than the decision tree in practical applications. Nevertheless, when facing data shortage or incompatibility, the decision tree would be the preferred choice.

Keywords: Dynamic Resource Allocation (DRA); Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II); Strength Pareto Evolutionary Algorithm-II (SPEA-II); Fuzzy Inference Systems; Decision Tree.

*Corresponding Author E-mail: hossein.alaeiceo@gmail.com

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر به دلیل پیچیدگی بالای جنگ‌ها استفاده از سامانه‌های اتوماسیون در فرماندهی و کنترل[1] و به ویژه در سامانه‌های مدیریت منابع رزمی[2] رشد بسیار زیادی داشته است. تشکیل تصویر[3]، ارزیابی رویارویی و ارزیابی تهدید سه مؤلفه کلیدی در فرماندهی و کنترل و پیش‌نیاز مدیریت منابع رزمی می‌باشند (شکل ۱).



شکل ۱. بخش‌های اصلی یک سامانه فرماندهی و کنترل [۱]

پردازش تمامی موجودیت‌ها، اعمال و اقدامات به‌منظور ترسیم تصویری از شرایط حاکم بر فضای مورد توجه "تلفیق تصویر" نامیده می‌شود. این فرآیند یک مؤلفه کلیدی در رسیدن به آگاهی از وضعیت و پیش‌نیازهای اصلی فرآیند تخصیص سلاح است. در فرآیند ارزیابی رویارویی، قابلیت‌های نیروهای خودی برای مقابله با دشمن و در فرآیند ارزیابی تهدید، قابلیت‌های دشمن مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این سامانه‌ها پس از انجام فرآیند ارزیابی تهدید، واکنش به تهدیدها باید طراحی و در زمان مناسب اجراء گردد (این فرآیند در ادامه به اختصار تخصیص منابع نامیده می‌شود) [۱]. در انجام فرآیند ارزیابی تهدید، استدلال‌های صورت گرفته توسط سامانه باید شفاف و قابل ارائه به کاربر باشند؛ به عبارتی خط استدلال سامانه باید برای تصمیم‌گیرندگان روشن و قابل راستی آزمایی باشد. فرآیند تخصیص منابع نیز معمولاً به‌منظور دستیابی به اهداف مختلف و گاهی دارای تعارض انجام می‌شود و ماهیتاً مسئله‌ای چند هدفه است. همچنین ممکن است که لازم باشد پاسخ طراحی شده در طی مراحل مختلفی اجراء شود، بنابراین مدل تخصیص منابع علاوه بر چند هدفه بودن باید چند مرحله‌ای نیز باشد. در انجام فرآیند مدیریت منابع، زمان‌بندی اجراء، دیگر مسئله مهم در طرح‌ریزی پاسخ است که در آن به تعیین زمان‌های امکان‌پذیر برای جفت نمودن منبع - هدف پرداخته می‌شود (اولین و آخرین زمان ممکن برای انجام تخصیص). تمرکز این مقاله بر موضوع مدل‌سازی و حل مدل تخصیص منابع یا به بیان دقیق‌تر تعیین جفت‌های هدف - منبع با استفاده از معیارهای مختلفی مانند توابع هدف، دکترین، محدودیت‌ها و ... می‌باشد و جنبه زمان‌بندی مسئله تخصیص منابع مورد توجه نیست.

اغلب تحقیقات انجام شده بر روی مسئله تخصیص منابع ریشه در کاربردهای نظامی دارد که به دهه‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ برمی‌گردد [۲] و معمولاً مدل تخصیص منابع در قالب تئوری بازی[4] [۳] و یا تئوری بهینه‌سازی [۴] بیان می‌شود. مدل‌های ارائه شده بر اساس تئوری بهینه‌سازی می‌توانند متمرکز بر سناریوهای تهاجمی باشند (نمونه کارهایی که سال‌های ابتدایی در این حوزه انجام شده است) اما کارهایی که در سال‌های اخیر انجام می‌شوند به‌طور عمده متمرکز بر سناریوهای پدافندی هستند [۵ و ۶]. اغلب کارهای پیشین به حل مسئله تخصیص منابع ایستا[5] پرداخته‌اند و اولین مدل پویا یا چند هدفه تخصیص منابع به وسیله حسین و آتان در سال ۱۹۹۰ پیشنهاد شد و به شدت مورد توجه قرار گرفت [۷]. این مدل توسط محققان زیادی (مانند گل‌پینار و همکاران [۸]، داویس و همکاران [۹]، کال‌یانام و همکاران [۱۰]، آهنر و پارسون [۱۱]، برکتاس و همکاران [۵]) مورد استفاده مجدد قرار گرفت. در مطالعه صورت گرفته توسط اسدی‌قنبری و علایی [۱۲]، بهینه‌سازی چند هدفه برای مدل‌سازی مسئله تخصیص منابع استفاده شده است. یک بررسی جامع از رویکردهای مختلف مدل‌سازی مسئله تخصیص منابع اخیراً توسط کلین و همکاران انجام شده است [۱۳].

۲. طرح پیشنهادی

بررسی‌های صورت پذیرفته حکایت از آن دارد که در بسیاری از مدل‌سازی‌های پیشین که در حوزه تخصیص منابع انجام شده است به فرآیند ارزیابی تهدید توجه کافی نشده و معمولاً خروجی آن به‌عنوان یک ورودی معلوم مسئله درنظر گرفته شده است (در واقع فرآیند ارزیابی تهدید انجام نشده است). در این کارها، معیارهای تصمیم اغلب ناکافی و غیر کامل بوده و محدودیت‌های لحاظ شده در مدل واقعی نیستند. مسئله تخصیص منابع اغلب به‌عنوان یک فرآیند تخصیص یک مرحله‌ای درنظر گرفته شده و الگوریتم‌هایی که برای حل مسئله استفاده شده است در شرایط واقعی فاقد کاربرد می‌باشند. بنابراین در این مقاله برای رفع نواقص فوق تلاش شده است. به‌منظور مدل‌سازی واقع‌گرایانه مسئله تخصیص منابع، در انجام فرآیند تصمیم‌گیری مجموعه‌ای از

[1] Command and Control (C2)
[2] Combat Power Management (CPM)
[3] Picture Compilation
[4] Game Theory
[5] Static RA

معیارها درنظر گرفته شده و تلاش شده است که محدودیت‌های موجود در شرایط واقعی نیز در مدل‌سازی و حل آن لحاظ شوند. همچنین تعداد مراحل تخصیص بیشتر از یک مرحله درنظر گرفته شده و به‌منظور دستیابی به نتایج بهینه از روش‌های حل مناسب استفاده شده است. در مدل ارائه شده، f نشان دهنده تابع هدف، γ میزان ارجحیت (وزن) تابع هدف مورد نظر، L شماره معیار تصمیم و S تعداد مراحل درگیری در تابع کارایی (F) است. با توجه به چند هدفه بودن مدل ارائه شده برای تخصیص سلاح و بعد از ترسیم جبهه پارتو به وسیله الگوریتم‌های حل مدل، به‌منظور تعیین گزینه نهایی روش تصمیم‌گیری *TOPSIS* برای تلفیق نتایج استفاده می‌شود مورد استفاده قرار گرفته است.

به‌منظور استفاده از خبرگی انسان در فرآیند ارزیابی تهدید از سامانه‌های استنتاج فازی استفاده شده است [۱۴ و ۱۵]. در بسیاری از نبردها داده‌های دریافتی ممکن است از ساختار مناسب برخودار نباشند؛ بنابراین به‌منظور فراهم نمودن امکان کار با داده‌های غیر استاندارد برای سامانه و همچنین شفاف و قابل بررسی نمودن خط استدلال سامانه برای کاربران، علاوه بر سامانه‌های فازی از درخت تصمیم نیز برای انجام فرآیند ارزیابی تهدید استفاده شده است [۱۶]. در این مقاله برای حل مدل چند هدفه تخصیص منابع، الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیر مغلوب و الگوریتم تکاملی قدرت پارتو مورد استفاده قرار خواهند گرفت. با توجه به ماهیت خروجی الگوریتم‌های فوق، حل مدل منجر به تولید مجموعه‌ای از پاسخ‌های بهینه در قالب جبهه پارتو[1] می‌گردد، همچنین به‌منظور تجمیع نتایج و تعیین یک راه‌حل نهایی، روش تصمیم‌گیری *TOPSIS*[2] مورد استفاده قرار گرفته است [۱۷].

در این مقاله در بخش دوم طرح پیشهادی برای مدیریت منابع رزمی ارائه شده است، در این بخش ابتدا تعاریف و فرض‌های مورد نیاز برای انجام مدل‌سازی مدیریت منابع تسلیحاتی و مدل چند هدفه- چند مرحله‌ای تخصیص منابع ارائه می‌گردد. سپس در بخش دوم، فرآیند ارزیابی تهدید که مقادیر تهدید را به زوج‌های هدف-دارایی تخصیص می‌دهد تشریح می‌شود. در ادامه، روش‌های حل مسئله که شامل الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیر مغلوب و الگوریتم تکاملی قدرت پارتو می‌باشد، ارائه شده است. در بخش ارزیابی طرح، مدل پیشنهاد شده با استفاده از سناریویی فرضی مورد آزمایش قرار خواهد گرفت. در ادامه، مطالب ارائه شده جمع‌بندی شده و پیشنهاداتی برای انجام تحقیقات آتی ارائه می‌گردد.

[1] Pareto Front
[2] Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)

۲-۱. شرح مسئله و مدل‌سازی مسئله تخصیص منابع

مسئله تخصیص منابع پدافندی شامل سه مؤلفه کلیدی است: فضای مورد توجه، تهدیدها و ابزارهای مقابله با تهدید (منابع). در این مقاله فرض می‌شود که تهدیدهای مهاجم قبلاً کشف، ردگیری و شناسایی شده‌اند و مقدار هدف (V_{ij}) برای نمایش مقدار تهدید[3] ایجاد شده توسط آن‌ها برای دارایی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد (جدول ۱).

جدول ۱. نمادها و نشانه‌گذاری‌ها

مجموعه‌ها:
T_i: مجموعه تهدیدهای شناسایی شده $i=1,2,\cdots,I$.
w_k: مجموعه منابع $k=1,2,\cdots,K$.
A_j: مجموعه دارایی‌های $j=1,2,\cdots,J$.
$s=1,2,\cdots,S$: مجموعه مراحل رویارویی.
پارامترها:
P_{ik}: اثربخشی تخمینی؛ یعنی احتمال اینکه منبع $w_k \in W$ تهدید $T_i \in T$ را بی‌اثر کند، در صورتی که به آن تهدید تخصیص داده شود.
π_{ij}: احتمال اینکه تهدید $T_i \in T$ دارایی $A_j \in A$ را نابود کند.
V_{ij}: مقدار تهدید زوج تهدید-دارایی (T_i, A_j).
ω_j: ارزش محافظت از دارایی $A_j \in A$.
C_{ik}: میزان هزینه استفاده از منابع، هنگام تخصیص منبع $w_k \in W$ به تهدید $T_i \in T$.
متغیرها:
$X_{ik}=\begin{cases}1 & \text{اگر منبع } w_k \in W \text{ به تهدید } T_i \in T \text{ تخصیص داده شود}\\ 0 & \text{در غیر این صورت}\end{cases}$
$\left[X_{ik}^s\right]_{I\times K}$: ماتریس تصمیم در مرحله S.

در این مقاله مقدار هدف به‌عنوان سطح تهدیدی تعریف می‌گردد که از سوی مهاجم T_i برای دارایی A_j ایجاد می‌شود و با استفاده از درخت تصمیم و سامانه استنتاج فازی محاسبه خواهد شد. سناریوی پدافندی مورد بررسی شامل چندین دارایی پدافندی است که توسط دشمن مهاجم تهدید می‌شوند و مرکز فرماندهی و کنترل با مجموعه‌ای از منابع برای مقابله با آن‌ها تجهیز شده است. برای هر منبعی که به‌منظور مبارزه با دشمن به‌کار گرفته می‌شود دو پارامتر P_{ik} (میزان اثربخشی در کنترل) و C_{ik} (هزینه استفاده) تعریف می‌گردد. این پارامترها به‌عنوان ورودی سامانه تخصیص منابع درنظر گرفته می‌شوند و فرض می‌گردد که مقدار آن‌ها از قبل تعیین شده است. در هر مرحله از رویارویی با دشمن، فرمانده می‌تواند که تعداد k منبع $(0\le k\le |W|)$ را برای مقابله با آن مورد استفاده قرار دهد.

[3] Threat Value

در این مقاله فرض می‌شود که تخصیص منابع یک مسئله چند مرحله‌ای و چند معیاره است که به‌صورت زیر مدل شده است:

$$\max U = \sum_{s=1}^{S} F\left(\gamma_l^s, f_l^s\right) \quad l = 1,...,\mathrm{L} \qquad (۱)$$

در این مدل، f نشان دهنده تابع هدف، L شماره معیار تصمیم، s مرحله مورد نظر، γ میزان ارجحیت (وزن) تابع هدف مورد نظر و F تابع کارایی است. در هر مرحله، F ترکیبی از مقادیر بهینه توابع $f_1, f_2 \; and \; f_3$ به‌صورت زیر است:

$$\min_{X_{ik}\in\{0,1\}} f_1, f_2, f_3$$

$$s.t \quad f_1 = \sum_{i=1}^{I} V_i \prod_{k=1}^{K} (1-P_{ik})^{X_{ik}}$$

$$f_2 = \sum_{k=1}^{K}\sum_{i=1}^{I} C_{ik} X_{ik} \qquad (۲)$$

$$f_3 = \sum_{j=1}^{J} \omega_j . \left\{ \sum_{i=1}^{I} \pi_i . \prod_{k=1}^{K} (1-X_{ik}) \right\}$$

که در آن، f_1، f_2 و f_3 به ترتیب عبارتند از: مجموع احتمال بقای تهدید ایجاد شده توسط اهداف[1] مهاجم، مجموع هزینه‌های استفاده از منابع[2] و مجموع ریسک تخصیص منابع[3]. در این توابع هدف، X_{ik} متغیر تصمیم بوده که مقادیر مختلف $f_i, \quad i = 1,2,3$ و خروجی نهایی مسئله تخصیص منابع را تعیین می‌کند. در شرایط واقعی مقادیر $\gamma_1^s,...,\gamma_l^s$، S و تابع F به وسیله تصمیم‌گیرندگان تعیین می‌گردد. در این مقاله فرض می‌شود که $L = 3$، $S = 2$ و روش تصمیم‌گیری TOPSIS به‌منظور الحاق توابع هدف و تعیین وزن‌های آن‌ها (γ) در تابع کارایی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲-۲. ارزیابی تهدید

در یک سامانه مدیریت رزمی، ارزیابی تهدید پیش‌نیاز انجام تخصیص منابع بوده اما بر خلاف مسئله تخصیص منابع، تحقیقات بسیار زیادی در مورد آن منتشر نشده است. الگوریتم‌های قاعده محور[4] [۱۸]، منطق فازی[5] [۱۹]، شبکه‌های عصبی مصنوعی[6] [۲۰] و مدل‌های گرافیکی[7] [۲۱] از جمله رویکردهای مهمی هستند که برای انجام فرآیند ارزیابی تهدید مورد استفاده قرار می‌گیرند. خروجی فرآیند ارزیابی تهدید معیاری است که نشان دهنده میزان تهدید ایجاد شده از سوی هدف T_i برای دارایی A_j است. به عبارتی هدف اصلی در این فرآیند، تعریف تابع $f : T \times A \to [0,1]$ می‌باشد. در فرآیند ارزیابی تهدید مقدار خروجی تابع f که مقدار هدف نامیده می‌شود باید برای هر زوج هدف-دارایی $\left(T_i, A_j\right)$ محاسبه شود. به بیان دقیق‌تر در فرآیند ارزیابی تهدید، تهدیدهای شناسایی شده، دسته‌بندی شده و تهدیدهای درون هر دسته بر اساس ویژگی‌های آن‌ها رتبه‌بندی می‌شوند. پارامترهایی که در این مقاله به‌منظور تعیین تابع f مورد استفاده قرار می‌گیرند، عبارتند از:

۱. **پارامترهای قرابت:** این دسته از پارامترها میزان نزدیکی اهداف مهاجم به دارایی‌های پدافندی را اندازه‌گیری می‌کنند. از جمله پارامترهای کلیدی که در بسیاری از الگوریتم‌های ارزیابی تهدید مورد استفاده قرار می‌گیرند، نزدیک‌ترین نقطه دسترسی[8] و زمان پیش از برخورد[9] است.

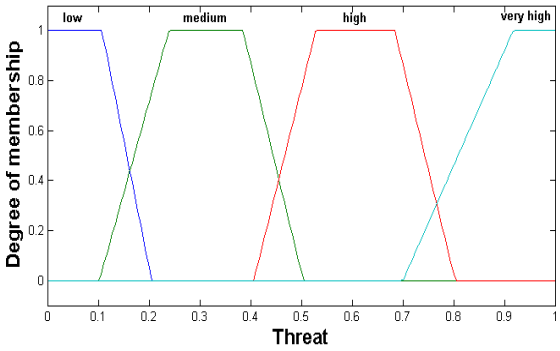
۲. **پارامترهای قابلیت:** این پارامترها به توانایی اهداف برای تهدید دارایی پدافند شده اشاره دارند. در این دسته، پارامتر اصلی نوع هدف[10] است که می‌تواند از پارامترهای دیگری مانند پاسخ به شناسایی دوست یا دشمن[11]، اقدامات پشتیبانی الکترونیکی[12]، سرعت و مواردی از این قبیل استخراج شود.

۳. **پارامترهای نیت:** پارامترهای مرتبط با نیت شامل دسته‌ای گسترده بوده و ویژگی‌هایی را شامل می‌شوند که می‌توانند چیزی را در مورد نیت هدف آشکار کنند. جنبش شناسی هدف یک نمونه از این ویژگی‌ها است. به‌عنوان مثال تندی هدف[13] (یعنی سرعت و جهت) در ترکیب با ارتفاع می‌تواند یک شاخص خوب تعیین نیت هدف برای حمله به یک دارایی پدافندی باشد.

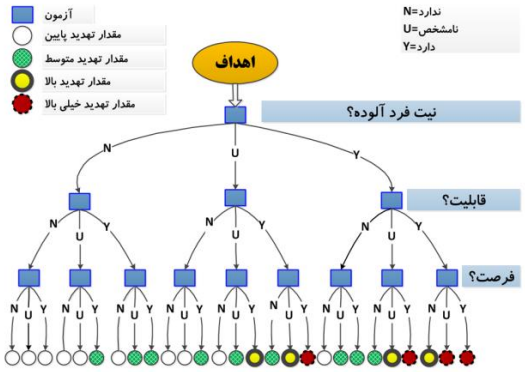
شایان ذکر است که کارهای تحقیقاتی انجام گرفته در حوزه ارزیابی تهدید بسیار محدود بوده و یا به‌صورت محدود منتشر شده‌اند. یکی از دلایل اصلی این مسئله، محرمانه بودن اقدامات داخلی انجام شده در حوزه سامانه‌های ارزیابی تهدید و نیازمندی آن‌ها به صرف هزینه‌های بسیار بالا است [۱۲]. دلیل دیگر این موضوع این است که طراحان این سامانه‌ها، اغلب تمایلی ندارند که ضعف سامانه‌های آن‌ها برای رقیبان آشکار گردد و به همین دلیل از انتشار جزئیات فرآیند ارزیابی تهدید طراحی شده در سامانه‌های پدافندی، خودداری می‌نمایند. در ادامه مقاله در حالی که سامانه استنتاج فازی (شکل ۲) و درخت تصمیم (شکل ۳) برای تعیین

[1] The Total Expected Threat Value (ETV) of Targets
[2] The Cost of the Resource Usage (CRU)
[3] The Resource Allocation Risk (RAR)
[4] Rule-based Algorithms
[5] Fuzzy Logic
[6] Artificial Neural Networks
[7] Graphical Models
[8] Closest Point of Approach (CPA)
[9] Time Before Hit (TBH)
[10] Target Type
[11] Identification Friend or Foe (IFF)-Interrogation
[12] Electronic Support Measures
[13] The Target's Velocity

تابع f استفاده می‌شود، زمان پیش از برخورد، فاصله، ارتفاع و سرعت به‌عنوان پارامترهای ورودی فرآیند ارزیابی تهدید مورد استفاده قرار خواهند گرفت.



شکل ۲. توابع عضویت میزان تهدید ایجاد شده توسط اهداف مهاجم (متغیر خروجی) در سامانه استنتاج فازی



شکل ۳. استفاده از درخت تصمیم برای انجام ارزیابی تهدید

یک سامانه استنتاج فازی شامل سه مؤلفه کلیدی است: یک پایگاه قواعد که شامل قواعد اگر-آنگاه فازی است و به وسیله مجموعه‌ای از مقادیر مورد نظر فعال می‌گردند، یک پایگاه داده که شامل توابع عضویتی است که در قواعد استنتاج فازی استفاده می‌شوند و یک موتور استنتاج یا رویه استنتاج[1] که بر اساس قواعد فازی فعال شده[2]، استنتاج‌های لازم را انجام می‌دهد. در این مقاله یک مدل فازی ممدانی[3] با سه ورودی و یک خروجی برای محاسبه مقادیر هدف استفاده می‌شود. در سامانه فازی استفاده شده در این مقاله برای هر پارامتر ورودی (*زمان پیش از برخورد*، *فاصله*، *ارتفاع* و *سرعت*) سه تابع عضویت تعریف شده است. این توابع عضویت هر نقطه را در فضای ورودی به یک مقدار عضویت در بازه $[0,1]$ نگاشت می‌کنند. این توابع عضویت بر اساس دانش افراد خبره این حوزه طراحی شده است. توابع عضویت استفاده شده برای متغیر خروجی (یعنی تهدید) در شکل (۲) نمایش داده شده است.

مثالی از قواعد استنتاج فازی استفاده شده در جدول (۲) ارائه شده است. در این گزاره‌ها عدد داخل پرانتز نشان دهنده وزن قانون مورد نظر است. با توجه به پارامترهای مورد استفاده در فرآیند ارزیابی تهدید و توابع عضویتی که برای هر کدام از این پارامترهای ورودی تعریف شده است، در موتور استنتاج فازی از ۸۱ قانون استفاده شده است. برخی از این قوانین دارای وزن صفر هستند؛ این قوانین در شرایط واقعی امکان‌پذیر نیستند.

جدول۲. مثالی از قواعد استنتاج فازی در پایگاه قواعد

If *(TBH is short)* **and** *(Distance is close)* **and** *(Speed is high)* **and** *(Height is low)* **then** *(Theart is very_high)* **(1)**
If *(TBH is long)* **and** *(Distance is close)* **and** *(Speed is medium)* **and** *(Height is medium)* **then** *(Theart is low)* **(1)**
If *(TBH is medium)* **and** *(Distance is far)* **and** *(Speed is medium)* **and** *(Height is low)* **then** *(Theart is medium)* **(1)** **If** *(TBH is short)* **and** *(Distance is close)* **and** *(Speed is high)* **and** *(Height is low)* **then** *(Theart is low)* **(0)**

در این مقاله در درخت تصمیم از ورودی‌هایی مشابه با سامانه استنتاج فازی استفاده شده و خروجی سامانه، دسته‌بندی تهدیدها و رتبه‌های آن‌ها در هر دسته می‌باشد. درخت تصمیم، تهدیدها را در سه حوزه مورد ارزیابی قرار می‌دهد: نیت، قابلیت و فرصت. زمان پیش از برخورد، فاصله، ارتفاع و سرعت معیارهایی هستند که برای اندازه‌گیری این پارامترها استفاده می‌شوند. برای انجام این ارزیابی از قوانین مختلفی که از ساختار زیر پیروی می‌کنند، استفاده می‌شود:

IF indicator 1 **AND** indicator 2 **AND** …. **AND** indicator **n THEN** intent/capability/opportunity **TRUE**

با استفاده از خروجی‌های این قوانین، تهدیدها در چهار دسته قرار داده می‌شوند: "خیلی بالا"، "بالا"، "متوسط" و "پایین" (شکل ۳). در درخت تصمیم، پارامترهای ارزیابی تهدید بر اساس اهمیت آن‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. در این فصل بالاترین اولویت به نیت تخصیص داده شده است و قابلیت و فرصت به ترتیب در اولویت‌های دوم و سوم قرار دارند. در این فصل فقط تهدیدهای (گره‌ها) با سطح تهدید "خیلی بالا" در فرآیند تخصیص سلاح مورد توجه قرار می‌گیرند. در درخت تصمیم، اهداف علاوه بر دسته‌بندی، بر اساس اولویت (وزن) نیز رتبه‌بندی می‌شوند. بنابراین، گره‌های برگ با سطح تهدید یکسان که در سمت راست‌تر درخت واقع شده‌اند دارای اولویت بالاتری هستند.

[1] Inference Procedur
[2] Fired Fuzzy Rules
[3] Mamdani Fuzzy Model

۲-۳. روش‌های حل مسئله

پس از انجام ارزیابی تهدید و مدل‌سازی تخصیص منابع، یافتن پاسخ بهینه، دیگر مسئله مهم در یک سامانه مدیریت منابع رزمی است. فرآیند طرح‌ریزی تخصیص منابع با وجود فرض‌های ساده کننده و گسسته‌سازی مسئله دارای ماهیت ان‌پی کامل[1] است؛ از این رو فراهم نمودن الگوریتم‌های حل کارا برای آن از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است [۱۳]. در متون این حوزه رویکردهای مختلفی شامل روش‌های شمارشی[2] ([۱۶])، روش‌های یافتاری/تقریبی[3] ([۲۲]) و روش‌های فوق‌یافتاری[4] ([۲۳]) برای حل این مسئله به‌کار گرفته شده است. الگوریتم‌های تکاملی به‌عنوان کاربردی از روش‌های فوق‌یافتاری به دلیل اینکه از مجموعه‌ای از راه‌حل‌ها (در قالب جمعیت) استفاده می‌کنند و این امکان را فراهم می‌سازند که بتوان بخش‌های مختلفی از جبهه پارتو را در یک اجرای الگوریتم پیدا نمود از جمله بهترین رویکردها برای حل مسئله تخصیص منابع چند هدفه می‌باشند. از دیگر مزایای مهم این الگوریتم‌ها نسبت به روش‌های برنامه‌ریزی ریاضی[5] سنتی، حساسیت کمتر آن‌ها نسبت به ناپیوستگی و شکل جبهه پارتو است [۲۴]. علاوه بر این، الگوریتم‌های تکاملی می‌توانند با یک رویکرد همه‌زمانه اجراء شوند و خروجی آن‌ها با گذر زمان بهبود پیدا کند. این ویژگی الگوریتم‌های تکاملی در حوزه مدیریت منابع رزمی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است.

۲-۳-۱. الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیر مغلوب

الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیر مغلوب توسط دِب و همکارانش در سال ۲۰۰۲ پیشنهاد شد [۲۵]. این الگوریتم بر مبنای مفاهیم پارِتو بوده و با اضافه شدن دو عملگر ضروری به الگوریتم ژنتیک تک هدفی معمولی به یک الگوریتم چند هدفه تبدیل شده است. این الگوریتم به جای یافتن بهترین پاسخ، دسته‌ای از بهترین پاسخ‌ها را نتیجه می‌دهد. این دو عملگر عبارتند از: ۱) عملگری که یک معیار برتری (رتبه) را بر اساس مرتب‌سازی نامغلوب به اعضای جمعیت اختصاص می‌دهد و ۲) عملگری که تنوع راه‌حل را در میان راه‌حل‌های با رتبه برابر حفظ می‌کند. بنابراین با استفاده از دو معیار فوق یک عملگر مقایسه به‌صورت زیر ارائه می‌گردد:

$$x \prec y \Leftrightarrow if\ \left(x_{rank} < y_{rank}\right) \\ elseif\ \left(x_{rank} = y_{rank}\right) \\ \left(\ cd(x) > cd(y)\right) \qquad (۳)$$

در الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیر مغلوب از روش ترکیب جمعیت موجود با فرزندان به وجود آمده و انتخاب بهترین افراد از بین آن‌ها استفاده می‌شود. بدین منظور ابتدا افراد جمعیت بر اساس رتبه *(rank)* مرتب شده و سپس آن‌ها دوباره بر اساس معیار فاصله ازدحامی *(cd)* مرتب می‌شوند. درنهایت برترین افراد از بین جمعیت مرتب شده بر اساس دو معیار رتبه و فاصله ازدحامی به نسل بعد منتقل می‌شوند.

۲-۳-۲. الگوریتم SPEA-II

الگوریتم‌های تکاملی قدرت پارتو[6] ۱ و ۲ (*SPEA* و *SPEA-II*) توسط زیتزلر و همکاران او ارائه شده‌اند. این الگوریتم‌ها از یک آرشیو خارجی برای ذخیره‌سازی پاسخ‌های نامغلوبی که در طی جستجوی الگوریتم یافت می‌شوند، استفاده می‌کنند. در الگوریتم *SPEA* ضعف‌هایی در محاسبه مقادیر قدرت برازندگی وجود داشت [۲۶] و همچنین معیاری ثانویه برای مقایسه پاسخ‌های نامغلوب در آن گنجانده نشده بود. از این رو زیتزلر و همکاران نسخه دوم این الگوریتم *(SPEA-II)* را که ضعف‌های فوق در آن برطرف شده بود، ارائه نمودند [۲۶]. الگوریتم *SPEA-II* نسبت به نسخه قبلی دارای مزایای زیر است:

- تضمین حفظ راه‌حل‌های مرزی[7]؛
- هدایت الگوریتم جستجو به شکل مؤثرتر؛
- به‌کارگیری استرتژی تخصیص برازندگی دقیق‌تر[8].

در این مقاله الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیر مغلوب و الگوریتم تکاملی قدرت پارتو با کدینگ عدد صحیح، برش تک نقطه‌ای[9] جهش رشته بیتی[10] برای حل مسئله تخصیص منابع استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیر مغلوب و الگوریتم تکاملی قدرت دو الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه کارا می‌باشند که پیچیدگی محاسباتی آن‌ها $O(M.N^2)$ است که M تعداد توابع هدف و N اندازه جمعیت است [۲۷].

۲-۳-۳. معیارهای کارایی

حفظ نخبگان[11] و حفظ تنوع[12] در راه‌حل‌ها دو هدف مهم در بهینه‌سازی چند هدفه است. بنابراین، برای مقایسه دو الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه، باید حداقل از دو معیار کارایی زیر استفاده شود [۲۵]:

[1] NP-complete
[2] Enumerative Techniques
[3] Heuristic
[4] Meta-heuristic
[5] Mathematical Programming Methods

[6] Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA)
[7] Guarantees Boundary Solutions
[8] Fine-grained Fitness Assignment Strategy
[9] Single-point Crossover
[10] Bit String Mutation
[11] Elite-preserving
[12] Diversity-preserving

- فاصله نسلی[1] به‌عنوان معیار همگرایی [۲۸]:

$$GD = \frac{1}{|Q|}\sqrt{\sum_{q=1}^{|Q|} Ed_q^2} \qquad (۴)$$

که در آن، Ed_q فاصله اقلیدسی[2] میان راه‌حل در یک مجموعه غیر مغلوب (Q) و نزدیک‌ترین عضو مجموعه بهینه پارتو (P*) است:

$$Ed_q = \min_{k=1}^{|P^*|}\sqrt{\sum_{l=1}^{L}(f_l^{(q)} - f_l^{*(k)})^2} \qquad (۵)$$

در اینجا L نشان دهنده تعداد توابع هدف و $f_l^{*(k)}$ مقدار تابع هدف k-امین عضو مجموعه بهینه پارتو (P*) در l-امین تابع هدف است. الگوریتمی که مقدار فاصله نسلی *(GD)* کمتری داشته باشد مطلوب‌تر است.

- گستردگی[3] به‌عنوان معیار تنوع [۲۵]:

$$\Delta = \frac{\sum_{l=1}^{L} d_l^e + \sum_{q=1}^{|Q|}\left|d_q - \bar{d}\right|}{\sum_{l=1}^{L} d_l^e + |Q|\bar{d}} \qquad (۶)$$

که در آن، d_q می‌تواند هر معیار فاصله میان راه‌حل‌های همسایه باشد و $\bar{d}$ مقدار متوسط این معیار فاصله است. در این مقاله d_q با استفاده از فاصله ازدحامی[4] محاسبه می‌شود [۲۵]. d_l^e فاصله میان دورترین راه‌حل‌ها در Q و P* برای هر یک از توابع هدف است. هنگامی که $\Delta = 0$ یعنی توزیع راه‌حل‌ها در حالت ایده‌آل است و در حالی که $\Delta > 1$ نشان دهنده یک توزیع نامناسب است.

۳. ارزیابی طرح

در این بخش، به‌منظور آزمایش مدل ارائه شده، سناریویی درنظر گرفته شده است که در آن دارایی‌های پدافند شده توسط مجموعه‌ای از اهداف مهاجم مورد حمله قرار می‌گیرند. این سناریو شامل ۱۰ سلاح پدافندی، ۴ دارایی پدافند شده و ۱۰۰ هدف مهاجم است. مشخصات مهم تهدیدهای مهاجم که در مدل‌سازی تخصیص منابع مورد استفاده قرار گرفته است در جدول (۳) نمایش داده شده است. همچنین واحدهای پدافند هوایی (سامانه‌های سلاح) خود نیز می‌توانند به‌عنوان دارایی تلقی شوند؛ زیرا که سامانه‌های سلاح علاوه بر ارزش ذاتی خود، تنها محافظین دارایی‌های پدافند شده در مقابل اهداف متخاصم می‌باشند. نابودی این سامانه‌های دفاعی، سایر دارایی‌های پدافند شده باقی‌مانده را به یک هدف آسان برای نیروهای مهاجم تبدیل می‌کند. در این مقاله در فرآیند ارزیابی تهدید، تهدیدها در ۴ سطح دسته‌بندی می‌شوند: خیلی‌بالا، بالا، متوسط و پایین. مدل تخصیص منابع با استفاده از دو الگوریتم *NSGA-II* و *SPEA-II* حل شده و با توجه به ویژگی تهدیدها، منابع در اختیار به‌صورت بهینه به آن‌ها اختصاص داده می‌شود.

با استفاده از سناریویی که بازه تغییرات پارامترهای آن در جدول (۳) ارائه شده است دو الگوریتم *NSGA-II* و *SPEA-II* مورد مقایسه قرار گرفته است. در این شبیه‌سازی مقدار نرمال شده توابع هدف، با استفاده از فاصله نسلی به‌عنوان معیار همگرایی، گستردگی (Δ) به‌عنوان معیار تنوع و زمان انجام محاسبات، برای مقایسه نتایج استفاده شده است. بهترین جبهه پارتو غیر مغلوب حاصل از ترکیب جبهه پارتو به‌دست آمده از ۵۰ اجرای مستقل هر یک از الگوریتم‌ها با تعداد ۳۰۰ نسل[5] برای محاسبه این معیارها استفاده شده است. نتایج به‌دست آمده شامل: متوسط، انحراف از معیار، حداقل و حداکثر مقدار معیارهای مقایسه می‌باشد که در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول ۳. پارامترهای الگوریتم ارزیابی تهدید

مقیاس	بازه تغییرات	پارامترهای ورودی
ثانیه	[۰، ۱۰۰۰]	زمان پیش از برخورد
متر	[۰، ۱۰۰۰۰۰]	فاصله
متر	[۰، ۷۰۰۰]	ارتفاع
کیلومتر/ساعت	[۰، ۲۵۰۰]	سرعت

جدول ۴. معیارهای کارایی برای الگوریتم‌های *NSGA-II* و *SPEA-II*

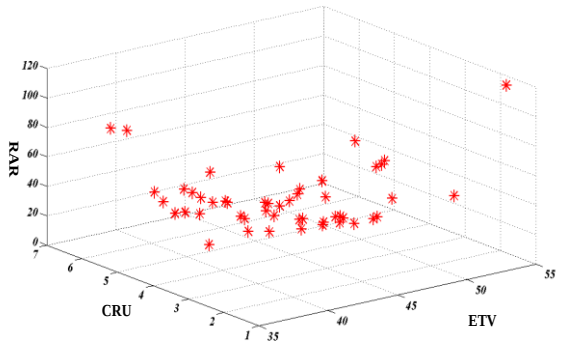
	گستردگی		فاصله نسبی		زمان اجرا	
	NSGA-II	SPEA-II	NSGA-II	SPEA-II	NSGA-II	SPEA-II
Mean	۰/۰۳۱۸	۰/۰۱۴۱	۰/۰۰۸۶	۰/۰۰۵۴	۳۷/۵	۵۲/۶
SD	۰/۰۰۵۷	۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۰۵	۰/۵	۱/۲
Min	۰/۰۰۷۵	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۷۴	۰/۰۰۳۶	۳۶/۶	۴۹/۴
Max	۰/۰۶۲۹	۰/۰۲۴۲	۰/۰۲۳۱	۰/۰۰۴۹	۳۸/۹	۶۷/۶

برای اجرای کدهای نرم‌افزار متلب و محاسبه زمان واقعی محاسبات از یک رایانه با مشخصات پردازنده هفت هسته‌ای ۳ گیگاهرتز، ۱۵ گیگا بایت رم و دارای سیستم عامل ویندوز ۱۰ استفاده شد. علاوه بر این، بهترین مجموعه بهینه پارتو به‌دست

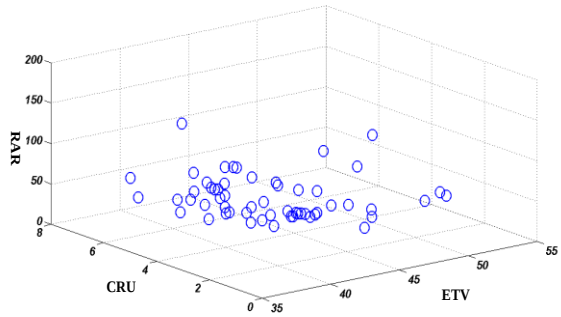
[1] Generational Distance
[2] Euclidean Distance
[3] Spread
[4] Crowding Distance
[5] Generations

آمده از این ۵۰ اجرا (با توجه به معیارهای کارایی) در شکل‌های (۴ تا ۷) نشان داده شده است.

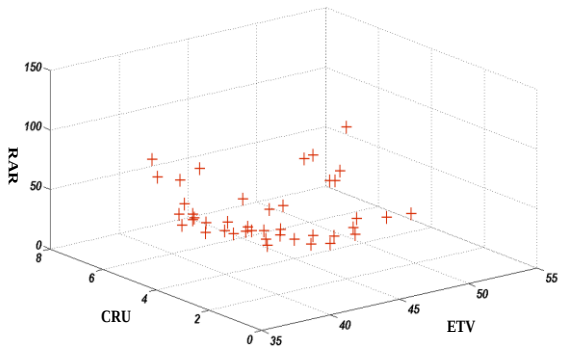
همان‌طور که در جدول (۴) مشاهده می‌شود، الگوریتم *SPEA-II* در حل مدل نتایج بهتری نسبت به الگوریتم *NSGA-II* را ارائه می‌دهد. در واقع راه‌حل‌های ارائه شده توسط این الگوریتم به دلیل استراتژی حفظ تنوع قوی‌تر، از تنوع بهتری برخوردار هستند (به‌عنوان مثال در معیار میزان متوسط گستردگی ۰/۰۱۴۱ در مقابل ۰/۰۳۱۸). به همین دلیل، الگوریتم *SPEA-II* دارای همگرایی بهتری نیز می‌باشد (به‌عنوان مثال در میزان متوسط فاصله نسلی مقدار ۰/۰۰۵۴ در مقابل ۰/۰۰۸۶). از طرف دیگر الگوریتم *SPEA-II* دارای نقطه ضعف بزرگی است که این ضعف، زمان اجرای بالاتر آن است (به‌عنوان نمونه در میزان متوسط زمان اجرا ۵۲/۶ در مقابل ۳۷/۵). با توجه به فاکتور کلیدی و مهم زمان و همچنین این واقعیت که الگوریتم *NSGA-II* دارای میزان انحراف از معیار بسیار کمتری نسبت به الگوریتم *SPEA-II* است، اعتقاد بر این است که الگوریتم *NSGA-II* انتخاب بهتری برای اهداف عملی است. در شکل‌های (۴ تا ۷) جبهه‌های بهینه پارتو برای مدل تخصیص منابع چند هدفه با استفاده از الگوریتم‌های *NSGA-II* و *SPEA-II* ترسیم شده است.



شکل ۴. حل مدل تخصیص منبع با استفاده از الگوریتم NSGA-II و درخت تصمیم [۲۴]



شکل ۵. حل مدل تخصیص منبع با استفاده از الگوریتم NSGA-II و سامانه استنتاج فازی [۲۴]



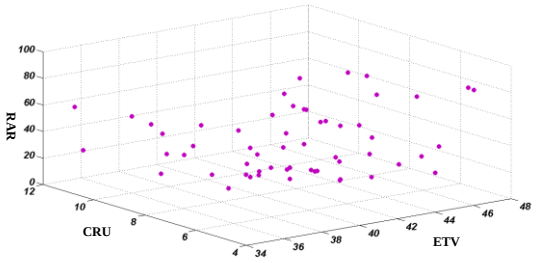
شکل ۶. حل مدل تخصیص منبع با استفاده از الگوریتم SPEA-II و درخت تصمیم [۲۴]

در پیاده‌سازی مدل تخصیص منابع از یک درخت تصمیم و یک سامانه استنتاج فازی برای انجام فرآیند ارزیابی تهدید استفاده شده است. این دو روش انجام ارزیابی تهدید دارای مزایای مشترک مختلفی هستند: هر دو روش مذکور از "خبرگی" برای بهبود میزان کارایی سامانه استفاده می‌نمایند. همچنین این دو روش از "خبرگی" برای تعیین قواعد استفاده می‌کنند؛ به‌عبارت دیگر در درخت تصمیم برای تعیین حدود آستانه و در سامانه استنتاج فازی برای تعیین توابع عضویت استفاده می‌شود. در هر دو رویکرد خط استدلال سامانه می‌تواند به کاربران ارائه شود که این ویژگی باعث افزایش اعتماد کاربر به سامانه می‌گردد. یکی از مزایای درخت تصمیم نسبت به سامانه استنتاج فازی، سادگی و ویژگی گرافیکی آن است که همه استراتژی‌ها را در قالب یک نمودار نمایش می‌دهد. علاوه بر این، در درخت تصمیم تمامی فرض‌ها صریحاً بیان شده و می‌توانند با استفاده از تحلیل حساسیت[1] مورد آزمون قرار گیرند؛ ولی در سامانه استنتاج فازی، فرض‌های ضمنی[2] مختلفی انجام می‌شود که می‌تواند منجر گردد تا سامانه برای فرماندهان بیشتر حالت جعبه سیاه[3] را داشته باشد و همچنین دنبال نمودن منطق گام‌های تصمیم‌گیری برای آن‌ها دشوارتر شود. از دیگر سو، استفاده از منطق فازی باعث می‌گردد با وجود تغییرات مشابه در ورودی، در خروجی تغییرات نرم‌تری نسبت به درخت تصمیم روی دهد. شایان ذکر است در درخت تصمیم با افزایش تعداد حالات می‌توان میزان تغییرات ناگهانی در خروجی سامانه را کاهش داد، اما این مسئله باعث افزایش هزینه‌های محاسباتی می‌گردد.

سامانه استنتاج فازی در مقایسه با درخت تصمیم دارای پارامترهای کنترلی بیشتری است و این مسئله میزان انعطاف‌پذیری آن را افزایش می‌دهد. این ویژگی سامانه استنتاج فازی می‌تواند انتخاب عملگر/پارامتر مناسب را در این روش به یک

[1] Sensitivity Analysis
[2] Implicit
[3] Black Box

مسئله‌ی حیاتی تبدیل نماید. این مسئله در درخت تصمیم وجود ندارد اما تعیین حدود آستانه در درخت تصمیم یک مسئله کلیدی وابسته به حوزه است که نیازمند تبحر و خبرگی است. با وجود اینکه در هر دو روش از خبرگی برای تعیین قواعد استفاده می‌گردد، قواعد تعریف شده در درخت تصمیم دارای مقادیر قطعی[1] هستند ولی فرماندهان اغلب برای بیان پارامترهای یک هدف مهاجم (مانند ارتفاع، سرعت، فاصله و مواردی از این قبیل) از متغیرهای زبانی[2] استفاده می‌کنند. در چنین شرایطی سامانه استنتاج فازی مناسب‌تر به نظر می‌رسد. یکی از معایب منطق فازی در چنین شرایطی کمبود دانش و عدم تسلط فرماندهان بر مفاهیم فازی است. دیگر مزیت مهم درخت تصمیم نسبت به سامانه استنتاج فازی، قابلیت آن در مواجهه با اطلاعات ناقص[3] و ناهمگن[4] است، در حالی که استفاده از سامانه استنتاج فازی نیازمند داده‌های ورودی کامل در یک قالب استاندارد است. این واقعیت می‌تواند در حوزه مدیریت منابع رزمی بسیار حائز اهمیت باشد؛ زیرا در اغلب موارد پوشش‌های اطلاعاتی کامل نیست و مراکز موجود نیز می‌تواند به وسیله جنگ الکترونیک مختل گردند. با توجه به این مزایا و معایب و به ویژه این فاکتور کلیدی که فرماندهان اغلب از متغیرهای زبانی برای بیان نظرات خود استفاده می‌کنند، اعتقاد بر این است که استفاده از سامانه استنتاج فازی برای کاربردهای عملی این حوزه مناسب‌تر از درخت تصمیم است. قطعاً در مواردی که با کمبود یا عدم هماهنگی در داده‌های ورودی روبه‌رو هستید، درخت تصمیم می‌تواند انتخاب ارجح باشد. نتایج اجرای و سناریوهای مختلف با استفاده از مقادیر متفاوت پارامترهای ورودی در جدول (۵) نشان داده شده است. این نتایج نشان دهنده مقادیر متوسط معیارهای کارایی الگوریتم‌ها در ۵۰ اجرای مستقل است.



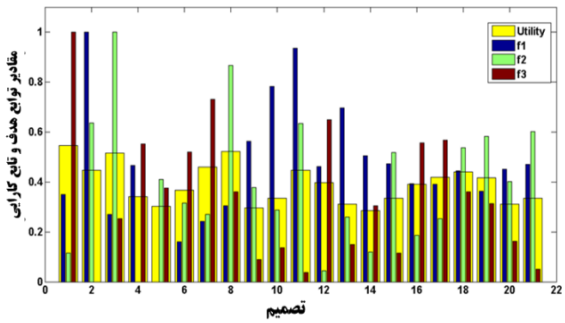
شکل ۷. حل مدل تخصیص منبع با استفاده از الگوریتم SPEA-II و سامانه استنتاج فازی [۲۴]

در شکل‌های (۴ تا ۷) هر نقطه بیان کننده یک ماتریس تصمیم است. در این شرایط و بعد از ترسیم جبهه پارتو به وسیله الگوریتم‌های حل مدل، مدیران بهترین گزینه‌ها را انتخاب نموده (با توجه به معیارهای کارایی) و در مورد چگونگی تخصیص منابع تصمیم‌گیری می‌کنند. در این مقاله برای تعیین گزینه نهایی، روش تصمیم‌گیری *TOPSIS* مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۵. معیار کارایی روش‌های حل با استفاده از مقادیر مختلف پارامترهای ورودی

پارامترهای سناریوها			متوسط معیارهای کارایی					
			Spread		GD		Time(s)	
#Resources	#Assets	#Threats	NSGA-II	SPEA-II	NSGA-II	SPEA-II	NSGA-II	SPEA-II
۱۰	۴	۱۰۰	۰/۰۳۱۸	۰/۰۱۴۱	۰/۰۰۸۶	۰/۰۰۵۴	۳۷/۵	۵۲/۶
۲۰	۶	۱۰۰	۰/۰۳۲۷	۰/۰۱۹۸	۰/۰۰۸۷	۰/۰۰۵۹	۵۶/۸	۷۲/۳
۲۵	۸	۱۱۰	۰/۰۳۴۰	۰/۰۲۰۱	۰/۰۰۹۱	۰/۰۰۷۲	۷۲/۹	۹۲/۸
۳۰	۱۰	۱۵۰	۰/۰۳۰۱	۰/۰۱۳۰	۰/۰۰۸۱	۰/۰۰۴۹	۹۳/۷	۱۲۱/۸
۳۵	۱۲	۲۵۰	۰/۰۱۱۰	۰/۰۱۰۹	۰/۰۰۵۱	۰/۰۰۴۳	۱۱۰/۲	۱۵۰/۷
۳۰	۱۵	۲۰۰	۰/۰۴۵۱	۰/۰۲۶۷	۰/۰۱۴۶	۰/۰۰۹۴	۸۹/۶	۹۸/۴
۳۵	۲۰	۲۵۰	۰/۰۴۲۰	۰/۰۲۵۶	۰/۰۱۴۱	۰/۰۰۹۱	۹۵/۹	۱۱۹/۶
۴۰	۳۰	۳۰۰	۰/۰۳۱۱	۰/۰۲۵۰	۰/۰۱۰۲	۰/۰۰۸۲	۱۲۴/۱	۱۵۵/۹
۵۰	۳۵	۴۰۰	۰/۰۲۹۱	۰/۰۲۳۱	۰/۰۰۹۷	۰/۰۰۷۸	۱۹۶/۷	۲۳۰/۱
۷۰	۵۰	۵۰۰	۰/۰۲۳۰	۰/۰۲۲۹	۰/۰۰۸۲	۰/۰۰۷۵	۳۷۶/۳	۴۴۵/۸

مقادیر خروجی به‌دست آمده از توابع هدف و تابع کارایی در حالی که سامانه استنتاج فازی و الگوریتم *NSGA-II* به ترتیب برای ارزیابی تهدید و حل مدل استفاده شده‌اند در شکل (۸) نمایش داده شده است.



شکل ۸. مقادیر خروجی به‌دست آمده از توابع هدف و تابع کارایی در جبهه پارتو

با توجه به اینکه توابع هدف دارای بازه تغییرات متفاوتی می‌باشند خروجی‌های آن‌ها نرمال شده است. در این مقاله یک راه‌حل برای مسئله تخصیص منابع به‌صورت ماتریسی از متغیرهای تصمیم به‌صورت زیر ارائه می‌گردد:

$$X=\begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1K} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2K} \\ \vdots & \vdots & X_{ik} & \vdots \\ X_{I1} & X_{I2} & \dots & X_{IK} \end{bmatrix} \qquad (۷)$$

[1] Crisp Values
[2] Linguistic Variables
[3] Missing
[4] Heterogeneous

چنین راه‌حلی امکان‌پذیر است اگر مجموعه محدودیت‌های مدل را تأمین نماید. به‌عنوان مثال در یک نمونه مسئله تخصیص منابع که شامل ۲ تهدید و ۳ منبع است، با فرض الزامی بودن تخصیص تمامی منابع موجود در هر مرحله از رویارویی‌ها، $2^3=8$ روش تخصیص مختلف امکان‌پذیر است و روش حل مسئله تخصیص منابع (در اینجا دو الگوریتم *SPEA-II* و *NSGA-II*) باید از میان آن‌ها بهترین ماتریس تصمیم را در مدت زمانی منطقی پیدا نماید. به‌عنوان مثال ماتریس تصمیم زیر پیشنهاد می‌دهد که w_1 (منبع ۱) باید به T_2 (هدف ۲)، w_2 به T_1 و w_3 به T_2 تخصیص داده شود.

$$X=\begin{bmatrix}0 & 1 & 0\\ 1 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

در سناریوی پدافندی مفروض، سامانه زوج‌های منبع-هدف را به‌صورت زیر پیشنهاد می‌دهد:

$$X=\begin{bmatrix}w_1 & w_2 & \cdots & w_{100}\\ 0 & 0 & \cdots & 0\\ 1 & 0 & \cdots & 0\\ 0 & 1 & \cdots & 0\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ 0 & 0 & \cdots & 0\end{bmatrix}$$

ماتریس تصمیم فوق به این معنی است که w_1 به T_2، w_2 به T_3، w_3 به T_{18}، w_4 به T_{35}، w_5 به T_9 و w_6 به T_{43}، w_7 به T_{21}، w_8 به T_4، w_9 به T_{82} و w_{10} به T_{47} تخصیص داده شود.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله چارچوبی برای فرماندهی و کنترل در مدیریت منابع رزمی ارائه گردید که دارای شفافیت بالا بوده و کاربردی است. این مزایا با به‌کارگیری سامانه استنتاج فازی و درخت تصمیم حاصل شده است. مدیریت منابع رزمی در حالی به‌صورت چند هدفه چند مرحله‌ای مدل شده است که در انجام این مدل‌سازی محدودیت‌های موجود در شرایط واقعی لحاظ شد و از روش تصمیم‌گیری *TOPSIS* برای تلفیق نتایج استفاده می‌شود. به‌منظور انجام مدیریت منابع پدافندی به شکل واقع‌گرایانه‌تر، فرآیندهای ارزیابی تهدید و تخصیص منابع به‌صورت هم‌زمان مدل‌سازی شد. مهم‌ترین مزیت سامانه استنتاج فازی در قابلیت کار کردن آن با مقادیر زبانی نهفته است. مزیت اصلی درخت‌های تصمیم نیز ساختار گرافیکی و توانایی کار کردن آن‌ها با داده‌های غیر کامل یا غیر استاندارد است. با توجه به اینکه داده‌های مورد استفاده در این پژوهش با کیفیت استاندارد مطابقت دارند، سامانه استنتاج فازی انتخاب بهتری نسب به درخت تصمیم است. به هر حال وجود این دو روش این امکان را می‌دهد تا با توجه به شرایط، بهترین گزینه را برای انجام ارزیابی تهدید انتخاب شوند. الگوریتم‌های *NSGA-II* و *SPEA-II* هر دو از جدیدترین روش‌های حل مسئله می‌باشند که از آن‌ها برای حل مدل به‌صورت همه زمانه استفاده گردید. این روش‌ها هر کدام دارای معایب و مزایایی نسب به دیگری می‌باشند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که الگوریتم *SPEA-II* دارای همگرایی و تنوع بهتری است، در حالی که الگوریتم *NSGA-II* سریع‌تر بوده و دارای میزان انحراف از معیار کمتری است. با توجه به این معایب و مزایا و با توجه به ماهیت زمان بحرانی این حوزه، الگوریتم *NSGA-II* برای استفاده در مدیریت منابع رزمی پیشنهاد می‌شود. الگوریتم *SPEA-II* را می‌توان برای یافتن راه حل‌های دقیق‌تر (به‌عنوان مثال ترسیم جبهه بهینه پارتو) به‌منظور مقایسه نتایج حاصل از سایر الگوریتم استفاده نمود. در پایان اشاره می‌گردد در تحقیقات و پژوهش‌های آینده از مدل ارائه شده در این مقاله می‌توان در سایر زمینه‌های مدیریت منابع استفاده نمود.

۵. مراجع

[1] Naseem, A.; Shah, S. T. H.; Khan, S. A.; Malik, A. W. “Decision Support System for Optimum Decision Making Process in Threat Evaluation and Weapon Assignment: Current Status, Challenges and Future Directions”; Annu. Rev. Control. 2017, 43, 169–187.

[2] Manne, A. S. “A Target-Assignment Problem”; Oper. Res. 1958, 6, 346–351.

[3] Ejaz, W.; Sharma, S. K.; Saadat, S.; Naeem, M.; Chughtai, N. A. “A Comprehensive Survey on Resource Allocation for CRAN in 5G and Beyond Networks. Journal of Network and Computer Applications”; J. Netw. Comput. Appl. 2020, 16, 102638.

[4] Ghanbari, A. A.; Alaei, H.; Mohammadnia, M. “A Multi-Stage Modelling Approche for Allocation of Defense Resources to Invading Targets”; Adv. Defence Sci. & Technol. 2020, 2, 167-173 (In Persian).

[5] Rudek, R.; Heppner, L. “Efficient Algorithms for Discrete Resource Allocation Problems under Degressively Proportional Constraints”; Expert Syst. Appl. 2020, 149, 113293.

[6] Hocaoğlu, M. F. “Weapon Target Assignment Optimization for Land Based Multi-Air Defense Systems: A Goal Programming Approach”; Comput. Ind. Eng. 2019, 128, 681-689.

[7] Hosein, P. A.; Athans, M. “Preferential Defense Strategies. Part II: The Dynamic Case”; Cambridge (US): MIT Laboratory for Information and Decision Systems, Report No.: LIDS-P 2003.Technical Report, 1990.

[8] Gülpınar, N.; Çanakoğlu, E.; Branke, J. "Heuristics for the Stochastic Dynamic Task-resource Allocation Problem with Retry Opportunities"; Eur. J. Oper. Res. 2018, 266, 291-303.

[9] Davis, M. T.; Robbins, M. J.; Lunday, B. J. "Approximate Dynamic Programming For Missile Defense Interceptor Fire Control"; Eur. J. Oper. Res. 2017, 259, 873-886.

[10] Kalyanam, K.; Rathinam. S.; Casbeer, D.; Pachter, M. "Optimal Threshold Policy for Sequential Weapon Target Assignment"; IFAC-PapersOnLine 2016, 49, 7-10.

[11] Ahner, D. K.; Parson, C. R. "Optimal Multi-Stage Allocation of Weapons to Targets Using Adaptive Dynamic Programming"; Optim. Lett. 2015, 9, 1689-1701.

[12] Ghanbari, A. A.; Alaei, H. "Meta-Heuristic Algorithms for Resource Management in Crisis Based on OWA Approach"; Appl Intell. Appl Intell 51, 646-657 (2021).

[13] Kline, A. G.; Ahner, D. K.; Hill, R. "The Weapon-Target Assignment Problem"; Comput. Oper. Res. 2019, 105, 226-236.

[14] Chachi, J.; Taheri, S. M.; Arghami, N. R. "A Hybrid Fuzzy Regression Model and its Applicationin Hydrology Engineering"; Appl. Soft Comput. 2014, 25, 149-158.

[15] Ross, T. J. "Fuzzy Logic with Engineering Application Second Edition"; Wiely, Singapore, 2005.

[16] Dahan, H.; Cohen, S.; Rokach, L.; Maimon, O. "Proactive Data Mining with Decision Trees"; Springer-Verlag, New York, 2014.

[17] Hwang, C. L.; Yoon, K. "Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications"; CRC Press, 2011.

[18] Runqvist, A. "Threat Evaluation. An Application for Air Surveillance Systems"; Master's Thesis, Uppsala University, 2004.

[19] Kong, D.; Chang, T.; Wang, Q.; Sun, H.; Dai, W. "A Threat Assessment Method of Group Targets Based on Interval-Valued Intuitionistic Fuzzy Multi-Attribute Group Decision-Making"; Appl. Soft Comput. 2018, 67, 350-369.

[20] Lee, H.; Choi, B. J.; Kim, C. O.; Kim, J. S.; Kim, J. E. "Threat Evaluation of Enemy Air Fighters via Neural Network-Based Markov Chain Modeling"; Knowl Based Syst. 2017, 116, 49-57.

[21] Johansson, F. "Evaluating the Performance of TEWA Systems"; Ph.D Thesis, University of Skövde, Skövde, 2010.

[22] Liu, B.; Zhu, Q.; Zhu, H. "Trajectory Optimization and Resource Allocation for UAV-Assisted Relaying Communications"; Wirel. Netw. 2020, 26, 739-749.

[23] Bogdanowicz, Z. R.; Tolano, A.; Patel, K.; Coleman, N. P. "Optimization of Weapon–Target Pairings Based on Kill Probabilities"; IEEE Trans. Cybern. 2013, 43, 1835-1844.

[24] Coello, C. A. C.; Lamont, G. B.; Veldhuizen, D. A. V. "Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems Second Edition"; Springer, New York, 2007.

[25] Deb, K.; Pratap, A.; Agarwal, S.; Meyarivan, T. "A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II"; IEEE Trans. Evol. Comput. 2002, 6, 182-197.

[26] Zitzler, E.; Thiele, L. "Multiobjective Evolutionary Algorithms: A Comparative Case Study and the Strength Pareto Approach"; IEEE Trans. Evol. Comput. 1999, 3, 257-271.

[27] Curry, D. M.; Dagli, C. H. "Computational Complexity Measures for Many-objective Optimization Problems"; Procedia Comput. Sci. 2014, 36, 185-191

[28] Laszczyk, M.; Myszkowski, P. B. "Survey of Quality Measures for Multi-Objective Optimization: Construction of Complementary Set of Multi-objective Quality Measures"; Swarm Evol. Comput. 2019, 48, 109-133.