دوفصلنامه بازی جنگ، سال پنجم، شماره ۱۱، پاییز و زمستان ۱۴۰۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۵

از صفحه ۵۱ تا صفحه۶۹

مدل‌سازی و مسیریابی بهینه‌ی حملات ازدحامی ریزپرنده‌ها در عملیات‌های شبکه محور

نوع مقاله: پژوهشی

عبدالرضا اسدی‌قنبری*[۱]

سیدعباس ساداتی‌نژاد[۲]

چکیده

امروزه تهدیدات ناشی از ریزپرنده‌ها از مهم‌ترین چالش‌های سیستم‌های پدافندی به شمار می‌آیند. دو مؤلفه‌ی اصلی در مدیریت این تهدیدات، مدل‌سازی و تصمیم‌گیری بر اساس مدل ترسیم شده از آن‌ها است. تعیین مسیر بهنیه‌ی حرکت ریزپرنده‌ها از جمله مه‌م‌ترین تصمی‌م‌گیری‌ها در این حوزه به‌شمار می‌آید. در این فرآیند، مسیربابی براساس مدل‌سازی انجام شده از ارزیابی فضای حالات و منابع موجود انجام می‌شوند. در همین راستا در این مقاله، به‌منظور تصویرسازی دقیق‌تر شرایط، ماهیت دنباله‌ای مساله‌ی تخصیص ریزپرنده‌ها در عملیات‌ها آفندی درنظر گرفته می‌شود. از این‌رو در این مقاله مدلی چندهدفه- چندمرحله‌ای برای تعیین وزن یال‌ها در گراف مسیریابی ارائه شده است. همچنین، از الگوریتم ژنتیک و الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیرمغلوب برای یافتن مسیریابی بهینه‌ی انجام عملیات در صحنه نبرد استفاده می‌شود. کارایی الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیرمغلوب با استفاده از سه معیار فاصله‌ی نسلی به‌عنوان معیار همگرایی، گستردگی به‌عنوان معیار تنوع و زمان محاسبات واقعی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی:

عملیات شبکه‌محور، پرواز ازدحامی ریزپرنده، مسیریابی، تخصیص پویای منابع.

[۱] گروه مهندسی کامپیوتر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

[۲] کارشناس ارشد مهندسی نرم‌افزار، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول: Email: Asadi.abdolreza@mail.com

CC BY NC ND

DOI: 10.22034/IJWG.2023.171228

مقدمه

بسیاری از عملیات نظامی امروزی که برای دفاع از یک ناحیه‌ی راهبردی خاص، اسکورت سکوهای غیرنظامی، یا فراهم کردن پشتیبانی آتش برای نیروهای دوست انجام می‌شوند در نواحی شلوغ و پرتراکم (نواحی ساحلی مانند تنگه‌ی هرمز) اجرا می‌گردند. فاکتورهای مختلفی باعث افزایش پیچیدگی عملیات در جنگ‌های امروزی شده است که از جمله‌ی آنها می‌توان به مواردی مانند: ضرب‌آهنگ تند، چگالی بالا، عدم‌یکنواختی و محدودیت‌های موجود بر روی منابع اشاره کرد. به‌عقیده‌ی صاحب‌نظران در چنین شرایطی برتری کامل اطلاعاتی و دستیابی به همکاری قوی میان واحدهای توزیع‌شده‌ی نیرو از طریق امکانات شبکه‌محور و استفاده ازسلاح‌های چابک نسل جدید مانند ریزپرنده‌ها و پهپادها راه‌حل مناسبی را برای غلبه بر این مشکلات فراهم می‌کند. از این‌رو تمرکز این مقاله بر روی استفاده از ریزپرنده‌ها در عمیات آفندی و پدافندی به‌ویژه مقابله با حملات ریزپرنده‌های دشمن است.

در یک نیروی ریزپرنده محور، یگان‌های مختلف به‌منظور انجام مأموریت‌ها و رسیدن به اهداف عملیات در تعامل با یکدیگر اقدام می‌کنند. پراکندگی جغرافیایی این یگان‌ها دارای مزایای مختلفی است اما چگونگی تبادل اطلاعات و هماهنگ‌سازی واحدهای عملیاتی دو چالش اساسی در سطح نیرو است. پراکندگی جغرافیایی واحدها با توجه به افزایش منابع اطلاعاتی می‌تواند باعث برتری اطلاعاتی و افزایش آگاهی از وضعیت فرماندهان گردد [۱]. اما در این حالت مسأله‌ی چگونگی هماهنگ‌سازی واحدهای مختلف نیرو و مسیریابی آنها به‌عنوان مسأله‌ی مهم و حیاتی مطرح می‌گردد. تأکید این مقاله بر مسیریابی بهینه ریزپرنده‌ها با تمرکز بر بیشینه نمودن میزان کارایی آنها است. سناریوی مورد بررسی شامل ریزپرنده‌هایی است که از نظر مکانی توزیع‌شده هستند و قصد دارند به‌صورت تعاونی و پیوسته محیط را رصد نمایند و سیستم با استفاده از داده‌های دریافتی از آنها، اهداف شناسایی شده را ارزیابی نموده و به آنها حمله کند.

در این مقاله، دربخش دوم به معرفی عملیات شبکه‌محور مبتنی‌بر ریزپرنده‌ها پرداخته می‌شود. در این‌بخش مهم‌ترین فرض‌ها و تعاریفی که در عملیات ریزپرنده‌ی پایه مطرح می‌باشد، معرفی می‌گردد و دربخش سوم مدل‌سازی تخصیص ریزپرنده ارائه شده، معیارهای تصمیم و مدل چندهدفه و چندمرحله‌ای برای تعیین وزن یال‌ها در گراف مسیریابی ریزپرنده‌ها پیشنهاد شده تشریح می‌گردد. دربخش چهارم، فرآیند معماری مسیریابی ریزپرنده‌ها با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی تشریح می‌شود. در این‌بخش روش‌های حل مسأله‌ی مسیریابی ریزپرنده‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک و الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیرمغلوب ارائه شده و مدل پیشنهاد شده با استفاده از سناریوئی فرضی مورد آزمایش قرار خواهد گرفت و در ادامه، مطالب ارائه شده جمع‌بندی و پیشنهادهایی برای انجام پژوهش‌های آتی می‌گردد.

کارهای مرتبط

اغلب تحقیقات انجام شده بر روی مسأله‌ی تخصیص منابع ریشه در کاربردهای نظامی دارد که به دهه‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ برمی‌گردد [۲] و معمولاً مدل تخصیص منابع در قالب تئوری بازی [۳] و یا تئوری بهینه‌سازی [۴] بیان می‌شود. مدل‌های ارائه شده براساس 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 مسأله‌ی تخصیص منابع ایستا[1] پرداخته‌اند و اولین مدل پویا یا چند هدفه تخصیص منابع به‌وسیله 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 مطالعه‌ی صورت گرفته توسط اسدی‌قنبری و علایی [۱۲]، بهینه‌سازی چند هدفه برای مدل‌سازی مسأله‌ی تخصیص منابع استفاده شده است. یک بررسی جامع از رویکردهای مختلف مدل‌سازی مسأله‌ی تخصیص منابع اخیراً توسط کلین و همکاران انجام شده است [۱۳].

جدول (۱) نمادها و نشانه‌گذاری‌ها

مجموعه‌ها:
T_i: مجموعه‌ی اهداف مهاجم شناسائی شده توسط سنسورهای نیروهای خودی $i = 1, 2, \cdots, I$.
W_k: مجموعه‌ی ریزپرنده‌هایی که در اختیار نیروهای خودی قرار دارد $k = 1, 2, \cdots, K$.
A_j: مجموعه‌ی دارایی‌های پدافندی $j = 1, 2, \cdots, J$.
$s = 1, 2, \cdots, S$: مجموعه‌ی مراحل رویاروئی یا تعداد گره‌های در گراف مسیریابی ریزپرنده.
پارامترها:
P_{ik}: احتمال کشندگی؛ یعنی احتمال این‌که ریزپرنده $w_k \in W$ هدف دشمن $T_i \in T$ را نابود کند، درصورتی‌که به آن گره تخصیص داده شود.
π_{ij}: احتمال این‌که دشمن $T_i \in T$ دارایی $A_j \in A$ را نابود کند (کشندگی دشمن $T_i \in T$).
V_{ij}: مقدار تهدید زوج گره دشمن -دارایی خودی (T_i, A_j).
ω_j: ارزش محافظت از دارایی خودی $A_j \in A$.
C_{ik}: میزان هزینه‌ی استفاده از منابع، هنگام تخصیص ریزپرنده $w_k \in W$ به هدف دشمن $T_i \in T$.
$F^s = \left[H_{ik}^s\right]_{I \times K}$: ماتریس امکان‌سنجی رویاروئی ($H_{ik}^s = 0$ اگر ریزپرنده k نتواند به هر دلیلی در مرحله‌ی s به هدف دشمن i شلیک کند و $H_{ik}^s = 1$ در غیر این‌صورت).
متغیرها:

[1] Static RA

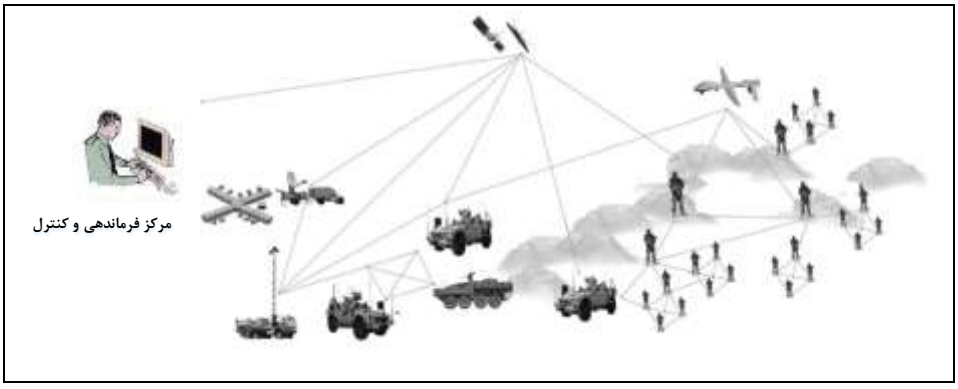
اگر ریزپرنده $w_k \in W$ به دشمن $T_i \in T$ تخصیص داده شود $X_{ik} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$ درغیراین‌صورت
$\left[X_{ik}^{s}\right]_{I\times K}$: ماتریس تصمیم در مرحله‌ی S.

مبانی نظری

عملیات‌های ریزپرنده محور در دکترین دفاعی کشورها نقش بسیاری مهمی پیدا کرده است. با توجه به حجم بالای مهاجمین در نبردهای ریزپرنده محور و درجه‌ی بالای هوشمندی این دسته از مهاجمین به‌عقیده‌ی صاحب‌نظران یکی از مؤثرترین رویکردها برای مقابله با آنها استفاده از مدافعین از جنس همین اهداف مهاجم است. به‌منظور مدل‌سازی این مسأله‌ی تصمیم، باید برخی فرض‌ها و ساده‌سازی‌ها انجام شود. بنابراین در ادامه‌ی این‌بخش فرض‌هائی را که در مورد گره‌های دشمن، مشخصات ناحیه‌ی عملیاتی (ارزش دارایی‌ها، هندسه‌ی محیط و...) و منابع رزمی (سلاح‌های موجود، محدودیت‌ها و...) در فرآیند مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است، ارائه می‌گردد.

فرض‌ها

در فرماندهی و کنترل ریزپرنده‌ها، سیستم مدیریت منابع رزمی از سه مؤلفه‌ی اصلی تشکیل شده است که عبارتند از: اهداف دشمن یا تهدیدات، فضای مورد توجه[1] (شامل اهداف و مسیر رسیدن به آنها) و منابع پدافندی/آفندی یا سلاح‌ها. در ادامه‌ی این‌بخش فرض‌های درنظر گرفته شده در مورد این مؤلفه‌ها ارائه می‌گردد.



شکل (۱) مثالی از یک سناریوی پدافندی در نبردهای شبکه‌محور نوین

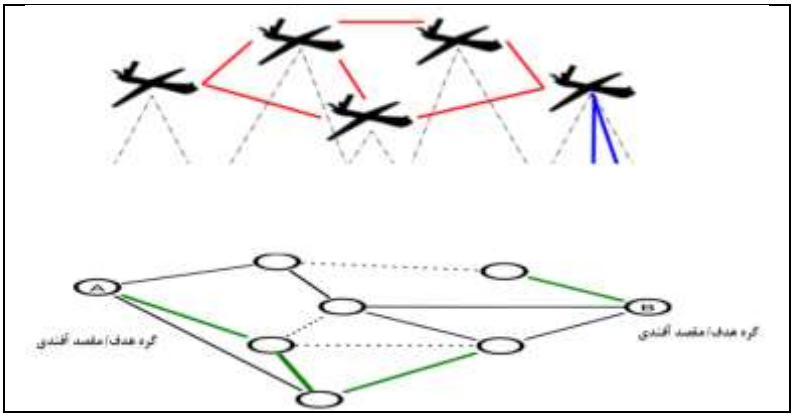
تهدیدها: فرض می‌شود که هر یک از ریزپرنده‌های آفندی با یک توزیع تصادفی از جهت‌های مختلف به سمت گره‌های هدف حمله می‌کنند. هر یک از این ریزپرنده‌ها توسط سیستم پدافندی دشمن مورد حمله قرار می‌گیرد. در این مقاله فرض می‌شود که تهدیدهای ایجاد شده برای هر یک از ریزپرندهای

[1] Volume of interest (VOI)

خودی توسط سیستم دفاعی دشمن قبلاً ارزیابی شده است و پارامتر V_{ij} برای نشان دادن میزان تهدید اهداف دشمن برای ریزپرنده‌های خودی مورد استفاده قرار می‌گیرد (جدول ۱).

مقاصد آفندی: موقعیت جغرافیائی مقاصد آفندی ریزپرنده‌ها، می‌تواند ثابت (مانند شهرها، پل‌ها، بنادر و نیروگاه‌ها) و یا متحرک (ریزپرنده‌ها، پهپادها، تانک‌ها و...) فرض شوند. ولی ارزش آنها در طی درگیری‌ها ثابت و بدون‌تغییر باقی می‌ماند. هدف یافتن کوتاه‌ترین یا کم‌هزینه‌ترین مسیر برای رسیدن به اهداف دشمن و نابودی همه آنها است.

اعمال امکان‌پذیر: برای ساده‌سازی، فرض می‌شوند اعمال ممکن ریزپرنده‌ها عبارتند از انتخاب کردن یا نکردن یک یال برای رسیدن به یک گره‌ی هدف (انتحاب یال‌ها دارای ماهیت غیرکسری است). این انتخاب‌ها با توجه به ویژگی‌های ریزپرنده‌ها، شرایط محیطی و اولویت تهدیدها تعیین می‌گردند.



شکل(۲)مثالی از آرایش ریزپرنده‌های آفندی و اهداف دشمن در صحنه‌ی نبرد

روش تحقیق

مسأله‌ی مسیریابی ریزپرنده‌ها ماهیتاً یک مسأله‌ی چندهدفه است، بنابراین برای مدل‌سازی واقع‌گرایانه‌ی مسأله‌ی مسیریابی ریزپرنده‌ها، چندین تابع هدف باید به‌صورت همزمان بهینه گردد. همچنین، محدودیت‌های عملیاتی مسأله، مانند محدودیت‌های منابع، محدودیت مرتبط با امکان‌پذیری رویاروئی، محدودیت‌های ایرودینامکی[1]، الزامات سیستم کمک‌ناوبری و منطقه‌ی کشف رادارهای دشمن نیز باید در فرآیند مدل‌سازی لحاظ شوند.

[1] Aerodynamics

معیارهای تصمیم درتعیین وزن یال‌ها

در این مقاله برای شبیه‌سازی سناریوهای واقعی‌تر، سه معیار تصمیم برای تعیین وزن یال‌ها درنظر گرفته می‌شود که عبارتند از جمع مقدار تهدید ایجاد شده توسط اهداف دشمن[1]، هزینه‌ی استفاده از ریزپرنده‌ها[2] و ریسک تخصیص ریزپرنده‌ها[3]. شایان ذکر است که این معیارها الزاماً بیان‌کننده‌ی مجموعه‌ای کامل از معیارهای تصمیم‌گیری واقعی که توسط فرماندهان مورد استفاده قرار می‌گیرد نمی‌باشد.

- **کمینه‌سازی تهدید ایجاد شده توسط اهداف دشمن**

مسأله‌ی تخصیص ریزپرنده می‌تواند به‌عنوان یک مسأله‌ی بهینه‌سازی مطرح گردد که نیروهای خودی قصد دارند ریزپرنده‌هایی را به‌منظور کمینه‌سازی احتمال بقای اهداف دشمن (تهدید ایجاد شده به‌وسیله‌ی ریزپرنده‌های مهاجم یا سایر سیستم‌های عملیاتی دشمن) تخصیص دهند. در متون حوزه‌ی فرماندهی و کنترل و تخصیص منابع تسلیحاتی روش‌های مختلفی برای محاسبه‌ی مقدار بقای دشمن پیشنهاد شده است [۱۲]. در این مقاله مقدار هدف یا بقای دشمن به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$V_i = \frac{\sum_{j=1}^{J} V_{ij}\omega_j}{\sum_{j=1}^{J} \omega_j}, \quad i = 1, 2, \ldots, I \qquad (۱)$$

اگر یک سناریوی پدافندی شامل K ریزپرنده پدافندی و I ریزپرنده مهاجم باشد، معیار تصمیم برای محاسبه‌ی جمع احتمال بقای اهداف دشمن می‌تواند به‌صورت زیر فرموله گردد:

$$\min f_1 = \sum_{i=1}^{I} V_i \prod_{k=1}^{K} (1 - P_{ik})^{X_{ik}} \qquad (۲)$$

- **کمینه‌سازی هزینه‌ی استفاده از ریزپرنده**

حفظ منابع عملیاتی (ریزپرنده‌ها) به دو دلیل از اهمیت بالائی برخوردار است، به‌منظور استفاده از آنها در حمله‌های احتمالی آتی و همچنین قیمت بالای این دسته از منابع [۴]. در این مقاله تابع هدف زیر به‌عنوان یک معیار تصمیم برای به‌کارگیری اثربخش‌تر ریزپرنده‌های پدافندی/ آفندی پیشنهاد شده است:

$$\min f_2 = \sum_{k=1}^{K} \sum_{i=1}^{I} X_{ik} C_{ik} \qquad (۳)$$

[1] The total Expected Target Value (ETV)
[2] The Cost of the Weapon Usage (CWU)
[3] The Resource Allocation Risk (RAR)

- **کمینه‌سازی ریسک تخصیص ریزپرنده**

ریسک همیشه یک معیار مهم در تصمیم‌گیری است. در مسأله‌ی تخصیص ریزپرنده، ریسک ممکن است وابسته به تخصیص نامناسب (نابه‌جا) ریزپرنده‌ها به اهداف دشمن باشد. این نامناسب بودن به‌دلیل نوع ریزپرنده‌ها و اولویتی است که با توجه به آن تخصیص سلاح صورت می‌گیرد. بنابراین در فرآیند تخصیص ریزپرنده، دو نوع ریسک می‌تواند به‌صورت زیر تعریف شود:

۱. **ریسک اتمام ریزپرنده؛** این نوع ریسک وابسته به اتمام ریزپرنده‌های موجود می‌باشد؛ به‌عبارتی ریسک اینکه ریزپرنده‌ای برای تخصیص به دشمن باقی نمانده باشد.
۲. **ریسک اولویت یا ریسک عدم‌تخصیص؛** ریزپرنده که یک گره‌ی خاص یک یال خاص (مسیر رسیدن به یک گره‌ی خاص) را انتخاب می‌کند ممکن است به‌کارگیری آن در یالی دیگر (برای مقابله با ریزپرنده یا دشمن دیگری در مرحله‌ی جاری یا استفاده از آن در مراحل بعدی) مناسب‌تر از یال انتخاب شده‌ی کنونی باشد.
۳. **ریسک کشف یا ریسک تخصیص؛** این ریسک اشاره به شناسایی و ردگیری ریزپرنده توسط سیستم راداری دشمن دارد. در واقع این ریسک برعکس ریسک نوع دوم می‌باشد، ریسک نوع دوم به ریسک عدم‌تخصیص ریزپرنده به یک یا چند هدف دشمن (انتخاب یال) و ریسک نوع سوم به ریسک احتمال شناسایی ریزپرنده توسط دشمن در صورت انتخاب یک یال خاص اشاره دارد.

در این مقاله نوع دوم ریسک مورد توجه قرار گرفته و برای هر گره از معیار ریسک عدم‌انتخاب استفاده شده است. این تابع ریسک با استفاده از میزان کشندگی هر گره‌ی دشمنی که به هر دلیلی (مانند استفاده شدن سلاح‌ها در مراحل قبل، سیاست رویاروئی و مقدار ارزش محافظت دارایی‌های پدافندی) ریزپرنده‌ی خودی نمی‌تواند یال منتهی به آنها را انتخاب کند محاسبه می‌گردد. در این حالت چون در هر گره، ریزپرنده می‌تواند به یکی از یال‌های موجود تخصیص داده شود، این ریسک معادل عدم‌تخصیص این ریزپرنده به سایر یال‌ها در همان گره است. در واقع انتخاب هر یال توسط ریزپرنده شامل یک مقدار ریسک است که معادل انتخاب این یال توسط ریزپرنده و عدم انتخاب سایر یال‌های متصل به آن گره است. بنابراین اگر در گره‌ای فقط یک یال موجود باشد چون ریزپرنده انتخاب دیگر ندارد ریسکی را نیز متحمل نمی‌گردد. این تابع ریسک به‌صورت زیر فرموله می‌گردد:

$$\min f_3 = \sum_{j=1}^{J} \omega_j \cdot \left\{ \sum_{i=1}^{I} \pi_i . \prod_{k=1}^{K} (1 - X_{ik}) \right\} \qquad (۴)$$

مدل‌سازی چندمعیاره‌ی وزن یال‌ها در گراف مسیریابی ریزپرنده‌ها

به‌عقیده صاحب‌نظران برای مدل‌سازی واقع‌گرایانه‌ی مسأله‌ی تخصیص ریزپرنده باید آن را به‌صورت چندمرحله‌ای و چندمعیاره مدل نمود [۴]. در مدل‌سازی انجام شده در این مقاله، درگیری‌ها به‌صورت

چندمرحله‌ای بوده و در گره‌های مختلف انجام می‌گیرد. بنابراین، از نقطه‌نظر چندهدفه بودن و به‌منظور اتخاذ تصمیم‌های اثربخش با توجه به اهداف درنظر گرفته شده یک مسأله‌ی بهینه‌سازی چندهدفه با درنظر گرفتن میزان ارجعیت هر یک از اهداف به‌صورت زیر طراحی می‌گردد:

$$\max U = \sum_{s=1}^{S} F\left(\gamma_l^s, f_l^s\right) \quad l = 1,...,\mathrm{L} \qquad (۵)$$

در این مدل، f نشان‌دهنده‌ی تابع هدف، L شماره‌ی معیار تصمیم، S مرحله، γ میزان ارجعیت (وزن) تابع هدف موردنظر و F تابع کارائی است. در هر مرحله، F ترکیبی از مقادیر بهینه‌ی توابع $f_1, f_2 \; and \; f_3$ به‌صورت زیر است:

$$\begin{aligned} &\min_{X_{ik}\in\{0,1\}} \; f_1, f_2, f_3 \\ &s.t \quad f_1 = \sum_{i=1}^{I} V_i \prod_{k=1}^{K} (1-P_{ik})^{X_{ik}} \\ &\qquad f_2 = \sum_{k=1}^{K}\sum_{i=1}^{I} C_{ik} X_{ik} \\ &\qquad f_3 = \sum_{j=1}^{J} \omega_j . \left\{ \sum_{i=1}^{I} \pi_i . \prod_{k=1}^{K} (1-X_{ik}) \right\} \end{aligned} \qquad (۶)$$

با توجه به معادله‌ی (۶) وزن هر یال در گراف مسیریابی ریزپرنده به‌صورت بردار $\left(f_1, f_2, f\right)$ می‌باشد که f_1, f_2 و f_3 به‌ترتیب عبارتند از: تهدید ایجاد شده توسط اهداف دشمن، مجموع هزینه‌های استفاده از ریزپرنده و مجموع ریسک تخصیص ریزپرنده. در این توابع هدف، X_{ik} متغیر تصمیم بوده که مقادیر مختلف $f_i, i = 1,2,3$ و خروجی نهائی مسأله‌ی تخصیص ریزپرنده را تعیین می‌کند. در شرایط واقعی مقادیر $\gamma_1^s,...,\gamma_l^s$، S و تابع F به‌وسیله‌ی تصمیم‌گیرندگان تعیین می‌گردد. در این مقاله فرض می‌شود که $L = 3$، S برابر با تعداد گره‌ها در گراف مسیریابی ریزپرنده است و به‌منظور الحاق توابع هدف وزن‌های آنها در تابع کارائی یکسان ($\gamma = 1$) درنظر گرفته می‌شود.

محدودیت‌ها

در مسأله‌ی تخصیص و مسیریابی بهینه ریزپرنده‌ها، محدودیت‌ها و قیود مختلفی وجود دارند که باید قبل از انجام فرآیند بهینه‌سازی تأمین گردند. در ادامه مجموعه‌ی محدودیت‌هائی که در مدل تخصیص و مسیریابی ریزپرنده درنظر گرفته شده‌اند، ارائه شده است:

۱. محدودیت امکان رویاروئی با توجه به محدودیت استفاده از ریزپرنده در بازه‌های خاص: برخی از ریزپرنده‌ها با توجه به برد، نوع و... ممکن است در برخی مراحل خاص از رویاروئی قابل استفاده

نباشند. به‌عنوان مثال، یک ریزپرنده برد کوتاه در مراحل اولیه از رویاروئی‌ها که ریزپرنده‌های مهاجم در فاصله‌ی دور قرار داشته و خارج برد ریزپرنده مذکور هستند نمی‌تواند مورد استفاده قرار گیرد یا در نبردهای نزدیک با توجه به ماهیت درگیری‌ها ریزپرنده‌های دور برد (مانند موشک‌های دوربرد موجود در ریزپرنده) ممکن است قابل به‌کارگیری نباشد.

$$X_{ik}^{s} \le H_{ik}^{s}, \quad \forall k = 1,2,\ldots,K, \quad \forall s = 1,2,\ldots,S, \quad \forall i = 1,2,\ldots,I \qquad (۷)$$

که $H_{ik}^{s} = 0$ نشان‌دهنده‌ی این است که ریزپرنده k نمی‌تواند به گره i در مرحله‌ی t به هر دلیل بالقوه‌ای شلیک کند و در غیراین‌صورت $H_{ik}^{s} = 1$. پنجره‌های زمانی ریزپرنده‌ی آفندی و گره‌ی هدف فاکتورهای اصلی هستند که امکان‌پذیری رویاروئی را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

۲. عدم‌الزام در تخصیص همه‌ی ریزپرنده‌های موجود: برخی از ریزپرنده‌ها در بعضی از مراحل رویاروئی می‌توانند تخصیص داده نشوند. این محدودیت بیان‌کننده‌ی این مسأله است که الزامی وجود ندارد که در هر مرحله از رویاروئی‌ها، تمامی ریزپرنده‌های موجود تخصیص داده شوند.

$$\sum_{i=1}^{I} X_{ik}^{s} \le 1, \quad \forall s = 1,2,\ldots,S, \forall k = 1,2,\ldots,K \qquad (۸)$$

معادله‌ی (۱۰) به این معنی است که در مدل ارائه شده، تخصیص هر یک ریزپرنده‌های موجود به یک ریزپرنده‌ی مهاجم در هر مرحله از درگیری‌ها الزامی نیست. به‌عبارتی یک ریزپرنده می‌تواند در برخی از گره‌ها هیچ اقدامی انجام ندهد و از تسلیحات خود استفاده ننماید.

۳. تخصیص کامل: معادله‌ی (۹) نشان می‌دهد که در طی مراحل درگیری با تهدیدها، تخصیص کسری ریزپرنده‌ها به اهداف مهاجم امکان‌پذیر نیست.

$$X_{ik}^{s} \in \{0,1\}, \ \forall s = 1,2,\ldots,S, \quad \forall i = 1,2,\ldots,I, \quad \forall k = 1,2,\ldots,K \qquad (۹)$$

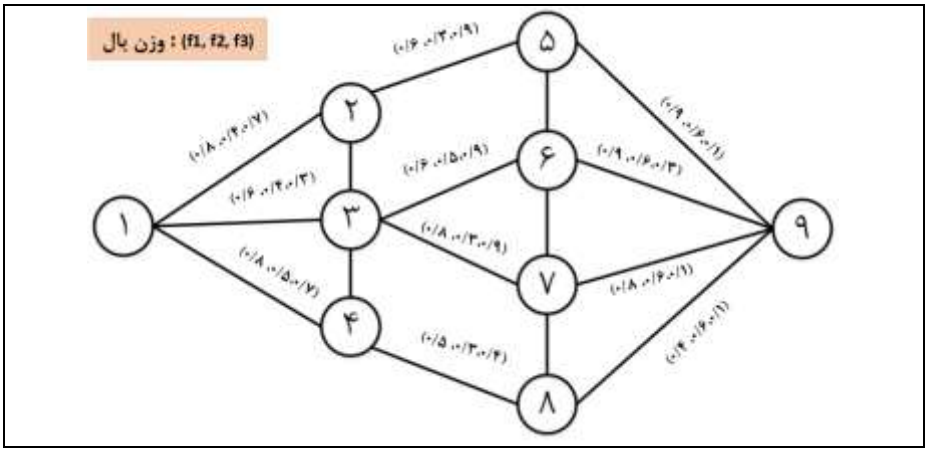
محدودیت‌های (۸) و (۹) اغلب در مدل‌های تخصیص سلاح وجود دارند و در این مقاله محدودیت عمومی نامیده می‌شود.

معماری مسیریابی ریزپرنده‌ها با استفاده ازالگوریتم‌های تکاملی

در اینجا مسأله‌ی موردنظر، از ریزپرنده (مجموعه‌ای از ریزپرنده‌ها) و مجموعه‌ای از شهرها (مکان‌ها) یا تشکیل شده است. این ریزپرنده اجازه دارد از هر شهر تنها یک‌بار عبور کند. فاصله‌ی میان شهرها یا هزینه‌ی عبور از شهرها داده شده است و هدف پیدا کردن درخت پوشای کمینه[1] است. در این مقاله هزینه‌ی پیمایش فاصله‌ی میان شهرها با استفاده از معیارهای تصمیم محاسبه می‌گردد. در این مقاله

[1] Minimum spanning tree (MST)

فرض شده است که خروجی این توابع هدف یا معیارهای تصمیم قبلاً محاسبه شده و وزن یال‌ها مشخص است.



شکل (۳)گراف کامل متصل برای یک مسأله‌ی مسیریابی بهینه‌ی ریزپرنده‌ها با تعداد ۹ شهر

گراف مساله و گراف مسیریابی

گراف مسأله شامل مجموعه‌ای از گره‌ها است که باید توسط ریزپرنده‌های مورد حمله قرارگیرند. گراف مسیریابی یا نقشه‌ی حمله، گرافی متشکل از اهداف، شامل مجموعه‌ای از گره‌ها، یال‌های و وزن‌هایی است که توسط هر ریزپرنده باید پیمایش گردد. در واقع گراف مسأله، یک گراف ثابت و مستقل از ریزپرنده‌ای است که باید آن را پیمایش نماید، در حالی‌که گراف مسیریابی یا نقشه‌ی حمله با توجه با قابلیت‌ها، امکانات در اختیار و محدودیت‌ها برای هر ریزپرنده متفاوت است. به‌عبارتی گراف مسأله بیان‌کننده‌ی یک دستور از سطوح بالای فرماندهی برای حمله به مجموعه‌ای از اهداف بدون توجه به یال‌ها، مسیرها و هزینه‌های پیمایش آنهاست درحالی‌که گراف مسیریابی نقشه‌ی عملیاتی برای اجرای دستور و رسیدن به اهداف مأموریت محول شده به نیرو است. تعداد گراف‌های مسیریابی برابر با تعداد ریزپرنده‌ها و تعداد مسیرها یا راه‌حل‌ها برای مسأله برابر با مجموع تعداد درخت‌های پوشا کمینه یا تورهای همیلتونی موجود در هر یک از گراف‌های مسیریابی ریزپرنده‌های است. تعداد کل راه‌حل‌های ممکن برای رسیدن به اهداف مأموریت ابلاغ شده به‌صورت معادله‌ی (۱۰) محاسبه می‌گردد.

$$PATH = \sum_{k=1}^{K} MST(k) \qquad (۱۰)$$

در معادله‌ی فوق $PATH$ تعداد کل روش‌های اجرای مأموریت و $MST(k)$ تعداد مسیرها یا درخت‌های پوشای کمینه در گراف مسیریابی ریزپرنده‌ی شماره k است. گراف مسیریابی هر یک از ریزپرنده‌ای در طی فرآیند مدل‌سازی و با درنظر گرفتن محدویت‌ها و امکانات هر ریزپرنده برای تعیین یال‌های میان گره‌ها و معیارهای تصمیم برای تعیین وزن یال‌ها ترسیم می‌گردد. در شکل ۳ مثالی از

گراف مسیریابی ریزپرنده‌ها که در آن وزن یال‌ها با استفاده از معیارهای تصمیم تعیین شده است نمایش داده شده است. بهترین روش اجرای دستور یا تعیین درخت پوشای کمینه یا تور همیلتونی در طی فرآیند حل مدل تعیین می‌گردد. در ادامه روش یافتن درخت پوشای کمینه با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

روش‌های حل مسأله

پس از مدل‌سازی گراف تخصیص ریزپرنده‌ها، یافتن مسیر بهینه دیگر مسأله‌ی مهم در یک سیستم فرماندهی و کنترل ریزپرنده‌ها است. الگوریتم‌های تکاملی به‌عنوان کاربردی از روش‌های فوق‌یافتاری به‌دلیل این‌که از مجموعه‌ای از راه‌حل‌ها (در قالب جمعیت) استفاده می‌کنند و این امکان را فراهم می‌سازند که بتوان‌بخش‌های مختلفی از جبهه‌ی پارتو را در یک اجرای الگوریتم پیدا نمود، از جمله بهترین رویکردها برای حل مسأله‌ی مسیریابی بهینه و چندهدفه می‌باشند. یک راه‌حل برای مسأله‌ی تخصیص ریزپرنده به‌صورت‌برداری است که نشان‌دهنده‌ی رأس‌های یک درخت پوشای کمینه از یال‌های گراف نمایش دهنده‌ی موقعیت اهداف دشمن است:

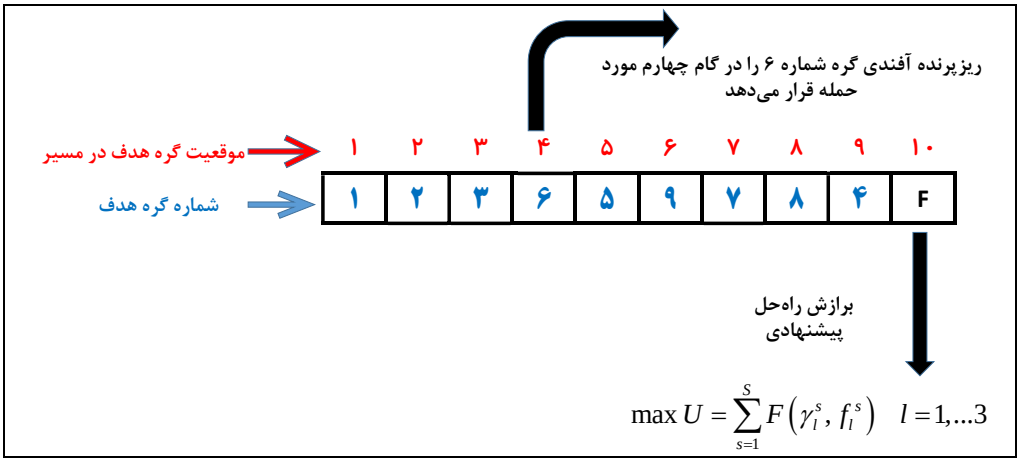
$$X = [\mathrm{X}_1 \ \mathrm{X}_2 \ \dots \ \mathrm{X}_I]$$

چنین راه‌حلی، عملی (انجام‌پذیر) است اگر بتواند مجموعه‌ی محدودیت‌های موجود را ارضاء نماید. در این‌بخش به‌منظور ساده‌سازی، فرض می‌شود که تخصیص کسری ریزپرنده امکان‌پذیر نیست و هر ریزپرنده در هر مرحله از رویارویی می‌تواند حداکثر به یک هدف دشمن تخصیص داده شود (یک یال را انتخاب کند) درحالی‌که از سایر محدودیت‌های مسأله چشم‌پوشی شده است. از آنجا که در شرایط معمول فرض می‌شود هیچ محدودیتی در امکان حرکت از یک شهر به هر شهر دیگری وجود ندارد، گراف ساختاری تشکیل شده یک گراف کاملاً متصل است و تعداد رأس‌های موجود در گراف برابر تعداد شهرهای تعریف شده در مسأله خواهد بود. همچنین، وزن یال‌های گراف متناسب با هزینه‌ی پیمایش آنها (که با استفاده از معیارهای تصمیم می‌شوند) از یکدیگر است.

مسیریابی بهینه‌ی ریزپرنده با استفاده از الگوریتم ژنتیک

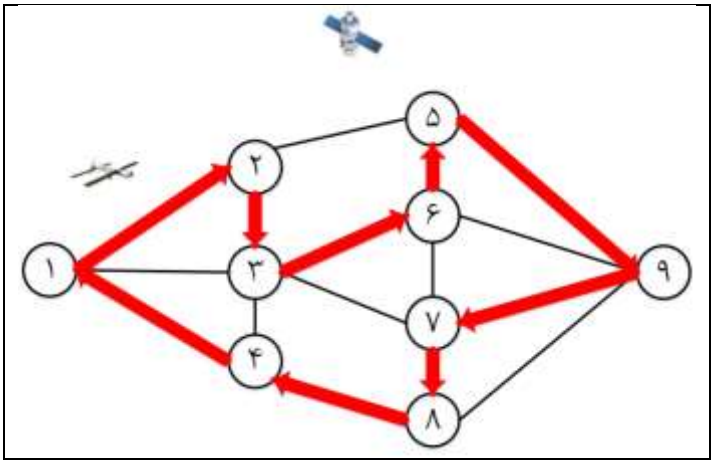
کاربرد الگوریتم ژنتیک برای حل مسأله‌ی مسیریابی بهینه‌ی ریزپرنده‌ها به‌گونه‌ای است که حرکت میان شهرها (مکان‌ها)، مؤلفه‌های جواب کاندید می‌باشند؛ یعنی، حرکت از شهر i به شهر j، مؤلفه‌ی جواب کاندید $C_{ij} \equiv C_{ji}$ مسأله خواهد بود. در این مقاله، برای تعیین درخت پوشای کمینه از الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود که طول هر کروموزم (d) برابر با تعداد گره‌های هدف (ریزپرنده‌های پدافندی) است و عدد داخل هر ژن بیانگر شماره یا برچسب گره‌ی هدف می‌باشد که هدف حمله‌ی ریزپرنده‌ی آفندی است. بنابراین اگر هر کدام از کروموزوم‌ها را به‌صورت یک ماتریس تبدیل $C_i \ \ (i = 1,2,...,n)$ در نظر بگیریم، در هر کدام از این کروموزوم‌ها زیرمجموعه‌ای از گره‌ها (شامل تمام ریزپرنده‌های مدافع) را خواهیم داشت که در فرآیند حمله توسط ریزپرنده‌های آفندی مورد حمله

قرار می‌گیرند شکل ۴ یک کروموزوم را نشان می‌دهد که هر یک از ژن‌های آن نشان‌دهنده‌ی یک گره در مسیر است.



شکل (۴) یک کروموزوم از جمعیت الگوریتم ژنتیک که نشان دهنده‌ی یک مسیر پیمایش شده توسط ریزپرنده است.

در این شکل فرض شده است که تعداد گره‌های هدف ۹ گره می‌باشد. میزان برازش[1] راه‌حل پیشنهادی توسط هر کروزم به‌وسیله‌ی جمع وزن‌دار مقادیر توابع هدف (معیارهای تصمیم) که قبلاً نرمالیزه شده‌اند محاسبه می‌گردد. در شکل ۷ تعداد مراحل درگیری برابر با تعداد گره‌های موجود در گراف مسأله است به‌عبارتی $S = 9$ است. در شکل ۵ نمونه مسیری نمایش داده شده است که ریزپرنده‌ها باید آنها را در طی عملیات پیمایش نمایند.



شکل (۵) گراف شهرهایی که باید ریزپزنده پیمایش نماید

[1] Fitness function

مسیریابی بهینه‌ی ریزپرنده با استفاده از الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیرمغلوب

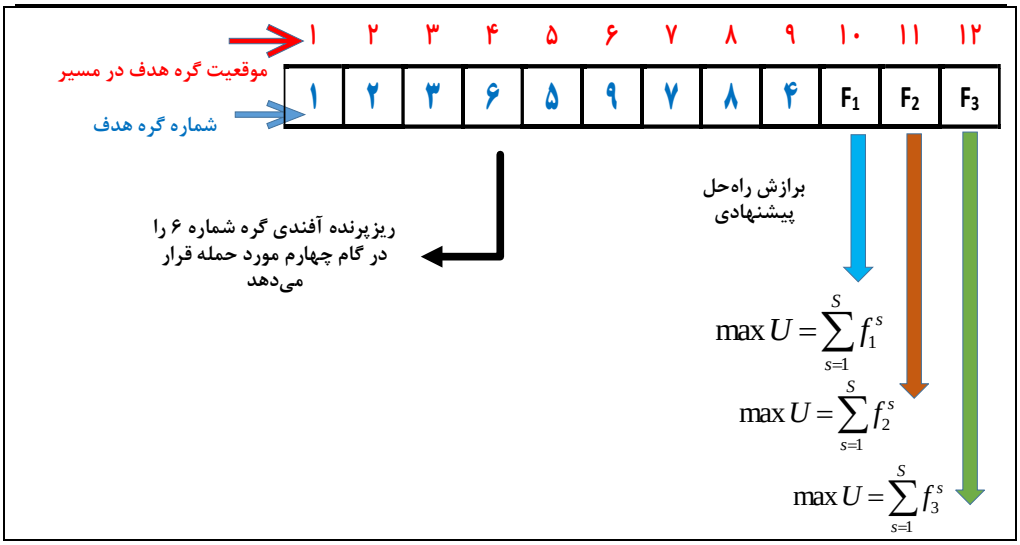
الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیرمغلوب توسط دِب و همکارانش در سال ۲۰۰۲ پیشنهاد شد [۱۴]. این الگوریتم برمبنای مفاهیم پارِتو بوده و با اضافه شدن دو عملگر ضروری به الگوریتم ژنتیک تک‌هدفی معمولی، به یک الگوریتم چندهدفه تبدیل شده است. این الگوریتم به‌جای یافتن بهترین جواب، دسته‌ای از بهترین جواب‌ها را نتیجه می‌دهد. این دو عملگر عبارتند از: ۱) عملگری که یک معیار برتری (رتبه) را براساس مرتب‌سازی نامغلوب به اعضای جمعیت اختصاص می‌دهد و ۲) عملگری که تنوع راه‌حل را در میان راه‌حل‌های با رتبه‌ی برابر حفظ می‌کند. بنابراین با استفاده از دو معیار فوق یک عملگر مقایسه به‌صورت زیر ارائه می‌گردد:

$$x \prec y \Leftrightarrow if\ \left(x_{rank} < y_{rank}\right) \\ elseif\ \left(x_{rank} = y_{rank}\right) \\ \left(cd(x) > cd(y)\right) \qquad (۱۱)$$

در الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیرمغلوب از روش ترکیب جمعیت موجود با فرزندان به‌وجود آمده و انتخاب بهترین افراد از بین آنها استفاده می‌شود. برای این منظور ابتدا افراد جمعیت براساس رتبه *(rank)* مرتب شده و سپس آنها مجدداً براساس معیار فاصله‌ی ازدحامی *(cd)* مرتب می‌شود. در نهایت برترین افراد از بین جمعیت مرتب شده براساس دو معیار رتبه و فاصله‌ی ازدحامی به نسل بعد منتقل می‌شود. میزان برازش راه‌حل پیشنهادی توسط هر کروزم به‌سیله‌ی مقادیر هر یک از توابع هدف (معیارهای تصمیم) که قبلاً نرمالیزه شده‌اند محاسبه می‌گردد. در اینجا هر راه‌حل پیشنهادی دارای سه مقدار برازش است. این امر باعث می‌گردد که به‌جای یک نقطه‌ی بهینه‌ی واحد مجموعه‌ای از نقاط بهینه در قالب جبهه‌ی پارتو تولید گردد. در جبهه‌ی پرتو هر نقطه بیان‌کننده‌ی یک مسیر بهینه است. این مسیر دارای یک بردار وزن بهینه با سه درایه است که هر درایه مجموع تمامی مقادیر مرتبط با آن در یال‌های تعیین کننده‌ی مسیر است. در این شرایط و بعد از ترسیم جبهه‌ی پارتو به‌وسیله الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیرمغلوب، مدیران بهترین گزینه‌ها را انتخاب نموده (با توجه به معیارهای کارائی) و در مورد چگونگی انتخاب مسیر تصمیم‌گیری می‌کنند.

در این مقاله الگوریتم ژنتیک و الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیرمغلوب با کدینگ عدد صحیح، برش تک‌نقطه‌ای[1] جهش رشته بیتی[2] برای حل مسأله‌ی تخصیص منابع استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیرمغلوب یک الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه کارا می‌باشد که پیچیدگی محاسباتی آنها $O(M.N^2)$ است که M تعداد توابع هدف و N اندازه‌ی جمعیت است [۱۵].

[1] Single-point crossover
[2] Bit string mutation



شکل (۶) یک کروموزوم از جمعیت الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیرمغلوب که نشان یک مسیر پیمایش شده توسط ریزپرنده است.

در شکل (۷) مثالی از جبهه‌های بهینه‌ی پارتو برای مدل تخصیص سلاح چندهدفه با استفاده از الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیرمغلوب ترسیم شده است.

معیارهای کارایی

حفظ نخبگان[1] و حفظ تنوع[2] در راه‌حل‌ها دو هدف مهم در بهینه‌سازی چندهدفه است. بنابراین، برای مقایسه‌ی الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه، باید حداقل از دو معیار کارایی زیر استفاده شود [۱۴]:

- فاصله نسلی[3] به‌عنوان معیار همگرایی [۱۶]:

$$GD = \frac{1}{|Q|}\sqrt{\sum_{q=1}^{|Q|} Ed_q^2} \qquad (۱۲)$$

که در آن، Ed_q فاصله اقلیدسی[4] میان راه‌حل در یک مجموعه‌ی غیرمغلوب (Q) و نزدیک‌ترین عضو مجموعه‌ی بهینه‌ی پارتو (P^*) است:

$$Ed_q = \min_{k=1}^{|P^*|}\sqrt{\sum_{l=1}^{L}(f_l^{(q)} - f_l^{*(k)})^2} \qquad (۱۳)$$

[1] Elite-preserving
[2] Diversity-preserving
[3] Generational Distance
[4] Euclidean Distance

در اینجا L نشان‌دهنده‌ی تعداد توابع هدف و $f_l^{*(k)}$ مقدار تابع هدف k-امین عضو مجموعه‌ی بهینه‌ی پارتو (P^*) در l-امین تابع هدف است. الگوریتمی که مقدار فاصله‌ی نسلی (GD) کمتری داشته باشد مطلوب‌تر است.

- گستردگی[1] به‌عنوان معیار تنوع [۱]:

$$\Delta = \frac{\sum_{l=1}^{L} d_l^e + \sum_{q=1}^{|Q|} \left| d_q - \bar{d} \right|}{\sum_{l=1}^{L} d_l^e + |Q| \bar{d}} \qquad (۱۴)$$

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 فاصله‌ی ازدحامی[2] محاسبه می‌شود. 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 $\Delta > 1$ نشان‌دهنده‌ی یک توزیع نامناسب است [۱۶]..

تجزیه و تحلیل داده‌ها و یافته‌های تحقیق

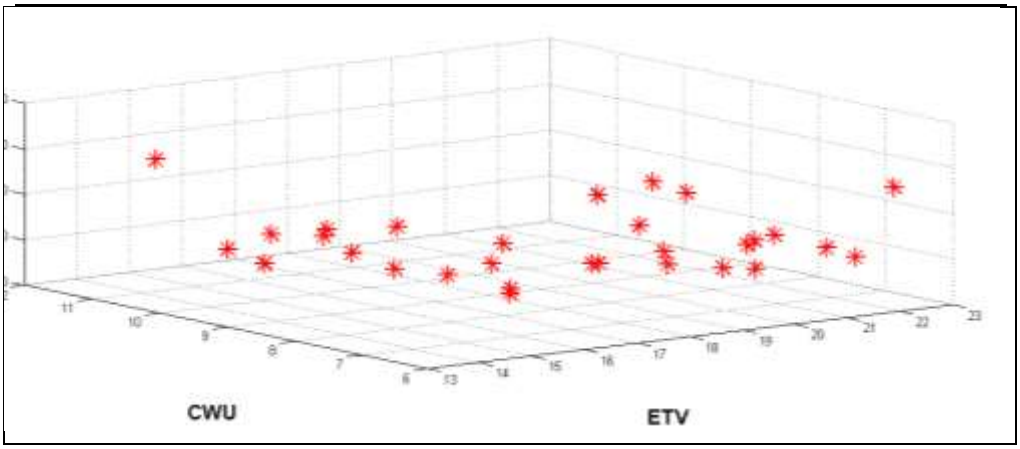
سناریوری مورد بررسی شامل مجموعه‌ای از ریزپرنده‌ها است که قصد دارند در طی سلسله مأموریت‌هایی در مجموعه‌ای از شهرها (مکان‌ها) عملیات آفندی انجام دهند. در این‌بخش به‌منظور آزمایش مدل ارائه شده سناریوئی درنظر گرفته شده است که در آن گره‌های هدف توسط مجموعه‌ای از ریزپرنده‌ها مورد حمله قرار می‌گیرند. این سناریو شامل ۱ ریزپرنده آفندی و ۱۰۰ گره هدف دشمن است. مقادیر معیارهای تصمیم به‌عنوان یکی از ورودی‌های اصلی سیستم مسیریابی ریزپرنده مورد استفاده قرار می‌گیرد. پارامترهای مدل تخصیص ریزپرنده و الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیرمغلوب در جدول ۲ نمایش داده شده است.

جدول (۲) پارامترهای مدل تخصیص ریزپزنده و الگوریتمNSGA-II

اندازه‌ی جمعیت	**تعداد تکرار حلقه اصلی**	**تعداد ریزپرنده‌ها**	**تعداد گره‌های هداف**
۳۰۰	**۲۰۰**	**۱**	**۱۰۰**

با توجه به پارامترهای ارائه شده در جدول ۲ مجموعه‌ی بهینه‌ی پارِتو برای مدل تخصیص ریزپرنده‌ها در شکل ۷ نمایش داده شده است. در این شکل هر نقطه نشان‌دهنده‌ی یک مسیر بهینه‌ی ارائه شده توسط الگوریتم *NSGA-II* است.

[1] Spread
[2] Crowding Distance



شکل (۷) نتایج حاصل از مسیریابی ریزپرنده‌ها با استفاده از الگوریتم NSGA-II

نتایج اجرای سناریوهای مختلف با استفاده از مقادیر متفاوت پارامترهای ورودی در جدول ۳ نشان داده شده است. این نتایج نشان‌دهنده‌ی مقادیر متوسط[1] معیارهای کارایی الگوریتم‌ها در ۱۰۰ اجرای مستقل است. در این سناریو فرض شده است که گراف مسأله کامل است. برای اجرای کدهای *MATLAB* و محاسبه‌ی زمان واقعی محاسبات از یک رایانه با مشخصه‌های پردازنده‌ی هفت هسته‌ای ۴ گیگاهرتز، ۱۶ گیگابایت رم و دارای سیستم‌عامل ویندوز ۱۰ استفاده شد. علاوه‌بر این، بهترین مجموعه‌ی بهینه‌ی پارتو به‌دست آمده از این ۱۰۰ اجرا (با توجه به معیارهای کارائی) در شکل ۷ نشان داده شده است.

بدیهی است که خروجی سیستم تخصیص و مسیریابی ریزپرنده‌ی وابسته به تنظیمات پارامترهای مختلفی است. از آنجا که تنظیمات مختلفی برای پارامترهای سیستم وجود دارد، تمرکز این مقاله بر روی مقایسه‌ی پیاده‌سازی‌های مختلف از روش‌های مسیریابی بهینه نیست و جنبه‌های کاربردی‌تری مانند مدل‌سازی گراف مسأله موردتوجه قرار گرفته است.

جدول (۳) متوسط معیارهای کارایی برای الگوریتم NSGA-II

سناریو#	پارامترهای سناریو		متوسط معیارهای کارایی		
	گره#	#یال	گستردگی	فاصله‌ی نسلی	زمان اجرا
۱	۱۰	۴۵	۰.۰۴۲۷	۰.۰۰۸۵	۶.۴۵
۲	۱۵	۱۰۵	۰.۰۳۳۰	۰.۰۰۹۱	۳.۵۰
۳	۲۰	۱۹۰	۰.۰۳۳۵	۰.۰۰۹۵	۸.۱۲۱
۴	۲۵	۳۰۰	۰.۰۳۵۰	۰.۰۰۹۹	۹.۱۸۰
۵	۳۰	۴۳۵	۰.۰۴۰۰	۰.۰۰۹۶	۷.۲۱۰
۶	۳۵	۵۹۵	۰.۰۲۱۵	۰.۰۰۶۷	۲.۳۴۰

[1] Mean

سناریو#	پارامترهای سناریو		متوسط معیارهای کارایی		
	گره#	#یال	گستردگی	فاصله‌ی نسلی	زمان اجرا
۷	۴۰	۷۸۰	۰۵۴۰ .۰	۰۱۵۶ .۰	۶۰ .۵۵۷
۸	۴۵	۹۹۰	۰۴۲۰ .۰	۰۱۶۲ .۰	۹۸ .۸۹۹
۹	۵۰	۱۲۲۵	۰۴۷۰ .۰	۰۱۱۳ .۰	۰۱ .۱۰۵۵
۱۰	۵۵	۱۴۸۵	۰۳۱۶ .۰	۰۰۹۹ .۰	۷۹ .۱۲۸۹.
۱۱	۶۰	۱۷۷۰	۰۳۷۹ .۰	۰۰۸۹ .۰	۳۶ .۱۴۰۰

نتیجه‌گیری و پیشنهاد

با توجه به سرعت بالا و پویایی نبردهای نوین و حملات مبتنی‌بر ریزپرنده‌ها، الگوریتم‌های همه‌زمانه[1] و معماری‌های بلادرنگ از مناسب‌ترین رویکردها برای مواجه با این دسته از حملات می‌باشند. استفاده از روش‌های مبتنی‌بر هوش مصنوعی، به‌ویژه هوش ذرات و الگوریتم‌های تکاملی در این حوزه می‌تواند پاسخ‌گوی بسیاری از نیازها باشد. الگوریتم‌های تکاملی می‌تواند با یک رویکرد همه‌زمانه اجرا شوند و خروجی آنها با گذر زمان بهبود پیدا کند. با توجه به محدودیت‌های زمانی و عدم‌قطعیت موجود در شرایط حاکم بر صحنه‌ی نبرد این ویژگی الگوریتم‌های تکاملی در حوزه‌ی مدیریت منابع رزمی در نبردها از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. پیش‌نیاز مسیریابی بهینه، مدل‌سازی دقیق صحنه‌ی نبرد است. در این مقاله تلاش شد یک رویکرد واقع‌گرایانه برای مدل‌سازی مسأله‌ی مسیریابی آفندی ریزپرنده‌ها ارائه گردد. بنابراین، در این مدل وزن یال‌ها با استفاده از چندین معیار تصمیم مکمل تعیین گردید. کمینه‌سازی تهدید ایجاد شده توسط اهداف دشمن، کمینه‌سازی هزینه‌های تسلیحاتی و کمینه‌سازی ریسک تخصیص ریزپرنده در هر مرحله از رویاروئی‌ها به‌عنوان معیارهای تعیین وزن یال‌ها درنظر گرفته شده است. برای نزدیک کردن مدل مسیریابی به شرایط واقعی، محدود بودن تعداد سلاح‌ها و همچنین محدودیت‌های فنی، محیطی و ساختاری به‌عنوان مجموعه‌ی جدیدی از محدودیت‌ها معرفی گردید. در این مقاله الگوریتم ژنتیک و همچنین الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیرمغلوب به‌عنوان کاربردی از الگوریتم‌های همه‌زمانه برای انجام فرآیند مسیریابی بهینه استفاده شد. ایده‌ای که در پشت الگوریتم‌های همه‌زمانه وجود دارد این است که بدون توجه به اینکه الگوریتم چقدر اجرا شده است، بتواند جوابی را تولید نمایند. درحالی‌که یک الگوریتم مرسوم برای یک بازه‌ی زمانی مشخص اجرا می‌گردد و سپس یک جواب را تولید می‌کند. یک الگوریتم همه‌زمانه می‌تواند برای هر میزانی از زمان اجرا یک پاسخ را تولید نماید. از جمله مهم‌ترین مسائلی که می‌تواند در پژوهش‌های آینده مورد بررسی قرار گیرد مکانیزم همکاری و هماهنگی ریزپرنده‌ها در صحنه‌ی عملیات و چگونگی حفظ ارتباطات میان واحدهای نیرو در شرایط مختلف عملیاتی می‌باشد.

[1] Anytime algorithms

منابع

[1] Ghanbari, A. A. ; Sadatinejad S. A; Mohammadnia, M. ; Alaei, H. "Dynamic Battle Management Using Meta-Heuristic Algorithms, Fuzzy Inference Systems and the Decision Tree"; Adv. Defence Sci. Tech. 2022, 13(1), 1–11 (In Persian).

[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. Tech. 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, 2021, 51, 646–657.

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

[14] Deb K, Pratap A, Agarwal S, Meyarivan T. 2002. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 6(2): 182-197.

[15] Curry DM, Dagli CH. 2014. Computational Complexity Measures for Many-objective Optimization Problems. Procedia Computer Science. 36: 185–191.

[16] 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.