

## مدل سازی تخصیص چندمرحله‌ای منابع پدافندی به اهداف مهاجم

عبدالرضا اسدی قنبری<sup>۱</sup>، حسین علایی<sup>۲\*</sup>، موسی محمدنیا<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران،

۲- دانشیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران، ۳- پژوهشگر، سازمان پژوهشی باقرالعلوم (ع)، تهران، ایران،

(دریافت: ۹۸/۰۴/۰۱، پذیرش: ۹۸/۰۹/۱۸)

### چکیده

فرآیند تخصیص سلاح یکی از مسائل مهم در حوزه فرماندهی و کنترل است. در این فرآیند لازم است که تصمیم‌های زمان-بحرانی در شرایطی اتخاذ گردند که در آنها عدم قطعیت وجود دارد. در این مقاله تلاش شده است که مدلی واقع‌گرایانه برای مسأله تخصیص سلاح پیشنهاد شود. لذا، یک مدل چندمعیاره و چندمرحله‌ای برای تخصیص سلاح ارائه شده است که در آن کمینه‌سازی احتمال بقای مورد انتظار اهداف مهاجم، کمینه‌سازی هزینه‌های تسلیحاتی و کمینه‌سازی خطرپذیری تخصیص سلاح در هر مرحله از رویارویی‌ها به‌عنوان معیارهای تصمیم در نظر گرفته شده است. در این مقاله برای نزدیک‌تر کردن مدل به شرایط دنیای واقعی، محدود بودن تعداد سلاح‌های موجود و همچنین محدودیت‌های فنی، محیطی و ساختاری به‌عنوان مجموعه جدیدی از محدودیت‌ها معرفی می‌گردند. در پایان مدل چندهدفه تخصیص سلاح با استفاده از الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیرمغلوب حل شده و یک جبهه پارتو بهینه از مسأله ترسیم شده است. مقایسه جواب‌های تولیدشده (از نظر کیفیت و سرعت یافتن آنها) با پیشنهاد‌های ارائه‌شده توسط فرماندهان خبره نظامی نشان‌دهنده کاربردی بودن مدل سازی انجام شده و روش حل می‌باشد.

**کلیدواژه‌ها:** فرماندهی و کنترل، تخصیص سلاح پویا، بهینه‌سازی چندهدفه

## A Multi-Stage Modelling Approche for Allocation of Defense Resources to Invading Targets

A. R. Asadi Ghanbari, H. Alaei\*, M. Mohammadnia

Imam Hossein University

(Received: 22/06/2019; Accepted: 09/12/2019)

### Abstract

Weapon target allocation (WTA) is a command and control main components. In this process, the critical time-based decisions often is made under uncertainty. In this paper attempt has been made to propose a realistic approach to WTA problem. We consider a multi-stage weapon target allocation with multiple criteria including: Minimizing the expected total value of surviving targets, minimizing the military resource costs and minimizing the allocation risks. In the following study to develop a more realistic weapon target allocation model, we have tried to bring almost all ignored constraints such scarcity of weapons, technological, atmospheric/geographical (e.g. terrain) and structural limitations into account. Finally Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II) has been used for solving multi-objective WTA problem and a Pareto optimal front for the model is depicted. Comparison of the calculated solutions (from the point of quality and speed of calculation) with those provided with expert commanders, suggests that the modelling and solving method have been successfully designed and match the application greatly.

**Keywords:** Command and Control (C2); Dynamic Weapon Target Allocation (DWTA); Multi-objective optimization

\* Corresponding Author E-mail: Hossein.Alaiceo@gmail.com

## ۱. مقدمه

سلاح‌های پدافندی/تهاجمی به اهداف مهاجم/مدافع تخصیص داده می‌شود [۴].

(b) **دسته دوم**، شامل مدل‌های تخصیص منابع پدافندی به اهداف مهاجم است که در آنها اعمال و اقدام‌های طرف مقابل نیز در مدل‌سازی نظر گرفته می‌شود. این دسته از مدل‌ها اغلب از مفاهیم بازی دو-نفره-جمع-صفر<sup>۴</sup> حوزه نظریه بازی‌ها در مدل‌سازی و فرآیند حل مسئله استفاده می‌کنند [۲].

در تحقیق‌های اولیه‌ای که در حوزه تخصیص سلاح صورت گرفته است غالباً به سناریوهای تهاجمی پرداخته شده است، ولی در کارهای تحقیقاتی انجام‌شده در سال‌های اخیر، بیشتر حالت پدافندی مسئله مورد توجه قرار گرفته است [۵-۶]. همچنین در کارهای انجام‌شده در این حوزه، حالت ایستا مسئله تخصیص سلاح بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. اولین مدل‌سازی پویا از این مسئله یا به عبارتی تخصیص سلاح چندمرحله‌ای، توسط حسین و آتن [۷] پیشنهاد شده و پس از آن، رویکرد پویا توجه بیشتری را در مجامع تحقیقاتی به خود جلب کرده است [۸-۹]. تمرکز این مقاله بر روی سناریوهای پدافندی و پویا است. یک بررسی جامع از رویکردهای مختلف مدل‌سازی تخصیص سلاح و روش‌های حل آن، اخیراً توسط کلین و همکاران صورت گرفته است [۱۰].

## ۳. شرح مسئله

سناریوی مورد بررسی شامل یک ناحیه پدافندی است که توسط مجموعه‌ای از مهاجمین موردحمله قرار می‌گیرد. این تهدیدها که دارای سطوح تهدیدکنندگی متفاوتی هستند، به صورت سریال یا همزمان با یک توزیع تصادفی از جهت‌های مختلف به دارایی‌های پدافندی حمله می‌کنند. موقعیت جغرافیایی دارایی‌ها و سلاح‌های پدافندی، ثابت و بدون حرکت فرض می‌شوند و هندسه، پیکربندی و ارزش آنها در طی درگیری‌ها ثابت و بدون تغییر باقی می‌ماند. فرض می‌شود که نیروهای خودی با مجموعه‌ای از سلاح‌ها تجهیز شده‌اند. برای هر سلاح دو پارامتر در نظر گرفته می‌شود،  $P_{ik}$  و  $C_{ik}$ . مدیر منابع رزمی می‌تواند که  $k$  سلاح  $(0 \leq k \leq |W|)$  را برای مقابله با یک تهدید خاص مورد استفاده قرار دهد. قدرت کشندگی  $k$  شلیک از سلاح‌های پدافندی بر روی هدف مهاجم  $i$  (یا احتمال بقای هدف مهاجم) با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌گردد:

$$\prod_{k=1}^K (1 - P_{ik})^{X_{ik}} \quad (1)$$

$$X_{ik} \in \{0, 1\}$$

در جدول (۱)، نمادها و نشانه‌گذاری‌هایی موردنیاز برای مدل‌سازی مسئله تخصیص سلاح ارائه شده است.

مسئله تخصیص سلاح<sup>۱</sup> به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های مهم و کلیدی در سیستم‌های مدیریت منابع رزمی<sup>۲</sup>، فرآیندی است که در آن برای طرح‌ریزی تخصیص بهینه سلاح‌های موجود به اهداف مهاجم تصمیم‌گیری می‌شود. به‌دلیل منحصربه‌فرد بودن هر سناریوی جنگی، این مسئله باید به‌صورت زمان‌واقعی<sup>۳</sup> حل شده و با توجه به شرایط لحظه‌ای میدان نبرد، بهبود داده شود [۱-۲]. بسیاری از مدل‌های ارائه‌شده در متون منتشرشده این حوزه، از عدم‌واقع‌گرایی رنج می‌برند. در این مقاله تلاش شده تا حد ممکن کمبودها و نواقص موجود در مدل‌هایی که از مسئله ارائه شده است، برطرف گردد. لذا، یک مدل چندهدفه چندمرحله‌ای برای مسئله پیشنهاد شده است که در آن کمینه‌سازی بقای موردانتظار اهداف مهاجم، کمینه‌سازی هزینه منابع تسلیحاتی و کمینه‌سازی خطرپذیری تخصیص منابع، به‌عنوان توابع هدف در نظر گرفته شده است. مدل ارائه‌شده بهبودهایی را در مدل تخصیص سلاح چندهدفه اولیه ایجاد کرده است، که از جمله آنها می‌توان به در نظر گرفتن شرایط محیطی و لحاظ کردن محدودیت‌های واقعی اشاره کرد. همچنین، در مدل پیشنهادشده خاصیت دنباله‌ای مسئله موردتوجه قرار گرفته و تخصیص سلاح به‌عنوان یک مسئله چندمرحله‌ای فرموله شده است.

در این مقاله، در بخش دوم تاریخچه کارهای مرتبط با مسئله تخصیص سلاح مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش سوم تعاریف و فرض‌های موردنیاز برای مدل‌سازی مسئله ارائه می‌شود. در بخش چهارم مدل تخصیص سلاح و معیارهای تصمیم و مدل چندهدفه و چندمرحله‌ای پیشنهاد شده تشریح می‌گردد. در بخش پنجم مدل طراحی‌شده با استفاده از یک سناریوی فرضی مورد آزمایش قرار می‌گیرد. در بخش آخر، مطالب ارائه‌شده جمع‌بندی شده و پیشنهادهایی برای مطالعه‌ها آینده ارائه می‌شود.

## ۲. پیشینه تحقیق

تاریخچه تحقیق بر روی مسئله تخصیص منابع با مقاصد نظامی به دهه‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ میلادی بر می‌گردد. در این سال‌ها اولین روش‌های مدل‌سازی برای مسئله تخصیص سلاح مورد بررسی قرار گرفت [۳]. متون منتشرشده در این حوزه به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند:

(a) **دسته اول**، شامل رویکردهایی برای مدل‌سازی تخصیص منابع است که در آنها بدون در نظر گرفتن رفتارهای طرف مقابل،

<sup>1</sup> Weapon Target Allocation (Wta)

<sup>2</sup> Combat Power Management (Cpm) Systems

<sup>3</sup> Real-Time

<sup>4</sup> Two-Person-Zero-Sum-Game

## جدول ۱: نمادها و نشانه‌گذاری‌ها

<b>مجموعه‌ها:</b>
$T_i$ : مجموعه اهداف مهاجم شناسایی شده $i = 1, 2, \dots, I$
$W_k$ : مجموعه سلاح‌های پدافندی $k = 1, 2, \dots, K$
$A_j$ : مجموعه‌ی دارایی‌های پدافندی $j = 1, 2, \dots, J$
$S = 1, 2, \dots, S$ : مجموعه مراحل رویارویی.
$T_i$ : مجموعه اهداف مهاجم شناسایی شده $i = 1, 2, \dots, I$
<b>پارامترها:</b>
$P_{ik}$ : احتمال کشتندگی تخمینی، یعنی احتمال این که تخصیص سلاح $w_k \in W$ هدف مهاجم $T_i \in T$ را نابود کند.
$P_{ik}^s$ : احتمال این که تخصیص سلاح $k$ در مرحله $s$ هدف $i$ را نابود کند.
$\pi_{ij}$ : احتمال این که هدف $T_i \in T$ دارایی $A_j \in A$ را نابود کند (کشتندگی تخمینی هدف مهاجم $T_i \in T$ ).
$V_{ij}$ : مقدار تهدید زوج هدف مهاجم-دارایی پدافندی $(T_i, A_j)$ .
$\omega_j$ : ارزش محافظت از دارایی پدافندی $A_j \in A$ .
$C_{ik}$ : میزان هزینه تخصیص واحد آتش $w_k \in W$ به هدف مهاجم $T_i \in T$ .
$N_k^s$ : حداکثر تعداد هدف مهاجمی که سلاح $k$ می‌تواند در مرحله $s$ به آنها شلیک کند.
$N_k$ : حداکثر تعداد دفعاتی که سلاح $k$ می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.
$F^s = [H_{ik}^s]_{I \times K}$ : ماتریس امکان‌سنجی رویارویی (اگر $H_{ik}^s = 0$ اگر سلاح $k$ نتواند به هر دلیلی در مرحله $s$ به هدف مهاجم $i$ شلیک کند و $H_{ik}^s = 1$ در غیر این صورت).
<b>متغیرها:</b>
اگر سلاح $w_k$ به هدف مهاجم $T_i$ تخصیص داده شود $X_{ik} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$ در غیر این صورت
$[X_{ik}^s]_{I \times K}$ : ماتریس تصمیم در مرحله $s$ .

مانند محدودیت‌های منابع و محدودیت مرتبط با امکان‌پذیری رویارویی<sup>۲</sup> نیز باید در فرآیند مدل‌سازی لحاظ شوند.

## ۴-۱. معیارهای تصمیم

در این مقاله برای شبیه‌سازی واقعی‌تر سناریوهای پدافندی، سه معیار تصمیم در نظر گرفته می‌شود: جمع مقدار هدف موردانتظار<sup>۳</sup> (ETV) اهداف مهاجم، هزینه استفاده از سلاح<sup>۴</sup> (CWU) برای حفاظت از دارایی‌های و خطرپذیری تخصیص منابع<sup>۵</sup> (RRA). شایان ذکر است که این معیارها الزاماً بیان‌کننده مجموعه‌ای کامل از معیارهای تصمیم‌گیری واقعی که توسط فرماندهان مورد استفاده قرار می‌گیرد نمی‌باشد. برای جامع‌تر و واقعی‌تر شدن آنها، معیارهای غیرملموسی مانند اقناع سیاسی<sup>۶</sup> و معیارهای شناختی مانند سطح استرس می‌تواند به‌عنوان توابع هدف تعریف گردد [۶].

**کمینه‌سازی جمع مقدار هدف موردانتظار:** مسأله تخصیص سلاح می‌تواند به‌عنوان یک مسأله بهینه‌سازی مطرح گردد که نیروهای خودی قصد دارند واحدهای آتش را به‌منظور کمینه‌سازی جمع مقدار هدف مورد انتظار (تهدید ایجادشده به‌وسیله اهداف مهاجم برای مجموعه دارایی‌های پدافندی) اهداف مهاجم تخصیص دهند. در متون حوزه فرماندهی و کنترل روش‌های مختلفی برای محاسبه مقدار هدف پیشنهاد شده است [۱۱]. این مقاله مقدار هدف به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد:

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

اگر یک سناریوی پدافندی شامل  $K$  واحد آتش و  $I$  هدف مهاجم باشد، معیار تصمیم برای محاسبه جمع مقدار هدف موردانتظار اهداف مهاجم به‌صورت زیر فرموله گردد:

$$f_1 = \sum_{i=1}^I V_i \prod_{k=1}^K (1 - P_{ik})^{X_{ik}} \quad (3)$$

در متون این حوزه از تابع هدف  $f_1$  اغلب به‌عنوان مدل تخصیص سلاح هدف-محور ایستا نام‌برده می‌شود [۱۲]. از آنجا که در این تابع مقادیر هدف نمی‌توانند مقدار منفی داشته باشند (با توجه به تعریف)، مقدار تابع هدف  $f_1$  در بازه  $f_1 \in \left[ 0, \sum_{i=1}^I V_i \right]$  قرار می‌گیرد.

## ۴. مدل‌سازی تخصیص سلاح

مسأله تخصیص سلاح ماهیتاً یک مسأله چندهدفه است، بنابراین برای مدل‌سازی واقع‌گرایانه مسأله باید چندین تابع هدف به‌صورت همزمان بهینه گردد. همچنین، محدودیت‌های عملیاتی<sup>۱</sup> مسأله،

<sup>۲</sup> Engagement Feasibility<sup>۳</sup> The Total Expected Target Value (Etv)<sup>۴</sup> The Cost of the Weapon Usage (Cwu)<sup>۵</sup> The Risk of Resource Allocation (Rra)<sup>۶</sup> Political Satisfaction<sup>۱</sup> Operational Constraints

نمی‌توانند مقدار منفی داشته باشند، مقادیر خروجی تابع هدف

$$f_3 \text{ در بازه } \left[ 0, \sum_{j=1}^J \omega_j \cdot \sum_{i=1}^I \pi_i \right] \text{ قرار می‌گیرد.}$$

#### ۲-۴. محدودیت‌ها

در مسأله تخصیص سلاح محدودیت‌ها و قیود مختلفی وجود دارند که باید قبل از انجام فرآیند بهینه‌سازی ارضاء گردند. در این مقاله برای واقعی‌تر شدن مدل تخصیص سلاح، مجموعه‌ای از محدودیت‌ها در نظر گرفته شده است که در ادامه تشریح خواهند شد:

**محدودیت منابع:** هر سلاح دارای تعداد محدودی گلوله می‌باشد؛ بنابراین، این سلاح در طول تمامی مراحل درگیری و انجام روبرویی با دشمن نمی‌تواند بیش از این تعداد مشخص به کار گرفته شود.

$$\sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^I X_{ik} \leq N_k \quad \forall k = 1, 2, \dots, K$$

$$\sum_{i=1}^I X_{ik}^s \leq N_k^s \quad \forall s = 1, 2, \dots, S, \quad (۶)$$

$$\forall k = 1, 2, \dots, K$$

$N_k^s$  نشان‌دهنده تعداد گلوله‌های باقی‌مانده برای سلاح  $k$  در مرحله  $s$  است (حداکثر تعداد هدف مهاجمی که سلاح  $k$  می‌تواند در مرحله  $s$  به آنها شلیک کند). این مقدار وابسته به تعداد گلوله‌هایی که در مراحل قبلی استفاده شده و همچنین سیاست روبرویی است. در این مقاله برای ساده‌سازی، فرض می‌شود که مقدار  $N_k^s$  فقط وابسته به تعداد گلوله‌هایی است که در مراحل قبل استفاده شده است:

$$N_k^s = N_k - B_k \quad (۷)$$

$N_k$  نشان‌دهنده تعداد کل گلوله‌های سلاح نوع  $k$ ،  $B_k$  تعداد گلوله‌هایی از این نوع سلاح است که در طی مراحل قبل مورد استفاده قرار گرفته است. این محدودیت به‌عنوان محدودیت منابع شناخته می‌شود. در مدل ارائه‌شده در این مقاله فرض می‌شود که در طی یک مأموریت خاص امکان به‌کارگیری مهمات اضافی امکان‌پذیر نبوده و تعداد مهمات سلاح‌ها در طی یک عملیات قابل افزایش نیست.

**محدودیت امکان روبرویی با توجه به محدودیت استفاده پی‌درپی:** برای نوع خاصی از سلاح‌ها ممکن است استفاده پی‌درپی امکان‌پذیر نباشد. این محدودیت می‌تواند به‌صورت زیر فرموله گردد:

**کمینه‌سازی هزینه استفاده از سلاح:** حفظ منابع پدافندی (مانند موشک‌ها زمین به هوا) به دو دلیل از اهمیت بالایی برخوردار است: به‌منظور استفاده از آنها در حملات احتمالی آتی و همچنین قیمت بالای این دسته از منابع [۶]. در این مقاله تابع هدف زیر به‌عنوان یک معیار تصمیم برای به‌کارگیری اثربخش‌تر سلاح‌های پدافندی پیشنهاد شده است:

$$f_2 = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I X_{ik} C_{ik} \quad (۴)$$

هزینه استفاده از منابع با توجه به ماهیت آن هرگز نمی‌تواند مقدار منفی داشته باشد؛ لذا مقادیر خروجی تابع هدف  $f_2$  در

$$\text{بازه } \left[ 0, \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I C_{ik} \right] \text{ قرار می‌گیرد.}$$

**کمینه‌سازی خطرپذیری تخصیص سلاح:** خطرپذیری همیشه معیاری مهم در تصمیم‌گیری است. در مسأله تخصیص سلاح، خطرپذیری ممکن است وابسته به تخصیص نامناسب (نابه‌جا) سلاح‌ها به اهداف مهاجم باشد. این عدم تناسب می‌تواند به‌دلیل نوع سلاح‌ها و اولویتی باشد که با توجه آن تخصیص صورت می‌گیرد. بنابراین در فرآیند تخصیص سلاح، دو نوع خطرپذیری می‌تواند به‌صورت زیر تعریف شود:

- **خطرپذیری اتمام گلوله:** این نوع خطرپذیری وابسته به اتمام گلوله سلاح می‌باشد.

- **خطرپذیری اولویت:** سلاحی که در یک مرحله خاص استفاده می‌شود ممکن است به‌کارگیری آن برای مقابله با تهدیدهای مهاجم در مراحل بعدی مناسب‌تر از مرحله کنونی باشد.

در این مقاله نوع دوم خطرپذیری موردتوجه قرار گرفته و به‌عنوان یک تابع خطرپذیری جدید مدل شده است. این تابع با استفاده از میزان کشندگی اهداف مهاجمی که به هر دلیلی (مانند: استفاده شدن سلاح‌ها در مراحل قبل، سیاست روبرویی و مقدار ارزش محافظت دارایی‌های پدافندی) سلاح پدافندی نمی‌تواند به آنها تخصیص داده شود محاسبه می‌گردد. این تابع خطرپذیری به‌صورت زیر فرموله می‌گردد:

$$f_3 = \sum_{j=1}^J \omega_j \cdot \left\{ \sum_{i=1}^I \pi_i \cdot \prod_{k=1}^K (1 - X_{ik}) \right\} \quad (۵)$$

در این تابع خطرپذیری، فرض می‌شود که یک تهدید مهاجم که هیچ سلاحی برای مقابله به آن تخصیص داده نشده است برای کل مجموعه دارایی‌های پدافندی خطرپذیری تلقی می‌گردد. عبارت  $\omega_j \cdot \left\{ \sum_{i=1}^I \pi_i \dots \right\}$  در رابطه (۵) منعکس‌کننده این واقعیت است. از آنجا که ارزش محافظت دارایی پدافندی  $\omega_j$  و میزان کشندگی هدف مهاجم  $\pi_i$  با توجه به تعریف آنها هرگز

$$\max \sum_{s=1}^S F(w_l^s, f_l^s) \quad l=1, \dots, L \quad (13)$$

که  $L$  نشان‌دهنده شماره معیار تصمیم،  $s$  مرحله و  $W$  میزان ارجعیت (وزن) تابع هدف موردنظر است. در مدل پیشنهادشده مجموعه معیارهای تصمیم، ترکیبی از  $RRA$  و  $ETV$ ،  $CWU$  به‌عنوان تابع هدف است. با توجه به تفاوت در ماهیت توابع هدف، بازه تغییرات مقدار آنها متفاوت بوده و خروجی حاصل از آنها باید نرمال‌سازی شود [۱].

به‌منظور واقع‌گرایانه کردن مدل، مسأله تخصیص سلاح به‌گونه‌ای مدل‌سازی شده است که بتواند با وجود تغییرات در شرایط تاکتیکی به نتایج بهینه سازگار<sup>۱</sup> منتج شود. لذا، در فرموله‌سازی مسأله جنبه چندهدفه در نظر گرفته شده است. مدل ارائه‌شده بهبودهایی را در مدل تخصیص سلاح چندهدفه اولیه ایجاد کرده است که از جمله آنها می‌توان به در نظر گرفتن شرایط محیطی و لحاظ کردن محدودیت‌هایی مانند: استفاده از سلاح‌ها در بازه‌های معین، محدودیت‌های منابع و محدودیت‌های استفاده پی‌درپی، اشاره کرد. همچنین، در مدل پیشنهادشده خاصیت دنباله‌ای مسأله مورد توجه قرار گرفته و فرآیند تخصیص سلاح به‌عنوان یک مسأله چندمرحله‌ای فرموله شده است.

### ۵. پیاده‌سازی مدل

در این بخش، به‌منظور آزمایش مدل ارائه‌شده سناریویی که در آن دارایی پدافندی توسط مجموعه‌ای از اهداف مهاجم مورد حمله قرار می‌گیرد در نظر گرفته شده است. یک راه‌حل برای مسأله تخصیص سلاح می‌تواند به‌صورت ماتریسی از متغیرهای تصمیم به‌صورت زیر بیان شود:

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

که در آن،  $X_{ik} = 1$  است اگر سلاح  $w_k \in W$  به هدف مهاجم  $T_i \in T$  تخصیص داده شود و  $X_{ik} = 0$  است اگر سلاح  $w_k \in W$  به هدف مهاجم  $T_i \in T$  تخصیص داده نشود.

چنین راه‌حلی، عملی (انجام‌پذیر) است اگر بتواند مجموعه محدودیت‌های موجود را ارضاء نماید. برای یک نمونه مفروض از مسأله که شامل  $I$  هدف مهاجم و  $K$  واحد آتش است،  $I^K$  راه‌حل ممکن وجود دارد. در این بخش به‌منظور ساده‌سازی، فرض

$$\sum_{h=s}^{s+q} X_{ik}^s \leq 1, \quad \forall h=1, 2, \dots, S-q \quad (8)$$

که  $q$  نشان‌دهنده تعداد مراحل است که برای آماده‌سازی مجدد سلاح موردنیاز است و  $h$  نشان‌دهنده مرحله جاری است. در طی این مراحل نمی‌توان از سلاح موردنظر استفاده کرد. مسائلی مانند خنک‌سازی، ساختار سلاح و زمان مورد نیاز برای گلوله‌گذاری مجدد در بروز این محدودیت‌ها مؤثر می‌باشند. برای مثال در سیاست رویارویی شلیک-بررسی-شلیک اگر  $q = 1$  و سلاح  $w_1$  در مرحله  $s = 1$  مورد استفاده قرار گرفته باشد، این سلاح برای مرحله  $s = 2$  قابل دسترس نخواهد بود. این محدودیت می‌تواند به‌صورت زیر فرموله گردد:

$$\begin{aligned} X_{ik}^1 + X_{ik}^{1+1} &\leq 1, \quad \forall s=1, 2, \\ \forall i &= 1, 2, \dots, I, \\ \forall k &= 1, 2, \dots, K \end{aligned} \quad (9)$$

**تخصیص همه سلاح‌های موجود:** برخی از سلاح‌ها در بعضی از مراحل رویارویی می‌توانند تخصیص داده نشوند. این محدودیت بیان‌کننده این مسأله است که الزامی برای استفاده از تمامی سلاح‌ها در هر مرحله از رویارویی‌ها وجود ندارد.

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^I X_{ik}^s &\leq 1, \quad \forall k=1, 2, \dots, K, \\ \forall s &= 1, 2, \dots, S \end{aligned} \quad (10)$$

این محدودیت اغلب در مدل تخصیص سلاح وجود دارد و در این مقاله محدودیت عمومی نامیده می‌شود.

**تخصیص کامل:** رابطه (۱۱) نشان می‌دهد که در طی مراحل درگیری با مهاجمین، تخصیص کسری واحدهای آتش به اهداف مهاجم امکان‌پذیر نیست [۶].

$$\begin{aligned} X_{ik}^s &\in \{0, 1\}, \quad \forall s=1, 2, \dots, S, \\ \forall i &= 1, 2, \dots, I, \\ \forall k &= 1, 2, \dots, K \end{aligned} \quad (11)$$

### ۳-۴. مدل تخصیص سلاح چندمرحله‌ای چندمعیاره

با توجه به توابع هدف و با در نظر گرفتن میزان ارجحیت هر یک از آنها، مسأله تخصیص سلاح را می‌توان به‌صورت یک مسأله بهینه‌سازی چندهدفه به‌صورت زیر طراحی نمود:

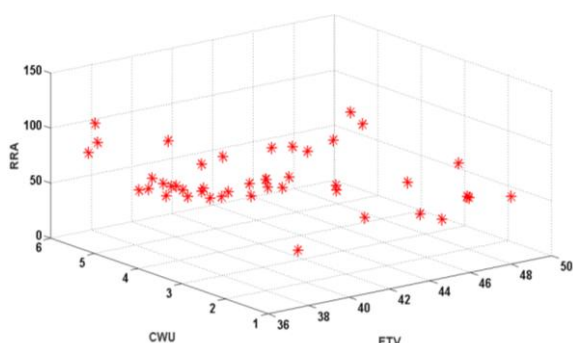
$$U = (f_1, \dots, f_L) \quad (12)$$

سپس جواب‌های بهینه به‌دست‌آمده پس از کمینه‌سازی تابع بهینه‌سازی چند هدفه  $U$  را به‌صورت زیر الحاق می‌کنیم:

<sup>1</sup> Consistent Optimal Solution

جدول ۲. پارامترهای توابع هدف

$\pi = \begin{bmatrix} 0.7 \\ 0.4 \end{bmatrix}$	قدرت کشندگی اهداف مهاجم
$C_{[T \times W]} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.7 \\ 0.2 & 0.8 \end{bmatrix}$	هزینه استفاده از سلاح‌ها
$\omega_{[A \times 1]} = \begin{bmatrix} 0.7 \\ 0.6 \end{bmatrix}$	ارزش محافظت از دارایی‌ها
$V_{[T \times 1]} = \begin{bmatrix} 0.8 \\ 0.5 \end{bmatrix}$	مقدار هدف
$P_{[T \times W]} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.4 \\ 0.6 & 0.9 \end{bmatrix}$	احتمال کشندگی سلاح‌ها



شکل ۱. نتایج حاصل از حل مسأله تخصیص سلاح با استفاده از الگوریتم NSGA-II [۱۳].

## ۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله تلاش شد، رویکردی واقع‌گرایانه برای مدل‌سازی تخصیص سلاح ارائه گردد. بنابراین، یک مدل چندمرحله‌ای تخصیص سلاح با استفاده از چندین معیار تصمیم متفاوت ارائه شد. در این مدل، کمینه‌سازی احتمال بقای موردانتظار اهداف مهاجم، کمینه‌سازی هزینه‌های تسلیحاتی و کمینه‌سازی خطرپذیری تخصیص سلاح در هر مرحله از رویارویی‌ها به‌عنوان معیارهای تصمیم در نظر گرفته شد. برای نزدیک کردن مدل به شرایط واقعی، محدود بودن تعداد سلاح‌ها و همچنین محدودیت‌های فنی، محیطی و ساختاری به‌عنوان مجموعه جدیدی از محدودیت‌ها معرفی گردید. در پایان جبهه پارتو بهینه مسأله با استفاده از الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیرمغلوب ترسیم شد. در فرآیند تخصیص سلاح، اغلب سطوح مختلفی از فرماندهی وجود دارد و در نظر گرفتن سلسله مراتب فرماندهی می‌تواند در تحقیق‌های آتی مورد بررسی قرار گیرد. انواع مختلف همکاری در سیستم‌های توزیع شده، به‌ویژه برای جنگ‌های ائتلافی از دیگر موضوع‌های جذاب برای تحقیق‌های آینده است.

می‌شود که تخصیص کسری سلاح امکان‌پذیر نیست و هر سلاح در هر مرحله از رویارویی می‌تواند حداکثر به یک هدف مهاجم تخصیص داده شود درحالی‌که از سایر محدودیت‌ها مسأله چشم‌پوشی شده است. برای مثال اگر پارامترهای تابع هدف به‌صورت جدول (۲) تعیین شوند، یک جبهه پارتو برای مدل چندهدفه تخصیص سلاح به‌صورت شکل (۱) خواهد بود. برای ترسیم این جبهه پارتو از الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیرمغلوب<sup>۱</sup> استفاده شده است [۱۳].

الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیرمغلوب توسط دب و همکارانش [۱۳] در سال ۲۰۰۲ پیشنهاد شد. این الگوریتم بر مبنای مفاهیم پارتو بوده و با اضافه شدن دو عملگر ضروری به الگوریتم ژنتیک تک‌هدفی معمولی، به یک الگوریتم چندهدفه تبدیل شده است که به‌جای یافتن بهترین جواب، دسته‌ای از بهترین جواب‌ها را نتیجه می‌دهد. این دو عملگر عبارتند از: (۱) عملگری که یک معیار برتری (رتبه) بر اساس مرتب‌سازی نامغلوب به اعضای جمعیت اختصاص می‌دهد و (۲) عملگری که تنوع راه‌حل را در میان راه‌حل‌های با رتبه برابر حفظ می‌کند [۱۳]. الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیرمغلوب یک الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه کارا با پیچیدگی محاسباتی  $O(M.N.\log N)$  است که  $M$  تعداد توابع هدف و  $N$  اندازه جمعیت است [۱۳].

از آنجا که در مدیریت منابع رزمی زمان یک فاکتور بسیار حیاتی است یافتن جواب یا جواب‌های بهینه در کوتاه‌ترین زمان ممکن یک مسأله مهم در این حوزه است. انتخاب رویکرد مناسب برای حل مسأله تخصیص سلاح وابسته به ساختار مسأله بوده و روش‌های به‌کار گرفته شده باید سرعت و دقت جواب‌های پیداشده را بهبود دهند [۱۴]. لذا در این مقاله الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیرمغلوب برای حل مسأله تخصیص سلاح چندهدفه استفاده شده است. در این مقاله الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیرمغلوب با کدینگ عدد صحیح، برش تک‌نقطه‌ای<sup>۲</sup> جهش رشته‌بیتی<sup>۳</sup> برای حل مسأله تخصیص سلاح استفاده شده است.

در شکل (۱) هر نقطه نشان‌دهنده یک تصمیم بهینه است که توسط متغیر تصمیم  $X_{ik}$  تعیین می‌گردد. هر تصمیم بهینه شامل مقدار کمینه شده خطرپذیری، هزینه و احتمال بقای دشمن است. مقایسه جواب‌های ارائه‌شده توسط الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیرمغلوب با پیشنهاد‌های فرماندهان خبره نظامی حاکی از کاربردی بودن مدل‌سازی انجام‌شده و روش حل ارائه‌شده دارد. در این مثال فرض شده است که تعداد اهداف مهاجم ۲، تعداد سلاح ۲ و تعداد دارایی‌های پدافندی نیز ۲ عدد است.

<sup>۱</sup> Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-II (Nsga-II)

<sup>۲</sup> Single-Point Crossover

<sup>۳</sup> Bit String Mutation

## ۷. مراجع‌ها

- [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] Ahner, D. K.; Parson, C. R. "Optimal Multi-Stage Allocation of Weapons to Targets Using Adaptive Dynamic Programming"; *Optim. Lett.* 2015, 9, 1689–1701.
- [9] Kalyanam, K.; Rathinam, S.; Casbeer, D.; Pachter, M. "Optimal Threshold Policy for Sequential Weapon Target Assignment"; *IFAC-PapersOnLine* 2016, 49, 7–10.
- [10] Kline, A. G.; Ahner, D. K.; Hill, R. "The Weapon-Target Assignment Problem"; *Comput. Oper. Res.* 2019, 105, 226–236.
- [11] Johansson, F. "Evaluating the Performance of TEWA Systems"; Ph.D Thesis, University of Skövde, Skövde, 2010.
- [12] Kline, A. G.; Ahner, D. K.; Lunday, B. J. "Real-Time Heuristic Algorithms for the Static Weapon Target Assignment Problem"; *J. Heuristics* 2018, 1, 1–21.
- [13] Coello, C. A. C.; Lamont, G. B.; Veldhuizen, D. A. V. "Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems Second Edition"; Springer, New York, 2007.
- [14] Mohammadi, R.; Parsaei, M. R.; Javidan, R.; Akbari, R. "An Effective Countermeasure Method against Freeloading Attack in Software Defined Networks"; *Adv. Defence Sci. Technol.* 2018, 9, 211-219. (In Persian)
- [1] Parson, C. R. "Approximate Dynamic Programming For Military Resource Allocation"; Ph.D Thesis, Air Force Institute of Technology, Ohio, 2014.
- [2] Zhang, J.; Zhuang, J. "Modeling a Multi-Target Attacker-Defender Game with Multiple Attack Types"; *Reliab Eng. Syst. Saef.* 2019, 185, 465–475.
- [3] Manne, A. S. "A Target-Assignment Problem"; *Oper. Res.* 1958, 6, 346–351
- [4] Hocaoglu, M. F. "Weapon Target Assignment Optimization for Land Based Multi-Air Defense Systems: A Goal Programming Approach"; *Comput. Ind. Eng.* 2019, 128, 681–689.
- [5] 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.
- [6] 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.