



## یک الگوریتم جستجوی ممنوعه ترکیبی برای مسأله چیدمان حامل های جنگی و تخصیص سلاح های آنها به تهدیدها در حالت تهاجمی

محمد رنجبار<sup>۱</sup>، محبوبه پیمان کار<sup>۲</sup>، مهدی لطفی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشیار و عضو هیئت علمی گروه مهندسی صنایع، دانشگاه فردوسی؛ m\_ranjbar@um.ac.ir  
<sup>۲</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه فردوسی؛ ma.peymankar@stu.um.ac.ir  
<sup>۳</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه فردوسی؛ lotfi.m@stu-mail.um.ac.ir

### چکیده

با توجه به نقش و اهمیت چیدمان تسلیحات دفاعی در صحنه نبرد و نحوه تخصیص تسلیحات موجود به تهدیدهای مهاجم، استفاده از مدل های ریاضی در این گونه مسائل ضروری است و منجر به تصمیم گیری سریع در شرایط احتمالی صحنه نبرد می شود. در این مقاله یک مدل برنامه ریزی غیر خطی عدد صحیح برای مسأله چیدمان حامل های جنگی و تخصیص سلاح آنها به تهدیدها در حالت تهاجمی و با هدف وارد کردن بیشترین تخریب به تهدیدها ارائه شده است. از آنجایی که حل دقیق مدل ارائه شده با استفاده از نرم افزارهای موجود تحقیق در عملیات امکان پذیر نیست، یک روش فرا ابتکاری برای حل آن پیشنهاد شده است. روش ارائه شده ترکیبی از روش جستجوی ممنوعه و یک روش ابتکاری است. هدف استفاده از روش جستجوی ممنوعه ایجاد چیدمان های مختلف است. برای هر یک از چیدمان های به دست آمده، از روش ابتکاری پیشنهاد شده کمک گرفته و بهترین نحوه تخصیص تسلیحات به تهدیدها ایجاد می شود. بنابراین با ترکیب این دو روش می توان بهترین چیدمان و تخصیص سلاح را پیدا کرد. در نهایت، نحوه استفاده از روش حل بر روی مثالی پیاده شده و نتایج عددی آن بررسی شده است.

### کلمات کلیدی

تخصیص سلاح، چیدمان، جستجوی ممنوعه، روش ابتکاری، برنامه ریزی غیر خطی عدد صحیح

## A hybrid tabu search algorithm for warships location and their weapons assignment against aggressive threats in attack case

Mohammad Ranjbar, Mahbube Peymankar, Mahdi Lotfi

Associate Professor of Industrial Engineering, Ferdowsi University of Mashhad  
M.Sc. Student of Industrial Engineering, Ferdowsi University of Mashhad  
M.Sc. Student of Industrial Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

### ABSTRACT

In this paper, we consider the problems of location and weapons assignment of a group of warships against a group of aggressive threats (warships). Each warship, including a set of weapons, is placed in one of the locations predefined for it. In addition, each weapon is assigned to at most one threat. We aim to maximize the destruction of threats subject to a set of defensive constraints. We develop an integer non-linear programming model for the problem. Also, we develop a hybrid tabu search algorithm that is able to find high quality solutions in a reasonable time.

### KEYWORDS

Weapon Assignment, Location, Tabu Search, Heuristic Method, Integer Nonlinear Programming

<sup>۱</sup> نویسنده مسؤؤل: محمد رنجبار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، میدان آزادی، مشهد، تلفن: ۰۵۱۱۸۸۰۶۰۶۱.



## ۱- مقدمه

سایر روش‌های شاخه و کران ارائه شده در این است که نویسنده با بررسی این مسأله به شکل مدل‌های شبکه، حدود بالا و پایین کارایی برای آن پیدا کرده است. به همین دلیل، وی توانسته جواب بهینه‌ای برای مسأله با ۲۰۰ سلاح و ۲۰۰ هدف را در زمانی نسبتاً کم بدست آورد.

علاوه بر روش‌های دقیق، روش‌های ابتکاری و فرا ابتکاری نیز برای این مسأله پیشنهاد شده است. در [۶]، یک روش ترکیبی از الگوریتم ژنتیک و مورچگان آورده شده است. در مراجع [۱۰]-[۷]، روش‌های فرا ابتکاری نظیر ژنتیک، تجمع ذرات، مورچگان و ... برای حل این مسأله پیشنهاد شده است.

در پیشینه این موضوع، بیشتر به جنبه تخصیص سلاح‌ها به تهدیدها پرداخته شده است و در اکثر این پژوهش‌ها مکان سلاح‌ها و تهدیدها، ثابت است. فقط دو مقاله [۱۱] و [۱۲] در این بررسی، حامل‌های موجود را متحرک فرض کرده‌اند. حامل‌های موجود در [۱۱] با توجه به محدودیت سوخت، مسافت محدودی را طی می‌کنند. همچنین بعد از تخصیص سلاح به یک هدف، مکان جدید حامل، مکانی است که تهدید، در آن قرار گرفته است. یکی از نقاط ضعف این مسأله این است که با وجود چندین سلاح مختلف بر روی یک حامل و اختصاص مستقل هر یک از سلاح‌ها به تهدیدها، حامل مورد نظر در یک لحظه زمانی، باید در مکان تهدیدهای مختلف قرار گیرد که این غیر ممکن است. در [۱۲] مدلی دو مرحله‌ای برای این مسأله ارائه شده که در مرحله اول سلاح‌ها به تهدیدها با توجه به محدودیت زمانی اختصاص یافته و در مرحله دوم با توجه به شرایط مسأله حامل‌ها در فضای نبرد جابجا می‌شوند.

مسأله تعریف شده در این مقاله از نظر متحرک بودن حامل‌ها به دو مقاله اخیر، شباهت دارد. با این وجود در این مقاله سعی بر این است که کاستی‌های آن مقاله‌ها رفع شود. علاوه بر این، شیوه تعریف تابع هدف، شرایط واقعی در نظر گرفته شده در یک نبرد دریایی، محدودیت‌های موجود در دنیای واقعی و همچنین تعیین هم‌زمان چیدمان حامل‌های خودی و تخصیص تسلیحات به تهدیدهای مهاجم، از جنبه‌های نوآوری این مقاله به شمار می‌رود.

در ادامه، ابتدا تعریف دقیق مسأله و مدلسازی آن در بخش ۲ بیان می‌شود. در بخش ۳، روش حل پیشنهادی تشریح می‌گردد و در نهایت در بخش ۴، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری این مسأله، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲- تعریف مسأله و مدلسازی

هر چند تجربه و درایت فرماندهان نظامی، نقش انکارناپذیری در موفقیت عملیات جنگی دارد، اما نمی‌توان از فشارهای روانی و شرایط صحنه نبرد غافل بود. به همین دلیل در کنار تجربه و درایت فرماندهان،

اهمیت تصمیم‌گیری در برابر تهدیدهای مهاجم و عکس‌العمل سریع برای رویارویی با آنها در صحنه نبرد، بر کسی پوشیده نیست. به همین منظور، می‌توان صحنه نبرد را به صورت شبکه‌ای منسجم تصور کرد که به واسطه مدیریت و فرماندهی مطلوب، برای رسیدن به موفقیت طراحی شده است. در این مقاله سعی می‌شود با توجه به معیارها و عوامل تأثیرگذار در نبرد دریایی از برنامه‌ریزی ریاضی برای تضمین عملکرد بهتر فرماندهان در برابر تهدیدهای دشمن استفاده شود.

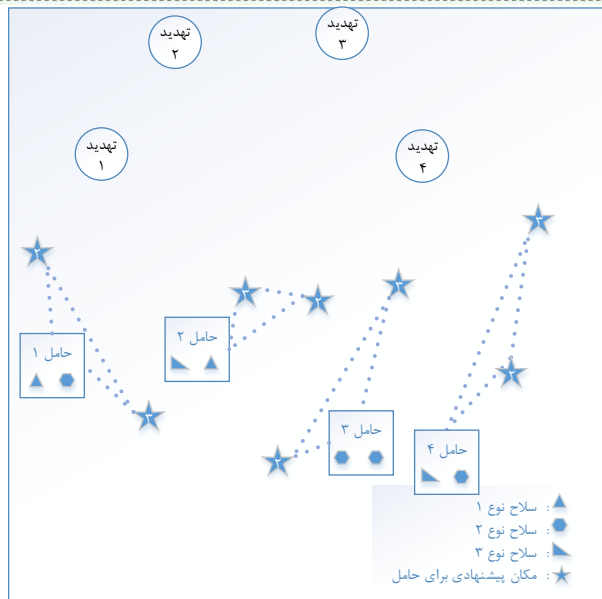
مسأله‌ای که در این مقاله بررسی می‌شود، مکان‌یابی حامل‌ها و تخصیص سلاح‌های موجود بر روی این حامل‌ها به تهدیدهای شناسایی شده است. هدف مسأله تعریف شده، حداکثر کردن تخریب وارده بر تهدیدهای مهاجم است. با حل این مسأله، استراتژی‌های بهتر شناسایی شده و با تجزیه و تحلیل آنها می‌توان بهترین استراتژی را به فرماندهان پیشنهاد کرد.

برای مرور پژوهش‌های انتشار یافته در این زمینه لازم است که مسأله تعریف شده را حالت تعمیم‌یافته‌ای از مسأله تخصیص سلاح به اهداف که در دهه ۱۹۵۰ مطرح شده، دانسته و مطالعات انجام شده در این زمینه را بررسی کرد. در مرجع [۱] اثبات شده است که مسأله تخصیص سلاح، از نظر پیچیدگی، NP-complete است و این بدان معنی است که با افزایش بعد مسأله، زمان حل آن نیز به صورت نمایی افزایش می‌یابد. بنابراین برای حل مسأله با بعد زیاد لازم است از روش‌های ابتکاری استفاده شود. اولین جمع‌بندی و مرور اجمالی از این موضوع در [۲] آمده است.

اکثر مقالات مرتبط در این زمینه، به بررسی این مسأله با هدف کمینه کردن امید ریاضی احتمال نجات تهدیدها (تهدیدهای مهاجم)، پرداخته‌اند [۳].

در پیشینه مسأله تخصیص سلاح، دو حالت کلی ایستا و پویا آورده شده است. در حالت ایستا، این مسأله در یک دوره زمانی بررسی می‌شود و فقط در همان دوره و یک بار تخصیص سلاح‌های موجود به تهدیدها انجام می‌شود. این بدان معنی است که در دوره بعدی تخصیص سلاح به تهدیدها، از نتایج حاصله تخصیص دوره قبل استفاده نمی‌شود. این در حالی است که در حالت پویا، مسأله در چندین دوره تعریف می‌شود و در هر دوره، از مجموعه‌ای از سلاح‌ها استفاده می‌شود. همچنین امکان اصلاح اطلاعات در هر دوره با توجه به اطلاعات به دست آمده از دوره‌های پیشین وجود دارد [۴].

روش‌های حل دقیق برای حل مسأله در حالت‌های خاصی مورد مطالعه قرار گرفته است. در مرجع [۵]، Ahuja برای حل دقیق این مسأله روش شاخه و کرانی پیشنهاد داده است. برتری این مقاله نسبت به



شکل (۱): ساختار نبرد دریایی

قبل از مدل سازی مسئله لازم است، پارامترها و متغیرهای مسئله به صورت اجمالی تعریف شوند.

## ۲-۱- تعریف پارامترها

پارامترهای تعریف شده به شرح جدول (۱) است.

جدول (۱): تعریف پارامترها

پارامتر	تعریف
$N = \{1, \dots, n\}$	مجموعه حاملها با اندیس $i$
$M = \{1, \dots, m\}$	مجموعه تهدیدها با اندیس $j$
$P = \{1, \dots, p\}$	مجموعه شماره مکان پیشنهادی با اندیس $l$
$x_{il}$	موقعیت افقی اولیه حامل $i$ در مکان $l$
$y_{il}$	موقعیت عمودی اولیه حامل $i$ در مکان $l$
$K_i = \{1, \dots, k_i\}$	مجموعه سلاح های حامل $i$ با اندیس $k$
$Q = \{1, \dots, q\}$	مجموعه نوع سلاحها با اندیس $v$
$r_{ik}$	برد سلاح $k$ از حامل $i$
$d_{kj}$	میزان تخریب تهدید $j$ با استفاده از سلاح $k$
$b_j$	اهمیت تهدید $j$
$a_{ik}^{max}$	حداکثر میزان دقت سلاح $k$ بر روی حامل $i$ به ازای تهدید $j$
$h_i^{max}$	حداکثر خطر قابل قبول برای حامل $i$
$\chi_j$	موقعیت افقی تهدید $j$
$\psi_j$	موقعیت عمودی تهدید $j$
$\delta_{ij}^{max}$	حداکثر میزان خطر تهدید $j$ برای حامل $i$
$G$	عددی بسیار بزرگ

واگذار کردن یکسری از تصمیم گیریها به مدل های ریاضی می تواند نتیجه مطلوب را به ارمغان آورد [۱۲].

همانطور که در بخش قبل گفته شد مسئله مورد بررسی در این مقاله حالت تعمیم یافته ای از مسئله تخصیص سلاح به تهدیدها است. در این مسئله، شبکه دفاعی که شامل تعدادی حامل است و بر روی هر حامل تعدادی سلاح از انواع مختلف وجود دارد در نظر گرفته شده است که در یک نبرد دریایی، با تعدادی تهدید (که آنها نیز در سطح دریا قرار دارند) مواجه می شوند. لازم به ذکر است که هر یک از این سلاحها دارای دقت، برد و میزان تخریب خاص خود می باشند.

بر خلاف تابع هدفهایی که تاکنون در مسئله تخصیص سلاح مبنی بر کمینه کردن احتمال نجات تهدیدها به کار رفته و مسئله به صورت احتمالی مدل سازی شده است هدف این مسئله، وارد کردن بیشترین تخریب به تهدیدها است. تخریب وارده به تهدیدها، به میزان دقت سلاح تخصیص داده شده و میزان تخریب توسط این سلاح برای یک تهدید خاص مرتبط است. از طرف دیگر، میزان دقت یک سلاح، با فاصله آن سلاح یا به عبارتی فاصله حامل مربوطه تا تهدید نسبت عکس دارد. به همین دلیل تابع هدف باید طوری تنظیم شود که این نکات در آن لحاظ شود. از طرف دیگر، به هر کدام از تهدیدهای شناسایی شده، با توجه به بزرگی و اهمیت نظامی (به عنوان مثال، حضور فرمانده خاص، داشتن سلاح های خاص و...) یک ضریب اهمیت تخصیص داده شده است. تفاوت دیگر تابع هدف این مسئله با سایر مسائل در تعیین بهترین آرایش نبرد و قرارگیری حاملها در بهترین مکان پیشنهادی در هنگام حمله است.

نکته قابل توجهی که در مدل سازی این مسئله به آن توجه شده است، در نظر گرفتن تهدید از جانب اهداف مختلف است؛ به این معنی که میزان تهدید اهداف مهاجم بر روی هر حامل با فاصله حامل تا هدف، نسبت عکس دارد. مورد دیگری که باید در این مسئله مورد توجه قرار گیرد این است که میزان تخریب یک تهدید، حداکثر به معنی نابودی کل تهدید است که از نظر مقدار، باید برابر با ۱ (۱۰۰٪) شود. به همین دلیل، همانطور که تخریب یک تهدید مهاجم که کاملاً نابود شده، بی معناست، تخصیص سلاح به چنین تهدیدی غیر منطقی خواهد بود. در مدل سازی این مسئله، سعی شده این موضوع مد نظر قرار گرفته شود.

با توجه به نحوه تعریف مسئله، می توان گفت که این مسئله در یک دوره به تخصیص سلاح و تعیین چیدمان می پردازد. بنابراین این مسئله، در گروه تخصیص سلاح به تهدیدها در حالت ایستا قرار می گیرد.

در شکل (۱)، ساختار یک نبرد دریایی آمده است. در این نبرد، چهار حامل با سه نوع سلاح متفاوت وجود دارد که بر روی هر حامل فقط دو سلاح نصب شده است. هر کدام از این حاملها علاوه بر مکان کنونی، می توانند در دو مکان پیشنهادی دیگر در لحظه آغاز نبرد قرار گیرند و در مقابل چهار تهدید شناسایی شده به نبرد پردازند.



$$O_j \in \{0,1\}; \forall j \in M \quad (11)$$

$$A_j \geq 0; \forall j \in M \quad (12)$$

در تابع هدف (۱)، مدل به دنبال بیشینه کردن تخریب وارده بر تهدیدهای شناسایی شده است که با توجه به اهمیت تهدیدها، مکان قرارگیری حامل‌های خودی و میزان دقت سلاح‌های موجود بر روی حامل‌ها به جستجوی فضای حل می‌پردازد. در تابع هدف از متغیر  $A_j$  استفاده شده که در محدودیت (۲) تعریف شده است. در تعریف این متغیر مخرج کسر فقط مربوط به میزان دقت سلاح است که با فاصله رابطه عکس دارد.

محدودیت (۳)، بیان می‌کند که هر سلاح موجود بر روی هر حامل، حداکثر می‌تواند به یک تهدید تخصیص داده شود. محدودیت (۴)، برای ایجاد آرایش حامل‌ها آورده شده است که در یک لحظه زمانی هر حامل در یکی از مکان‌های بالقوه شناسایی شده می‌تواند قرار گیرد.

محدودیت‌های (۵) و (۶)، میزان تخریب وارده بر روی حامل‌ها را مشخص می‌کند که آیا تهدید مورد نظر به طور کامل از بین رفته است یا خیر.

محدودیت (۷)، به بررسی این مسأله می‌پردازد که میزان تهدید (خطر) وارده بر روی هر حامل از حد مشخصی که برای آن تعریف شده نباید بیشتر شود. محدودیت (۸)، به این نکته می‌پردازد که اگر برد سلاحی بر روی حامل از فاصله آن نسبت به تهدید بیشتر باشد، آن سلاح می‌تواند به تهدید مربوطه تخصیص داده شود. محدودیت‌های (۹) - (۱۲) نوع متغیرهای استفاده شده در مسأله را بیان می‌کند.

با توجه به نحوه تعریف مدل، می‌توان به غیر خطی بودن آن هم در تابع هدف و هم در محدودیت‌ها پی برد. در بخش بعد، به بررسی مسأله به منظور پیدا کردن بهترین جواب برای آن، می‌پردازیم.

### ۳- روش حل

همانطور که در بخش قبل گفته شد، مدل تعریف شده برای این مسأله مدلی غیر خطی است. به همین دلیل، حل این مسأله به وسیله نرم‌افزارهای موجود در زمینه تحقیق در عملیات امکان‌پذیر نیست. برای حل، این مسأله به دو بخش تقسیم شده است. در بخش اول با استفاده از الگوریتم جستجوی ممنوعه<sup>۲</sup> چیدمان‌های مختلف بررسی و در بخش دوم نحوه تخصیص سلاح ارزیابی می‌شود. در ادامه به تشریح این دو بخش می‌پردازیم و در نهایت با ارائه یک مثال، نحوه بکارگیری این روش توضیح داده می‌شود.

#### ۳-۱- الگوریتم جستجوی ممنوعه

همانطور که گفته شد برای تعیین چیدمان حامل‌ها، از الگوریتم جستجوی ممنوعه استفاده می‌شود. این الگوریتم دارای دو حافظه‌ی

#### ۲-۲- تعریف متغیرها

برای مدل‌سازی این مسأله، لازم است متغیرهای استفاده شده در مدل، تعریف شود.

$$Z_{ikj} = \begin{cases} 1; & \text{اگر سلاح } k \text{ از حامل } i \text{ به تهدید } j \text{ اختصاص یابد} \\ 0; & \text{در غیر اینصورت} \end{cases}$$

$$W_{il} = \begin{cases} 1; & \text{اگر حامل } i \text{ در مکان } (x_{il}, y_{il}) \text{ قرار گیرد} \\ 0; & \text{در غیر اینصورت} \end{cases}$$

$$O_j = \begin{cases} 1; & \text{اگر تهدید } j \text{ به طور کامل نابود نشود} \\ 0; & \text{در غیر اینصورت} \end{cases}$$

$$A_j \quad \text{میزان تخریب ایجاد شده برای تهدید } j$$

#### ۲-۳- مدل‌سازی

با توجه به تعریف ارائه شده برای متغیرهای مدل، برای این مسأله یک مدل غیر خطی عدد صحیح به شرح ذیل توسعه داده می‌شود.

$$\text{Max} \sum_{j \in M} b_j (A_j O_j + 1 - O_j) \quad (1)$$

s.t.

$$A_j = \sum_{i \in N} \sum_{k \in K_i}$$

$$\left( \frac{d_{kj} a_{ikj}^{\max} Z_{ikj}}{1 + \sqrt{\sum_{l \in P} W_{il} \left( (x_{il} - \chi_j)^2 + (y_{il} - \psi_j)^2 \right)}} \right); \forall j \in M \quad (2)$$

$$\sum_{j \in M} Z_{ikj} \leq 1; \forall i \in N, \forall k \in K_i \quad (3)$$

$$\sum_{l \in P} W_{il} \leq 1; \forall i \in N \quad (4)$$

$$A_j \leq 1 + G(1 - O_j); \forall j \in M \quad (5)$$

$$A_j \geq 1 - GO_j; \forall j \in M \quad (6)$$

$$\sum_{j \in M} \frac{\delta_{ij}^{\max}}{1 + \sqrt{\sum_{l \in P} W_{il} \left( (x_{il} - \chi_j)^2 + (y_{il} - \psi_j)^2 \right)}} \leq h_i^{\max}; \forall i \in N \quad (7)$$

$$r_{ik} - \sqrt{\sum_{l \in P} W_{il} \left( (x_{il} - \chi_j)^2 + (y_{il} - \psi_j)^2 \right)} \geq G(1 - Z_{ikj}); \forall i \in N, \forall k \in K_i, \forall j \in M \quad (8)$$

$$Z_{ikj} \in \{0,1\}; \forall i \in N, \forall k \in K_i, \forall j \in M \quad (9)$$

$$W_{il} \in \{0,1\}; \forall i \in N, \forall l \in P \quad (10)$$



به دست آمده، مقدار عبارت ذیل محاسبه و به صورت نزولی مرتب می‌شود.

$$Za_{ikj} = \frac{b_j d_{kj} a_{ikj}^{\max}}{1 + \sqrt{\sum_{l \in P} W_{il} \left( (x_{il} - \chi_j)^2 + (y_{il} - \psi_j)^2 \right)}}$$

مجموعه‌های  $AS$  و  $NA$  به ازای هر چیدمان شامل ترکیب سه تایی  $(i, k, j)$  هستند که در  $(AS) NA$  سلاح  $k$  از حامل  $i$  را نمی‌توان (می‌توان) به تهدید  $j$  تخصیص داد.

ابتدا مجموعه  $NA$  را با توجه به برد سلاح‌های موجود بر روی هر حامل و فاصله حامل مربوطه تا هر تهدید ایجاد کرده و سپس به ازای هر عضو مجموعه مرتب شده  $Za_{ikj}$ ، اگر  $(i, k, j)$ ، متعلق به مجموعه  $NA$  نباشد، این ترکیب سه تایی به مجموعه  $AS$  اضافه می‌شود. از آنجایی که هر سلاح موجود بر روی حامل فقط می‌تواند به یک تهدید تخصیص داده شود، ترکیب‌های سه تایی که مربوط به اختصاص این سلاح به تهدیدهای دیگر است به مجموعه  $NA$  اضافه می‌شود. در هر بار اضافه کردن عضو جدیدی به مجموعه  $AS$ ، مقدار تخریب وارده بر تهدید  $j$  به روز می‌شود و اگر تهدید به طور کامل نابود شده بود، ترکیب‌های سه تایی که به اختصاص سلاح به آن تهدید مربوط است، به مجموعه  $NA$  اضافه می‌شود. این مراحل تا زمانی که تمامی سلاح‌ها در دو مجموعه  $AS$  و  $NA$  تفکیک شوند ادامه می‌یابد.

تابع هدف مربوط به تخصیص به صورت  $F = \sum_{(i,k,j) \in AS} Za_{ikj}$  محاسبه می‌شود.

### ۳-۳- یک مثال

در این زیر بخش ساختار صحنه نبرد آورده شده در شکل (۱) را به عنوان مثالی در نظر گرفته و روند حل با توجه به مفروضات این مثال به صورت گام به گام بررسی می‌شود. پارامترهای مورد نیاز برای مثال موجود در بخش ۲ به شرح جدول‌های (۴)-(۲) است. در جدول (۲) و (۳) واحد موقعیت‌های افقی و عمودی و همچنین برد سلاح‌ها بر حسب کیلومتر ارائه شده است. لازم به ذکر است برای به دست آوردن فاصله یک حامل تا تهدید از واحد صد کیلومتر در محاسبات استفاده شده است.

جدول (۲): اطلاعات مربوط به تهدیدها و اهمیت آنها

اهمیت	موقعیت عمودی	موقعیت افقی	تهدید
$b_j$	$\psi_j$	$\chi_j$	$j$
۰.۲۵	۲۰.۳۹	۴.۳۲	۱
۰.۸	۲۶.۹۲	۶.۱۹	۲
۰.۹	۳۰.۹۳	۱۰.۸۱	۳
۰.۳۵	۱۸.۹۵	۱۴.۹۱	۴

کوتاه مدت و بلند مدت است. حافظه کوتاه مدت که به آن لیست ممنوعه<sup>۲</sup> هم می‌گویند برای جلوگیری از تکرار جستجو در همسایگی‌های بررسی شده، تعریف می‌شود. همچنین، حافظه بلند مدت برای نگهداری بهترین همسایگی شناخته شده است. از ویژگی‌های دیگر این الگوریتم نخبه‌گرایی<sup>۴</sup> و تنوع‌گرایی<sup>۵</sup> است که خاصیت نخبه‌گرایی برای حرکت به سمت همسایگی‌های بهتر و خاصیت تنوع‌گرایی برای این است که از ایجاد بهینگی محلی جلوگیری شود [۱۳].

در گام اول این الگوریتم برای تعیین چیدمان، ابتدا از یک جواب اولیه که شامل در نظر گرفتن مکان اولیه حامل‌ها است شروع شده و آن را در مجموعه  $PO = \{(e_1, \dots, e_i)\}$  قرار می‌دهیم. در این مجموعه  $e_i$  مکان قرارگیری حامل  $i$  است. برای این جواب اولیه، میزان تابع هدف  $F_{PO}$  با استفاده از نحوه تخصیص سلاح که در بخش بعد توضیح داده شده، بدست می‌آید. بنابراین بهترین تابع هدف شناخته شده تاکنون  $F_{Best}$  همان میزان  $F_{PO}$  خواهد بود. این گام برای مقدار دهی اولیه آورده شده است.

بعد از بدست آوردن یک چیدمان، در گام دوم، همسایگی‌های آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. همسایگی هر جواب در تکرار  $itr$  را با  $NE_{itr}$  نمایش داده و به این صورت تعریف می‌شود که یکی از حامل‌ها به شرطی که عضو لیست ممنوعه  $TL_{itr-1}$  نباشد، در مکان‌های پیشنهادی جابجا شود. به همین دلیل برای هر تکرار  $(|P_i| - 1) \prod_{i \in N \setminus \{TL_{itr-1}\}} (|P_i| - 1)$  تعداد مکان‌های پیشنهادی برای حامل  $i$  است) همسایگی تعریف می‌شود. به عبارت دیگر می‌توان همسایگی در تکرار  $itr$  را به صورت  $NE_{itr} = \{(c_1, \dots, c_i)\}$  تعریف کرد که  $c_i$  مکان قرارگیری حامل  $i$  است و هر عضو این همسایگی با  $PO$  فقط در مکان قرارگیری یک حامل متفاوت است. برای هر یک از همسایگی‌های ایجاد شده میزان تابع هدف  $F_{PO}$  محاسبه شده و بیشترین مقدار تابع هدف در  $F_{NE_{itr}}$  نگهداری می‌شود و حاصلی که با تغییر مکانش باعث ایجاد این تابع هدف شده به لیست ممنوعه اضافه می‌شود. بنابراین برای ساختن همسایگی جدید، مکان این حامل را نمی‌توان تغییر داد. سپس  $PO$  در این تکرار به روز می‌شود. این گام تا رسیدن به شرط خاتمه الگوریتم تکرار می‌شود.

برای استفاده از خاصیت تنوع‌گرایی و نخبه‌گرایی، بهترین جواب حاصل از هر همسایگی با جواب همسایگی پیشین مقایسه می‌شود اگر این جواب بهتر از همسایگی مرحله قبل باشد، به دلیل نخبه‌گرایی، تغییر مکان حامل در دفعات بیشتری نسبت به حالتی که این جواب کمتر از مرحله قبل باشد (به عبارت دیگر، تنوع‌گرایی رخ دهد) ممنوع می‌شود.

### ۳-۲- نحوه تخصیص سلاح

برای تخصیص سلاح‌ها به تهدیدها بر اساس یک چیدمان مشخص، می‌توان از روش ابتکاری استفاده کرد. در این روش، ابتدا برای چیدمان



جدول (۵): میزان تخریب هر تهدید

تهدید	$j$	۱	۲	۳	۴
میزان تخریب	$A_j$	۰.۳۶	۰.۷۴	۱	۰.۰۷

در گام دوم ابتدا  $itr = 1$  می‌شود. از آنجایی که  $TL_i = \emptyset$  است مجموعه همسایگی‌های موقعیت به دست آمده  $PO$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$NE_1 = \{(2, 1, 1, 1), (3, 1, 1, 1), (1, 2, 1, 1), \dots, (1, 1, 1, 2), (1, 1, 1, 3)\}$$

به ازای هر یک از اعضای مجموعه فوق مقدار تابع هدف مطابق مراحل گفته شده در گام اول، محاسبه می‌شود. بیشترین مقدار تابع هدف برای این همسایگی از عضو  $(2, 1, 1, 1)$  به دست می‌آید. بنابراین میزان تابع هدف  $F_{NE_1} = 1.70$  و بهترین موقعیت  $PO = \{(2, 1, 1, 1)\}$  خواهد شد. حال با توجه به این که  $F_{NE_1} \geq F_{Best}$  است باید میزان  $F_{Best}$  را با مقدار  $1.70$  به روز کرده و تغییر مکان حامل ۱ تا سه تکرار ممنوع شود. به همین دلیل  $TL_1 = \{1\}$  به روز می‌شود.

دوباره به گام دوم برگشته و  $itr = 2$  می‌شود. از آنجایی که  $TL_1 = \{1\}$  است برای ایجاد همسایگی‌های این تکرار، مکان حامل ۱ را ثابت در نظر گرفته و سایر حامل‌ها جابجا می‌شوند.

$$NE_2 = \{(2, 2, 1, 1), (2, 2, 1, 1), (2, 1, 2, 1), \dots, (2, 1, 1, 2), (2, 1, 1, 3)\}$$

همانند قبل بیشترین مقدار تابع هدف به ازای هر عضو این همسایگی متعلق به عضو  $(2, 2, 1, 1)$  با مقدار  $F_{NE_2} = 1.78$  است. با توجه به نتیجه حاصله  $F_{Best} = 1.78$  شده و  $PO = \{(2, 1, 3, 1)\}$  و لیست ممنوعه به صورت  $TL_2 = \{1, 3\}$  به روز می‌شود. لازم به ذکر است که حامل ۱ تا دو تکرار و حامل ۳ تا سه تکرار اجازه جابجایی ندارند. الگوریتم تا رسیدن به شرط پایان ادامه داده می‌شود.

در این مثال، به وجود آمدن شرایط نخبه‌گرایی و تنوع‌گرایی بدین صورت است که ممکن است  $F_{NE_{itr}}$  از مقدار  $F_{Best}$  بیشتر نشود حال اگر  $F_{NE_{itr}} \geq F_{NE_{itr-1}}$  شرط نخبه‌گرایی ایجاد شده و تغییر مکان حاملی که بوجود آورنده این تابع هدف است تا دو تکرار ممنوع می‌شود. در غیر اینصورت تنوع‌گرایی رخ داده و تغییر مکان آن حامل فقط در یک تکرار ممنوع می‌شود.

جواب نهایی به دست آمده برای این مثال چیدمان  $(2, 3, 3, 3)$  با تابع هدف  $1.82$  است که میزان تخریب هر تهدید در جدول (۶) ارائه شده و نحوه تخصیص سلاح در شکل (۲) نشان داده شده است.

جدول (۶): میزان تخریب هر تهدید در جواب بهینه

تهدید	$j$	۱	۲	۳	۴
میزان تخریب	$A_j$	۱	۰.۷۷	۱	۰.۱۲

جدول (۳): اطلاعات مربوط به حامل‌ها و مکان پیشنهادی

مکان پیشنهادی $l$					$r_{ik}$	$v$	$j$	$i$
	۱	۲	۳	۴				
$y_{i2}$	$x_{i2}$	$y_{i1}$	$x_{i1}$	$y_{i1}$	$x_{i1}$			
۳۱.۵	۱۱.۵	۸.۷۵	۰	۵.۳۵	۲.۱۵	۱۴/۳۵	۱/۲	۱/۲
۷.۷۴	۸.۴۷	۵.۸۵	۱۰.۴	۵.۷۷	۶.۳۲	۱۴/۱۷	۱/۳	۱/۲
۷.۸۸	۱۳.۲	۳.۱۶	۷.۹۳	۳.۲	۱۱.۷	۳۵/۳۵	۲/۲	۱/۲
۹.۰۶	۱۷.۲	۴.۷۲	۱۶.۵	۲.۸۸	۱۴.۹	۳۵/۱۷	۲/۳	۱/۲

جدول (۴): اطلاعات مربوط به دقت و تخریب سلاح

سلاح	میزان دقت سلاح به ازای تهدید				میزان تخریب تهدید			
	۱	۲	۳	۴	۱	۲	۳	۴
۱	۰.۹۵	۰.۸	۰.۶۵	۰.۵	۰.۴	۰.۳	۰.۲	۰.۱
۲	۰.۹	۰.۹۳	۰.۹۸	۰.۸۵	۰.۶	۰.۵	۰.۵	۰.۶
۳	۰.۹۲	۰.۸۸	۰.۷۵	۰.۶	۰.۴۵	۰.۴	۰.۳	۰.۱۵

برای حل مسأله تعریف شده در گام اول باید تکرار و لیست ممنوعه به صورت  $itr = 0$  و  $TL_i = \emptyset$  مقدار دهی و مکان حامل‌ها در مجموعه  $PO = \{(1, 1, 1, 1)\}$  به روز شود.

برای این موقعیت اولیه باید میزان تابع هدف تخصیص را بدست آورد. بنابراین ابتدا باید میزان  $Za_{ikj}$  را بدست آورده و به صورت نزولی مرتب کرد. ترتیب نزولی این ضریب در ذیل آورده شده است.

$$Za_{111} = 0.347 \geq Za_{112} = 0.345 \geq Za_{113} = 0.345 \geq$$

$$Za_{114} = 0.343 \geq Za_{115} = 0.305 \geq \dots \geq Za_{116} = 0.01$$

حال با توجه به برد سلاح و فاصله هر حامل تا تهدید مجموعه  $NA$

در زیر به روز شده است.

$$NA = \{(1, 1, 1), (1, 1, 2), (1, 1, 3), (1, 1, 4), (2, 1, 1), (2, 1, 2), (2, 1, 3), (2, 1, 4), (2, 2, 2), (2, 2, 3), (4, 1, 1), (4, 1, 2), (4, 1, 3)\}$$

دو مجموعه  $AS$  و  $NA$  با توجه به میزان ضرایب به دست آمده و ملاحظات لازم به روز می‌شود. مجموعه به روز شده  $AS$  به شرح زیر است.

$$AS = \{(1, 2, 3), (3, 1, 3), (3, 2, 3), (3, 2, 2), (4, 2, 2), (2, 2, 1), (4, 1, 4)\}$$

میزان تخریب هر تهدید در جدول (۵) آمده است. میزان تابع هدف

$$F_{PO} = 1.61$$
 خواهد بود. در این مرحله مقدار  $F_{Best} = 1.61$  به روز

می‌شود.



Eckler, A.R., Burr, S. A., "Mathematical models of target coverage and missile allocation", Military Operations Research Society, U.S, 1972.

Matlin, S., "A review of the literature on the missile - allocation problem", Operation Research, vol. 18(2), pp. 334-373, 1970.

Huaiping, C., Liu, J., Chen, Y., Wang, H., "Survey of the research on dynamic weapon-target assignment problem", Journal of Systems Engineering and Electronics, vol. 17.3, pp. 559-565, 2006.

Ahuja, R. K., Kumar. A., Jha, K. C., Orlin, J. B., "Exact and heuristic algorithms for the weapon-target assignment problem", Operations Research, vol. 55(6), p. 1136-1146, 2007.

Lee, Z. J., Lee, W. L., "A hybrid search algorithm of ant colony optimization and genetic algorithm applied to Weapon-Target Assignment Problems", in *Intelligent Data Engineering and Automated Learning*, Springer Berlin Heidelberg, 2003.

Su, M. C., Lai, S. C., Lin, S. C., You, L. F., "A new approach to multi-aircraft air combat assignments", Swarm and Evolutionary Computation, vol. 6, pp. 39-46, 2012.

Lee, Z. J., Su, S. F; Lee, C. Y., "An immunity-based ant colony optimization algorithm for solving weapon-target assignment problem," Applied Soft Computing, vol. 2, p. 39-47, 2002.

Zhen, L., Jain-gue, S., Xiao-guang, G., "Compact genetic algorithm and its application in WTA problem", Computer Engineering and Application, vol. 44(3), pp. 229-231, 2008.

Turan, A., "Algorithms for the Weapon-Target Allocation Problem, M.S thesis, Middle East Technical University," 2012.

Rosenberger, J. M., Hwang, H. S., Pallerla, R. P., "The Generalized Weapon Target Assignment Problem", in *10th International Command and Control Research and Technology Symposium*, McLean, VA, 2005.

میری، علی اصغر، لطفی، مهدی؛ طراحی مدل پویای آرایش شبکه یکپارچه دفاع دریایی مبتنی بر استقلال سایتها جهت مقابله با اهداف معین، اولین کنفرانس ملی علوم، فناوری و سامانه های مدیریت نبرد دریایی، مشهد، ۱۳۹۱.

Glover, F., Kochenberger, G. A., HANDBOOK OF METAHEURISTICS, New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers, 2003.

[۲]

[۳]

[۴]

[۵]

[۶]

[۷]

[۸]

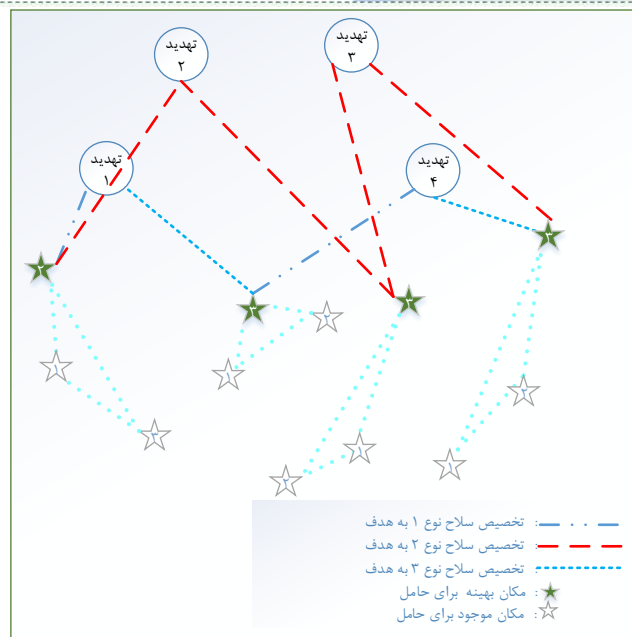
[۹]

[۱۰]

[۱۱]

[۱۲]

[۱۳]



شکل (۲): تعیین چیدمان بهینه و تخصیص تسلیحات

#### ۴- جمع بندی و نتیجه گیری

هدف از انجام این مقاله، تعیین همزمان چیدمان حاملها و تخصیص سلاحهای آنها به تهدیدهای مهاجم است. به این منظور مدل غیر خطی عدد صحیح پیشنهاد شده است. از آنجایی که حل این مدل در نرم افزارهای موجود تحقیق در عملیات ممکن نیست، روش فرا ابتکاری جستجوی ممنوعه ترکیبی پیشنهاد شده که به دنبال بهترین جواب موجود در فضای حل می باشد. روش پیشنهاد شده در نرم افزار Microsoft Visual Studio 2010، کدنویسی شده و با روش شمارش کامل مقایسه شده است. در نمونه های بررسی شده، روش ارائه شده در تکرارهای کمتری نسبت به شمارش کامل به جواب بهینه می رسد.

#### ۵- مراجع

Lloyd, S. P., Witsenhausen, H. S., "Weapon allocation is NP-Complete", in *IEEE Summer Simulation Conference*, Reno, Nevada, 1986.

زیر نویس ها

<sup>۱</sup> Weapon Target Assignment (WTA)

<sup>۲</sup> Tabu Search Algorithm

<sup>۳</sup> Tabu List

<sup>۴</sup> Intensification

<sup>۵</sup> Diversification