International Journal of Industrial Engineering & Production Management (2016)
September 2016, Volume 27, Number 3
pp. 281-298

http://IJIEPM.iust.ac.ir/

Local Searches and Tabu Search Algorithms for Concurrent Location and Weapons Assignment Problems of Warships

Mahboubeh Peymankar, Mohammad Ranjbar* & Mehdi Lotfi

Mahboubeh Peymankar, *M.Sc. Student of Industrial Engineering- Ferdowsi University of Mashhad*
Mohammad Ranjbar, *Associate Professor of Industrial Engineering- Ferdowsi University of Mashhad*
Mehdi Lotfi, *M.Sc. Student of Industrial Engineering- Ferdowsi University of Mashhad*

Keywords

Marine combat management systems,
Location,
Weapon assignment,
Local search,
Tabu search

ABSTRACT

In the marine combat management systems, the role of mathematical and optimization models is significant in solving the location and weapon assignment problems. In this paper, a non-linear mixed-integer programming model has been developed for concurrent location and weapons assignment problems of a warships group against a set of aggressive threats. Since the developed model is non-linear, it cannot be solved by the available operation research solvers. Thus, we developed two local searches, called the best improvement and the fastest improvement, and a metaheuristic based on tabu search algorithm. On the basis of a developed test set and extensive computational results, we compare the performance of the three algorithms. The computational experiments reveal that developed tabu search algorithm outperforms other algorithms.

نشـــریه بین المللـــی مهنـــدسی صنـــایع و مدیـــریت تولیـــد

شمـــاره ۳، جلـــد ۲۷، پاییز ۱۳۹۵

صفحـــه ۲۹۸-۲۸۲

نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید دانشگاه علم و صنعت ایران

ISSN: 2008-4870

http://IJIEPM.iust.ac.ir/

روش‌های جستجوی محلی و جستجوی ممنوعه برای مسأله همزمان چیدمان و تخصیص سلاح حامل‌های جنگی

محبوبه پیمان‌کار، محمد رنجبر* و مهدی لطفی

کلمات کلیدی

حامل‌های جنگی،
مکان‌یابی،
تخصیص سلاح،
جستجوی محلی،
جستجوی ممنوعه

چکیده:

با توجه به نقش و اهمیت چیدمان تسلیحات دفاعی دریایی در صحنه نبرد و نحوه تخصیص تسلیحات موجود به تهدیدهای مهاجم، استفاده از مدل‌های ریاضی و بهینه‌سازی در این‌گونه مسائل ضروری است. در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی مختلط عدد صحیح برای مسأله چیدمان حامل‌های جنگی و تخصیص سلاحهای آن‌ها به تهدیدها با هدف وارد کردن بیشترین تخریب به تهدیدها ارائه می‌شود. از آنجایی که حل دقیق مدل ارائه شده با استفاده از نرم‌افزارهای موجود در زمینه تحقیق در عملیات امکان‌پذیر نیست، روش‌های جستجوی محلیِ بیشترین بهبود، سریع‌ترین بهبود و روش فرا ابتکاریِ جستجوی ممنوعه برای این مسأله طراحی شده‌است. نتایج به دست آمده از این روش‌ها با روش شمارش کامل مقایسه شده و مشخص می‌شود، روش جستجوی ممنوعه کارایی بیشتری نسبت به سایر روش‌های پیشنهادی دارد.

۱. مقدمه

مهم‌ترین دغدغه فرماندهان نظامی در لحظه وقوع نبرد، تصمیم‌گیری سریع در برابر تهدیدهای مهاجم و عکس‌العمل مناسب و به موقع برای رویارویی با آن‌ها می‌باشد. به همین دلیل آن‌ها با تکیه بر تجربه و درایتشان، در شرایط احتمالی وقوع جنگ و فشارهای روانی حاصل از آن نقش غیرقابل‌انکاری در موفقیت عملیات جنگی دارند. اگر در کنار این تجربه و درایت بتوان از مدل‌های ریاضی استفاده کرد، مسلماً می‌توان اطمینان بیشتری نسبت به تصمیم‌های اتخاذ شده داشت. در این مقاله سعی شده است با توجه به معیارها و عوامل تأثیرگذار در نبردهای دریایی، از برنامه‌ریزی ریاضی برای تضمین عملکرد فرماندهان در برابر تهدیدهای دشمن استفاده کرد. مسأله‌ای که در این مقاله بررسی می‌شود، مکان‌یابی حامل‌ها و تخصیص سلاح‌های آن‌ها به تهدیدهای شناسایی شده است که در آن، هدف، بیشینه‌سازی تخریب وارده بر تهدیدهای مهاجم در نظر گرفته شده است.

برای مرورپژوهش‌های انتشار یافته در این زمینه لازم است که مسأله تعریف شده را حالت تعمیم‌یافته‌ای از مسأله تخصیص سلاح به تهدیدها[1] که در دهه ۱۹۵۰ مطرح شده، دانسته و مطالعات انجام شده در این زمینه را مورد بررسی قرار دهیم. مسأله تخصیص سلاح به تهدیدها عبارت است از تخصیص n سلاح موجود به m تهدید شناخته شده به نحوی که امید ریاضی احتمال نجات تهدیدها حداقل شود. در مرجع [۱] اثبات شده است که مسأله تخصیص سلاح از نظر پیچیدگی در رده مسائل NP-complete است و این بدان معنی است که با افزایش ابعاد مسأله، زمان حل آن نیز به صورت نمایی افزایش می‌یابد. بنابراین برای حل مسائل بزرگ لازم است از روش‌های ابتکاری استفاده شود. اولین جمع‌بندی و مرور اجمالی از این موضوع در مرجع [۲] آمده است. اکثر مقالات مرتبط در این زمینه، به بررسی این مسأله با هدف کمینه کردن امید ریاضی احتمال نجات تهدیدهای مهاجم، پرداخته‌اند [۳].

تاریخ وصول: ۹۲/۱۰/۲۰
تاریخ تصویب: ۹۳/۰۸/۲۰

محبوبه پیمان‌کار، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی،
ma.peymankar@stu-mail.ir
مهدی لطفی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی،
lotfi.m@stu-mail.um.ac.ir
*نویسنده مسئول مقاله: **دکتر محمد رنجبر**، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، m_ranjbar@um.ac.ir

در پیشینه مسأله تخصیص سلاح، مساله در دو حالت کلیِ ایستا و پویا بررسی شده است. در حالت ایستا، این مسأله در یک دوره زمانی بررسی می‌شود و فقط در همان دوره ویک بار، سلاح‌های موجود به تهدیدها تخصیص می‌یابند. این بدان معنی است که در دوره بعدیِ تخصیص سلاح‌ها به تهدیدها، از نتایج بدست آمده از 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 در این حالت با توجه به نتایج به دست آمده در دوره‌های قبلی می‌توان یکسری از اطلاعات را اصلاح کرد و تخصیص سلاح را با توجه به اطلاعات اصلاح شده انجام داد [۴].

روش‌های حل دقیق برای حل مسأله تخصیص سلاح به تهدیدها در حالت‌های خاصی مورد مطالعه قرار گرفته است. در مرجع [۵] برای حل دقیق این مسأله روش شاخه و کرانی پیشنهاد شده است. برتری این مقاله نسبت به سایر روش‌های شاخه و کران ارائه شده در پیشینه این مسأله در این است که نویسنده با بررسی این مسأله در قالب مدل‌های شبکه، حدود بالا و پایین کارایی برای آن پیدا کرده است. به همین دلیل، وی توانسته جواب بهینه‌ای برای مسائلی با ۲۰۰ سلاح و ۲۰۰ هدف را در زمانی نسبتاً کم بدست آورد. علاوه بر روش‌های دقیق، روش‌های ابتکاری و فراابتکاری نیز برای این مسأله پیشنهاد شده است. در مراجع [۶] تا [۹]، روش‌های فراابتکاری نظیر الگوریتم‌های ژنتیک[۲]، تجمع ذرات[۳]، کلونی مورچگان[۴] و ... برای حل این مسأله پیشنهاد شده است.در مرجع [۱۰]، یک روش ترکیبی از الگوریتم ژنتیک و کلونی مورچگان آورده شده است.

در پیشینه این موضوع، بیشتر به جنبه تخصیص سلاح‌ها به تهدیدها پرداخته شده است و در اکثر این پژوهش‌ها مکان حامل‌ها و تهدیدها، ثابت فرض شده است. در این بررسی فقط دو مقاله[۱۱] و [۱۲]، حامل‌های موجود را متحرک فرض کرده‌اند. حامل‌های موجود در مرجع [۱۱]، با توجه به محدودیت سوخت، مسافت محدودی را طی می‌کنند. هم‌چنین بعد از تخصیص سلاح به یک تهدید، مکان جدید حامل، مکانی است که تهدید، در آن قرار گرفته است. ایرادی که به این پژوهش می‌توان گرفت 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 کار عملاً غیرممکن است. در مرجع [۱۲] مدلی دو مرحله‌ای برای این مسأله ارائه شده که در مرحله اول با توجه به محدودیت زمانی، سلاح‌ها به تهدیدها اختصاص یافته و در مرحله دوم با توجه به شرایط مسأله، حامل‌ها در فضای نبرد جابجا می‌شوند. در نظر گرفتن مسأله به صورت دومرحله‌ای ممکن است باعث حذف جواب بهینه شود.

مسأله تعریف شده در این مقاله از نظر متحرک بودن حامل‌ها به دو مقاله اخیر، شباهت دارد. با این وجود در این مقاله سعی شده است که نقایص و کاستی‌های موجود در آن‌ها را برطرف سازد. نوآوریهای این تحقیق به شرح ذیل می‌باشند. شیوه تعریف تابع هدف این مقاله به صورت بیشینه کردن میزان تخریب وارده بر تهدیدها می‌باشد. در این تحقیق فرض شده است که در یک نبرد دریایی هر حامل دارای چندین سلاح با برد متفاوت و هر سلاح دارای سه پارامترِ میزان تخریب، دقت و برد است. همچنین فرض شده است که یک میزان خطر از جانب تهدیدها برای حامل‌های خودی وجود دارد. محدودیت‌های موجود در دنیای واقعی از جمله عدم اسقرار یک حامل در مکانی که میزان خطر از جانب تهدیدها برای آن از حد مجاز بیشتر است و همچنین، تعیین همزمان چیدمان حامل‌های خودی و تخصیص تسلیحات آن‌ها به تهدیدهای مهاجم و پیشنهاد روش‌های ابتکاری و فراابتکاری برای حل این مسأله از جنبه‌های نوآوری این مقاله به شمار می‌رود.

در ادامه، ابتدا تعریف دقیق مسأله و مدلسازی در بخش ۲ بیان می‌شود. در بخش ۳، روش‌های حل مختلف تشریح می‌گردند. بخش ۴ به بررسی نتایج محاسباتی می‌پردازد و در نهایت در بخش ۵، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری این مسأله، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

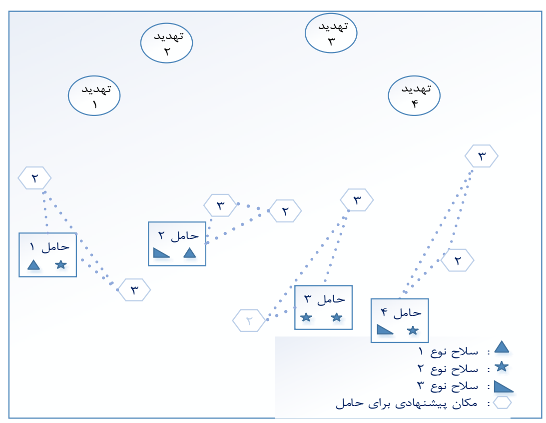
۲. تعریف مسئله و مدلسازی

مسأله مورد بررسی در این مقاله حالت تعمیم‌یافته‌ای از مسأله تخصیص سلاح‌ها به تهدیدها است. در این مسأله، یک شبکه دفاعی شامل تعدادی حامل در نظر گرفته شده است که بر روی هر حامل تعدادی سلاح از انواع مختلف وجود دارد. این شبکه در یک نبرد دریایی، با تعدادی تهدید (که آن‌ها نیز در سطح دریا قرار دارند) مواجه می‌شود که سعی در نابودی آن‌ها دارد. لازم به ذکر است که هر یک از این سلاح‌ها دارای دقت، برد و میزان تخریب خاص خود می‌باشد. بر خلاف تابع هدف‌هایی که تاکنون در مسأله تخصیص سلاح مبنی بر کمینه کردن احتمال نجات تهدیدها به کار رفته، هدف این مسأله وارد کردن بیشترین تخریب به تهدیدها است. به عبارت دیگر، مسأله تعریف شده در این مقاله در حالت تهاجمی (حمله نیروهای خودی به تهدیدها) می‌باشد. تخریب وارده به تهدیدها به میزان دقت سلاح تخصیص داده شده و میزان تخریب توسط این سلاح برای یک تهدید خاص مرتبط است. میزان دقت یک سلاح، با فاصله آن سلاح یا به عبارتی فاصله حامل مربوطه تا تهدید نسبت عکس دارد. همچنین به هر کدام از تهدیدهای شناسایی شده، با توجه به

بزرگی و اهمیت نظامی (به عنوان مثال، حضور فرمانده خاص، داشتن سلاح‌های خاص و...) یک ضریب اهمیت، تخصیص داده می‌شود. تفاوت دیگر این مسأله با سایر مسائل در تعیین همزمان بهترین آرایش نبرد و قرارگیری حامل‌ها در بهترین مکان پیشنهادی در هنگام حمله و تخصیص سلاح حامل‌ها به تهدیدها می‌باشد.

نکته قابل توجهی که درمدلسازی این مسأله به آن توجه شده است، در نظر گرفتن خطر از جانب تهدیدهای مختلف است؛ به این معنی که میزان خطر تهدیدهای مهاجم بر روی هر حامل با فاصله حامل تا تهدید، نسبت عکس دارد. مورد دیگری که باید در این مسأله مورد توجه قرار گیرد این است که میزان تخریب تهدید j ، حداکثر به معنی نابودی کل تهدید است که از نظر مقدار، باید برابر با $1-s_j$ (s_j میزان نابودی تهدید j می‌باشد) شود. به همین دلیل، تخصیص سلاح به تهدیدی که کاملاً نابود شده، غیر منطقی خواهد بود.

در شکل ۱، ساختار یک نبرد دریایی نشان داده شده 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، می‌توانند در دو مکان پیشنهادی دیگر در لحظه آغاز نبرد قرار گیرند و در مقابل چهار تهدید شناسایی شده به نبرد بپردازند.



شکل ۱. ساختار نبرد دریایی

مفروضات این مسأله شامل در نظر گرفتن تمامی پارامترها به شکل قطعی، در نظر گرفتن مکان ثابت برای تهدیدها (به این معنا که در یک نبرد با توجه به شواهد و اطلاعات به دست آمده از تهدیدها مکان آن‌ها در لحظه آغاز نبرد پیش‌بینی شده است)، تخصیص هر سلاح موجود بر روی یک حامل به حداکثر یک تهدید و مشخص بودن مکان پیشنهادی حامل‌ها به عنوان پارامتر ورودی مسأله می‌باشد.

با توجه به نحوه تعریف مسأله، می‌توان گفت که این مسأله در یک دوره به تخصیص سلاح و تعیین چیدمان می‌پردازد. بنابراین این مسأله، در گروه تخصیص سلاح به تهدیدها در حالت ایستا قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که اگر بخواهیم مسأله را در دوره‌های مختلف بررسی کنیم، کافی است بعد از به دست آمدن اطلاعات مربوط به نبرد انجام شده، میزان s_j، مکان‌های پیشنهادی جدید حامل‌ها و تهدیدها، سلاح‌های در دسترس و میزان خطر تهدیدها را به‌روز کرده و مسأله را دوباره حل کنیم.

پارامترهای مورد استفاده جهت مدلسازی مسأله در جدول ۱ تشریح شده‌اند.

جدول ۱. تعریف پارامترها

پارامتر	تعریف
$N=\{1,\dots,n\}$	مجموعه حامل‌ها با اندیس i
$\lvert N\rvert$	تعداد حامل‌ها
$M=\{1,\dots,m\}$	مجموعه تهدیدها با اندیس j
$\lvert M\rvert$	تعداد تهدیدها
$\lvert P_i\rvert$	تعداد مکان‌های پیشنهادی برای حامل i
$P_i=\{1,\dots,\lvert P_i\rvert\}$	مجموعه مکان‌های پیشنهادی برای حامل i با اندیس l
$\lvert K_i\rvert$	تعداد سلاح‌های حامل i
$K_i=\{1,\dots,\lvert K_i\rvert\}$	مجموعه سلاح‌های حامل i با اندیس k
r_{ik}	برد سلاح k از حامل i
d_{kj}	میزان تخریب تهدید j با استفاده ازسلاح k
b_j	اهمیت تهدید j
a_{ik}	میزان دقت سلاح k بر روی حامل i برای تخریب
s_j	میزان نابودی تهدید j
h_i^{max}	حداکثر خطر قابل پذیرش برای حامل i
dis_{ilj}	فاصله حامل i در مکان l تا تهدید j
δ_{ij}	میزان خطر تهدید j برای حامل i
G	عددی بسیار بزرگ

متغیرهای مورد استفاده در این مدل نیز به شرح ذیل است.

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

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

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

$A_j =$ میزان تخریب ایجاد شده برای تهدید j

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

$$Max \sum_{j\in M} b_j \left(A_j O_j + \left(1-s_j\right)\left(1-O_j\right)\right) \quad (۱)$$

$$s.t.$$

$$A_j = \sum_{i\in N}\sum_{k\in K_i}\left(\left(\sum\nolimits_{l\in P_i}\frac{a_{ik}}{1+dis_{ilj}}\right)d_{kj}Z_{ikj}\right) \quad ;\forall j\in M \quad (۲)$$

$$\sum_{j\in M} Z_{ikj} \le 1 \quad ;\forall i\in N,\forall k\in K_i \quad (۳)$$

$$\sum_{l\in P_i} W_{il} = 1 \quad ;\forall i\in N \quad (۴)$$

$$A_j \le \left(1-s_j\right)+G\left(1-O_j\right) \quad ;\ \forall j\in M \quad (۵)$$

$$A_j \ge 1-s_j-GO_j \quad ;\ \forall j\in M \quad (۶)$$

$$\sum_{j\in M}\left(\sum_{l\in P_i}\frac{W_{il}}{1+dis_{ilj}}\right)\delta_{ij} \le h_i^{\max} \quad ;\ \forall i\in N \quad (۷)$$

$$r_{ik} - \sum\nolimits_{l\in P_i} W_{il}dis_{ilj} \ge G\left(Z_{ikj}-1\right) \quad ;\forall i\in N,\forall k\in K_i,\forall j\in M \quad (۸)$$

$$Z_{ikj}\in\{0,1\} \quad ;\forall i\in N,\forall k\in K_i,\forall j\in M \quad (۹)$$

$$W_{il}\in\{0,1\} \quad ;\forall i\in N,\forall l\in P_i \quad (۱۰)$$

$$O_j\in\{0,1\} \quad ;\forall j\in M \quad (۱۱)$$

$$A_j \ge 0 \quad ;\forall j\in M \quad (۱۲)$$

تابع هدف (۱) به دنبال بیشینه کردن تخریب وارده به تهدیدهای شناسایی شده است که با توجه به اهمیت تهدیدها که مقدار آن با استفاده از پارامتر حداکثر میزان خطر هر تهدید از رابطه $b_j = \frac{\sum_{i\in N}\delta_{ij}}{\sum_{i\in N}\sum_{j\in M}\delta_{ij}}$ به دست می‌آید، 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 متغیر A_j باید به این نکته توجه داشت که دقت سلاح به طور بالقوه یک پارامتر مشخص است ولی در عمل، دقت تعریف شده به نسبت فاصله‌ای که این سلاح با تهدید دارد، تغییر می‌کند. بنابراین مخرج کسر متغیر A_j فقط مربوط به تغییر a_{ik} بوده و آن را به صورت خطی کاهش می‌دهد. لازم به ذکر است که متغیر A_j می‌تواند مقادیر مثبت را بگیرد ولیکن اگر این مقدار از $1-s_j$ بیشتر شود یا به عبارت دیگر تهدید j به طور کامل نابود شده باشد، تابع هدف طوری تنظیم شده که مقدار $1-s_j$ را در نظر می‌گیرد و اگر این مقدار کمتر از $1-s_j$ باشد از مقدار A_j در تابع هدف استفاده می‌شود.

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 باید 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 خطرایجاد شده برای هر حامل از حد مشخصی که قبلاً تعیین شده است نباید بیشتر شود. چون مسأله مورد بررسی در این پژوهش در حالت "تهاجمی" تعریف شده است، محدودیت (۷) یک محدودیت تدافعی برای نیروهای خودی محسوب می‌شود. 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) تا (۱۲) نوع متغیرهای استفاده شده در مسأله را بیان می‌کند. اگرچه محدودیتهای این مدل بصورت خطی می‌باشد، اما تابع هدف آن غیرخطی است و امکان حل این مدل توسط نرم‌افزارهای تحقیق در عملیات امکان‌پذیر نیست. بنابراین می‌توان این مدل را یک

مدل مفهومی[۵] در نظر گرفت که از آن برای تعریف مسأله به زبان ریاضی و بیان مفروضات استفاده می‌شود.

۳. روش حل

مفهوم برای حل مسأله این تحقیق، ابتدا مفهوم همسایگی[۶] تعریف و نحوه ایجاد آن‌ها برای مسأله مورد نظر بیان می‌شود. سپس یک روش حل ابتکاری برای تخصیص سلاح‌ها به تهدیدها پیشنهاد می‌گردد. همچنین بر اساس ویژگیهای مسأله، دو روش جستجوی محلی[۷] تحت عناوین بیشترین بهبود[۸] و سریع‌ترین بهبود[۹] و روش جستجوی ممنوعه[۱۰] برای حل این مساله طراحی شده است. در جدول ۲، نمادهای استفاده شده در هر یک از روش‌های حل پیشنهادی معرفی شده است.

جدول ۲. نمادهای استفاده شده در روش‌های حل

نماد	تعریف
itr	اندیس شمارنده برای هر بار اجرای الگوریتم
g	اندیس شمارنده همسایگی
g'	اندیس شمارنده همسایگی‌های مجاز
lay_i	محل قرار گرفتن حامل i در مکان lay_i که $lay_i \in P_i$ (در همسایگی S_{itr})
lay_i^g	محل قرار گرفتن حامل i در مکان lay_i در همسایگی شماره g که $lay_i \in P_i$
$S_{itr} = \{(lay_1,...,lay_{\|N\|})\}$	جواب انتخاب شده در تکرار itr (شامل $\|N\|$تایی است که مکان هر حامل را مشخص می‌کند)
$NE_g = \{(lay_1^g,...,lay_{\|N\|}^g)\}$	همسایگی gام (شامل $\|N\|$تایی است که مکان هر حامل را مشخص می‌کند)
G'	مجموعه همسایگی‌های مجاز جواب S_{itr-1}
$\|G'\|$	تعداد همسایگی‌های مجاز
Za_{ikj}	میزان تخریب تهدید j با استفاده از سلاح k از حامل i با توجه به اهمیت تهدید
$A'_j = b_j \times A_j$	میزان تخریب تهدید j با توجه به اهمیت آن
$ZA = \{Za_{ikj} \mid i \in N, k \in K_i, j \in M\}$	مجموعه ضرایب Za_{ikj} به صورت نزولی مرتب شده‌اند
nz	تعداد اعضای مجموعه ZA
$count$	شمارنده
NA	مجموعه تخصیص‌های غیرممکن
AS	مجموعه تخصیص‌های ممکن
F	تابع هدف تخصیص
FNE_g	مقدار تابع هدف برای همسایگی شماره g
FS_{itr}	بهترین مقدار تابع هدف برای همسایگی انتخاب شده در تکرار itr
$Fbest$	بهترین تابع هدف شناخته شده
$NE = \{(NE_{g'}, FNE_{g'}) \mid g' = 1,2,...,\|G'\|\}$	مجموعه شامل تمام همسایگی‌های مجاز و تابع هدف آن‌ها
imp	تعداد تکرارهای همراه با بهبود در تابع هدف
div	تعداد تکرارهای متوالی همراه با عدم بهبود در تابع هدف
$lenT$	طول پیشنهادی لیست ممنوعه
len	طول کنونی لیست ممنوعه
tot_{i,lay_i}	تعداد دفعات قرارگیری حامل i در مکان lay_i
$TOT = [tot_{i,lay_i}]_{\|N\| \times Max_{i \in N}\{\|P_i\|\}}$	ماتریس تعداد دفعات قرارگیری هر حامل در مکان‌هایپیشنهادی
$totimp_{i,lay_i}$	تعداد دفعات قرارگیری حامل i در مکان lay_i در مواقع بهبود
$TI = [totimp_{i,lay_i}]_{\|N\| \times Max_{i \in N}\{\|P_i\|\}}$	ماتریس تعداد دفعات قرارگیری هر حامل در مکان‌های پیشنهادی در مواقع بهبود
$Score_\gamma$	امتیاز همسایگی مجاز γ که $\gamma = 1,2,...,\|G'\|$
$Tabu_{len} = \{(lay_1,...,lay_{\|N\|})\}$	لیست ممنوعه با طول len

۳-۱. ساختار همسایگی

همسایگی‌های مجاز یک جواب به این صورت تعریف می‌شوند که در هر همسایگی فقط و فقط یک حامل می‌تواندتغییر مکان داده و در هر کدام از مکان‌های بالقوه قرار گیرد. برای ایجاد همسایگی‌های یک جواب کنونی، از تغییر مکان حامل اول شروع کرده و به تعداد $|P_1|-1$ همسایگی (که مکان این حامل در هیچ کدام از همسایگی‌ها با مکان جواب کنونی این حامل یکسان نمی‌باشد) ایجاد می‌شود. سپس همین روند، برای سایر حامل‌ها تکرار می‌شود. ایجاد ساختار همسایگی به عنوان رویه‌ای[11] در روش‌های حل استفاده می‌شود. در نهایت $\sum_{i\in N}(|P_i|-1)$ همسایگی برای یک جواب مشخص ایجاد می‌شود. روند ایجاد همسایگی به صورت گام به گام در ذیل آمده است.

گام ۱: قرار دهید: $g=1$، $count=1$ و $i=1$. جواب کنونی $S_{itr}=\{(lay_1,...,lay_{|N|})\}$ را که باید همسایگی‌های آن مشخص شود تعیین کنید.

گام۲: ابتدا مکان هر حامل $i'\in N/\{i\}$ را به صورت $lay_{i'}^g=lay_{i'}$ در نظر بگیرید.اگر $lay_i+count\le|P_i|$ است، همسایگی NE_g را با تغییر مکان حامل i و قرار گرفتن آن در مکان به صورت $lay_i^g=lay_i+count$ ایجاد کنید. در غیر اینصورت همسایگی NE_g را با تغییر مکان حامل i و قرار گرفتن آن در مکان به صورت $lay_i^g=lay_i+count-|P_i|$ ایجاد کنید. $NE_g=\{(lay_1^g,...,lay_i^g,...,lay_{|N|}^g)\}$

گام ۳: اگر $count<|P_i|-1$ است، قرار دهید: $count=count+1$. در غیر اینصورت قرار دهید: $count=1$ و $i=i+1$.

گام ۴: اگر $g<\sum_{i\in N}(|P_i|-1)$، قرار دهید: $g=g+1$ و به گام ۲ بروید. در غیر اینصورت متوقف شوید.

برای بررسی روند ایجاد همسایگی، مثال موجود در بخش قبل را در نظر بگیرید. فرض کنید مکان کنونی حامل‌ها در تکرار پنجمِ یکی از روش‌های حل بدین صورت تعریف شده است که $S_5=\{(1,2,3,1)\}$ می‌باشد. حال برای ایجاد تمامی همسایگی‌های آن، ابتدا از حامل ۱ شروع کرده و با هر تغییر مکان این حامل و ثابت نگه داشتن سایر حامل‌ها، یک همسایگی ایجاد می‌شود. از آنجایی که تعداد مکان‌های پیشنهادی برای هر حامل، ۳ مکان می‌باشد، بنابراین برای هر حامل دو تغییر مکان مجاز است. بنابراین داریم: $g=1$، $count=1$ و $i=1$

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

. همچنین در تکرار بعد الگوریتم داریم: $g=2$، $count=2$ و $NE_2=\{(1+count,2,3,1)\}=\{(3,2,3,1)\}$. حال باید همسایگی‌های مربوط به تغییر مکان حامل ۲ را تعیین کرد. بنابراین

$g=3$، $count=1$

و $NE_3=\{(1,2+count,3,1)\}=\{(1,3,3,1)\}$ خواهد شد و برای ایجاد همسایگی بعدی این حامل به صورت $g=4$، و $count=2$

$$NE_4=\{(1,2+count-|P_2|,3,1)\}=\{(1,2+2-3,3,1)\}=\{(1,1,3,1)\}$$

تعریف می‌شود. به همین ترتیب سایر همسایگی‌ها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$NE_5=\{(1,2,1,1)\},NE_6=\{(1,2,2,1)\},NE_7=\{(1,2,3,2)\},NE_8=\{(1,2,3,3)\}$$

در روش فوق، نحوه بدست آوردن تمامی همسایگی‌های یک جواب شرح داده شد. حال اگر بخواهیم همسایگی‌های یک جواب را در روش‌های حل مسأله که در ادامه آمده است، استفاده کنیم، کافی است تغییرات کوچکی در روش فوق داد. در گام اول مقداردهی اولیه به g حذف می‌شود و در ابتدای گام دوم باید مقدار g از روش مربوطه فراخوانی می‌شود. دستورات گام ۴ نیز حذف شده و به جای آن‌ها، روش مربوطه فراخوانی شده و هنگامی که در روش مذکور، دستور ایجاد همسایگی جدید داده می‌شود به گام ۲ این روش برگردید.

روش حل مسأله مطرح شده در این پژوهش شامل دو مرحله پیدا کردن مکان مناسب برای حامل‌ها و تخصیص سلاح‌های آن‌ها به تهدیدها می‌باشد. برای مرحله اول، پنج روش حل در زیر بخش‌های ۳-۳ تا ۳-۵ و برای مرحله دوم نیز یک روش حل در زیر بخش ۳-۲ ارائه می‌شود.

۳-۲. تخصیص سلاح به روش ابتکاری

برای تخصیص سلاح‌های روی هر حامل به تهدیدها بر اساس یک چیدمان مشخص، از یک روش ابتکاری استفاده شده است. روند کلی این روش بدین صورت است که ابتدا ضرایب $Za_{ikj}=\frac{b_j d_{kj} a_{ik}}{1+\sqrt{(x_{il}-\chi_j)^2+(y_{il}-\psi_j)^2}}$ را به ازای یک چیدمان مشخص برای تهدیدهایی که در برد سلاح‌های حامل i هستند، بدست آورده و آن‌ها را در مجموعه‌ای به‌نام ZA به صورت نزولی مرتب می‌کنیم. در ادامه روند حل، مجموعه ZA، به دو مجموعه‌ی NA و AS که به ترتیب مجموعه تخصیص‌های غیرممکن و ممکن را مشخص می‌کنند، افراز می‌شود. در نهایت، تابع هدف با جمع میزان تخریب حاصله تمام تهدیدها با توجه به اهمیت آن‌ها $\left(\sum_{j\in M}A'_j\right)$ محاسبه می‌شود. روند تخصیص سلاح به صورت گام به گام در ادامه آمده است.

گام ۱: در یک چیدمان مشخص، مجموعه‌ای از سه تایی‌های (i,k,j) که در آن تهدید j در برد سلاح k از حامل i نیست را در مجموعه NA قرار دهید. همچنین به ازای هر تهدید $j \in M$ مقدار A'_j و nz را برابر صفر قرار دهید.

گام ۲: به ازای هر $(i,k,j) \notin NA$، مقدار Za_{ikj} را محاسبه کنید و nz را یک واحد افزایش دهید.

گام ۳: تمامی Za_{ikj} های موجود را به صورت نزولی مرتب کنید و در مجموعه $ZA = \{Za^{(1)}_{ikj}, Za^{(2)}_{i'k'j'}, ..., Za^{(nz)}_{i^{nz}k^{nz}j^{nz}}\}$ که در آن $Za^{(1)}_{ikj} \ge Za^{(2)}_{i'k'j'} \ge ... \ge Za^{(nz)}_{i^{nz}k^{nz}j^{nz}}$ می‌باشد، نگهداری کنید.

گام ۴: به ازای $Za^{(1)}_{ikj}$، مقدار تخریب تهدید j را $A'_j = A'_j + Za^{(1)}_{ikj}$ به روز کنید.

گام ۵: اگر $A'_j \le b_j\left(1-s_j\right)$ بود، سه‌تایی (i,k,j) را به مجموعه AS اضافه کنید و Za_{ikj} را از مجموعه ZA حذف کرده و یک واحد از nz کم کنید. در غیر اینصورت از میان سایر اعضای مجموعه ZA، Za_{ikj} ای را که مقدار A'_j را کمتر از همه نسبت به $b_j\left(1-s_j\right)$ افزایش می‌دهد از مجموعه ZA حذف کرده و سه‌تایی (i,k,j) مربوط به آن را به مجموعه AS اضافه کنید و قرار دهید: $A'_j = b_j\left(1-s_j\right)$ و یک واحد از nz کم کنید. از میان اعضای مجموعه ZA، سایر Za_{ikj} هایی را که مربوط به اختصاص سلاح به تهدید j را حذف کرده و سه تایی (i,k,j) مرتبط با آن‌ها را به مجموعه NA اضافه کنید. به ازای هر حذف از مجموعه ZA، یک واحد از nz کم کنید.

گام ۶: اگر $nz > 0$ است، به گام ۳ بروید. در غیر اینصورت قرار دهید: $F = \sum_{j \in M} A'_j$ و متوقف شوید.

۳-۳. روش‌بیشترین بهبود

در این روش سعی بر این است که در هر تکرار، تمامی همسایگی‌های مجاز جواب کنونی مورد بررسی قرار گیرند و بر اساس بهترین آن‌ها از نظر تابع هدف، جواب کنونی به روز شده و جستجو حول همسایگی‌های این جواب ادامه پیدا کند. شرط خاتمه‌ی این روش، عدم بهبود در یک تکرار است. مراحل اجرای این روش، طی ۵ گامی که در ادامه آمده است، شرح داده شده است.

گام ۱: مکان اولیه و مشخص حامل‌ها را در S_0 قرار دهید. به ازای این مکان مقدار FS_0 را با استفاده از الگوریتم تخصیص محاسبه کنید.قرار دهید: $FBest = FS_0$، $itr = 1$ و $g = 1$.

گام ۲: همسایگی NE_g را برای جواب S_{itr-1} ایجاد کرده و مقدار FNE_g را با استفاده از الگوریتم تخصیص محاسبه کنید.

گام ۳: اگر $g < \sum_{i \in N}\left(\left|P_i\right|-1\right)$ است، قرار دهید: $g = g + 1$ و به گام ۲ بروید. در غیر اینصورت قرار دهید: $g = 1$ و به گام ۴ بروید.

گام ۴: بیشترین تابع هدف و همسایگی مربوط به آن را شناسایی کرده و مقادیر مربوط به هر یک را به ترتیب در FS_{itr} و S_{itr} قرار دهید.

گام ۵: اگر $FS_{itr} > FBest$ است، $FBest = FS_{itr}$، $itr = itr + 1$ و به گام ۲ برگردید. در غیر اینصورت متوقف شوید و $FBest$ را گزارش کنید.

۳-۴. روش‌های سریع‌ترین بهبود

در این روش سعی براین است که برای هر جواب کنونی، همسایگی‌ای که اولین بهبود را در تابع هدف ایجاد می‌کند شناسایی کرده و بر اساس آن، جواب فعلی به روز شود. بهبود در تابع هدف می‌تواند به سه صورت تفسیر گردد: بهبود در بهترین جواب شناخته شده کنونی، بهبود در همسایگی‌های ایجاد شده در تکرار قبل و یا بهبود تابع هدف نسبت به همسایگی‌های قبل در تکرار فعلی. با توجه به تعریف بهبود، سه نوع مختلف از این روش به صورت گام به گام در ادامه ارائه شده است.

۳-۵. روش سریع‌ترین بهبود۱

در این روش، بهبود نسبت به بهترین جواب شناخته شده کنونی، تعریف می‌شود.

گام ۱: مکان اولیه‌ی حامل‌ها را در S_0 قرار دهید. به ازای این مکان مقدار FS_0 را با استفاده از الگوریتم تخصیص محاسبه کنید. قرار دهید: $FBest = FS_0$، $itr = 1$ و $g = 1$.

گام۲:همسایگی NE_g را برای جواب S_{itr-1} ایجاد کرده و مقدار FNE_g را با استفاده از الگوریتم تخصیص محاسبه کنید.

گام ۳:اگر $FNE_g > FBest$ است،قرار دهید: $FBest = FNE_g$، $S_{itr} = NE_g$، $FS_{itr} = FNE_g$، $g = 1$، $itr = itr + 1$ و به گام ۲ برگردید. در غیر اینصورت به گام ۴ بروید.

گام ۴: اگر $g < \sum_{i \in N}\left(\left|P_i\right|-1\right)$ است، قرار دهید: $g = g + 1$ و به گام ۲ برگردید. در غیر اینصورت متوقف شویدو $FBest$ را گزارش کنید.

۳-۶. روش سریع‌ترین بهبود ۲

در این روش، بهبود بدین صورت تعریف می‌شود که جواب یک همسایگی از مقدار تابع هدف از تکرار قبل بیشتر باشد.

گام ۱: مکان اولیه‌ی حامل‌ها را در S_0 قرار دهید. به ازای این مکان مقدار FS_0 را با استفاده از الگوریتم تخصیص محاسبه کنید. قرار دهید: $FBest = FS_0$، $itr = 1$ و $g = 1$.

گام۲: همسایگی NE_g را برای جواب S_{itr-1} ایجاد کرده و مقدار FNE_g را با استفاده از الگوریتم تخصیص محاسبه کنید.

گام ۳: اگر $FNE_g > FS_{itr-1}$است، قرار دهید: $FS_{itr} = FNE_g$ ،$S_{itr} = NE_g$ ،$FS_{itr} = FNE_g$ و در غیر اینصورت به گام ۶ بروید.

گام ۴: اگر $FNE_g > FBest$ است، قرار دهید: $FBest = FNE_g$.

گام ۵: قرار دهید:$g = 1$ ، $itr = itr + 1$و به گام ۲ برگردید.

گام ۶: اگر $g < \sum_{i \in N} (|P_i| - 1)$ است، قرار دهید: $g = g + 1$ و به گام ۲ برگردید. در غیر اینصورت متوقف شویدو $FBest$ را گزارش کنید.

۳-۷. روش سریع‌ترین بهبود۳

در این روش، از تلفیق سه تعریف ارائه شده برای بهبود استفاده شده است.

گام ۱:مکان اولیه‌ی حامل‌ها را در S_0قرار دهید. به ازای این مکان مقدار FS_0را با استفاده از الگوریتم تخصیص محاسبه کنید. قرار دهید: $FBest = FS_0$ ،$itr = 1$و $g = 1$.

گام ۲: همسایگی NE_gرا برای جواب S_{itr-1}ایجاد کرده و مقدار FNE_gرا با استفاده از الگوریتم تخصیص محاسبه کنید.

گام ۳:اگر $FNE_g > FBest$ است، قرار دهید: $FBest = FNE_g$ ،$S_{itr} = NE_g$ ،$FS_{itr} = FNE_g$ ،$g = 1$، $itr = itr + 1$ و به گام ۲ برگردید، در غیر اینصورت به گام ۴ بروید.

گام ۴: اگر $FNE_g > FS_{itr-1}$است، قرار دهید: $FS_{itr} = FNE_g$ ،$S_{itr} = NE_g$ ،$FS_{itr} = FNE_g$ ،$g = 1$، $itr = itr + 1$ وبه گام ۲ برگردید، در غیر اینصورت به گام ۵ بروید.

گام ۵: اگر $g = 1$ است، به گام ۷ بروید، در غیر اینصورت به گام ۶ بروید.

گام ۶: اگر $FNE_g > FNE_{g-1}$است، قرار دهید: $FS_{itr} = FNE_g$ ،$S_{itr} = NE_g$ ،$FS_{itr} = FNE_g$ ،$g = 1$، $itr = itr + 1$و به گام ۲ برگردید، در غیر اینصورت به گام ۷ بروید.

گام ۷: اگر $g < \sum_{i \in N} (|P_i| - 1)$ است، قرار دهید: $g = g + 1$ و به گام ۲ برگردید، در غیر اینصورت متوقف شوید و $FBest$ را گزارش کنید.

۳-۸. روش جستجوی ممنوعه

یکی از معایب روش‌های جستجوی محلی، متوقف شدن آن‌ها در نقاط بهینه محلی است. به همین دلیل برای رفع این مشکل می‌توان از الگوریتم‌های فراابتکاری نظیر روش جستجوی ممنوعه که توسط Glover در سال ۱۹۸۶ ارائه شد، استفاده کرد. در این روش، همسایگی‌هایی را که پیرامون آن‌ها جستجو انجام شده است به طور موقت و کوتاه‌مدت در لیستی به نام لیست ممنوعه[12] نگهداری می‌شوند. در نتیجه با ایجاد لیست ممنوعه، از ایجاد همسایگی‌های تکراری در کوتاه مدت جلوگیری می‌شود. برای بهبود عملکرد روش جستجوی ممنوعه می‌توان از دو عملگر تنوع‌گرایی[13] و نخبه‌گرایی[14] استفاده کرد. عملگر تنوع‌گرایی در هر مرحله با قبول جوابی بدتر از جواب فعلی، فضای جستجو را بزرگتر کرده و از گیر افتادن در بهینه‌های محلی جلوگیری می‌کند. عملگر نخبه‌گرایی نیز به منظور انتخاب جواب‌های بهتر و سرعت بخشیدن به روند جستجو، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۳].

در الگوریتم پیشنهادی، به ازای جواب اولیه برای مکان اولیه حامل‌ها، مقدار تابع هدف از الگوریتم تخصیص محاسبه شده و مکان قرارگیری حامل‌ها به لیست ممنوعه اضافه می‌شوند. همسایگی‌های این جواب مورد بررسی قرار می‌گیرد و بهترین آن‌ها از نظر تابع هدف تخصیص، شناسایی شده و به لیست ممنوعه اضافه می‌شود. در این الگوریتم، طول لیست ممنوعه ثابت در نظر گرفته شده و هنگامی که تعداد همسایگی‌های ممنوع بیشتر از طول لیست ممنوعه شود، اولین جوابی که وارد لیست ممنوعه شده حذف می‌شود. به عبارت دیگر هر همسایگی که به لیست ممنوعه اضافه می‌شود به اندازه $lenT$ تکرار در آن باقی مانده و سپس خارج می‌شود.

در ابتدای کار، الگوریتم بهترین جواب در هر تکرار را صرف نظر از بهبود یا عدم بهبود به لیست ممنوعه اضافه می‌کند و پیرامون آن جستجو را ادامه می‌دهد. همچنین تعداد تکرارهایی که جواب را بهبود نداده‌اند و تعداد تکرارهایی که جواب را نسبت به جواب قبلی بهبود داده‌اند، در دو متغیر div و impنگهداری می‌کند. اگر بعد از ITR تکرار هنوز جواب‌های بهبود داده نشده وجود داشته باشد، اگر متغیر div بیشتر از imp باشد عملگر تنوع‌گرایی و در غیر اینصورت عملگر نخبه‌گرایی اجرا می‌شود.

عملگر تنوع‌گرایی پیشنهادی به این صورت است که براساس تعداد دفعاتی که از شروع الگوریتم، هر حامل در هر موقعیت پیشنهادی در لیست ممنوعه قرار گرفته است، به هر همسایگی امتیاز داده می‌شود. سپس همسایگی‌ای که کمترین امتیاز را دارد، انتخاب می‌شود. منطق این انتخاب بر این اساس است که اطراف همسایگی‌های با امتیاز کمتر جستجوی کمتری انجام شده است و جستجوی این فضا ممکن است منجر به جواب‌های بهتری شود.

عملگر نخبه‌گرایی پیشنهادی به این صورت است که بر اساس تعداد دفعاتی که از شروع الگوریتم، هر حامل در هر مکان پیشنهادی موجود باعث بهبود جواب شده است، به هر همسایگی جواب کنونی امتیازی داده می‌شود. سپس همسایگی‌ای که دارای بیشترین امتیاز است، برای جستجوهای بعدی انتخاب شده و در لیست ممنوعه قرار داده می‌شود. انتخاب بیشترین امتیاز به منظور

این است که قرار گرفتن حامل در این موقعیت با توجه به سوابقی (مبنی بر بهبود جواب) که در الگوریتم ذخیره شده، احتمال بهبود جواب را افزایش می‌دهد.

شرط خاتمه الگوریتم را محدودیت زمان تعریف کرده و گام‌های زیر مراحل انجام این روش را شرح می‌دهند.

گام ۱: قرار دهید: $len=1$ و مکان اولیه‌ی حامل‌ها را در S_0 و $Tabu_{len}$ قرار دهید. به ازای این مکان مقدار FS_0 را با استفاده از الگوریتم تخصیص محاسبه کنید. قرار دهید: $FBest=FS_0$، $itr=1$، $G'=\varnothing$، $NE=\varnothing$، $g=1$ و $g'=1$. تمامی درایه‌های ماتریس‌های TOT و TI را برابر صفر قرار دهید.

گام ۲: همسایگی $NE_{g'}$ را برای جواب S_{itr-1} ایجاد کرده، اگر این همسایگی در لیست ممنوعه وجود ندارد، این همسایگی را به مجموعه G' اضافه کرده، مقدار $FNE_{g'}$ را با استفاده از الگوریتم تخصیص محاسبه کنید و این همسایگی و تابع هدف آن را به مجموعه NE اضافه کنید. قرار دهید: $Score_{g'}=0$ و $g'=g'+1$.

گام ۳: اگر $g<\sum_{i\in N}(|P_i|-1)$ است، قرار دهید: $g=g+1$ و به گام ۲ برگردید، در غیر اینصورت به گام ۴ بروید.

گام ۴: بیشترین مقدار تابع هدف و همسایگی مربوط به S_{itr-1} را شناسایی کرده و مقادیر مربوط به هر یک را به ترتیب در FS_{itr} و S_{itr} قرار دهید.

گام ۵: اگر مقدار $FS_{itr}>FS_{itr-1}$ است، قرار دهید: $imp=imp+1$ و به ازای هر حامل $i\in N$ در S_{itr} قرار دهید: $totimp_{i,lay_i}=totimp_{i,lay_i}+1$.

گام ۶: اگر مقدار $FS_{itr}>FBest$ است، قرار دهید: $FBest=FS_{tr}$، $div=0$ و به گام ۱۰ بروید، در غیر اینصورت قرار دهید: $div=div+1$.

گام ۷: اگر $div<ITR$ است، به گام ۱۰ بروید، در غیر اینصورت اگر $div<imp$ است، به گام ۸ بروید. در غیر اینصورت به گام ۹ بروید.

گام ۸: قرار دهید: $imp=0$ و برای $|G'|$ همسایگی مجاز از مجموعه NE، $Score_{\gamma}=\sum_{i\in N} totimp_{i,lay_i^{\gamma}}$ که $\gamma=1,2,...,|G'|$ را محاسبه کنید. بیشترین امتیاز ($Score_{\gamma^*}$) را تعیین کنید. همسایگی مربوط به آن (NE_{γ^*}) و مقدار تابع هدف تخصیص (FNE_{γ^*}) را به ترتیب در S_{itr} و FS_{itr} قرار دهید و به گام ۱۰ بروید.

گام ۹: قرار دهید: $div=0$ و برای $|G'|$ همسایگی مجاز از مجموعه NE، $Score_{\gamma}=\sum_{i\in N} tot_{i,lay_i^{\gamma}}$ که $\gamma=1,2,...,|G'|$ را محاسبه کنید. کمترین امتیاز ($Score_{\gamma^*}$) را تعیین کنید. همسایگی مربوط به آن (NE_{γ^*}) و مقدار تابع هدف تخصیص (FNE_{γ^*}) را به ترتیب در S_{itr} و FS_{itr} قرار دهید و به گام ۱۰ بروید.

گام ۱۰: اگر $len<lenT$ است، قرار دهید: $len=len+1$ و S_{itr} را به $Tabu_{len}$ اضافه کنید. در غیر اینصورت $Tabu_1$ را از لیست خارج کرده وبرای هر $len=2,3,...,lenT$، قرار دهید: $Tabu_{len-1}=Tabu_{len}$ و S_{itr} را به $Tabu_{lenT}$ اضافه کنید. به ازای هر حامل $i\in N$ در S_{itr} قرار دهید: $tot_{i,lay_i}=tot_{i,lay_i}+1$.

گام ۱۱: اگر شرط خاتمه برقرار است، متوقف شوید و $FBest$ را گزارش دهید. در غیر اینصورت قرار دهید: $g=1$، $g'=1$، $itr=itr+1$، $G'=\varnothing$، $NE=\varnothing$ و به گام ۲ برگردید.

۴. نتایج محاسباتی

کلیه روش‌های حل ارائه شده در این تحقیق در محیط Microsoft Visual C++ 2010، بر روی رایانه کتابی با مشخصات CPU Core i5، 4GB RAM که مجهز به سیستم عامل Windows 7 بوده، کد نویسی شده است. سپس برای بررسی عملکرد روش‌های پیشنهادی و انتخاب بهترین روش، ۶۰۰ نمونه مسأله در سه گروه بزرگ، متوسط و کوچک ایجاد شده است.

۴-۱. نحوه ایجاد نمونه مسائل

برای ایجاد نمونه مسأله، سه عامل تعداد حامل‌ها، تعداد تهدیدها و تعداد مکان‌های پیشنهادی مد نظر قرار گرفته و برای هر ترکیب آن‌ها که در جدول ۳آمده است، ۵ نمونه مسأله به صورت تصادفی ایجاد شده است. تعداد حامل‌های در نظر گرفته شده در این نمونه مسائل از بین اعداد ۱ تا ۱۰ و ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ و تعداد تهدیدها از بین اعداد۲تا ۵ و ۱۰، ۱۵ و۲۰ انتخاب شده است. لازم به ذکر است مکان‌های پیشنهادی اطراف هر حامل ۲، ۳ یا ۴ می‌تواند باشد. از آنجایی که یک مکان اولیه برای حامل‌ها در نظر گرفته شده است، برای حل باید به بررسی ۳، ۴ یا ۵ مکان پرداخته و یکی از آن‌ها انتخاب شود.

جدول ۳. نحوه ایجاد ترکیب‌های مختلف برای تولید نمونه مسائل

تعداد مکان‌های بالقوه	تعداد حامل‌ها	تعداد تهدیدها
۳، ۴ و ۵	۱، ۲، ۳ و ۴	۲
۳، ۴ و ۵	۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶	۳
۳، ۴ و ۵	۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸	۴
۳، ۴ و ۵	۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹ و ۱۰	۵
۳، ۴ و ۵	۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰	۱۰

۵ و ۴، ۳	۳۰ و ۲۵، ۲۰، ۱۵، ۱۰، ۵	۱۵
۵ و ۴، ۳	۳۰ و ۲۵، ۲۰، ۱۵، ۱۰	۲۰

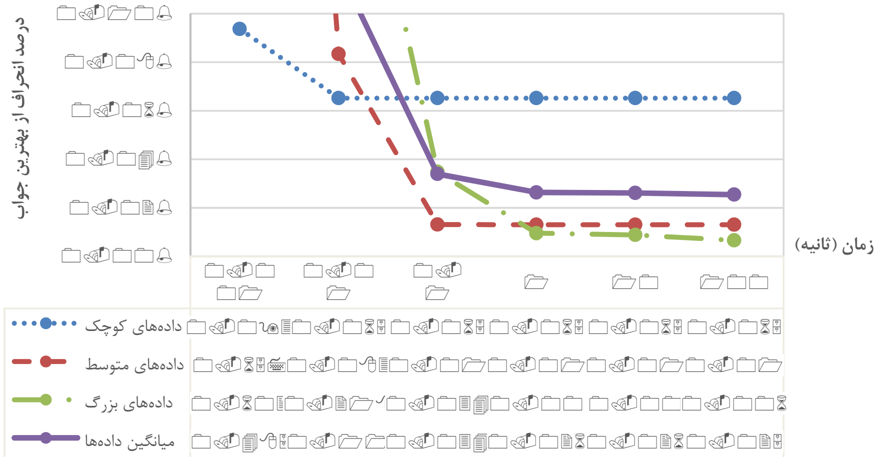
بر اساس حداکثر تعداد حامل و تهدید در هر نمونه مسأله، نمونه مسائل در سه گروه کوچک، متوسط و بزرگ تقسیم‌بندی می‌شوند.اگر حداکثر تعداد حامل‌ها و یا تهدیدهای یک نمونه مسأله کمتر از ۵ عدد باشد در گروه کوچک، اگر بین ۵ تا ۱۵ عدد باشد در گروه متوسط و اگر بین ۱۵ تا ۳۰ عدد باشد در گروه بزرگ قرار می‌گیرند. بنابراین از بین ۶۰۰ نمونه مسأله تولیدی، ۱۶۵ نمونه در گروه کوچک، ۲۵۵ نمونه در گروه متوسط و ۱۸۰ نمونه در گروه بزرگ قرار گرفته‌اند. برای هر ترکیب از تعداد حامل‌ها، تعداد تهدیدها و تعداد مکان‌های پیشنهادی، تعداد سلاح‌های قرار گرفته بر روی هر حامل به صورت تصادفی مقدار ۲، ۴ یا ۶ می‌باشد و برد هر سلاح به صورت تصادفی از بین مقادیر ۳۵، ۸۵، ۱۲۰ و ۱۸۰ کیلومتر انتخاب می‌شوند. میزان خطر هر تهدید برای هر حامل، دقت سلاح، میزان تخریب هر سلاح و بیشترین تخریب قابل قبول برای هر حامل به ترتیب به صورت تصادفی و بر اساس توزیع یکنواخت پیوسته در بازه‌های $[0.1, 0.8]$، $[0.85, 1]$، $[0.35, 1]$ و $[0.35, 0.65]$ ایجاد می‌شود.

مکان اولیه حامل‌ها و تهدیدها به صورت تصادفی در صفحه مختصات دو بعدی تولید شده است. در تولید مکان‌های بالقوه حامل‌ها باید دو عامل جهت حرکت حامل و میزان حرکت حامل در آن جهت مورد توجه قرار گیرد. میزان حرکت هر حامل با توجه به حداقل وحداکثر میزان جابجایی حامل در یک دوره زمانی به صورت تصادفی و بر اساس توزیع یکنواخت پیوسته در بازه $[2, 60]$ ایجاد می‌شود. برای تعیین اینکه یک مکان بالقوه برای یک حامل در جهت نزدیک شدن به تهدیدها باشد و یا در جهت دور شدن از آن‌ها، ابتدا یک عدد تصادفی بر اساس توزیع یکنواخت پیوسته در بازه $[0, 1]$ ایجاد می‌شود. سپس اگر این عدد کمتر از ۰.۵ باشد، مکان بالقوه جدید در جهت دور شدن از تهدیدها و در غیر اینصورت، در جهت نزدیک شدن به تهدیدها ایجاد می‌شود. برای تعیین جهت حرکت حامل، ابتدا مکان تهدیدها را بر اساس مؤلفه χ_j آن‌ها به صورت نزولی مرتب کرده و سپس بازه‌هایی بر مبنای فراوانی تجمعی اهمیت تهدیدها ایجاد می‌شود. برای اولین تهدید این بازه به صورت $\left[0, \frac{b_{(1)}}{\sum_{j \in M} b_{(j)}}\right]$ و برای سایر تهدیدها به عنوان مثال، تهدید (j') این بازه به صورت $\left[\frac{\sum_{j=1}^{(j')-1} b_{(j)}}{\sum_{j \in M} b_{(j)}}, \frac{\sum_{j=1}^{(j')} b_{(j)}}{\sum_{j \in M} b_{(j)}}\right]$ تعریف می‌شود. سپس یک عدد تصادفی بر اساس توزیع یکنواخت پیوسته در بازه $[0, 1]$ ایجاد کرده و تعیین می‌کنیم این عدد در بازه مربوط به کدام تهدید قرار می‌گیرد.فرض کنید تهدید (j^*) انتخاب شود. اکنون زاویه بین حامل و تهدیدهای $(j^*)-1$ و $(j^*)+1$ را تعیین کرده و یک عدد تصادفی بین این دو زاویه ایجاد می‌کنیم. این زاویه جهت حرکت حامل را مشخص می‌کند. بنابراین مکان پیشنهادی حامل با توجه به این زاویه و میزان حرکت حامل نسبت به مکان اولیه آن تعیین می‌شود.

۴-۲. تجزیه و تحلیل نتایج

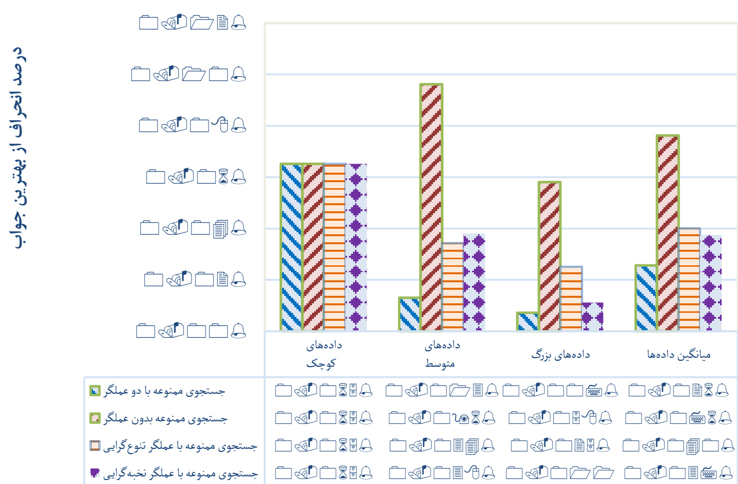
برای تجزیه وتحلیل نتایج، ابتدا شرط توقف روش جستجوی ممنوعه را محدودیت زمانی قرار داده و آن را در محدوده زمانی ۰.۰۰۱ ثانیه تا ۱۰۰ ثانیه اجرا کرده‌ایم. لازم به ذکر است که انحرافات مربوطه در این زیربخش برای نمونه مسائل کوچک و ۹۵٪ از نمونه مسائل متوسط از مقایسه مقدار به دست آمده به وسیله روش مربوطه با روش شمارش کامل (روش شمارش کامل به این صورت در نظر گرفته شده است که مکان‌یابی حامل‌ها بصورت شمارش کامل و در نظر گرفتن تمامی جایگشت‌های مکان‌ها بدست می‌آید.) و برای سایر نمونه مسائل متوسط و نمونه مسائل بزرگ با مقایسه آن مقدار با بهترین جواب به دست آمده از تمامی روش‌ها، محاسبه شده است. میانگین این درصد انحرافات در گروه‌های تعریف شده در شکل ۲ آورده شده است.

همانطور که در شکل ۲مشاهده می‌شود، تغییر انحرافات در گروه‌های مختلف با افزایش زمان کاهش یافته است. می‌توان زمان ۳۰ ثانیه را به عنوان زمانی که نتایج روش مذکور بعد از آن تغییرات نزدیک به صفر (۰.۷٪) دارند، درنظر گرفت و در ادامه تحلیل‌ها، فقط به بررسی این روش با محدودیت زمانی ۳۰ ثانیه پرداخته شود.

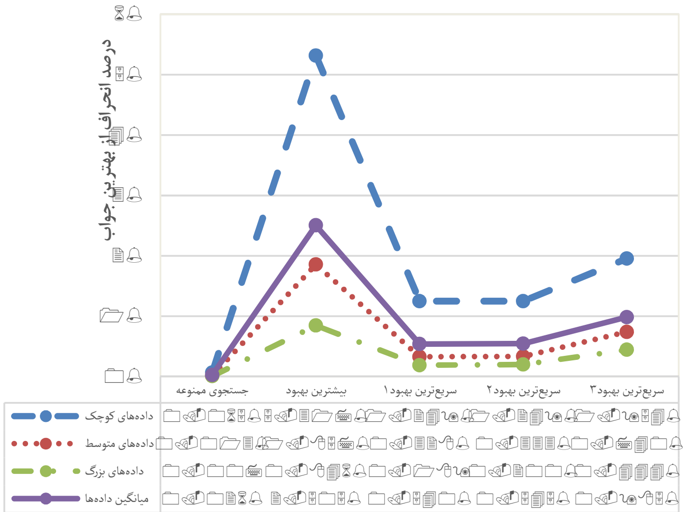


شکل ۲. اجرای روش جستجوی ممنوعه در زمان‌های مختلف

در شکل ۳، زمان حل روش جستجوی ممنوعه را ۳۰ ثانیه قرار داده و با حذف عملگرهای تنوع‌گرایی و نخبه‌گرایی، کارایی این روش مورد بررسی قرار می‌گیرد. همانطور که در شکل ۳ مشخص است به جز گروه نمونه مسائل کوچک که استفاده یا عدم استفاده از این عملگرها برای آن یکسان است، برای سایر نمونه مسائل استفاده از دو عملگر به صورت همزمان باعث بهبود در جواب شده است. با در نظر گرفتن میانگین حاصل از کل نمونه مسائل موجود، می‌توان نتیجه گرفت که روش جستجوی ممنوعه با دو عملگر به بهترین نتایج دست یافته است و در مقایسه با هنگامی که از هیچ عملگری استفاده نمی‌شود درصد انحراف از بهترین جواب شناخته شده ٪ ۰.۰۵ کاهش یافته است. همچنین از مقایسه روش جستجوی ممنوعه با هر دو عملگر با هنگامی که فقط از عملگر تنوع‌گرایی و یا فقط از عملگر نخبه‌گرایی استفاده می‌شود، مشخص می‌شود که درصد انحراف از بهترین جواب شناخته شده به ترتیب ٪۰.۰۱۴ و ٪۰.۰۱۱ کاهش یافته است.



شکل ۳. بررسی استفاده از عملگرها در روش جستجوی ممنوعه



شکل ۴. بررسی انحراف پنج روش پیشنهادی از بهترین جواب

تجزیه و تحلیل نتایج مربوط به تمامی روش‌های معرفی شده در شکل ۴ آورده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، روش جستجوی ممنوعه در سه گروه نمونه مسأله، انحراف کمتری نسبت به بهترین جواب شناخته شده دارد. میانگین درصد انحراف در روش جستجوی ممنوعه ۰.۰۲۶٪ بوده و این میزان انحراف کمی را نسبت به بهترین جواب شناخته شده نشان می‌دهد. بر خلاف انتظار، روش بیشترین بهبود نسبت به روش‌های سریع‌ترین بهبود دارای انحراف بیشتری است و این بدان معنی است که با وجود انتخاب بهترین‌ها، الگوریتم سریع‌تر در نقاط بهینه محلی متوقف شده و کارایی آن نسبت به سایر روش‌های پیشنهادی به طور محسوس کمتر می‌شود. نتیجه دیگری که می‌توان از شکل ۴ گرفت این است که پنج روش پیشنهادی با افزایش اندازه نمونه مسائل، جواب‌هایی با انحراف کمتر از بهترین جواب‌های شناخته شده ایجاد می‌کنند. به نظر می‌رسد دلیل اصلی ایجاد چنین نتایجی، فاصله زیاد جواب‌های ایجاد شده از تمامی روش‌ها با جواب‌های بهینه‌ای باشد که برای ما نامشخص‌اند. همچنین می‌توان گفت که از بین سه روش ارائه شده به عنوان روش سریع‌ترین بهبود، روش سریع‌ترین بهبود ۱ کارایی بیشتری نسبت به دو روش دیگر دارد. به عبارت دیگر اضافه شدن شرایط بیشتر برای هدایت الگوریتم به سمت جواب‌های بهتر باعث شده الگوریتم، سریع‌تر در بهینه محلی متوقف شده و به جستجو ادامه ندهد.

برای اثبات این ادعا که روش جستجوی ممنوعه پیشنهادی عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها دارد، ابتدا می‌توان فرض برابری میانگین درصد انحراف روش‌های مختلف از بهترین جوابهای شناخته شده را با آنالیز واریانس آزمون کرد. بدین منظور درصد انحرافات در ۶۰۰ نمونه تولیدی را برای پنج روش پیشنهادی در نرم‌افزار Minitab 16 وارد کرده که نتایج آنالیز واریانس مطابق جدول ۴ می‌باشد.

جدول ۴. آنالیز واریانس

منابع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعها SS	میانگین مربعها MS	آماره F_0	مقدار $P-Value$
الگوریتمها	۴	۰.۲۱۶۱	۰.۰۵۴۰۲	۳۳.۰۴	۰.۰۰۰
خطا	۲۹۹۵	۴.۷۹۸۵	۰.۰۰۱۶۴		
مجموع	۲۹۹۹	۵.۱۱۳۶			

با توجه به جدول ۴، از آنجایی که مقدار $P-Value=0$ است، می‌توان فهمید که میانگین درصد انحرافات روش‌های مختلف تفاوت معناداری با هم دارند. اکنون با مقایسه دو به دوی روش‌های پیشنهادی برای تعیین بهترین روش پیشنهادی می‌توان از روش کمترین تفاضل معنی دار[15] استفاده کرد. بدین منظور، $\binom{5}{2}=10$ آزمون فرض $\begin{cases}H_0:\mu_i\le\mu_j\\ H_1:\mu_i>\mu_j\end{cases}$ برای مقایسات دو تایی روش‌های پیشنهادی باید انجام داد. اگر تفاضل میانگین درصد انحراف مشاهدات هر دو روش پیشنهادی $\left(\bar{y}_{i.}-\bar{y}_{j.}\right)$ در بازه ناحیه پذیرش این آزمون صدق کند، دلیلی برای رد فرض صفر وجود ندارد و این بدان معنی است که درصد انحراف روش i

کمتر j از بوده و بنابراین کارایی روش i بیشتر از j است. ناحیه پذیرش هر آزمون مقایسه دوتایی به صورت $\left(-\infty, 1.96\sqrt{\frac{2(0.00164)}{600}}\right] = (-\infty, 0.456\%]$ می‌باشد (مقدار خطای نوع I برابر ۰.۰۵ فرض شده است). در جدول ۵ به بررسی مقایسات دوتایی روش‌های پیشنهادی مختلف پرداخته است.

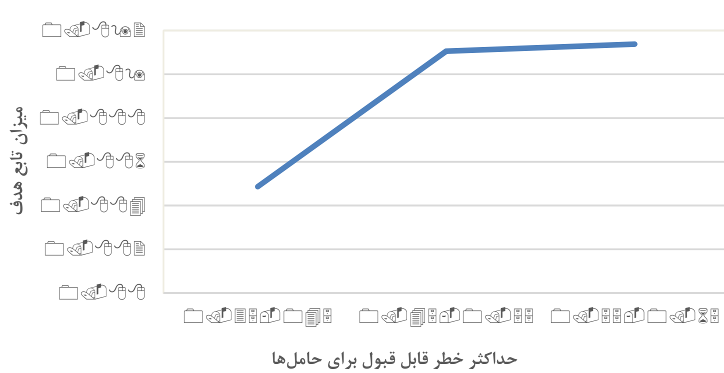
جدول ۵. نتایج روش کمترین تفاضل معنی‌دار برای مقایسات دوتایی روش‌های پیشنهادی

نتیجه	تفاضل میانگین درصد انحرافات از بهترین جواب	روش‌های انتخابی
کارایی روش جستجوی ممنوعه بیشتر است.	-٪۲.۴۷۹۳	روش بیشترین بهبود - روش جستجوی ممنوعه
کارایی روش جستجوی ممنوعه بیشتر است.	-۰.۵۱۳۹٪	روش سریع‌ترین بهبود ۱- روش جستجوی ممنوعه
کارایی روش جستجوی ممنوعه بیشتر است.	-۰.۵۱۹۵٪	روش سریع‌ترین بهبود ۲- روش جستجوی ممنوعه
کارایی روش جستجوی ممنوعه بیشتر است.	-۰.۹۵۹۵٪	روش سریع‌ترین بهبود ۳- روش جستجوی ممنوعه
کارایی روش سریع‌ترین بهبود ۱ بیشتر است.	۱.۹۶۵۴٪	روش سریع‌ترین بهبود ۱- روش بیشترین بهبود
کارایی روش سریع‌ترین بهبود ۲ بیشتر است.	۱.۹۵۹۸٪	روش سریع‌ترین بهبود ۲- روش بیشترین بهبود
کارایی روش سریع‌ترین بهبود ۳ بیشتر است.	۱.۵۱۹۸٪	روش سریع‌ترین بهبود ۳- روش بیشترین بهبود
کارایی روش سریع‌ترین بهبود ۱ بیشتر است.	-۰.۰۰۵۶٪	روش سریع‌ترین بهبود ۲- روش سریع‌ترین بهبود ۱
کارایی روش سریع‌ترین بهبود ۱ بیشتر است.	-۰.۴۴۵۶٪	روش سریع‌ترین بهبود ۳- روش سریع‌ترین بهبود ۱
کارایی روش سریع‌ترین بهبود ۲ بیشتر است.	-۰.۴۳۹۹٪	روش سریع‌ترین بهبود ۳- روش سریع‌ترین بهبود ۲

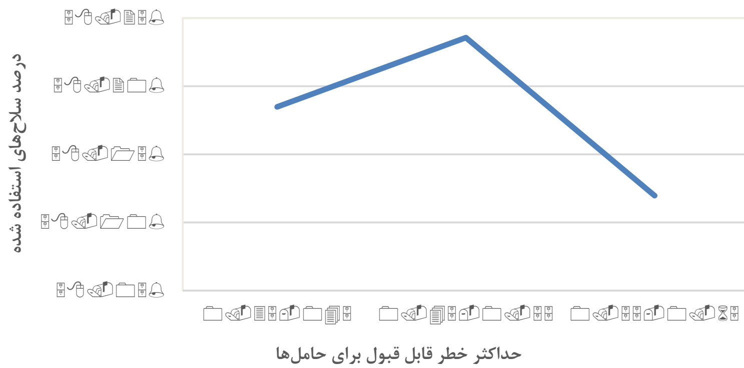
بنابراین با استناد به شکل ۴ و جدول ۵ می‌توان نتیجه گرفت که روش جستجوی ممنوعه نسبت به سایر روش‌های پیشنهادی دارای کارایی بیشتری است و کارایی به ترتیب در روش‌های سریع‌ترین بهبود ۱، سریع‌ترین بهبود ۲، سریع‌ترین بهبود ۳ و بیشترین بهبود کاهش یافته است.

در ادامه تحلیل‌هایی مبنی بر تأثیر میزان دقت سلاح‌ها، حداکثر خطر قابل قبول و برد سلاح‌ها بر روی مقدار تابع هدف و درصد سلاح‌های استفاده شده، آورده شده است. بدین منظور بر روی نمونه مسائل تولید شده این تغییرات اعمال شده است. اگر n_w تعداد سلاح‌هایی باشد که حداقل یک تهدید در برد آن است و n_u تعداد سلاح‌های استفاده شده در یک مسأله باشد، برای به دست آوردن درصد سلاح‌های استفاده شده در هر مسأله از رابطه $100\times\frac{n_u}{n_w}$ استفاده می‌کنیم.

دو شکل ۵ و ۶، به بررسی میزان تغییر تابع هدف و درصد سلاح‌های استفاده شده با تغییر حداکثر خطر قابل قبول می‌پردازد. همانطور که در شکل۵ مشخص شده است افزایش میزان حداکثر خطر قابل قبول باعث افزایش میزان تابع هدف شده است. این تغییر در تابع هدف در ابتدای نمودار با شیب زیادی تغییر کرده و در انتها شیب آن کم می‌شود. این نشان‌دهنده وابستگی زیاد تابع هدف در مقادیر کم این پارامتر است و تا زمانی که مقدار پارامتر به ۰.۵۵-۰.۴۵ برسد، تغییر زیادی در تابع هدف مشاهده می‌شود. با تحلیل دو شکل ۵ و ۶ درمی‌یابیم که در زمانی که حداکثر خطر قابل قبول از ۰.۴۵-۰.۳۵ به ۰.۵۵-۰.۴۵ تغییر می‌کند، استفاده از سلاح‌های بیشتر سبب افزایش تابع هدف شده و در هنگام تغییر این پارامتر از ۰.۵۵-۰.۴۵ به ۰.۶۵-۰.۵۵، با استفاده از سلاح‌های کمتری افزایش در مقدار تابع هدف را شاهد هستیم و این تغییر می‌تواند به علت چیدمان نزدیک‌تر و بیشتر بودن تعداد سلاح‌های در دسترس ایجاد شده باشد.



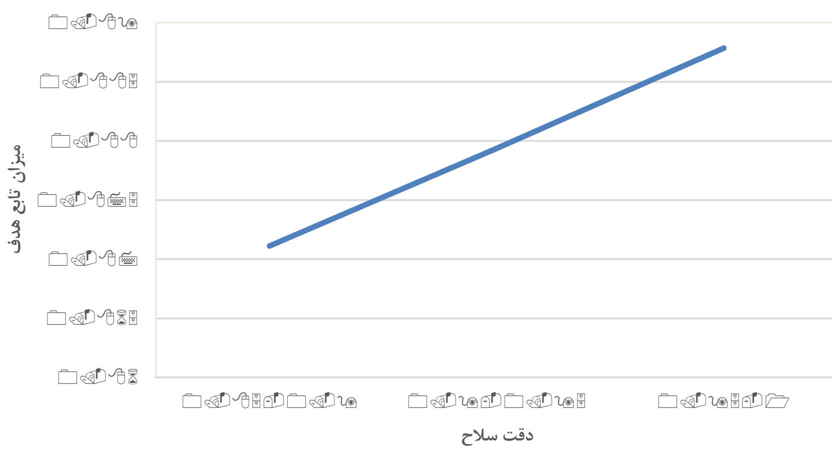
شکل ۵. تاثیر حداکثر خطر قابل قبول بر تابع هدف



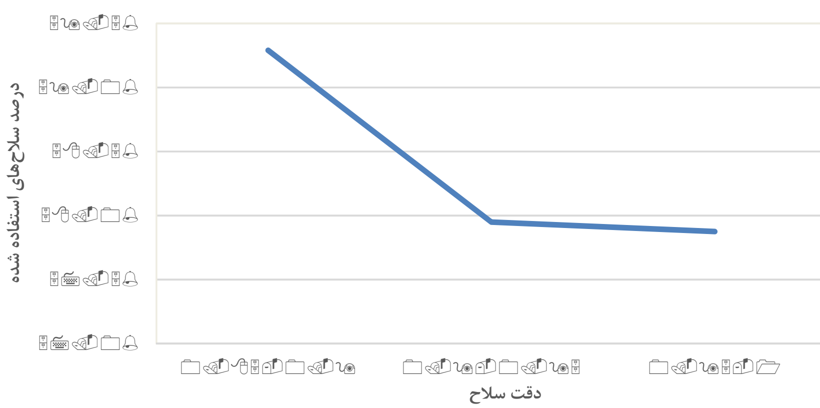
شکل ۶. تاثیر حداکثر خطر قابل قبول بر درصد سلاح‌های استفاده شده

دو شکل ۷ و ۸، به بررسی میزان تاثیر دقت سلاح بر مقدار تابع هدف و درصد سلاح‌های استفاده شده می‌پردازد. همانطور که در شکل ۷ مشخص شده است افزایش میزان دقت سلاح باعث افزایش میزان تابع هدف به صورت تقریباً خطی شده است.

بررسی شکل ۸ نشان می‌دهد که هر چه دقت سلاح بیشتر شود از سلاح‌های کمتری برای تخصیص دادن استفاده می‌شود. همچنین می‌توان این طور نتیجه‌گیری کرد که علت افزایش در انتهای شکل۶، مقدار زیاد دقت می‌باشد چرا که در این قسمت از نمودار از سلاح‌های کمتری استفاده شده است.



شکل ۷. تاثیر دقت سلاح بر مقدار تابع هدف

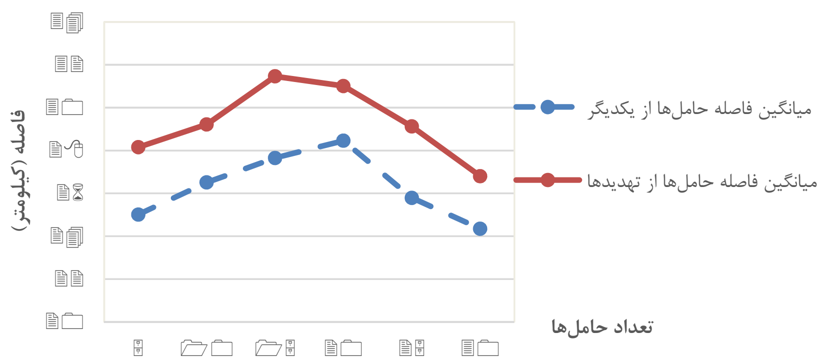


شکل ۸. تاثیر دقت سلاح بر درصد سلاح‌های استفاده شده

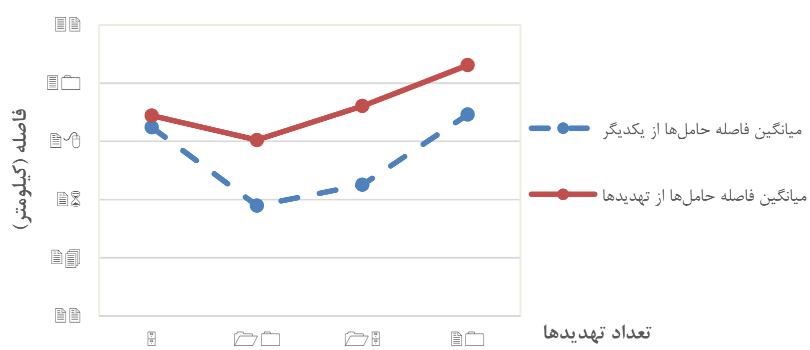
برای بررسی نحوه چیدمان حامل‌ها از دو شاخص میانگین فاصله حامل‌ها از یکدیگر و میانگین فاصله حامل‌ها از تهدیدها استفاده می‌شود. بنابراین اگر $d_{ii'}^{p}$ فاصله اقلیدسی حامل‌های i و i' با p مکان پیشنهادی و $d_{ij}'^{p}$ فاصله اقلیدسی حامل i و تهدید j با p مکان پیشنهادی را مشخص کند، میانگین فاصله حامل‌ها از یکدیگربه صورت $\bar{d}_p = \frac{\sum_{i,i'\in N, i<i'} d_{ii'}}{\binom{|N|}{2}}$ و میانگین فاصله حامل‌ها از تهدیدهابه صورت $\bar{d}'_p = \frac{\sum_{i\in N, j\in M} d_{ij}'^{p}}{|M|\times|N|}$ تعریف خواهد شد.

دو شکل ۹ و ۱۰ به بررسی تأثیر تعداد حامل‌ها و تهدیدها بر روی میانگین فاصله حامل‌ها از یکدیگر و میانگین فاصله حامل‌ها از تهدیدها می‌پردازد. به این منظور در شکل ۸ تعداد تهدیدها برابر ۱۵ و تعداد مکان‌های بالقوه برابر ۵ در نظر گرفته شده است. با افزایش تعداد حامل‌ها، سیر صعودی نمودار پایینی نشان‌دهنده پراکنده شدن حامل‌ها برای در اختیار گرفتن وسعت بیشتری از صحنه نبرد است و کاهش فاصله حامل‌ها از هم در انتهای این نمودار نشان‌دهنده ازدیاد آن‌ها در فضای نبرد است. افزایش فاصله حامل‌ها از تهدیدها در نمودار بالایی نشان‌دهنده در تیررس بودن تهدیدها در فواصل دورتر بوده و به همین دلیل لزومی ندارد حامل‌ها به تهدیدها نزدیک‌تر شوند. هنگامی که تعداد حامل‌ها از تهدیدها خیلی بیشتر است به دلیل افزایش شانس پیروزی در نبرد، حامل‌ها حالت تهاجمی به خود گرفته و در نتیجه فاصله آن‌ها از تهدیدها کاهش می‌یابد.

در شکل ۹ تعداد حامل‌ها ثابت و برابر ۱۰ و همچنین تعداد مکان‌های بالقوه برابر ۵ قرار داده شده است.



شکل ۹. بررسی میزان تأثیر تعداد حامل‌ها بر میانگین فاصله آن‌ها از یکدیگر و تهدیدها



شکل ۱۰. بررسی میزان تأثیر تعداد تهدیدها بر میانگین فاصله آن‌هااز یکدیگر و تهدیدها

همانطور که در نمودار مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد تهدیدها تا هنگام برابر شدن تعداد حامل‌ها با تهدیدها، میانگین فاصله حامل‌ها از یکدیگر کاهش یافته است و این نشان‌دهنده تمرکز حامل‌ها برای حمله است. با افزایش تعداد تهدیدها، میانگین فاصله افزایش یافته و این افزایش به معنی پراکنده شدن برخی حامل‌ها در جهت عقب نشینی است. همچنین

هنگامی که تعداد تهدیدها از تعداد حامل‌ها کمتر است، به دلیل حالت تهاجمی حامل‌ها، میانگین فاصله حامل‌ها از تهدیدها کمتر شده و در هنگام افزایش تعداد تهدیدها، به دلیل عقب‌نشینی این میانگین افزایش یافته است.

۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

هدف از انجام این مقاله، تعیین همزمان چیدمان حامل‌ها و تخصیص سلاح‌های آن‌ها به تهدیدهای مهاجم بود. به این منظور یک مدل غیرخطی مختلط عدد صحیح پیشنهاد شده است. از آنجایی که حل این مدل با نرم‌افزارهای موجود تحقیق در عملیات امکان‌پذیر نیست، چند روش حل ابتکاری و فراابتکاری طراحی شده است. دو روش بیشترین بهبود و سریع-ترین بهبود با منطق روش‌های جستجوی محلی و روش جستجوی ممنوعه برای این مدل پیشنهاد شد. بعد از مقایسه نتایج عددی این روش‌ها با بهترین جواب‌های موجود، مشخص شد که روش جستجوی ممنوعه با داشتن انحراف ۰.۰۲۶ درصدی، کارایی بیشتری نسبت به بقیه روش‌ها دارد.

در حالت کلی پیشنهادهای مطرح شده برای تحقیقات آتی را می‌توان به دو دسته توسعه روش حل این مسأله و توسعه خود مسأله تقسیم‌بندی کرد. برای توسعه روش حل، می‌توان استفاده از روش‌های حل دقیق برای مسأله تخصیص سلاح، چیدمان حامل‌ها و هم‌چنین تلفیق دو مسأله تخصیص سلاح و چیدمان حامل‌ها به صورت همزمان را پیشنهاد کرد. برای توسعه مسأله مورد بررسی، می‌توان با فرض داشتن اطلاعات کامل از تهدیدها، به بررسی این مسأله همانند مسائل نظریه بازی‌ها و در نظر گرفتن رویکرد تدافعی و تهاجمی به طور همزمان پرداخت. همچنین افزایش مکان‌های بالقوه در این مسأله و تبدیل این نقاط گسسته به یک ناحیه پیوسته می‌تواند به عنوان توسعه مسأله مورد بررسی قرار گیرد.

پی نوشت

1. Weapon target assignment (WTA)
2. Genetic algorithm
3. Swarm particle
4. Ant colony
5. Conceptual model
6. Neighborhood
7. Local search
8. Best improvement
9. Fastest improvement
10. Tabu search
11. Procedure
12. Tabu list
13. Diversification
14. Intensification
15. Least significant difference

مراجع

[1] Lloyd SP, Witsenhausen HS. Weapon allocation is NP-Complete, in IEEE Summer Simulation Conference, Reno, Nevada, (1986).

[2] Eckler AR, Burr SA. Mathematical models of target coverage and missile allocation, Military Operations Researchs Society, U.S, (1972).

[3] Matlin S, A review of the litreature on the missile - allocation problems, Operation Research, Vol. 18, No. 2, (1970), pp. 334-373.

[4] 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, No. 3, (2006), pp. 559-565.

[5] Ahuja RK, Kumar A, Jha KC, Orlin JB. Exact and heuristic algorithms for the weapon-target assignment problem, Operations Research, Vol. 55, No. 6, (2007), pp. 1136–1146.

[6] Su MC, Lai SC, Lin SC, You LF. A new approach to multi - aircraft air combat assignments, Swarm and Evolutionary Computation, Vol. 6, (2012), pp. 39-46.

[7] Lee ZJ, Su SF, Lee CY. An immunity - based ant colony optimization algorithm for solving weapon - target assignment problem, Applied Soft Computing, Vol. 2, (2002), pp. 39-47.

[8] Zhen L, Jain-gue S, Xiao-guang G. Compact genetic algorithm and its application in WTA problem, Computer Engineering and Application, Vol. 44, No. 3, (2008), pp. 229-231.

[9] Turan A. Algorithms for the Weapon-Target Allocation Problem, M.S thesis, Middle East Technical University, (2012).

[10] Lee ZJ, Lee WL. 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).

[11] Rosenberger JM, Hwang HS, Pallerla RP. The Generalized Weapon Target Assignment Problem, in 10th International Command and Control Research and Technology Symposium, McLean, VA, (2005).

[۱۲] میری، علی اصغر؛ لطفی، مهدی (۱۳۹۱). 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.

[13] Glover F, Kochenberger GA, Handbook of Metaheuristics, New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers, (2003).