

مدل سازی و حل مسئله چیدمان پایگاه های آتش

محبوبه پیمانکار^۱، محمد رنجبر^{۲*}، احمد ایزدی پور^۳، سعید بلوچیان^۴

۱- دانشجوی دکتری، ۲- دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد ۳- استادیار دانشگاه امام رضا (ع) ۴- استادیار دانشگاه آزاد اسلامی گناباد
(دریافت: ۹۶/۰۵/۱۴، پذیرش: ۹۶/۱۰/۰۲)

چکیده

استفاده از مدل های ریاضی و بهینه سازی در مسائل نظامی اثر قابل توجهی در مسائل تصمیم گیری مهم نظیر تعیین مکان پایگاه های آتش خودی از قبیل پایگاه های سلاح های سخت و نرم دارد. در این مقاله، یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح خطی برای مسئله چیدمان پایگاه های آتش با هدف بیشینه سازی متوسط میزان دسترسی به اهداف و میزان محافظت از مناطق مهم ارائه می شود. همچنین دو الگوریتم فرا ابتکاری مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و الگوریتم بهینه سازی تجمع ذرات برای حل این مسئله طراحی شده است. نتایج محاسباتی به دست آمده از این روش ها با جواب دقیق حاصل از مدل سازی مقایسه شده و مشخص می شود، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم بهینه سازی تجمع ذرات در صورت محدودیت زمانی تا ۶۰ ثانیه با میانگین به ترتیب ۰/۱۶٪ و ۰/۰۷٪ انحراف از جواب بهینه، دارای کارایی مناسبی هستند.

کلیدواژه ها: سیستم مدیریت نبرد، پایگاه های آتش، مکان یابی، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم بهینه سازی تجمع ذرات

۱- مقدمه

و صنایع مهم، مراکز و ساختمان های تجاری اقتصادی مهم و شناورهای تجاری و... را نام برد. از طرفی با توجه به انواع سلاح ها که به دو دسته سخت و نرم تقسیم می شوند و سلاح های نرم شامل انواع ادوات جنگ الکترونیک^۱ و فریب و اخلال راداری و مخابراتی^۲ است بنابراین مکان یابی پایگاه های سلاح نرم برای حفاظت از دارایی های مهم خودی در برابر تهدیدات دشمن اهمیت بسزایی دارد. از این رو در این مقاله، مسأله مکان یابی پایگاه های آتش خودی در یک فرمول بندی کلی مورد بررسی قرار می گیرد.

مرزها در هر کشوری دارای اهمیت ویژه ای هستند و به تبع آن، هر کشوری برای دفاع و نظارت از آن ها برای جلوگیری از نفوذ و تسخیر بیگانگان برنامه ویژه ای دارند. بخش قابل توجهی از مرزهای ایران را مرزهای آبی تشکیل داده است که دفاع از آن ها را به دلیل شرایط خاص رویارویی با اهداف می توان کار مشکلی تلقی کرد. به همین دلیل، برای حفظ اقتدار و عزت کشور باید سرمایه گذاری ویژه ای برای تقویت قوای دریایی و آمادگی همیشگی آن ها داشت.

در این مقاله ابتدا در بخش ۲ روش تحقیق شامل تعریف مسئله، پیشینه تحقیق، مدل سازی و روش حل پیشنهادی مورد بررسی قرار می گیرد. سپس در بخش ۳ بحث و نتیجه در مورد کارایی روش های حل پیشنهادی در سناریوهای عملیاتی بررسی می شود و در نهایت در بخش ۴ نتیجه گیری ارائه می شود.

مسأله مکان یابی پایگاه های خودی به عنوان جزئی از زیرسامانه تخصیص سلاح به اهداف، آخرین مرحله سامانه هوشمند مدیریت نبرد و پس از ارزیابی تهدید اهداف، مطرح می شود. آنچه که در صحنه نبرد مهم است و تأثیر به سزایی در تخصیص سلاح و منابع دارد مکان یابی مناسب پایگاه های خودی در نبرد شبکه محور برای حفاظت از مجموعه ای از دارایی های است که وظیفه حفاظت از آن ها در برابر تهدیدات بر عهده فرمانده است از جمله این دارایی ها می توان به ایستگاه های راداری و مخابراتی، بنادر خاص، نیروگاه ها هسته ای، پالایشگاه ها

۲- روش تحقیق

در یک صحنه نبرد دریایی، مجموعه پایگاه های آتش خودی در تلاش است با استفاده از سلاح ها و امکانات در دسترس خودش بر

1- Electronic Warfare

2- Electronic Support Measures - Electronic Counter Measures (ESM-ECM)

ژنتیک و بهینه‌سازی تجمع ذرات برای این مسئله توسعه داده شده است بنابراین پژوهش انجام‌شده از نظر شیوه پژوهش عملیاتی است که بر اساس مدل‌سازی ریاضی بنا نهاده شده است.

۲-۱- پیشینه تحقیق

در واقع مسأله مکان‌یابی، به تخصیص مکان به تسهیلات جدید در میان تسهیلات موجود می‌پردازد؛ به طوری که تقاضای تسهیلات برآورده شود و میزان هزینه حمل‌ونقل کالا یا خدمات کمینه گردد [۲].

اولین بار مسئله مکان‌یابی توسط کوپر^۱ در سال ۱۹۶۳ مطرح شد [۳]. در سال بعد، حکیمی^۲، این مسأله را در توزیع بهینه مراکز سوئیچ در شبکه‌های مخابراتی توسعه داد [۴].

برای حل مسأله تخصیص مکان در مسائل خاص روش‌هایی ارائه شده است. کیونن و سولند^۳ حل دقیق با استفاده از روش شاخه و کران را ارائه داده‌اند [۵]. مراری و چارچ^۴ روش حل با استفاده از الگوریتم تبرید تدریجی را مطرح کرده‌اند [۶]. بریمبرگ و ملادنویک^۵ الگوریتم جستجوی ممنوعه را برای مسأله مکان‌یابی با مدل ارائه شده خودشان پیشنهاد داده‌اند [۷].

در بررسی‌های انجام شده، تمامی مسائل موجود در این حوزه، بیشتر به مکان‌یابی تسهیلات با هدف کاهش هزینه مالی تخصیص پرداخته و نمونه مشابه با مسئله تعریف شده با تابع هدف بهینه‌سازی میزان دسترسی به اهداف و حفاظت از مناطق خودی، موجود نمی‌باشد؛ اما مسئله تعریف شده در این مقاله، تا حدودی به مسئله تخصیص سلاح به هدف^۶ شباهت دارد که فرضیات استفاده شده در این مقاله، مسئله را واقعی‌تر کرده و با تغییر ایجاد شده در تابع هدف مسئله، بیشتر به دنبال چیدمان مناسب برای پایگاه‌ها به نحوی است که میزان دسترسی به اهداف و حفاظت از مناطق مهم پیشینه شود.

عملیات تخصیص سلاح به هدف عبارت است از تخصیص n سلاح موجود به m تهدید شناخته شده که ورودی این عملیات، اطلاعات خروجی از عملیات ارزیابی تهدید است. پژوهش‌های کاربردی در حوزه تخصیص سلاح را از نقطه نظر تابع هدف می‌توان در سه دسته‌ی کمینه کردن احتمال سالم ماندن تهدیدها، کمینه کردن آسیب وارده بر تجهیزات دفاعی و بهینه کردن احتمال نجات تجهیزات دفاعی تقسیم‌بندی کرد [۸]. اثبات شده است که این مسئله از نظر پیچیدگی در رده مسائل NP-

پایگاه‌های آتش دشمن یا به عبارت دیگر اهداف مهاجم غلبه کند. یکی از مسائل مهم برای فرماندهان در چنین نبردهایی، نحوه قرارگیری و آرایش پایگاه‌های آتش خودی به نحوی است که بتوان بیشترین دسترسی به اهداف مهاجم را داشت و از مناطق و امکانات خودی بیشترین حفاظت را کرد. بنابراین آن‌ها با کسب اطلاعات قابل استنادی از اهداف شناخته شده مبنی بر میزان ریسک و خطر اهداف برای پایگاه‌های خودی قصد دارند به بهترین نحو و بر اساس تجارب ارزنده خود، مکان قرارگیری پایگاه‌ها و نحوه چینش آن‌ها را تعیین کنند. محل استقرار هر پایگاه آتش خودی از هر دو منظر تهاجمی (بیشترین انهدام اهداف) و تدافعی (حفاظت از منطقه‌های عملیاتی مشخص یا هر یک از پایگاه‌های آتش خودی) دارای اهمیت است [۱]. بنابراین، در این مقاله سعی شده است با ارائه مدل ریاضی برای نحوه استقرار پایگاه‌های خودی در فضای دو بعدی صحنه نبرد، بهترین تصمیم را گرفت. بعد از شناسایی اهداف مهاجم می‌توان پیش‌بینی خوبی از وضعیت آن‌ها از نظر میزان خطر ایجاد کننده برای پایگاه‌های خودی و مناطق حفاظت شده، مکان قرارگیری اهداف و غیره در لحظه شروع نبرد داشت. با داشتن چنین اطلاعاتی می‌توان آرایش صحنه نبرد را طوری طراحی کرد که پایگاه‌های خودی بیشترین دسترسی به اهداف را داشته باشند و همچنین بتوانند از مناطق مهم بیشترین حفاظت را بکنند. منظور از دسترسی به اهداف در این مقاله، در تیررس بودن آن‌ها در صورت وقوع نبرد است. به عبارت دیگر، هدف این است که در صورت وقوع نبرد، بتوان به تعداد زیادی از اهداف غلبه کرد. در این مقاله فرض شده است که از قبل، تعدادی مکان کاندیدا برای قرارگیری پایگاه‌ها در نظر گرفته شده است و مکان‌های مهم (حفاظت‌شده) هم قبل از وقوع نبرد به صورت دقیق تعیین شده‌اند. باید در نظر داشت که در لحظه وقوع نبرد، فرصت کمی برای جابجایی پایگاه‌ها وجود دارد؛ لذا، پایگاه‌های متحرک خودی می‌توانند مسافت کمی را به منظور چیدمان جدید و بر اساس شرایط پیش‌بینی شده از لحظه وقوع جنگ طی کنند. همچنین با توجه به مسیرهای موجود و برخی سیاست‌ها، بعضی از پایگاه‌ها به دلیل بعد مسافت و یا صعب‌العبور بودن کوتاه‌ترین مسیر منتهی به مکان کاندیدا، نمی‌توانند در آنجا قرار گیرند. همچنین بر روی هر پایگاه چندین سلاح با نوع و بردهای مختلف می‌تواند وجود داشته باشد که حداقل و حداکثر برد و پوشش سلاح‌ها برای استفاده کارا از آن‌ها از پارامترهای ورودی این مسئله است.

در این بخش پس از بیان پیشینه تحقیق، ابتدا مدل‌سازی این مسئله به شکل خطی آورده شده است که از این مدل به منظور حل دقیق مسئله توسط نرم‌افزار IBM ILOG CPLEX12.3 استفاده می‌شود. سپس دو الگوریتم فرا ابتکاری

1- Cooper

2- Hakimi

3- Kuenne And R. M. Soland

4- Murray And R. L. Church

5- Brimberg And N. Mladenovic

6- Weapon Target Assignment (Wta)

همچنین این پژوهشگر در مقاله بعدی خود کارایی روش را با ترکیب الگوریتم مورچگان و الگوریتم ژنتیک به صورت نسبی در پاره‌ای موارد افزایش داده است [۲۰]. ژن^۷ و همکاری با استفاده از الگوریتم ژنتیک روش حلی برای مسأله تخصیص سلاح ارائه داده‌اند [۲۱].

چو^۸ به بررسی مدل تخصیص سلاح با هدف کمینه کردن میزان ضرر مورد انتظار تجهیزات خودی پرداخت. وی مسئله WTA را به صورت غیرخطی و در حالت خودی مبنا و ایستا مدل‌سازی کرده و برای حل آن از ترکیب یک جستجوی حریمانه برای ایجاد جواب اولیه مطلوب و روش افرازهای تو در تو^۹ برای جستجوی فضای حل استفاده کرده است [۲۲].

توران^{۱۰} در پایان‌نامه خود به مدل‌سازی مسائل ایستای تخصیص سلاح به اهداف در دو حالت هدف‌مبنا و خودی‌مبنا پرداخته است. بعد از ارائه دو مدل، الگوریتم‌های متنوعی برای حل این مسئله استفاده کرده است [۱].

لوتر^{۱۱} به بررسی مسئله تخصیص سلاح با رویکرد دو تابع هدف پرداخت. کمینه کردن احتمال سالم بودن اهداف و کمینه کردن هزینه شلیک دو تابع هدفی بود که در این مقاله از آن استفاده شده است [۲۳].

در پیشینه این موضوع، بیشتر به جنبه تخصیص سلاح‌ها به اهداف پرداخته شده است و در اکثر این پژوهش‌ها مکان حامل‌ها و اهداف، ثابت است. راسنبرگر^{۱۲} و همکارانش، این فرض را در نظر گرفته‌اند که پایگاه‌های آتش با توجه به محدودیت سوخت، مسافت محدودی را طی می‌کنند. هم‌چنین بعد از تخصیص سلاح به یک هدف، مکان جدید پایگاه مکانی است که هدف در آن قرار گرفته است. ایرادی که به این پژوهش وارد است این است که با وجود چندین سلاح مختلف بر روی یک حامل و اختصاص مستقل هر یک از سلاح‌ها به اهداف، حامل مورد نظر در یک لحظه زمانی باید در مکان اهداف مختلف قرار گیرد که این امر غیرممکن است [۲۴].

میری^{۱۳} و همکارانش مدل دو مرحله‌ای برای مسئله تخصیص سلاح به اهداف ارائه کردند که در مرحله اول با توجه به محدودیت زمانی، سلاح‌ها به اهداف اختصاص یافته و در مرحله دوم با توجه به شرایط مسئله، پایگاه‌ها در فضای نبرد جابجا می‌شوند. در نظر گرفتن مسئله به صورت دو مرحله‌ای باعث

complete است و این بدان معنی است که با افزایش ابعاد مسئله، زمان حل آن نیز به صورت نمایی افزایش می‌یابد [۹]. بنابراین فراهم کردن یک الگوریتم سریع برای به‌دست آوردن جواب نزدیک به بهینه اهمیت زیادی دارد.

دو مفهوم کلی ایستا و پویا در پیشینه مسئله تخصیص سلاح، مطرح شده است. در حالت ایستا، این مسئله در یک دوره زمانی بررسی می‌شود و فقط در همان دوره و فقط یک بار تخصیص سلاح‌های موجود به اهداف انجام می‌شود. این در حالی است که در حالت پویا، مسئله در چندین دوره تعریف می‌شود و در هر دوره، از مجموعه‌ای از سلاح‌ها و اطلاعات به‌دست‌آمده از دوره‌های زمانی قبلی استفاده می‌شود [۱۱ - ۱۰].

به منظور دستیابی به جواب بهینه، دو مدل برای تخصیص سلاح به هدف پیشنهاد شده است که هدف این پژوهش پیشینه کردن میزان نابودی هدف با در نظر گرفتن احتمال اصابت به هدف است. در این پژوهش برای یک حالت خاص، الگوریتمی به منظور به دست آوردن جواب بهینه توسعه داده‌اند [۱۲]. کتر^۱ این مسئله را با در نظر گرفتن چندین نوع سلاح و انواع مختلف اهداف مدل‌سازی می‌کند [۱۳]. چنگ^۲ و همکارانش به بررسی این مسئله در حالت تدافعی و به هر دو شکل ایستا و پویا پرداخته‌اند و الگوریتم دقیقی برای حل آن پیشنهاد داده است [۱۴]. اورلین^۳ برای این مسئله با در نظر گرفتن لایه‌های مختلف دفاعی دو مدل عدد صحیح و یک الگوریتم ترکیبی ارائه کرده است [۱۵]. علاوه بر این مقالات روش‌های حل دقیق دیگری نیز برای حل مسئله تخصیص سلاح به اهداف در حالت‌های خاصی مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۶ - ۱۷].

آهوچا^۴ و همکارانش برای حل دقیق مسئله تخصیص سلاح روش شاخه و کرانی پیشنهاد داده‌اند. برتری این مقاله نسبت به سایر روش‌های شاخه و کران ارائه شده در پیشینه این مسئله در این است که نویسنده با بررسی این مسئله در قالب مدل‌های شبکه، حدود بالا و پایین کارایی برای آن پیدا کرده است [۸].

علاوه بر روش‌های دقیق، روش‌های ابتکاری و فرا ابتکاری نیز برای این مسئله پیشنهاد شده است. گرین^۵ با استفاده از گرد کردن جواب‌های یک مدل خطی و ترکیب آن با برنامه‌ریزی آرمانی جواب‌های خوبی برای یک نبرد هوایی به دست آورده است [۱۸]. لی^۶ و همکارانش برای حل مسأله تخصیص سلاح روش فرا ابتکاری الگوریتم مورچگان را ارائه داده‌اند [۱۹].

7- Zhen
8- Cho
9- Nested Partitions Method
10- Turan
11- Lötter
12- Rosenberger
13- Miri

1- Katter
2- Chang
3- Orlin
4- Ahuja
5- Green
6- Lee

شده است. از آنجایی که حل دقیق مدل ارائه شده با استفاده از نرم افزارهای موجود تحقیق در عملیات در ابعاد نه چندان بزرگ امکان پذیر نیست، الگوریتم ژنتیک و روش تجمع ذرات آشوبی برای این مسئله طراحی شده است [۲۷].

تمرکز اصلی این مقاله بر روی چگونگی تعیین چیدمان پایگاه های آتش خودی در صحنه نبرد با هدف افزایش میزان دسترسی به اهداف و حفاظت از مناطق خودی است. به منظور حل مسئله، روش های حل دقیق و ابتکاری برای مدل پیشنهادی ارائه شده است.

۲-۲- مدل سازی

در این زیر بخش، برای بیان ریاضی مسئله یا به عبارتی مدل سازی این مسئله با توجه به تعریف جامع ارائه شده در بخش روش تحقیق، ابتدا پارامترها و متغیرها تعریف شده و در نهایت مدل مورد نظر شرح داده می شود.

پارامترهای مورد استفاده در این مسئله در جدول (۱) آمده است.

می شود یکسری از جواب های شدنی که ممکن است جواب بهینه از روی آن ها ایجاد شود، نادیده گرفته شود [۲۵].

همچنین، برای مسئله تخصیص سلاح پایگاه های آتش در نبرد شبکه محور با هدف وارد کردن بیشترین تخریب به اهداف مهاجم، یک مدل برنامه ریزی غیرخطی مختلط عدد صحیح ارائه شده است. سپس روش های جستجوی محلی و جستجوی ممنوعه برای این مسئله طراحی شده است. همچنین، یک روش ابتکاری و روش شاخه و کران برای مسئله تخصیص سلاح توسعه داده شده است که به عنوان رویه ای در روش های جستجوی محلی و ممنوعه مورد استفاده قرار گرفته است [۲۶].

علاوه بر پژوهش های فوق، یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح خطی برای مسئله تخصیص و زمان بندی سلاح های آن ها به اهداف با فرض مشخص بودن مکان پایگاه های خودی و متحرک بودن اهداف مهاجم، با هدف بیشینه کردن متوسط میزان تخریب اهداف و میزان محافظت از مناطق مهم و استفاده کارا از سلاح های موجود و با در نظر گرفتن محدودیت های عملیاتی ارائه

جدول (۱): پارامترهای مسئله

پارامتر	تعریف
$N = \{1, \dots, n\}$	مجموعه پایگاه های آتش خودی با اندیس i
$ N $	تعداد پایگاه های آتش
$M = \{1, \dots, m\}$	مجموعه اهداف با اندیس z
$ M $	تعداد اهداف
$K_i = \{1, \dots, k_i \}$	مجموعه سلاح های پایگاه آتش i با اندیس k
$ K_i $	تعداد سلاح های پایگاه آتش i
$P = \{(\pi_1, \rho_1), \dots, (\pi_{ P }, \rho_{ P })\}$	مجموعه نقاط مهم جهت حفاظت با اندیس p
$L = \{(\gamma_1, \vartheta_1), \dots, (\gamma_{ L }, \vartheta_{ L })\}$	مجموعه نقاط کاندیدا جهت قرار گرفتن پایگاه های آتش با اندیس l
η_{il}	اگر مکان پیشنهادی l برای پایگاه i مجاز باشد، مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار ۰ می گیرد.
b_j	ضریب اهمیت هدف z
w'_{pj}	ضریب اهمیت هدف z برای منطقه مهم p با توجه به اهمیت منطقه
\mathcal{X}_{jt}	طول جغرافیایی هدف z در لحظه t
\mathcal{V}_{jt}	عرض جغرافیایی هدف z در لحظه t
r_{ik}	برد سلاح k از پایگاه آتش i
r_{ik}^{min}	کمینه برد قابل شلیک برای سلاح k از پایگاه آتش i
r'_j	حداکثر برد هدف z
R	شعاع کره زمین که تقریباً برابر است با ۶۳۷۱ کیلومتر
Δ^{max}	حداکثر فاصله ممکن برای جابجایی یک لانچر
dis_{ij}	فاصله نقطه کاندیدای (γ_i, ϑ_i) از هدف z
dis_{pj}	فاصله منطقه حفاظت شده (π_p, ρ_p) از هدف z
dis_{ij}	فاصله پایگاه آتش i از نقطه کاندیدای (γ_i, ϑ_i)
G	عددی بسیار بزرگ

متغیرهای تصمیم استفاده‌شده در مدل در جدول (۲) آمده

است.

مدل ارائه شده برای تعیین مکان پایگاه‌ها در ادامه آمده

است. مقدار متغیر dis_{ij} از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$dis_{ij} = R \times \arccos \left(\sin \left(\frac{\pi}{180} x_i \right) \times \sin \left(\frac{\pi}{180} x_j \right) + \cos \left(\frac{\pi}{180} x_i \right) \times \cos \left(\frac{\pi}{180} x_j \right) \times \cos \left(\frac{\pi}{180} (y_i - \psi_j) \right) \right)$$

در این مدل فرض می‌شود که مجموعه‌ای از نقاط کاندیدا برای هر پایگاه آتش وجود دارد که محل قرارگیری هر پایگاه آتش در لحظات مختلف نبرد از بین این مجموعه نقاط انتخاب می‌شود.

جدول (۲): متغیرهای تصمیم و تعریف آن‌ها

نام متغیر	تعریف
U_{iklj}	اگر پایگاه آتش i در مکان l قرار داشته باشد و هدف j در بین کمینه برد و بیشینه برد سلاح k از پایگاه آتش i باشد برابر یک و در غیر اینصورت صفر است.
R_{il}	اگر پایگاه آتش i در مکان l قرار داشته باشد برابر یک و در غیر اینصورت برابر صفر است.
W_{ikpj}	اگر سلاح k از پایگاه آتش i به هدف j شلیک کند درحالی‌که منطقه حفاظتی p در این لحظه در تیررس هدف j باشد برابر یک و در غیر اینصورت برابر صفر است.
V_{pj}	اگر منطقه حفاظتی p در تیررس هدف j باشد برابر یک و در غیر اینصورت صفر است.

$$Max \alpha \frac{\sum_{i \in N} \sum_{k \in K_i} \sum_{l \in L} \sum_{j \in M} b_j U_{iklj}}{\sum_{i \in N} \sum_{k \in K_i} \sum_{l \in L} \sum_{j \in M} b_j} + (1 - \alpha) \frac{\sum_{i \in N} \sum_{k \in K_i} \sum_{p \in P} \sum_{j \in M} w'_{pj} W_{ikpj}}{\sum_{i \in N} \sum_{k \in K_i} \sum_{p \in P} \sum_{j \in M} w'_{pj}} \quad (1)$$

$$s.t. \quad (2)$$

$$\sum_{l \in L} \eta_{il} R_{il} = 1 \quad \forall i \in N \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N} \eta_{il} R_{il} \leq 1 \quad \forall l \in L \quad (4)$$

$$U_{iklj} \geq \frac{(r_{ik} - dis_{lj})(dis_{lj} - r_{ik}^{min})}{G} \eta_{il} R_{il} \quad ; \forall i \in N, \forall k \in K_i, \forall j \in M, \forall l \in L \quad (5)$$

$$U_{iklj} \leq 1 + \frac{(r_{ik} - dis_{lj})(dis_{lj} - r_{ik}^{min})}{G} \eta_{il} R_{il} \quad ; \forall i \in N, \forall k \in K_i, \forall j \in M, \forall l \in L \quad (6)$$

$$U_{iklj} \leq \eta_{il} R_{il} \quad ; \forall i \in N, \forall k \in K_i, \forall j \in M, \forall l \in L \quad (7)$$

$$R_{il} dis_{il} \leq \Delta^{max} \quad ; \forall i \in N, \forall l \in L \quad (8)$$

$$V_{pj} > (r'_j - dis_{pj}) / G \quad ; \forall p \in P, \forall j \in M \quad (9)$$

$$V_{pj} \leq 1 + (r'_j - dis_{pj}) / G \quad ; \forall p \in P, \forall j \in M \quad (10)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{k \in K_i} W_{ikpj} \leq G V_{pj} \quad ; \forall p \in P, \forall j \in M \quad (11)$$

$$\sum_{p \in P} W_{ikpj} \leq G U_{iklj} \quad ; \forall i \in N, \forall k \in K_i, \forall j \in M \quad (12)$$

$$W_{ikpj} \geq U_{iklj} + V_{pj} - 1 \quad ; \forall p \in P, \forall i \in N, \forall k \in K_i, \forall j \in M \quad (13)$$

$$U_{iklj}, R_{il}, W_{ikpj}, V_{pj} \in \{0, 1\} \quad ; \forall i \in N, \forall k \in K_i, \forall j \in M, \forall l \in L, \forall p \in P \quad (14)$$

جدول (۳): نمادهای مورد استفاده در روش‌های حل

نماد	تعریف
c, c', c'', c'''	شمارنده
$GAloc_{ M }(c)$	ماتریس $ N $ بعدی مشخص کننده مکان انتخابی برای قرارگیری هر پایگاه در جمعیت c ام
$Floc$	مجموعه شامل مکان‌های کاندیدای مجاز
$ Floc $	تعداد مکان‌های کاندیدای مجاز
prt	تعداد ذرات ایجاد شده
$v_{il}^{c'}$	سرعت مربوط به قرارگیری پایگاه i در مکان کاندیدای l در تکرار c'
$V_{ M M }^{c'}(c)$	ماتریس سرعت ذره c در تکرار c' دارای اعضای v_{il}^c
v_{max}	حداکثر سرعت در نظر گرفته شده
v_{min}	کمترین سرعت در نظر گرفته شده
c_1	مقدار ثابت بیان کننده شتاب به سمت بهترین جواب همسایگی در هر تکرار
c_2	مقدار ثابت بیان کننده شتاب به سمت بهترین جواب همسایگی شناخته شده
r_1	مقدار تصادفی برای تعدیل میزان شتاب در حرکت به سمت بهترین جواب همسایگی در هر تکرار
r_2	مقدار تصادفی برای تعدیل میزان شتاب در حرکت به سمت بهترین جواب همسایگی شناخته شده
$PSOloc_{ M }(c)$	مکان قرارگیری ذره c
$pbest_{ M }^{c'}$	ماتریس $ N $ بعدی نشان دهنده بهترین مکان قرارگیری پایگاه‌ها در تکرار c'
$gbest_{ M }$	ماتریس $ N $ بعدی نشان دهنده بهترین مکان قرارگیری پایگاه‌ها تاکنون
$Elite$	درصد نخبه‌گزینی
Mig	درصد مهاجرت

۲-۳-۱- الگوریتم ژنتیک برای مکان‌یابی

الگوریتم ژنتیک یکی از الگوریتم‌های تکاملی است که با توجه به مفاهیم وراثت و جهش در زیست‌شناسی اولین بار توسط هولند^۲ ارائه شد. در واقع این الگوریتم با ایجاد نسل به بهبود جواب‌ها و به دست آوردن جواب‌های نزدیک به بهینه کمک می‌کند [۲۸].

برای مسئله مکان‌یابی لازم است که به هر پایگاه یکی از نقاط کاندیدا تخصیص داده شود به طوری که پایگاه مربوطه بتواند در آن مکان قرار بگیرد و همچنین مسافت جابجایی پایگاه تا آن

تابع هدف (۱) میزان دسترسی پایگاه‌های آتش به اهداف را بر اساس ضرایب خطر آن‌ها و همچنین میزان متوسط حفاظت از مناطق مهم را حداکثر می‌کند که در آن $0 \leq \alpha \leq 1$ اسکالر ترکیب محدب است که هر چه قدر نزدیک به یک انتخاب شود، به تابع دسترسی پذیری به اهداف نسبت به حفاظت از مناطق اهمیت بیشتری داشته است. محدودیت (۲) بیانگر این است که هر پایگاه آتش در یکی از نقاط کاندیدا قرار خواهد گرفت. محدودیت (۳) بیانگر این موضوع است که در هر یک از نقاط کاندیدا حداکثر یک پایگاه آتش قرار می‌گیرد. اعمال چنین محدودیتی به این دلیل است که به محض شلیک از یک پایگاه آتش، به دلیل آشکار شدن منطقه شلیک برای دشمن، شلیک مجدد از آن منطقه امکان‌پذیر نیست. محدودیت‌های (۴) و (۵) نشان دهنده این است که شلیک یک سلاح از یک پایگاه آتش فقط وقتی صورت می‌گیرد که هدف مورد نظر در برد آن سلاح باشد. محدودیت (۶) ارتباط بین U_{iklj} و R_{il} را نشان می‌دهد که به نحوی بیانگر نظر فرمانده در خصوص مجوز مکان‌یابی پایگاه i ام در محل l ام است. محدودیت (۷) نیز بیانگر حداکثر فاصله جابجایی ممکن برای هر پایگاه آتش است. اعمال چنین محدودیتی به این دلیل است که خروجی مدل، نقاط کاندیدای خیلی دور را برای پایگاه‌های آتش پیشنهاد ندهد

محدودیت‌های (۸) و (۹) به منظور تعریف متغیر V_{pj} طراحی شده‌اند. محدودیت‌های (۱۰) و (۱۱) جهت تعیین ارتباط بین متغیر W_{ikpj} با متغیرهای U_{iklj} و V_{pj} ارائه شده‌اند. در محدودیت (۱۲)، اگر $U_{iklj} = V_{pj} = 1$ باشند، آنگاه رابطه $W_{ikpj} \geq 1$ اعمال می‌شود که با توجه به باینری بودن متغیر W_{ikpj} ، عملاً به معنای اعمال محدودیت $W_{ikpj} = 1$ است. محدودیت (۱۳) نوع متغیرهای این مدل را نمایش می‌دهد.

۲-۳-۲- روش حل

با توجه به ماهیت مسئله، یک روش حل دقیق با استفاده از نرم‌افزارهای موجود تحقیق در عملیات مانند IBM ILOG CPLEX و دو الگوریتم مبتنی بر جمعیت^۱ الگوریتم ژنتیک و تجمع ذرات برای مسئله مکان‌یابی پایگاه‌های خودی ارائه شده است.

در جدول (۳) نمادهای استفاده شده در روش‌های حل آورده شده است.

و از مجموعه مکان‌های کاندیدای مجاز $Floc$ حذف می‌شوند. در نهایت، کروموزوم‌های پدر را از بعد از نقطه تقاطع بررسی کرده و اگر در مجموعه $Floc$ موجود بودند، به نسل بعد منتقل می‌شود و آن مکان از مجموعه $Floc$ حذف می‌شود. در غیر این صورت عدد ۱- را به عنوان مکان فرارگیری پایگاه قرار می‌دهیم. بعد از تعیین مکان همه پایگاه‌ها اگر در ماتریس $GAloc$ عدد ۱- موجود بود، از مجموعه $Floc$ یک مکان تصادفی برای آن پایگاه انتخاب کرده و در صورت مجاز بودن مکان انتخاب شده برای پایگاه مربوطه، $GAloc$ به روز شده و مکان انتخابی از مجموعه $Floc$ حذف می‌شود. اصلاح ژن در این گام منجر به ایجاد جواب‌های شدنی می‌شود به عبارت دیگر می‌توان این گام را به نوعی جهش دانست.

به عنوان مثال فرض کنید که ۳ پایگاه آتش و ۶ مکان کاندیدا موجود است و بعد از ایجاد $|Pop|$ جواب اولیه می‌خواهیم نسل جدیدی ایجاد کنیم. بدین منظور فرض کنید جواب اولیه که می‌خواهیم فرزندی از آن برای نسل بعدی ایجاد شود به صورت شکل (۱) باشد.

	پایگاه آتش			تابع هدف
	۱	۲	۳	
مکان کاندیدای انتخابی ($GAloc$)	۱	۴	۵	۰,۱۲۰۵

شکل (۱): جواب اولیه برای ایجاد نسل بعد

شکل (۲) انتخاب می‌کنیم:

	پایگاه آتش			تابع هدف
	۱	۲	۳	
مکان کاندیدای انتخابی ($GAloc(27)$)	۵	۳	۱	۰,۱۲۱۰

شکل (۲): انتخاب جواب با استفاده از چرخ رولت

آتش اول است را از مادر یا $GAloc(7)$ می‌گیرد و برای انتخاب مکان دو پایگاه دیگر باید کروموزوم‌های پدر را از ابتدا بررسی کرد در صورت موجه بودن جواب، آن را انتخاب می‌کنیم. فرزند حاصله در نسل بعد به شکل (۳) خواهد بود.

	پایگاه آتش		
	۱	۲	۳
مکان کاندیدای انتخابی برای فرزند نسل بعد	۱	۳	-۱

شکل (۳): فرزند حاصله با عملگر تقاطع

مکان کاندیدا بیشتر از Δ^{\max} نشود. بنابراین $|Pop|$ جمعیت اولیه ($GAloc$) با توجه به شرایط ذکر شده برای مسئله مکان‌یابی به صورت تصادفی (که هر یک دارای $|N|$ کروموزوم هستند) برای ایجاد اولین نسل ایجاد می‌شود. سپس به ازای هر یک از اعضای نسل قبل، با استفاده از فرآیند چرخ رولت عضو دیگری از آن نسل را انتخاب می‌کنیم. عضو انتخابی به همراه عضو فعلی را به عنوان والدین در نظر گرفته و به صورت تصادفی نقش پدر و مادر را برای آن‌ها تعیین می‌کنیم. استفاده از چرخ رولت برای انتخاب اعضاء به این دلیل است که در ایجاد جمعیت جدید، اعضایی که دارای تابع هدف بیشتری هستند، شانس انتخاب بیشتری داشته باشند تا جمعیت‌های موجود در نسل بعد، از نظر تابع هدف مطلوبیت بیشتری داشته باشند. همچنین در این الگوریتم در هر نسل به تعداد $|Pop| \times Elite$ از بهترین‌ها بدون تغییر وارد نسل آینده می‌شوند. به عبارت دیگر از نخبه‌های هر نسل فرزند ایجاد نمی‌کنیم ولی می‌توانیم از آن‌ها به عنوان والد برای اعضای دیگر استفاده کرد. با استفاده از عملگر تقاطع تک نقطه‌ای، ابتدا مکان تقاطع را به صورت تصادفی تعیین کرده و سپس کروموزوم‌های موجود قبل از نقطه قاطع از مادر بدون تغییر وارد نسل بعد شده

ابتدا توسط چرخ رولت یکی از اعضای مجموعه را مطابق

حال به صورت تصادفی فرض می‌کنیم $GAloc(7)$ در نقش مادر و $GAloc(27)$ در نقش پدر ظاهر می‌شود. به منظور تولید فرزند همان‌طور که گفته شد از عملگر تقاطع تک نقطه‌ای استفاده می‌شود. نقطه تقاطع $cp=1$ انتخاب می‌شود. بنابراین فرزند جدید اولین کروموزومش را که بیان‌کننده جایگاه پایگاه

از آنجایی که پایگاه ۱ و ۳ هر دو نمی‌توانند در مکان کاندیدای ۱ قرار گیرند، بنابراین مکان قرارگیری پایگاه آتش سوم را به صورت تصادفی از میان مکان‌های کاندیدای مجاز در مجموعه

مکان، سرعت مربوط به قرارگیری سایر پایگاه‌ها در مکان l^* را

	پایگاه آتش			تابع هدف
	۱	۲	۳	
مکان کاندیدای انتخابی برای فرزند نسل بعد	۱	۳	۵	۰,۱۲۵۲

شکل (۴): اصلاح فرزند در نسل بعد

برای هر ذره با توجه به مکان انتخاب شده برای تمامی پایگاه‌ها میزان تابع هدف را محاسبه کرده، بهترین تابع هدف در آن تکرار را شناسایی کرده و مکان قرارگیری آن را در $pbest_i^c$ ذخیره کرده و بهترین جواب شناسایی شده تاکنون را در $gbest$ قرار می‌دهیم. اگر $pbest_i^c$ را pb ، $PSOloc_i^c$ را lb و $gbest_i$ را gb بنامیم، بردار سرعت ذرات به منظور حرکت به سمت بهترین جواب به صورت زیر به روز می‌شود:

همان‌طور که مشاهده می‌شود در این مثال تابع هدف فرزند از والدین خود بهتر شده است.

به همین ترتیب برای تمامی جمعیت هر نسل فرزند جدیدی برای نسل بعد ایجاد کرد و تا برقراری شرط توقف که می‌تواند زمان حل مسئله و یا تعداد نسل تولید شده باشد، این کار ادامه می‌یابد و در نهایت بهترین جواب گزارش داده می‌شود.

۲-۳-۲- الگوریتم تجمع ذرات

الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات (PSO) یک روش مبتنی بر جمعیت است که با الهام گرفتن از حرکت پرندگان و ماهی‌ها توسط کندی^۱ و ابرهارت^۲ برای مسائل پیوسته و برای مسائل گسسته معرفی شده است. این الگوریتم شامل مجموعه‌ای از ذرات می‌شود که هر کدام از این ذرات نشان‌دهنده یک جواب شدنی برای مسئله مورد نظر است. ذرات در طی این روش با توجه به شرایط فعلی خود و همسایگانش (ذرات دیگر موجود در همان تکرار) در فضای شدنی تغییر مکان داده و جواب‌های شدنی دیگری را ایجاد می‌کنند [۳۰ - ۲۹].

$$1. \text{ اگر } lb \neq pb \text{ باشد آنگاه داریم: } v_{lb,l}^{c'+1} = v_{lb,l}^{c'} - c_1 r_1$$

$$\text{و } v_{pb,l}^{c'+1} = v_{pb,l}^{c'} + c_1 r_1$$

اگر مکان فعلی پایگاه با بهترین مکان همسایه‌اش برابر نبود باید سرعت آن را در آن مکان کاهش داد و همچنین سرعت مربوط به قرارگیری پایگاه در بهترین مکان همسایه باید افزایش یابد. با این کار در تکرار بعدی منجر می‌شود که با تغییر سرعت‌ها، هر پایگاه در مکانی قرار گیرد که به بهترین همسایه شباهت بیشتر داشته باشد.

$$2. \text{ اگر } lb \neq gb \text{ باشد آنگاه داریم: } v_{lb,l}^{c'+1} = v_{lb,l}^{c'} - c_2 r_2$$

$$\text{و } v_{gb,l}^{c'+1} = v_{gb,l}^{c'} + c_2 r_2$$

حالت قبلی منجر به تغییر سرعت به منظور شباهت بیشتر جواب در مرحله بعدی به بهترین جواب شناخته شده، می‌شود.

c_1 و c_2 مقادیر ثابتی هستند که منجر به شتاب دادن به حرکت ذرات می‌شوند و r_1 و r_2 مقادیر تصادفی از توزیع یکنواخت [۰، ۱] هستند و منجر به تصادفی شدن حرکت ذرات می‌شود. بدین ترتیب این الگوریتم با به روز کردن سرعت ذرات در هر تکرار با توجه به بهترین جواب موجود در همسایگی و بهترین جواب شناخته شده به جستجوی فضای حل می‌پردازد. لازم به ذکر است که برای جلوگیری از قرار گرفتن سایر پایگاه‌ها

روند کلی این الگوریتم بدین شکل است که ابتدا به ازای هر ذره (c که $c < prt$) یک ماتریس سرعت $(V^1(c))$ به صورت تصادفی در بازه $[-v_{max}, v_{max}]$ ایجاد می‌شود. لازم به ذکر است که ماتریس $V^1(c)$ شامل $|N|$ سطر که نشان‌دهنده تعداد پایگاه‌ها و $|L|$ ستون که نشان‌دهنده تعداد مکان کاندیدا است، می‌شود. بنابراین اگر پایگاه آتش i نتواند در مکان کاندیدای l به دلیل اینکه فاصله این پایگاه تا آن مکان بیشتر از Δ^{max} باشد و یا آن پایگاه به دلایل خاصی نتواند در آن مکان قرار گیرد، لذا سرعت متناظر با آن را $v_{il} = -Gv_{max}$ قرار می‌دهیم.

بعد از تشکیل ماتریس سرعت برای هر ذره، هر پایگاه در مکانی قرار می‌گیرد که دارای سرعت بیشتری باشد و مکان انتخاب شده l^* برای پایگاه i را در ماتریس $PSOloc(c)$ قرار داده و برای جلوگیری از قرارگیری پایگاه‌های دیگر در آن

۳- بررسی نتایج عددی

کلیه روش‌های حل ارائه‌شده در این گزارش، در محیط Microsoft Visual Studio 2012، بر روی رایانه کتابی با مشخصات CPU Core i5، 4GB RAM، که مجهز به سیستم عامل Windows 7 بوده، پیاده‌سازی و اجرا شده است. سپس روش‌های پیشنهادی بر روی ۳۰ نمونه مسئله پیاده‌سازی شده است و کارایی روش‌ها از نظر میزان زمان لازم برای حل و میانگین درصد انحرافات هر روش از جواب بهینه در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است. پارامترهای اصلی در نظر گرفته شده برای این نمونه مسائل در جدول (۴) آمده است.

جدول (۴): نحوه ایجاد نمونه مسائل

پارامتر	مقادیر تصادفی
تعداد پایگاه‌ها	۳-۴-۵
تعداد اهداف	۴-۵-۹-۱۰
تعداد مناطق حفاظت‌شده	۰-۱-۴-۵-۶

۳-۱- تنظیم پارامترها

برای تنظیم پارامترهای یک الگوریتم، روش‌های آماری مختلفی در طراحی آزمایش‌ها وجود دارد. در این پژوهش از طرح سه سطحی عاملی استفاده شده است که جزئیات نحوه استفاده از آن در ادامه برای هر یک از الگوریتم‌ها آورده شده است. لازم به ذکر است که برای تنظیم پارامترها ۵ نمونه مسئله سخت که هم از نظر درصد انحراف از بهترین جواب شناخته شده و هم از نظر طولانی بودن زمان حل وضعیت مناسبی نداشتند، از بین ۳۰ نمونه مسئله انتخاب شده و تنظیم پارامترها بر اساس آن‌ها انجام شده است.

۳-۱-۱- تنظیم پارامترهای الگوریتم ژنتیک

در الگوریتم ژنتیک برای مسئله مکان‌یابی می‌خواهیم دو پارامتر تعداد جمعیت ایجاد شده و درصد نخبه‌گزینی در هر تکرار را تنظیم کنیم. از آنجایی که شرط خاتمه الگوریتم ژنتیک، زمان‌های ۱، ۱۰، ۳۰ و ۶۰ ثانیه در نظر گرفته شده است، نیاز است که در هر یک از این زمان‌ها، پارامترهای گفته شده تعیین گردد. سه سطح در نظر گرفته شده برای درصد نخبه‌گزینی برای هر یک از این زمان‌ها ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد جمعیت ایجاد شده بوده و جمعیت ایجاد شده متناسب با مدت زمان حل افزایش می‌یابد. بنابراین طرح عاملی 3^2 برای هر یک از این زمان‌ها در نرم‌افزار Minitab 17 ایجاد شده و میزان تابع هدف مکان‌یابی برای هر یک از ۹ حالت ایجاد شده برای هر یک از ۵ مسئله انتخابی به دست آورده و بر روی آن‌ها میانگین گرفته می‌شود. جدول (۵) سطوح مختلف هر پارامتر را نشان می‌دهد. همچنین مقادیر منتخب برای هر پارامتر در جدول (۶) ارائه شده است.

در یک مکان انتخاب شده (l^*) سرعت مربوط به قرار گرفتن آن پایگاه‌ها در l^* به صورت $v_{\min} = v_{\min} - c_1 r_1 - c_2 r_2$ به روز می‌شود.

فرض کنید همانند بخش قبلی ۳ پایگاه آتش و ۶ نقطه کاندیدا موجود است. بهترین جواب شناخته شده در همسایگی و بهترین جواب شناخته شده تاکنون به صورت شکل (۵) است.

تابع هدف	پایگاه آتش		
	۱	۲	۳
بهترین مکان ($gbest$) و بهترین مکان ($pbest$)	۲	۳	۴
			۰,۱۲۸۵

شکل (۵): بهترین جواب شناخته شده در همسایگی

فرض کنید ماتریس سرعت و مکان انتخابی برای یکی از ذرات به صورت شکل (۶) است:

$$V = \begin{bmatrix} -2 & 1.1 & -5 & 1.89 & 1 & -4 & -\infty \\ 0.89 & 3 & 2.1 & -27 & -4 & -4 & -\infty \\ -5 & -27 & -1 & -27 & -4 & 0 & -\infty \end{bmatrix}$$

تابع هدف	پایگاه آتش		
	۱	۲	۳
مکان پایگاه‌ها با توجه به ماتریس سرعت ($PSOloc$)	۴	۲	۶
			۰,۱۱۰۸

شکل (۴): مکان انتخابی ذرات

با در نظر گرفتن $c_1=2$ ، $c_2=4$ ، $r_1=0.8$ ، $r_2=0.85$ و ماتریس سرعت و مکان فعلی به صورت شکل (۷) به روز می‌شود.

$$V = \begin{bmatrix} -2 & 6.12 & -5 & -3.12 & 1 & -4 & -\infty \\ 0.89 & -54 & 7.12 & -27 & -4 & -4 & -\infty \\ -5 & -54 & -54 & -21.9 & -4 & -5 & -\infty \end{bmatrix}$$

تابع هدف	پایگاه آتش		
	۱	۲	۳
مکان پایگاه‌ها با توجه به ماتریس سرعت ($PSOloc$)	۲	۳	۵
			۰,۱۲۵۲

شکل (۵): مکان به روز شده ذرات

به همین ترتیب برای سایر ذرات نیز در تکرارهای مختلف تا برقراری شرط خاتمه، ماتریس سرعت را به روز کرده، جواب شدنی متناظر با ماتریس سرعت ایجاد شده و در نهایت بهترین جواب گزارش داده می‌شود.

جدول (۵): سطوح مختلف هر پارامتر برای الگوریتم ژنتیک در زمان‌های مختلف

پارامترها	محدودیت زمانی (ثانیه)											
	۱			۱۰			۳۰			۶۰		
	سطوح			سطوح			سطوح			سطوح		
	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳
$ Pop $	۲۰	۴۰	۶۰	۴۰	۸۰	۱۲۰	۲۰۰	۲۴۰	۳۰۰	۳۰۰	۴۰۰	۵۰۰
<i>Elite</i>	%۱۰	%۲۰	%۳۰	%۱۰	%۲۰	%۳۰	%۱۰	%۲۰	%۳۰	%۱۰	%۲۰	%۳۰

جدول (۶): مقادیر منتخب هر پارامتر برای الگوریتم ژنتیک

پارامترها	محدودیت زمانی (ثانیه)			
	۱	۱۰	۳۰	۶۰
$ Pop $	۴۰	۸۰	۲۴۰	۴۰۰
<i>Elite</i>	%۳۰	%۳۰	%۲۰	%۳۰

نیاز است که در هر یک از این زمان‌ها، پارامترهای گفته شده تعیین گردد. با ارائه تحلیلی مشابه با تحلیل‌های انجام شده، می‌توان پارامترهای الگوریتم تجمع ذرات را برای محدوده‌های زمانی ۱، ۱۰، ۳۰ و ۶۰ ثانیه تنظیم نمود. جدول (۷) سطوح مختلف هر پارامتر در هر محدوده زمانی را نشان می‌دهد. همچنین مقادیر منتخب برای هر پارامتر در جدول (۸) ارائه شده است.

۳-۱-۲- تنظیم پارامترهای الگوریتم تجمع ذرات

در الگوریتم تجمع ذرات می‌خواهیم سه پارامتر تعداد ذرات ایجاد شده، حداکثر سرعت و میزان شتاب ذرات در هر تکرار را تنظیم کنیم. از آنجایی که شرط خاتمه الگوریتم تجمع ذرات نیز همانند ژنتیک، زمان‌های ۱، ۱۰، ۳۰ و ۶۰ ثانیه در نظر گرفته شده است،

جدول (۷): سطوح مختلف هر پارامتر برای الگوریتم تجمع ذرات در زمان‌های مختلف

پارامترها	محدودیت زمانی (ثانیه)											
	۱			۱۰			۳۰			۶۰		
	سطوح			سطوح			سطوح			سطوح		
	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳
p_{rt}	۵	۱۰	۱۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۰	۳۰	۴۰	۴۰	۶۰	۸۰
v_{max}	۵	۱۰	۱۵	۵	۱۰	۱۵	۵	۱۰	۱۵	۵	۱۰	۱۵
(c_1, c_2)	(۲,۴)	(۵,۱۰)	(۱۰,۲۰)	(۲,۴)	(۵,۱۰)	(۱۰,۲۰)	(۲,۴)	(۵,۱۰)	(۱۰,۲۰)	(۲,۴)	(۵,۱۰)	(۱۰,۲۰)

ذرات پیشنهادی برای مکان‌یابی است.

توضیح: از آنجایی که مدل ارائه شده در بخش ۲-۲ به صورت یک برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح است، برای حل آن و به دست آوردن جواب بهینه این مدل می‌توان از نرم‌افزارهای موجود در تحقیق در عملیات استفاده کرد. IBM ILOG CPLEX 12.3 یکی از بهترین نرم‌افزارهای موجود در این زمینه است که می‌توان مدل ارائه شده را در قالب تابع هدف و محدودیت‌ها در آن پیاده‌سازی کرد. پیاده‌سازی این مدل در این نرم‌افزار به کمک نرم‌افزار Microsoft visual studio 2013 و به زبان ++C انجام شده است. یکی از مزایای مهم این نرم‌افزار استفاده از برش‌های کارآمد برای کاهش فضای حل مسئله است که سرعت حل و دستیابی به جواب بهینه را افزایش می‌دهد.

به منظور تحلیل بهتر الگوریتم‌های پیشنهادی و کاهش اثر استفاده از اعداد تصادفی به منظور ایجاد جواب اولیه، هر کدام از این الگوریتم‌ها برای هر نمونه مسئله ۵ بار پیاده‌سازی می‌شود. با

جدول (۸): مقادیر منتخب هر پارامتر برای الگوریتم تجمع ذرات

پارامترها	محدودیت زمانی (ثانیه)			
	۱	۱۰	۳۰	۶۰
p_{rt}	۱۵	۲۰	۲۰	۶۰
v_{max}	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵
(c_1, c_2)	(۲,۴)	(۲,۴)	(۲,۴)	(۲,۴)

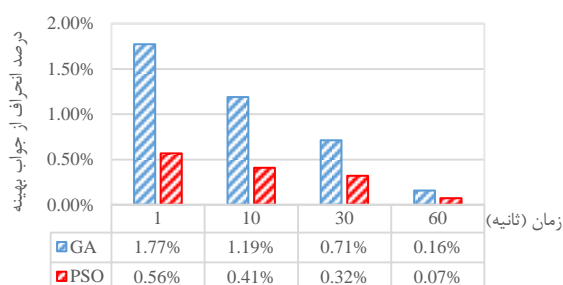
۳-۲- ارزیابی روش‌های پیشنهادی

در این بخش کارایی الگوریتم‌های پیشنهادی برای حل مسئله مکان‌یابی پایگاه‌های آتش بررسی می‌شود.

ابتدا مدل خطی ارائه شده را برای مسئله مکان‌یابی توسط نرم‌افزار IBM ILOG CPLEX 12.3 پیاده‌سازی کرده و جواب بهینه این مسئله را برای هر یک از ۳۰ نمونه مسائل داده شده به دست می‌آوریم. از آنجایی که این مدل در کمتر از ۱ ثانیه (به‌طور متوسط ۰,۱۵ ثانیه) جواب بهینه را پیدا می‌کند؛ لذا این مقدار معیار مناسبی برای تعیین کارایی الگوریتم ژنتیک و تجمع

همچنین میانگین انحرافات در تکرارهای مختلف الگوریتم آورده شده است و می‌توان گفت تا زمان ۶۰ ثانیه روند کاهشی قابل توجهی دارد. بنابراین اگر بخواهیم از این الگوریتم استفاده کنیم و محدودیت زمان حل نیز داشته باشیم بهتر است مدت اجرای الگوریتم را بر روی ۶۰ ثانیه قرار دهیم.

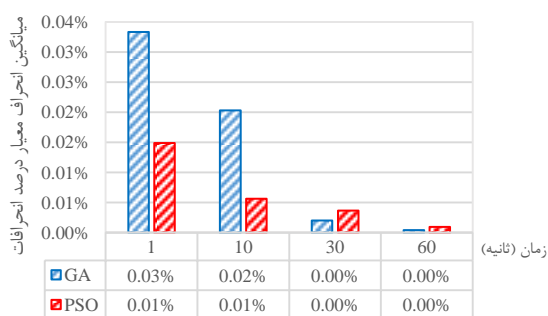
شکل (۱۰) مقایسه جواب‌های به دست آمده از الگوریتم ژنتیک و تجمع ذرات در زمان‌های مختلف، با توجه به میانگین انحرافات به دست آمده از تکرارهای مختلف را نشان می‌دهد.



شکل (۱۰): مقایسه روش ژنتیک و تجمع ذرات

همان‌طور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات نسبت به ژنتیک در زمان‌های مختلف دارای کارایی بهتری است ولیکن سرعت بهبود جواب‌ها با گذر زمان در الگوریتم ژنتیک بیشتر است. بنابراین در یک سیستم تصمیم‌گیری در بعد عملیاتی، اگر زمان حل محدودی برای مسئله مد نظر باشد، بهتر است از الگوریتم تجمع ذرات استفاده کرد؛ چرا که در زمان کوتاهی به جواب نزدیک به بهینه دست پیدا می‌کند، در غیر این صورت می‌توان از الگوریتم ژنتیک بهره گرفت که با گذر زمان سرعت بهبود جواب‌های آن به منظور دستیابی به جواب بهینه بیشتر است.

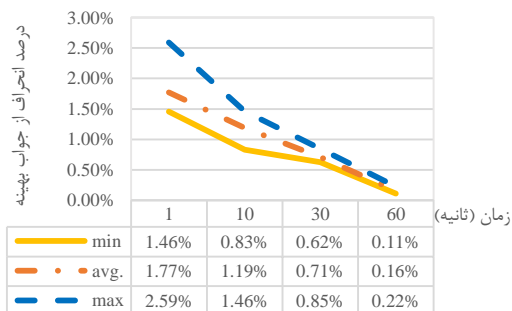
میزان میانگین انحراف معیار درصد انحراف جواب‌ها از جواب بهینه به دست آمده از حل مدل دقیق برای تکرارهای مختلف هر یک از الگوریتم‌های پیشنهاد شده در شکل (۱۱) ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود میزان تغییرپذیری (انحراف معیار) این الگوریتم‌ها در تکرارهای مختلف بسیار کم است.



شکل (۱۱): میزان تغییرپذیری الگوریتم‌ها در تکرارهای مختلف

در نظر گرفتن شرط خاتمه ۱، ۱۰، ۳۰ و ۶۰ ثانیه، کمترین، بیشترین و میانگین انحراف جواب‌های به دست آمده از الگوریتم‌های پیشنهادی از جواب بهینه محاسبه می‌شود.

نتایج حاصله از ۵ تکرار برای هر نمونه مسئله در زمان‌های مذکور برای الگوریتم ژنتیک پیشنهادی در شکل (۸) آمده است.

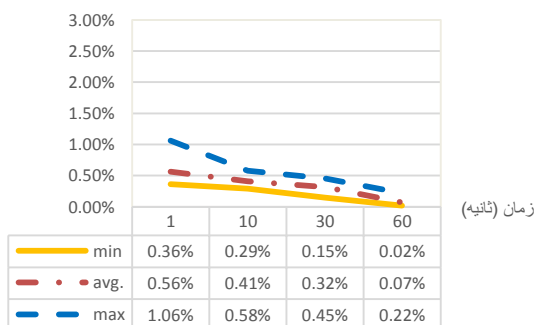


شکل (۸): بررسی انحراف از جواب بهینه در الگوریتم ژنتیک با گذر

زمان

همان‌طور که در شکل (۸) ملاحظه می‌شود، با گذر زمان، میزان درصد انحراف از جواب بهینه کاهش می‌یابد. در شکل فوق بدترین جواب (جواب دارای بیشترین انحراف از جواب بهینه به دست آمده از مدل خطی)، بهترین جواب (جواب دارای کمترین انحراف از جواب بهینه به دست آمده از مدل خطی) در تکرارهای مختلف الگوریتم و همچنین میانگین انحرافات در تکرارهای مختلف الگوریتم آورده شده است. بنابراین اگر بخواهیم از این الگوریتم استفاده کنیم برای به دست آوردن بهترین جواب باید حداقل ۶۰ ثانیه را برای شرط خاتمه آن در نظر بگیریم چرا که روند نزولی نمودار با شیب قابل توجهی تا زمان ۶۰ ثانیه است.

نتایج به دست آمده از ۵ تکرار برای هر نمونه مسئله در زمان‌های گفته شده برای الگوریتم تجمع ذرات پیشنهادی در شکل (۹) آمده است.



شکل (۹): بررسی انحراف از جواب بهینه در الگوریتم تجمع ذرات با

گذر زمان

همان‌طور که در شکل (۹) ملاحظه می‌شود، با گذر زمان، میزان درصد انحراف از جواب بهینه کاهش می‌یابد. در شکل (۹) بدترین جواب، بهترین جواب در تکرارهای مختلف الگوریتم و

۴- نتیجه گیری

هدف از انجام این مقاله، تعیین چیدمان پایگاه‌ها به نحوی است که بتوان به بیشترین دسترسی به اهداف مهاجم و محافظت از مناطق مهم نائل شد. بدین منظور یک مدل ریاضی به صورت خطی با توجه به فرضیات عملیاتی توسعه داده شده است. انعطاف‌پذیری مدل بگونه‌ای است که برای پایگاه‌های حاوی سلاح سخت و نرم قابل استفاده است. مزیت این مدل در این است که می‌توان از نرم‌افزارهای موجود تحقیق در عملیات به منظور حل بهینه آن استفاده کرد. سپس الگوریتم ژنتیک و تجمع ذرات برای این مدل در شرایطی که استفاده از نرم‌افزار مجاز نباشد، توسعه داده شده است. اگر بخواهیم یک نتیجه‌گیری ساده داشته باشیم، باید گفت که استراتژی تخصیص مکان با توجه به مشخصات رایانه در اختیار می‌تواند به این صورت باشد که در صورت نیاز به تصمیم‌گیری سریع و وجود محدودیت زمانی از پاسخ نزدیک بهینه ایجاد شده الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات استفاده کرد چرا که انحراف این روش با گذر زمان نسبت به جواب بهینه به طور متوسط از $0/56\%$ به $0/07\%$ کاهش می‌یابد و در صورت وجود زمان بیشتر، از پاسخ نزدیک به بهینه الگوریتم ژنتیک که با گذر زمان به طور متوسط از $1/77\%$ به $0/16\%$ کاهش می‌یابد، استفاده کرد و با توجه به نوع مدل‌سازی انجام شده در صورتی که محدودیت زمانی وجود نداشته باشد پاسخ بهینه را از حل مدل ارائه شده با نرم‌افزار IBM ILOG CPLEX استفاده کرد.

۵- منابع

- [8] R. K. Ahuja, A. Kumar, K. C. Jha, and J. B. Orlin, "Exact and heuristic algorithms for the weapon-target assignment problem," *Operations Research*, vol. 55, no. 6, pp. 1136-1146, 2007.
- [9] S. P. Lioyd and H. S. Witsenhausen, "Weapon allocation is NP-Complete," *IEEE Summer Simulation Conference*, Reno, Nevada, 1986.
- [10] P. A. Hosein, J. T. Walton, and M. Athans, "Dynamic weapon-target assignment problems with vulnerable C2 nodes," *Massachusetts inst of tech cambridge lab for information and decision systems*, pp. 1-10, 1988.
- [11] C. Huaiping, J. Liu, Y. Chen, and H. Wang, "Survey of the research on dynamic weapon-target assignment problem," *Journal of Systems Engineering and Electronics*, vol. 17, no. 3, pp. 559-565, 2006.
- [12] G. G. denBroeder Jr, R. E. Ellison, and L. Emerling, "On optimum target assignments," *Operation Research*, vol. 7, pp. 322-326, 1958.
- [13] J. D. Katter, "A solution of the multi-weapon, multi-target assignment problem," WP-26597, The MITRE Co., Bedford, MA, 1986.
- [14] S. C. Chang, R. M. James, and J. J. Shaw, "Assignment algorithm for kinetic energy weapons in boost defense," *Proceedings IEEE 26th Conference of Decision and Control*, Los Angeles, CA, pp. 1678-1683, 1987.
- [15] D. Orlin, "Optimal weapons allocation against layered defenses," *Naval Research Logist*, vol. 34, pp. 605-616, 1987.
- [16] D. A. Castanon, "Advanced weapon-target assignment algorithm," *Quarterly report #TR-337*, Alpha Tech., Inc, Burlington, MA, 1987.
- [17] E. Wacholder, "A neural network-based optimization algorithm for the static weapon-target assignment problem," *ORSA Journal Comput.*, vol. 4, pp. 232-246, 1989.
- [18] D. J. Green, J. T. Moore, and J. J. Borsi, "An integer solution heuristic for the arsenal exchange model (AEM)," *Military Operation Research Society*, vol. 3, no. 2, pp. 5-16, 1997.
- [19] Z. J. Lee, S. F. Su, and C. Y. Lee, "An immunity-based ant colony optimization algorithm for solving weapon-target assignment problem," *Applied Soft Computing*, vol. 2, pp. 39-47, 2002.
- [20] Z. J. Lee and W. L. Lee, "A hybrid search algorithm of ant colony optimization and genetic algorithm applied to Weapon-Target Assignment Problems," *Intelligent Data Engineering and Automated Learning*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 278-285, 2003.
- [21] L. Zhen, S. Jain-gue, and G. Xiao-guang, "Compact genetic algorithm and its application in WTA problem," *Computer Engineering and Application*, vol. 44, no. 3, pp. 229-231, 2008.
- [22] G. Cho, "Hybrid Nested Partitions method with Intelligent Greedy Search for solving Weapon-Target Assignment Problem," *Graduate Theses and Dissertations*, Paper 10757, 2009.
- [23] D. P. Lötter, I. Nieuwoudt, and J. H. Van Vuuren, "A multiobjective approach towards weapon assignment in a ground-based air defence environment," *ORiON: The Journal of ORSSA*, vol. 29, no. 1, pp. 31-54, 2013.
- [24] J. M. Rosenberger, H. S. Hwang, and R. P. Pallerla, "The Generalized Weapon Target Assignment Problem," *10th International Command and Control Research and Technology Symposium*, McLean, VA, 2005.
- [1] A. Turan, "algorithms for the weapon-target allocation problem," *PhD dissertation*, Middle East Technical University, 2012.
- [2] R. Farahani and M. Hekmatfar, "Facility location: concepts, models, algorithms and case studies. 2009," *Physica-Verlag*, Heidelberg, 2009.
- [3] L. Cooper, "Location-allocation problems," *Operations research*, vol. 11, no. 3, pp. 331-343, 1963.
- [4] S. L. Hakimi, "Optimum distribution of switching centers in a communication network and some related graph theoretic problems," *Operations Research*, vol. 13, no. 3, pp. 462-475, 1965.
- [5] R. E. Kuenne and R. M. Soland, "Exact and approximate solutions to the multisource Weber problem," *Mathematical Programming*, vol. 3, no. 1, pp. 193-209, 1972.
- [6] A. T. Murray and R. L. Church, "Applying simulated annealing to location-planning models," *Journal of Heuristics*, vol. 2, no. 1, pp. 31-53, 1996.
- [7] J. Brimberg and N. Mladenovic, "Solving the continuous location-allocation problem with tabu search," *Studies in Locational Analysis*, vol. 8, no. 23-32, p. 41, 1996.

- [28] J. H. Holland, "Adaptation in natural and artificial systems," An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence: U Michigan Press, 1975.
- [29] J. Kennedy, "Particle swarm optimization," in Encyclopedia of machine learning, ed: Springer, pp. 760-766, 2011.
- [30] J. Kennedy and R. C. Eberhart, "A discrete binary version of the particle swarm algorithm," in Systems, Man, and Cybernetics, 1997. Computational Cybernetics and Simulation, 1997 IEEE International Conference on, pp. 4104-4108, 1997.
- [25] A. A. Miri and M. Lotfi, "A Dynamic Model for Doing of an Integrated Naval Defence Network Based on Independency Of Sites," 1st national conference of science and technology of naval combat systems, Mashhad, Iran, 2011. (In Persian)
- [26] M. Peymankar, "Local Searches and Tabu Search Algorithms for Concurrent Location and Weapons Assignment Problems of Warships," M. Sc dissertation, Ferdowsi university of Mashhad, 2013. (In Persian)
- [27] M. Ranjbar and M. Peymankar, "Weapon assignment and time scheduling of fire stations," Technical Report, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, 2016. (In Persian)

Modelling and Solving the Location Problem of Fire Launching Sites

M. Peymankar, M. Ranjbar*, A. Izadipour, S. Balouchian

*Ferdowsi University of Mashhad

(Received: 05/08/2017, Accepted: 23/12/2017)

ABSTRACT

Using the mathematical and optimization models has significant impact in military strategic decision making problems such as finding location of domestic fire launching site of hard and soft kill. In this paper, an integer linear programming model is developed for location problem of fire launching sites with goal of maximizing the expected value of the target accessibility and protection of strategic realms. Also, two metaheuristic algorithms based on genetic algorithm and particle swarm optimization algorithm have been designed to solve the problem. The computational results of these methods have been compared to exact answers from modeling. It is revealed that with time limit of 60 seconds, the developed genetic algorithm and particle swarm optimization have 0.16% and 0.07% average deviation from optimal solutions, indicating they perform efficiently.

Keywords: Combat Management Systems, Fire launching sites, Location, Genetic Algorithm, Particle Swarm Optimization