

مدل سازی یک مساله مکان یابی تدافعی چندهدفه با هزینه ساخت و ظرفیت و حل به کمک یک الگوریتم جستجوی فاخته کارا

راحله خاندوزی^{۱*}، حمیدرضا ملکی^۲

۱- استادیار، دانشگاه گنبد کاووس، گروه ریاضی و آمار، گنبد کاووس، گلستان، ایران

۲- استاد، دانشگاه صنعتی شیراز، دانشکده ریاضی، شیراز، فارس، ایران

رسید مقاله: ۸ بهمن ۱۳۹۶

پذیرش مقاله: ۲۳ شهریور ۱۳۹۹

چکیده

این مقاله به دنبال ارائه یک مدل جدید برای مساله مکان یابی تدافعی چندهدفه (MDLP) با هزینه ساخت و با در نظر گرفتن ظرفیت متفاوت برای امکانات در یک شبکه می باشد. در MDLP جدید، جهت جلوگیری از دستیابی مهاجم به سایت های استراتژیک (هسته)، مدافع امکانات گوناگون را در رأس های شبکه مکان یابی می کند. در این راستا، یک مساله برنامه ریزی صحیح مختلط برای پیدا کردن جواب های استکلبرگ فرمول بندی شده است که مدافع و مهاجم به ترتیب تصمیم گیرنده های سطح بالا و پایین هستند. در این مطالعه، هدف استراتژی تدافعی، بیشینه سازی فاصله بین هسته ها و مهاجم است که هدفش رسیدن به نزدیک ترین رأس ممکن به هسته ها است. از طرفی از آنجایی که مساله ارائه شده یک مساله NP- سخت است، برای یافتن یک جواب رضایت بخش، روش فازی تعاملی بر اساس الگوریتم جستجوی فاخته معرفی می شود. کاربرد روش با حل دو نمونه تصادفی از MDLP نشان داده می شود.

کلمات کلیدی: مساله مکان یابی تدافعی، تعادل استکلبرگ، برنامه ریزی صحیح مختلط، الگوریتم جستجوی فاخته.

۱ مقدمه

به طور کلی برای انجام مکان یابی امکانات دفاعی و پایگاه های نظامی، یا مدل های ریاضی استفاده می شود یا با سامانه اطلاعات جغرافیایی در سطح شبکه با تجزیه تحلیل مکانی و توصیفی صورت می گیرد. مکان یابی مناسب امکانات تدافعی بر اساس داده های مختلفی انجام می گیرد که این داده ها با توجه به اهداف و محدودیت های موجود تغییر خواهند کرد. استفاده بهینه از پتانسیل های منطقه ای نقش به سزایی در مکان یابی تأسیسات زیر بنایی از قبیل پایگاه های نظامی و کاهش خطرات ناشی از انواع تهدیدات دارد. در روش ارائه شده توسط محمود بابویی [۱] ابتدا مناطق مناسب برای احداث پایگاه ها تعیین شده و سپس محدودیت های موجود از قبیل دوری و نزدیکی به راه ها، دسترسی به تسهیلات مناسب از قبیل آب، برق، گاز، تلفن و یا بازار مصرف و عوامل زیست محیطی به

* عهده دار مکاتبات

آدرس الکترونیکی: khanduzi@gonbad.ac.ir

تفکیک ارزش‌گذاری شده و با استفاده از یک تکنیک تحلیل آماری مناسب‌ترین نواحی تعیین شده‌اند. آقاپاھر و همکاران [۲] با کاربرد مدل فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP^۱) و GIS^۲ مکانی مناسب برای مراکز مستعد دفاعی در بخشی از جنگل‌های متراکم در استان گلستان-شهرستان علی‌آباد کتول تعیین کردند. درصد شیب، جهت شیب، طبقات ارتفاعی، فاصله از شبکه آبراهه، فاصله از جاده، فاصله از روستاها، سنگ‌شناسی (لیتولوژی)، تراکم پوشش گیاهی و فاصله از مناطق شهری به‌عنوان معیارهای اصلی در مکان‌یابی مراکز مستعد دفاعی در نواحی جنگلی انتخاب‌شده و نقشه‌های مذکور در محیط ArcGIS تهیه شد. سپس فرم‌های استاندارد AHP تهیه و به‌منظور وزن‌دهی معیارهای اصلی در اختیار کارشناسان مختلف قرار گرفته است. حنفی و لطفی [۳] یک مدل برنامه‌ریزی خطی ۱-۰ برای یک مساله مکان‌یابی سامانه‌های متحرک موشکی ارایه کردند. ابتدا با تهیه پرسش‌نامه و مصاحبه با خبرگان نظامی، عوامل مؤثر در مکان‌یابی سامانه‌های متحرک موشکی جمع‌آوری شده است، سپس با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی، پایگاه داده در نرم‌افزار GIS تهیه و تصمیم‌گیری انجام گرفته است. در پایان با حل مدل ریاضی مکان بهینه سامانه‌های موشکی تعیین گردید. در بررسی فلاح ززولی و همکاران [۴]، با استفاده از نظر کارشناسان نظامی، هشت لایه اطلاعاتی شامل سنگ‌شناسی، فاصله از مناطق شهری، فاصله از روستاها، درصد شیب، جهت شیب، طبقات ارتفاعی، فاصله از شبکه آبراهه و فاصله از جاده انتخاب و نقشه‌های مذکور در محیط ArcGIS برای تعیین مکان بهینه مراکز مستعد دفاعی در جنگل‌های استان ایلام رقومی گردید. اولویت‌بندی عوامل مؤثر با استفاده از روش مقایسه زوجی اجرا شد. باهدف مقابله با تهدیدهای دشمن در خلیج فارس، احمدی و همکاران [۵] الگویی مناسب برای مکان‌یابی سایت‌های موشکی ساحل به دریا طراحی کردند. داده‌های توصیفی از روش کتابخانه‌ای گردآوری و با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌ها لایه‌های مربوطه مشخص شد. با نظر خبرگان پرسش‌نامه‌ها تهیه گردید. مدل AHP برای تجزیه و تحلیل داده‌ها استفاده و مؤلفه‌های مهم وزن‌دهی شد. با توجه به استقرار تیپ ۴۰ مستقل پیاده ارتش در کاربری‌های شهری اردبیل و لزوم جابجایی آن، جعفرزاده و ولیزاده کامران [۶] مکانی مناسب و بهینه برای این پادگان نظامی تعیین کردند. روش آن‌ها از نوع توصیفی تحلیلی بوده که با کاربرد GIS و AHP اقدام به جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل اطلاعات برای ایجاد پادگان شده و با استفاده از روش خطی وزن، ناحیه مناسب به‌عنوان بهترین نقاط با اولویت‌های اول تا سوم برای مکان‌یابی پادگان مشخص گردید. اصغری سراسکانرود و همکاران [۷] با شناسایی وضعیت استقرار پایگاه‌های نظامی و دفاعی شهرستان‌های مرزی آذربایجان غربی و تجزیه تحلیل شرایط منطقه، مکان‌هایی مناسب برای احداث پایگاه‌های نظامی دفاعی پیشنهاد دادند. آن‌ها ابتدا با تهیه پرسش‌نامه، نظرات کارشناسان نظامی و ژئومورفولوژی درباره‌ی عوامل مؤثر در مکان‌یابی بهینه پایگاه‌های نظامی را گردآوری کردند، سپس با رقومی کردن لایه‌های موردنیاز، نقشه‌ها در نرم‌افزار ArcGIS آماده و سپس وزن‌دهی معیارهای اصلی با استفاده از فرآیند تحلیل شبکه‌ای (ANP^۳) انجام گرفت. نوری [۸] روشی مناسب و کاربردی جهت شناسایی ابعاد

^۱Analytical Hierarchy Process

^۲Geographic information system

^۳Analytic Network Process

تهدیدات نظامی و اجرایی شدن عوامل مؤثر پدافند غیرعامل جهت مکان‌یابی پادگان‌های نظامی به‌منظور حفظ تأسیسات و بالا بردن توان عملیاتی ارایه کرد. عوامل متعددی نظیر مباحث آمایشی شرایط محیطی، راه‌های ارتباطی، آب و پوشش گیاهی، مسایل امنیتی، ملاحظات سیاسی و پدافند غیرعامل، نوع یگان نظامی، مأموریت یگان و پادگان در انتخاب مکان پادگان در نظر گرفته شده است.

مساله مکان‌یابی امکانات دفاعی همچنین با رویکردهایی در نظریه بازی‌ها و علوم نظامی موردتوجه مؤلفان زیادی قرار گرفته است. اونوو کاتاگیری [۹] در سال ۲۰۰۸ اولین نویسنده‌گانی بودند که یک مدل برنامه‌ریزی دوسطحی ۱-۰ به‌منظور مکان‌یابی امکانات دفاعی ارایه و مساله مکان‌یابی تدافعی^۱ (DLP) را مورد مطالعه قرار دادند. در DLP یک تصمیم‌گیرنده (مدافع) امکانات دفاعی را برای جلوگیری از دستیابی دشمن (مهاجم) به یک مکان استراتژیک به نام هسته، مکان‌یابی می‌کند. ناحیه‌ای که مدافع امکانات را قرار می‌دهد به‌صورت یک شبکه در نظر گرفته می‌شود. مدافع نسبت به مهاجم در اولویت تصمیم‌گیری قرار دارد. با توجه به این که در بسیاری از این مسایل مدافع می‌بایست از چندین سایت مهم در برابر مهاجم دفاع کند، لذا DLP به‌صورت مسایل برنامه‌ریزی چندهدفه نیز فرمول‌بندی شده است.

برمن و همکارانش [۱۰] نیز مدل جدیدی از این مسایل را در سال ۲۰۰۹ معرفی کردند که مساله پوشش ماکزیمال تدافعی نامیده می‌شود. در این مساله، مدافع به‌منظور فراهم کردن پوشش بیشینه‌ای از تقاضاها در یک شبکه، p امکان را مکان‌یابی می‌کند. در مقابل، هدف مهاجم کمینه‌سازی پوشش تقاضاها با حذف یک لینک در اثر یک حمله تروریستی یا حادثه طبیعی است. به این ترتیب هدف مدافع، بیشینه‌سازی پوشش سرویس‌دهی است بعد از آسیبی که به یک مسیر ارتباطی امکانات وارد می‌شود. لذا آن‌ها یک مدل دوسطحی در چارچوب یک تعادل استکلبرگ ارایه دادند.

اونوو و کاتو [۱۱] در سال ۲۰۱۱ اثرات تصادفی بودن مکان و انرژی مهاجم را مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. همچنین یک مساله برنامه‌ریزی چندهدفی دوسطحی، با در نظر گرفتن رأس‌ها و انرژی‌های مهاجم به‌عنوان متغیرهای تصادفی فرمول‌بندی شد. بر این اساس، برای هر سایت استراتژیک درجه تهاجم تعریف و برای هجوم به هر سایت سناریوهای متفاوتی وجود داشت.

خاندوزی و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۵ مساله مکان‌یابی تدافعی پیوسته را برای تخصیص منابع دفاعی ارایه دادند. با استفاده از مدل پیشنهادی مدافع می‌تواند هر کسری از توان دفاعی را در رأس‌های شبکه قرار دهد. به سبب NP- سخت بودن مساله، آن‌ها با استفاده از روش‌های فراابتکاری مدل خود را حل نمودند. در این راستا، الگوریتم جستجوی ممنوعه جهت‌دار مبتنی بر الگوریتم لونبرگ- مارکوارت برای ایجاد جواب نزدیک به بهینه در حل مساله ارایه شد.

در مساله مشابه، ملکی و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۷ با فرض پیوسته بودن متغیرها از یک الگوریتم فراابتکاری ترکیبی جدید برای یافتن جواب‌های با کیفیت مناسب (زمان و دقت) استفاده کردند. [۱۳] یک

¹Defensive Location problem

رویکرد مفید مبتنی بر الگوریتم رقابت استعماری به منظور حل مدل ریاضی معرفی شده در [۱۲] ارایه و بر روی مسایل با ابعاد مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در این تحقیق، جهت مقایسه الگوریتم های ارایه شده از آزمون آماری t استفاده شده است.

اونو و کاتاگیری [۹] با معرفی مدل برنامه ریزی دوسطحی چندهدفه گام بزرگی برای حل مساله مکان یابی تدافعی برداشتند. علی رغم محبوبیت مدل آن ها، این مدل در عمل دارای معایب و نقاط ضعفی به شرح زیر می باشد: (۱) برقرار نبودن فرضیات ظرفیت و هزینه ساخت امکانات (۲) در نظر نگرفتن محدودیت بودجه (۳) مشکلات محاسباتی در حل نمونه های با ابعاد بالا از مدل.

در مورد اولین و دومین نقطه ضعف مدل ارایه شده توسط اونو و کاتاگیری [۹]، می توان گفت که مدل جدید بر اساس این فرضیات مطرح شده است که این منابع و محدودیت ها در مسایل موجود در دنیای واقعی برقرار هستند. در خصوص سومین ایراد وارد شده به کار اونو و کاتاگیری [۹]، می توان گفت که مساله NP- سخت حاصل را می توان با الگوریتم های فراابتکاری حل کرد. مزیت کاربرد الگوریتم های فراابتکاری در حل این نوع مسایل، رسیدن به جواب بهینه یا نزدیک به بهینه با دقت بالا و زمان محاسباتی کم است. از طرفی، زمان محاسباتی با وارد شدن محدودیت های جدید افزایش می یابد؛ بنابراین با توجه به مطالب عنوان شده، پیچیدگی مدل جدید و بزرگی ابعاد مساله، به نظر می رسد استفاده از الگوریتم های فراابتکاری با کارایی بالا از نظر دقت و زمان محاسباتی در حل مساله تأکید شود که در این مقاله به کاربرد یک الگوریتم فراابتکاری با ساختار مناسب خواهیم پرداخت.

لذا، در این مقاله، یک مدل مکان یابی تدافعی چند هدفه^۱ (MDLP) با توجه به هزینه ساخت و با در نظر گرفتن ظرفیت متفاوت برای امکانات ارایه می شود. امروزه، در موضوع حفاظت شبکه، اهداف اقتصادی، نظامی و رقابتی جهت افزایش کارایی سازه های دفاعی به منظور ایجاد شبکه ای مقاوم مورد توجه و بررسی قرار گرفته اند. لذا از آنجایی که کاهش هزینه های ساخت و افزایش ظرفیت امکانات به عنوان شاخص هایی مهم و اثرگذار در شرایط تأمین امنیت شبکه موجب حفاظت آن می شود، با در نظر گرفتن آن ها در مدل به دنبال بیشینه سازی فاصله مهاجم از سایت های استراتژیک هستیم که ناشی از مکان یابی امکانات می باشد. مدل ارایه شده به صورت یک مدل برنامه ریزی دوسطحی بوده و در رده مسایل NP- سخت قرار داد. به منظور حل مدل ارایه شده، یک رویکرد مبتنی بر روش تعامل فازی^۲ (IMF) و الگوریتم جستجوی فاخته^۳ (COA) ارایه و بر روی دو نمونه تصادفی از مساله مورد بررسی قرار گرفت.

ساختار مقاله به این صورت است که در بخش ۲، مدل پیشنهادی برای مساله ی مکان یابی تدافعی چندهدفه ارایه می گردد. در بخش ۳ و ۴ به ترتیب روش حل مساله جدید و نتایج حل یک مثال بیان می گردد. در نهایت، نتیجه گیری و پیشنهادها در بخش ۵ ارایه می شود.

¹Multiobjective Defensive Location Problem

²Interactive Fuzzy Method

³Cuckoo Search Algorithm

۲ مدل ریاضی مکان‌یابی تدافعی چندهدفه

در این مقاله، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح برای مساله DLP ارایه می‌گردد به‌طوری که متغیر مساله تعداد امکانات دفاعی با ظرفیت دفاعی و هزینه ساخت متفاوت است؛ برای انتخاب مکانی درست و بهینه برای امکانات دفاعی، قبل از هر چیز باید فعالیت یا امکانی که در نظر است برای آن مکان‌یابی شود، از نظر تمام ویژگی‌ها و مشخصات مانند بودجه موردنیاز برای راه‌اندازی و ظرفیت یا ارزش دفاعی به‌طور کامل شناخته شود. این واقعیت ما را بر آن داشت تا مدل جدیدی از مساله DLP را معرفی و توسعه دهیم. در نوع جدید مساله، فرض بر این است که مدافع دارای یک بودجه دفاعی کل است که می‌تواند انواع امکانات با ظرفیت و هزینه ساخت متفاوت را در رأس‌های شبکه قرار دهد. در کاربردهای نظامی، این بودجه دفاعی می‌تواند در امکانات دفاعی متفاوت به‌منظور ساخت و راه‌اندازی آن‌ها اعمال شود. به‌عنوان مثال، مقدار منابع مالی مشخصی که مدافع می‌تواند آن را برای ساخت و تجهیز امکانات دفاعی و رساندن ظرفیت دفاعی آن به هر میزان، هزینه کند، به‌عنوان بودجه دفاعی در نظر گرفته می‌شود.

در DLP، علاوه بر مکان‌یابی بهینه امکانات، انتخاب نوع سازه یا امکان دفاعی نیز مهم است؛ زیرا در کاربردهای نظامی، ظرفیت امکانات دفاعی یکسان نیست و توان دفاعی یا ارزش عملیاتی آن‌ها به راندمان دفاعی سازه‌ها (حداقل آسیب‌پذیری و بیشینه قدرت تخریب)، بودجه موردنیاز جهت ساخت امکانات (محدودیت منابع مالی) و سایر پارامترها وابسته است که با افزایش ارزش عملیاتی یک امکان، قدرت تخریبی امکانات تهاجمی نیز افزایش می‌یابد یا در بازی‌های گروهی نظیر فوتبال، دلیل آرایش‌های تیمی متفاوت توان دفاعی بازیکنان است. لذا در مکان‌یابی امکانات دفاعی باید انتخاب نوع امکان دفاعی بر مبنای ظرفیت دفاعی و بودجه موردنیاز جهت ساخت امکان نیز موردبررسی قرار گیرد که این نشان‌دهنده برتری مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح DLP نسبت به مدل باینری آن است. لذا مدل معتبر است زیرا فرضیات جدیدی را با روابط دقیق ریاضی بیان می‌کنیم که بر اثر تغییر دادن شرایطی همچون ظرفیت دفاعی و اضافه کردن قید جدیدی یعنی در نظر گرفتن بودجه تخصیصی متفاوت متناظر با ارزش دفاعی امکان به وجود می‌آید. لذا آنچه در مدل جدید حایز اهمیت است استفاده از پارامترهای اقتصادی (بودجه تخصیصی) و ویژگی‌های نظامی و دفاعی امکانات (ظرفیت دفاعی) در تعیین مکان امکانات است. از سوی دیگر، همان‌طور که بیان شد هدف مهاجم یافتن مسیری برای رسیدن به هسته یا نزدیک‌ترین رأس ممکن به آن است. لذا عامل فاصله به‌عنوان مؤثرترین مانع برای مهاجم است درواقع هزینه کرد مدافع در ایجاد پایگاه‌های نظامی در رأس‌ها به‌منظور افزایش دادن فاصله مهاجم تا هسته است که بدین‌وسیله در کاربردهای نظامی کارایی امکانات دفاعی همچون هواپیما، موشک و سایر تجهیزات برای انواع حملات ارتقایافته و یکسان نیست و به جهت مقابله با حملات مهاجم از امکانات با کارایی متفاوت در رأس‌ها استفاده می‌شود که ما این عامل را در مدل‌سازی جدید این مساله در نظر گرفتیم.

در این بخش، مدل مکان‌یابی تدافعی با توجه به ظرفیت دفاعی و هزینه ساخت متفاوت برای امکانات به‌صورت دوسطحی و چندهدفه ارایه می‌شود. در مساله مورد مطالعه امکانات با دو ویژگی خاص مطابق با بودجه موردنیاز برای راه‌اندازی و ارزش دفاعی در نظر گرفته می‌شوند. از طرف دیگر باید مکان‌یابی امکانات در

سایت ها مطابق بودجه موجود به گونه ای باشد که بیشینه امکانات انتخاب شوند. با توجه به شرایط فوق مناسب ترین امکانات انتخاب شده و مدافع آن ها را در رأس های شبکه مکان یابی می کند.

۲-۱ نمادگذاری و فرضیات

پیش از ارایه مدل ریاضی مساله مکان یابی تدافعی چندهدفه، در این زیربخش مجموعه ها، پارامترها، متغیرهای تصمیم و فرضیات موجود در این مدل ارایه می شود.

۲-۱-۱ مجموعه ها و پارامترها

G : شبکه ای است که مدافع، امکانات دفاعی را روی آن مکان یابی می کند؛

n : تعداد رأس های شبکه؛

V : مجموعه رأس های شبکه، G ، $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ ، با i, j اندیس گذاری شده است؛

E : مجموعه یال های شبکه G ، $|E| = r$ ؛

ξ : n امین رأس شبکه G که مهاجم در آن قرار دارد؛

c_h : n امین هسته که مدافع می بایست از آن در برابر مهاجم دفاع کند برای $h \in \{1, \dots, k\}$ و $\{c_1, \dots, c_k\} \in V$ ؛

$\bar{\alpha}$: میزان انرژی اولیه مهاجم؛

e_{ij} : یال بین رأس i ام و رأس j ام؛

w_{ij} : وزن یال e_{ij} ($w_{ij} > 0$)؛

P_{vc_h} : مجموعه همه مسیرها از رأس دلخواه v به هسته c_h برای $h \in \{1, \dots, k\}$ ؛

γ : کل بودجه دفاعی؛

T : انواع منابع یا امکانات دفاعی، t اندیس منابع دفاعی است و $t = 1, \dots, T$ ؛

f_t : بیشینه تعداد برای تولید امکان دفاعی t ام؛

β_t : توان دفاعی امکان t ام؛

ρ_t : هزینه ساخت امکان t ام؛

ρ_t^l : l امین یال روی مسیر مهاجم؛

λ^j : j امین رأس در بردار تصمیم مهاجم.

۲-۱-۲ متغیرها

q_{jt} : تعداد امکانات دفاعی از نوع t که روی رأس j ام قرار می گیرد؛ بنابراین $q = (q_1, \dots, q_{n \rightarrow T})$ بردار تصمیم

مدافع است؛

p_h : h امین مؤلفه بردار تصمیم مهاجم (مهاجم تصمیم می گیرد مسیریابی از ξ به c_h ها پیدا کند).

۲-۱-۳ فرضیات

در این مدل فرض بر این است که:

(۱) فاصله ی بین رأس v و هسته c_h به صورت زیر تعریف می شود:

$$d^{ch}(v) \equiv \min_{p \in P_{vc_h}} \sum_{e_{ij} \in p} w_{ij} \quad (1)$$

(۲) مدافع می تواند وسایل دفاعی را روی هر رأس شبکه جز گ مکان یابی کند؛

(۳) مهاجم قبل از ترک گ دارای انرژی α اولیه است؛

(۴) مهاجم انرژی خود را به دو شکل مصرف می کند:

الف) با طی کردن یال e_{ij} ، انرژی مهاجم به میزان w_{ij} کاهش می یابد،

ب) اگر مهاجم از v_i به v_j برود، به دلیل برخورد با وسایل دفاعی در رأس j ام انرژی آن به اندازه $\sum_{t=1}^T \beta_t q_{jt}$ کاهش می یابد.

بنابراین انرژی کاهش یافته مهاجم از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\bar{w}(e_{ij}, \mathbf{q}) = w_{ij} + \sum_{t=1}^T \beta_t q_{jt}, j = 1, \dots, n-1. \quad (2)$$

(۵) زمانی که انرژی مهاجم به صفر برسد، مهاجم از بین خواهد رفت؛

(۶) مهاجم در h امین رأس p_h یعنی $v^h(p_h)$ حضور دارد اگر انرژی مهاجم، $\alpha(v^h(p_h) | \mathbf{q})$ ، مثبت باشد. مقدار این انرژی از رابطه زیر حاصل می شود:

$$\alpha(v^h(p_h) | \mathbf{q}) = \bar{\alpha} - \sum_{l=1}^h \bar{w}(e^l(p_h), \mathbf{q}), h = 1, \dots, k \quad (3)$$

۲-۲ مدل دوسطحی

مدل ریاضی موردنظر از دسته مسایل برنامه ریزی دوسطحی می باشد. در ادامه به بیان مسایل سطح بالا و سطح پایین می پردازیم. هدف مهاجم رسیدن به هسته های $(C_1, \dots, C_k)$ یا نزدیک ترین رأس به هسته ها است، لذا توابع هدف مهاجم به صورت زیر تعریف می شود:

$$f_h^I(\mathbf{q}, \mathbf{p}_h) = \min_{v \in p_h} \{d^{ch}(v) | \alpha(v | \mathbf{q}) \geq 0\} \quad (4)$$

اگر توابع هدف مدافع را با $f_h^d(\mathbf{q}, \mathbf{p}_h)$ نمایش دهیم و $MDLP$ را به عنوان یک بازی استکلبرگ با مجموع صفر در نظر بگیریم، خواهیم داشت:

$$f_h^d(\mathbf{q}, \mathbf{p}_h) + f_h^I(\mathbf{q}, \mathbf{p}_h) = 0, \forall h = 1, \dots, k \quad (5)$$

در مسایل مکان یابی امکانات رقابتی، هزینه ساخت و راه اندازی امکانات، پارامترهای بسیار مهمی برای مکان یابی سازه های دفاعی محسوب می شوند. پس یک بودجه دفاعی کل و امکانات باارزش ساخت متفاوت استفاده شده است. برای بیان این محدودیت به زبان ریاضی، رابطه زیر بیان می شود (مجموعه شدنی مدافع):

$$FD = \{\mathbf{q} | \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{t=1}^T \rho_t q_{jt} \leq \gamma, \sum_{j=1}^{n-1} q_{jt} \leq f_t, q_{jt} \in \{0, 1, \dots, f_t\}, j = 1, \dots, n-1, t = 1, \dots, T\}. \quad (6)$$

از طرف دیگر، مجموعه شدنی مهاجم که با FI نمایش داده می شود، مجموعه تمام مسیرها از ξ به هسته های $\{1, \dots, k\}$ است. برای هسته $c_h, h \in \{1, \dots, k\}$ ، فرض کنید FI_h مجموعه تمام مسیرها از ξ به هسته c_h را مشخص می کند؛ بنابراین مجموعه شدنی مهاجم به صورت زیر بیان می شود:

$$FI = \prod_{h=1}^k FI_h \quad (7)$$

فرم کلی $MDLP$ عدد صحیح را به صورت زیر می توان فرمول بندی کرد:

$$\max_{\mathbf{q}} (f_1^d(\mathbf{q}, \mathbf{p}_1), \dots, f_k^d(\mathbf{q}, \mathbf{p}_k))^T \quad (8)$$

$$s.t. \quad \mathbf{q} \in FD \quad (9)$$

که در آن $\mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_k$ جواب های مسایل زیر هستند:

$$\min_{\mathbf{p}_h} f_h^d(\mathbf{q}, \mathbf{p}_h), \forall h = 1, \dots, k \quad (10)$$

$$s.t. \quad (\mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_k) \in FI \quad (11)$$

در مدل فوق، رابطه (۸) نشان دهنده تابع هدف پیشرو (مدافع) است که شامل مکان یابی امکانات دفاعی متفاوت برای بیشینه سازی k هدف متناظر با کل فاصله بین هسته ها و مهاجم است. رابطه (۹) نشان دهنده محدودیت بودجه جهت مکان یابی امکانات است. رابطه (۱۰) نشان دهنده اهداف مهاجم است. مهاجم در پاسخ به استراتژی مدافع، مسیرهایی را برای کمینه سازی فاصله تا هسته ها انتخاب می کند و این تصمیم سبب کاهش انرژی مهاجم می شود. رابطه (۱۱) انتخاب مهاجم را از مجموعه همه مسیرهای از ξ به هسته ها برقرار می سازد.

۳ الگوریتم پیشنهادی

مدل ارایه شده در این مقاله یک مساله برنامه ریزی خطی دوسطحی و چندهدفه می باشد که در آن مساله سطح بالا یا مدافع چندهدفه و اهداف شامل بیشینه سازی فاصله مهاجم از هسته ها هستند؛ حال آنکه مهاجم در سطح پایین به دنبال کمینه سازی فاصله اش از تمام هسته ها است. لذا با یک مساله چندهدفه روبه رو هستیم. برای حل این مسایل از روش های بهینه سازی چندهدفه استفاده می شود که در میان آن ها تعامل فازی مبتنی بر یک الگوریتم فراابتکاری از مقبولیت بیشتری برخوردار است. لذا در ادامه به معرفی روش های مذکور برای مسایل بهینه سازی چندهدفه می پردازیم.

۳-۱ روش تعامل فازی

در روش تعامل فازی ابتدا تصمیم گیرنده برای هریک از توابع هدف، مقادیری فازی با استفاده از توابع عضویت را تعیین می کند. توابع عضویت برای هریک از توابع هدف با توجه به تجربه و درک تصمیم گیرنده به صورت توابع خطی در نظر گرفته می شوند. تابع عضویت $\mu_i(x)$ برای i امین متغیر فازی که نشان دهنده مقدار تابع هدف $Z^i(x)$ است، با توجه به حداقل و حداکثر تابع هدف به دست می آید. مقدار عددی به دست آمده از تابع عضویت میزان رضایت مندی تصمیم گیرنده را نشان می دهد؛ به طوری که اگر برای تابع $Z^i(x)$ مقدار $\mu_i(x) = 1$ به دست آید،

تصمیم گیرنده از نتیجه به دست آمده بیشترین رضایت را دارد و اگر این مقدار برابر صفر شد، نشان دهنده کمترین رضایت مندی از جانب تصمیم گیرنده است. نحوه محاسبه $\mu_{z^i}(x)$ برای توابع هدف به شرح ذیل بیان می شود:

$$\mu_{z^i}(x) = \begin{cases} 0, & z^i(x) \leq z_{\min}^i \\ \frac{z_{\max}^i - z^i(x)}{z_{\max}^i - z_{\min}^i}, & z_{\min}^i \leq z^i(x) \leq z_{\max}^i \\ 1, & z^i(x) \geq z_{\max}^i \end{cases}$$

بعد از تعیین تابع عضویت، تصمیم گیرنده مقدار مرجعی برای تابع عضویت هر تابع هدف مشخص می کند. این مقدار مرجع با توجه به تجربه تصمیم گیرنده و رفتار توابع هدف موجود در مساله چندهدفه به دست می آید. با این مقدار مرجع می توان اثر و نقش هر تابع هدف را کم و زیاد نمود. لذا یکی از مهم ترین مزیت های این روش نقش تصمیم گیرنده در تصمیم گیری مقادیر تابع هدف است. سپس به منظور رسیدن به یک مصالحه خوب بین توابع هدف از روش مینی ماکس استفاده می شود که در قسمت زیر توضیح داده شده است. برای تبدیل مساله چندهدفه به مساله تک هدفه از رابطه زیر استفاده می گردد. آنگاه این تابع هدف تحت فرآیند کمینه کردن، توسط الگوریتم های فراابتکاری قرار می گیرد:

$$z(x) = \max_{i=1, \dots, k} \mu_{z^i}^{ref} - \mu_{z^i}(x)$$

با توجه به رابطه بالا، منظور از روش مینی ماکس، کمینه کردن بیشینه مقدار اختلاف $\mu_{z^i}^{ref}$ (مقدار درجه عضویت هر تابع هدف) از مقدار به دست آمده برای هر تابع هدف است. این مساله با الگوریتم های فراابتکاری قابل حل است. اگر رضایت تصمیم گیرنده با نتایج به دست آمده حاصل نگردد، مقدار مرجع درجه عضویت هر تابع هدف توسط تصمیم گیرنده تغییر می کند. این کار تا زمانی که نتایج مطلوب مقابل قبول تصمیم گیرنده به دست نیاید، ادامه پیدا می کند [۱۴].

در این روش ابتدا تصمیم گیرنده برای هر یک از توابع هدف، مقادیری فازی با استفاده از توابع عضویت را مشخص می کند. توابع عضویت برای هر یک از توابع هدف با توجه به تجربه و درک تصمیم گیرنده و به صورت توابع خطی انتخاب می شوند. تابع عضویت $\mu_h(f_h(q, p_h))$ برای h امین متغیر فازی که نشان دهنده مقدار تابع هدف $f_h(q, p_h)$ است، با توجه به حداقل و حداکثر تابع هدف ایجاد می شوند. مقدار عددی به دست آمده از تابع عضویت میزان رضایت مندی تصمیم گیرنده را بیان می کند؛ به طوری که اگر برای تابع $f_h(q, p_h)$ مقدار $\mu_h(f_h(q, p_h)) = 1$ حاصل شود، تصمیم گیرنده بیشترین رضایت را دارد و اگر این مقدار برابر صفر شد، نشان دهنده کمترین رضایت مندی است. نحوه محاسبه $\mu_h(f_h(q, p_h))$ برای توابع هدف به صورت زیر مشخص می شود:

$$\mu_h(f_h(q, p_h)) = \begin{cases} 0, & f_h(q, p_h) \leq \bar{f}_h^L, \\ \frac{f_h(q, p_h) - \bar{f}_h^L}{\bar{f}_h^U - \bar{f}_h^L}, & \bar{f}_h^L \leq f_h(q, p_h) \leq \bar{f}_h^U, \\ 1, & \bar{f}_h^U \leq f_h(q, p_h). \end{cases} \quad (12)$$

که $\bar{f}_h^U$ و $\bar{f}_h^L$ کمینه و بیشینه انفرادی هر یک از توابع هدف تحت محدودیت های مدل می باشند. بعد از تعیین تابع عضویت، تصمیم گیرنده مقدار مرجعی برای تابع عضویت هر تابع هدف تعیین می کند. این مقدار مرجع با توجه به تجربه تصمیم گیرنده و رفتار توابع هدف موجود در مساله چندهدفه تعریف می شود. با این مقدار مرجع می توان اثر و نقش هر تابع هدف را کم و زیاد نمود. سپس با استفاده از روش مینی ماکس مساله چندهدفه به مساله تک هدفه تبدیل می شود که در رابطه (۱۳) بیان شده است. آنگاه این تابع هدف تحت فرآیند کمینه سازی، توسط الگوریتم های فراابتکاری حل می شود:

$$\max_{h=1, \dots, k} \{ \bar{\mu}_h - \mu_h(f_h(\mathbf{q}, \mathbf{p}_h)) \} \quad (13)$$

با توجه به رابطه بالا، اگر تصمیم گیرنده با توجه به نتایج رضایت نداشته باشد، مقدار مرجع درجه عضویت هر تابع هدف توسط تصمیم گیرنده تغییر می کند. این کار ادامه می یابد تا زمانی که نتایج مطلوب و قابل قبول تصمیم گیرنده حاصل شود [۱۵]. گام های روش تعامل فازی برای حل **MDLP** در شکل (۱) مشاهده می شود.

گام ۱: کمینه و بیشینه انفرادی هر یک از توابع هدف تحت محدودیت های **MDLP** مشخص گردد؛

گام ۲: درجه عضویت مرجع اولیه را ۱ در نظر بگیرید، یعنی، $(\bar{\mu}_1, \dots, \bar{\mu}_k) = (1, \dots, 1)$ ؛

گام ۳: برای درجه عضویت مرجع $(\bar{\mu}_1, \dots, \bar{\mu}_k)$ مساله مینی ماکس متناظر را حل کنید:

$$\min \max_{h=1, \dots, k} \{ \bar{\mu}_h - \mu_h(f_h(\mathbf{q}, \mathbf{p}_h)) \} + \rho \sum_{h=1}^k \bar{\mu}_h - \mu_h(f_h(\mathbf{q}, \mathbf{p}_h)) \} \quad (14)$$

به طوری که $\mathbf{q} \in FD$ و ρ یک عدد مثبت کوچک است؛

گام ۴: اگر رضایت مدافع با این درجه عضویت مرجع حاصل گردید، توقف کنید و جواب بهینه **M** - پرتو فعلی جواب رضایت بخش مدافع

است. وگرنه، مدافع می بایست درجه عضویت مرجع فعلی $(\bar{\mu}_1, \dots, \bar{\mu}_k)$ را بر طبق مقادیر توابع عضویت تغییر دهد و به گام ۳ برگردد.

شکل ۱. گام های روش تعامل فازی برای حل **MDLP**

در گام ۳، می بایست یک الگوریتم کارا برای به دست آوردن جواب بهینه مساله مینی ماکس استفاده کرد. با توجه به عملکرد خوب الگوریتم بهینه سازی فاخته (**COA**) در حل مسایل برنامه ریزی عدد صحیح، استفاده از آن برای حل مساله مینی ماکس پیشنهاد شده است. عملکرد الگوریتم **COA** در [۱۶] بر طبق مقادیری از پارامترهایش آزمایش شده و مقداری که سبب شود الگوریتم **COA** عملکرد بهتری داشته باشد انتخاب می گردد. این مقادیر همچنین در حل **MDLP** در نظر گرفته شده اند.

۳-۲ الگوریتم بهینه سازی فاخته

روش جستجوی فاخته در سال ۲۰۰۹ توسط یانگودب [۱۵] معرفی شده است که از پرورش تخم مزاحم در گونه هایی از فاخته الهام گرفته شده است. این روش از ترکیب با روش پرواز لوی (جستجوی محلی و سراسری با استفاده از یک ساختار) ایجاد شده است. در ادامه ساختار کلی و اجزای مهم الگوریتم بهینه سازی فاخته معرفی می شود [۱۶].

۳-۲-۱ تولید محل های سکونت اولیه فاخته ها (جمعیت اولیه جواب های کاندید)

برای حل یک مساله بهینه سازی، لازم است تا مقادیر متغیرهای مساله به فرم یک آرایه شکل گیرند. در الگوریتم بهینه سازی فاخته به این آرایه habitat یا محل سکونت می گویند. در یک مساله بهینه سازی N_{var} بعدی یک محل سکونت یک آرایه $1 \times N_{var}$ خواهد بود که موقعیت فعلی زندگی فاخته ها را نشان می دهد. میزان مناسب بودن (یا مقدار سود) در محل سکونت فعلی با ارزیابی تابع سود (f) در محل سکونت به دست می آید. پس:

$$Profit = f(habitat)$$

برای شروع COA، یک ماتریس محل سکونت به سائز $N_{pop} \times N_{var}$ تولید می شود که N_{pop} اندازه جمعیت است. سپس برای هر کدام از این محل سکونت ها تعدادی تصادفی تخم تخصیص می یابد. در طبیعت هر فاخته بین ۵ تا ۲۰ تخم می گذارد. این اعداد به عنوان حد بالا و پایین تخصیص تخم به هر فاخته در تکرارهای مختلف استفاده می شود. دیگر عادت هر فاخته حقیقی این است که آن ها در یک دامنه مشخص تخم های خود را می گذارند. حداکثر دامنه تخم گذاری (ELR)^۱ نامیده می شود.

در یک مساله بهینه سازی به حد بالای متغیرهای var_{hi} و حد پایین var_{low} هر فاخته دارای ELR ی خواهد بود که متناسب با تعداد کل تخم ها و تعداد تخم های فعلی فاخته و همچنین حد بالا و پایین متغیرهای مساله است. بنابراین ELR به صورت زیر تعریف می شود:

$$ELR = \alpha \times \frac{\text{Number of current cuckoo's eggs}}{\text{Total number of eggs}} \times (var_{hi} - var_{low})$$

که در آن α متغیری است که حداکثر مقدار ELR با آن تنظیم می شود.

۳-۲-۲ روش فاخته ها برای تخم گذاری و مهاجرت

هر فاخته به صورت تصادفی تخم هایی را در لانه پرندگان میزبان که در ELR خود قرار دارد، می گذارد. وقتی تمام فاخته ها تخم های خود را گذاشتند برخی از تخم ها که کمتر شبیه تخم های پرندگان میزبان هستند شناسایی شده و از لانه بیرون انداخته می شوند. بنابراین بعد از هر تخم گذاری $p\%$ از تمام تخم ها (معمولاً 10%) که مقدار تابع سود آن ها کمتر است نابود می شوند. بقیه جوجه ها در لانه های میزبان تغذیه شده و رشد می کنند.

نکته جالب دیگر در مورد جوجه فاخته ها این است که فقط یک تخم در هر لانه امکان رشد دارد. چراکه وقتی جوجه های فاخته از تخم درمی آیند، تخم های خود پرندگان میزبان را از لانه به بیرون پرت می کنند و اگر جوجه های پرندگان میزبان زودتر از تخم خارج شده باشند جوجه فاخته بیشترین مقدار غذا را که پرندگان میزبان می آورد خورده (بدن ۳ برابر بزرگتری که دارد بقیه جوجه ها را کنار می زند) و پس از چند روز جوجه های خود پرندگان میزبان از گرسنگی می میرند و فقط جوجه فاخته زنده می ماند.

¹Egg Laying Radius

۳-۲-۳ مهاجرت فاخته ها

وقتی جوجه فاخته ها رشد کردند و بالغ شدند مدتی در محیط ها و گروه های خودشان زندگی می کنند ولی وقتی زمان تخم گذاری نزدیک می شود به محل سکونت های بهتر که در آنجا شانس زنده ماندن تخم ها بیشتر است، مهاجرت می کنند. پس از تشکیل گروه های فاخته در مناطق مختلف زیست کلی (فضای جستجوی مساله) گروه دارای بهترین موقعیت به عنوان نقطه هدف برای سایر فاخته ها جهت مهاجرت انتخاب می شود. وقتی فاخته های بالغ در اقصی نقاط محیط زیست زندگی می کنند تشخیص این که هر فاخته به کدام گروه تعلق دارد کار سختی است. برای حل این مشکل، گروه بندی فاخته ها توسط روش خوشه بندی K- میانگین انجام می شود (یک K بین ۳ تا ۵ معمولاً کفایت می کند). حال که گروه های فاخته تشکیل شدند سود میانگین گروه محاسبه می شود تا بهینگی نسبی محل زیست آن گروه به دست آید. سپس گروهی که دارای بیشترین مقدار متوسط سود (بهینگی) است، به عنوان گروه هدف انتخاب شده و گروه های دیگر به سمت آن مهاجرت می کنند.

هنگام مهاجرت به سمت نقطه هدف، فاخته ها تمام مسیر را به سمت محل هدف طی نمی کنند. آن ها فقط قسمتی از مسیر را طی کرده و در آن مسیر هم انحرافی دارند؛ هر فاخته فقط $\lambda\%$ از کل مسیر را به سمت ایده آل فعلی طی می کند و یک انحراف ϕ رادیان نیز دارد. این دو پارامتر به فاخته ها کمک می کند تا محیط بیشتری را جستجو کنند. λ عددی تصادفی بین ۰ و ۱ است و ϕ عددی بین $-\frac{\pi}{6}$ و $\frac{\pi}{6}$ است. وقتی تمام فاخته ها به سمت نقطه هدف مهاجرت کردند و نقاط سکونت جدید هریک مشخص شد، هر فاخته صاحب تعدادی تخم می شود. با توجه به تعداد تخم هر فاخته یک ELR برای آن مشخص می شود و سپس تخم گذاری شروع می گردد.

۳-۲-۴ از بین بردن فاخته های قرار گرفته در مناطق نامناسب

با توجه به این واقعیت که همیشه تعادلی بین جمعیت پرندگان در طبیعت وجود دارد عددی مثل N_{max} حداکثر تعداد فاخته هایی را که می توانند در یک محیط زندگی کنند کنترل و محدود می کند. این تعادل به دلیل محدودیت های غذایی، شکار شدن توسط شکارچیان و نیز عدم امکان پیدا کردن لانه های مناسب برای تخم ها وجود دارد.

۳-۲-۵ شرط همگرایی

پس از چند تکرار تمام جمعیت فاخته ها به یک نقطه بهینه با حداکثر شباهت تخم ها به تخم های پرندگان میزبان و همچنین به محل بیشترین منابع غذایی می رسند. این محل بیشترین سود کلی را خواهد داشت و در آن کمترین تعداد تخم ها از بین خواهد رفت. همگرایی بیش از ۹۵٪ تمام فاخته ها به سمت یک نقطه، الگوریتم بهینه سازی فاخته را به انتهای خود می رساند.

گام های اصلی COA را می توان به صورت زیر بیان نمود:

گام ۱: مکان های سکونت فعلی فاخته ها را به صورت تصادفی مشخص نمایید؛

گام ۲: تعدادی تخم به هر فاخته اختصاص دهید؛

گام ۳: شعاع تخم گذاری هر فاخته را تعیین نمایید؛

گام ۴: فاخته‌ها در لانه میزبانانی که در شعاع تخم‌گذاری آن‌ها قرار دارند، تخم‌گذاری می‌کنند؛

گام ۵: تخم‌هایی که توسط پرندگان میزبان شناسایی می‌شوند از بین می‌روند؛

گام ۶: تخم فاخته‌هایی که شناسایی نشده‌اند پرورش می‌یابند؛

گام ۷: محل سکونت فاخته‌های جدید را ارزیابی نمایید؛

گام ۸: بیشینه تعداد فاخته‌هایی که در هر مکان امکان زندگی دارند را مشخص نمایید و آن‌هایی را که در مکان‌های نامناسب هستند از بین ببرید؛

گام ۹: فاخته‌ها را با استفاده از روش K میانگین خوشه‌بندی و بهترین گروه فاخته را به‌عنوان مکان سکونت هدف مشخص نمایید؛

گام ۱۰: جمعیت جدید فاخته‌ها به سمت مکان هدف حرکت می‌کند؛

گام ۱۱: اگر شرط توقف برقرار گردیده توقف، در غیر این صورت به گام ۲ بروید.

۳-۲-۶ الگوریتم ارایه‌شده

مدل بهینه‌سازی پیشنهادی برای DLP یک مدل برنامه‌ریزی خطی چندهدفه است. روش‌های مختلفی برای حل مسایل چندهدفه مطرح شده است. در این تحقیق، یک روش فازی تعاملی برای حل مدل جدید اتخاذ گردیده است. دلیل استفاده از این روش ماهیت تعاملی آن در کنار سادگی و منطق قابل قبول آن است. مساله تک هدفه حاصل، یک مساله پرکاربرد جهت مکان‌یابی امکانات تدافعی می‌باشد. این مساله از جمله مسایل NP - سخت می‌باشد و نیاز به استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری با ساختار کارا جهت حل آن قطعی است. الگوریتم بهینه‌سازی فاخته دو جمعیتی، به جای استفاده از یک جمعیت اولیه، دو جمعیت متفاوتی ایجاد می‌نماید. ساختار لانه‌ها (محل سکونت)، فاخته‌ها و تخم‌گذاری در این جمعیت‌ها یکسان است؛ اما هر جمعیت از فاخته‌ها می‌تواند مراحل لانه‌سازی، پرواز لوی، مهاجرت، از بین رفتن فاخته‌های موجود در مکان نامناسب و تابع ارزیابی خاص خود را داشته باشد. پس از گذشت چند نسل محل سکونت بهینه با حداکثر شباهت تخم‌ها به تخم‌های پرندگان میزبان، توسط الگوریتم به تبادل فاخته‌ها بین جمعیت‌ها می‌پردازیم. کار صورت گرفته تلاش دارد با استفاده از توابع ارزیاب مختلف در هر جمعیت یک ویژگی (ارضاء محدودیت‌ها) را تقویت نماید. با تبادل فاخته‌ها، در هر جمعیت، محل‌های سکونت با ویژگی‌های مختلف وجود خواهند داشت که تکثیر تخم‌ها می‌تواند تخم‌هایی حاوی این ویژگی‌های مختلف ایجاد نماید. تابع ارزیاب در حالت تک جمعیتی، تأکید بر ارضا محدودیت‌های سطح اول و دوم دارد. به دلیل وابستگی محدودیت‌های دو سطح به یکدیگر، ارضا محدودیت‌های سطح اول و دوم در دو مرحله تقریباً مجزا، روند ارضا محدودیت‌های سطح دوم را کند و ناکارآمد می‌نماید. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد: استفاده از دو جمعیت با تابع ارزیاب مختلف، محدودیت‌ها را همگام با یکدیگر و در زمان کمتری ارضا می‌نماید.

در این بخش، یک الگوریتم ابتکاری دو جمعیتی بر پایه COA [۱۶] برای حل مساله تحقیق ارایه می‌شود (شکل ۲). در فرآیند تولید جواب دو جمعیت متمایز تعریف می‌کنیم. جمعیت اول (D_1) جواب‌هایی را در

$h = 1, \dots, k$ برای k تابع هدف و جمعیت دوم (D_p) جواب‌هایی را در FD نمایش می‌دهند. برای یک جواب h در D_1 ، تابع هدف $Q(h)$ با بررسی کارایی بدترین جواب با توجه به جمعیت دوم ارزیابی می‌شود:

$$Q(h) = \max_{q \in FD} \{ \bar{\mu}_h - \mu_h(f_h(q, p_h)) + \rho \sum_{h=1}^k \bar{\mu}_h - \mu_h(f_h(q, p_h)) \} \quad (15)$$

سپس، برای یک جواب q در D_p ، تابع هدف $H(q)$ با بررسی بهترین جواب با توجه به جمعیت اول به دست می‌آید.

$$H(q) = \min_{h \in D_1} \{ \bar{\mu}_h - \mu_h(f_h(q, p_h)) + \rho \sum_{h=1}^k \bar{\mu}_h - \mu_h(f_h(q, p_h)) \} \quad (16)$$

گام ۱: مکان‌های سکونت فعلی فاخته‌ها $(D_1(0))$ و $(D_p(0))$ را به صورت تصادفی مشخص نمایید. قرار دهید $t = 0$.

گام ۲: برای هر مکان سکونت $h \in D_1$ ، $Q(h)$ را ارزیابی کنید.

گام ۳: مکان‌های سکونت را در بازه گسسته $[1, k]$ نگاشت کنید.

گام ۴: برای هر مکان سکونت $q \in D_p$ ، $H(q)$ را ارزیابی کنید.

گام ۵: مکان‌های سکونت را در بازه گسسته $[0, f_t]$ نگاشت کنید.

گام ۶: مکان‌های سکونت جدید فاخته‌ها در جمعیت اول $(D_1(t+1))$ را با توجه به مراحل زیر تعیین کنید:

۱. تعدادی تخم به هر فاخته اختصاص دهید.
۲. شعاع تخم‌گذاری هر فاخته را تعیین نمایید.
۳. فاخته‌ها در لانه‌های میزبانانی که در شعاع تخم‌گذاری آن‌ها قرار دارند، تخم‌گذاری می‌کنند.
۴. تخم‌هایی که توسط پرندگان میزبان شناسایی می‌شوند از بین می‌روند.
۵. تخم فاخته‌هایی که شناسایی نشده‌اند پرورش می‌یابند.
۶. محل سکونت فاخته‌های جدید را ارزیابی نمایید.
۷. ماکسیمم تعداد فاخته‌هایی که در هر مکان امکان زندگی دارند را مشخص نمایید و آن‌هایی را که در مکان‌های نامناسب هستند از بین ببرید.
۸. فاخته‌ها را با استفاده از روش K -means خوشه‌بندی و بهترین گروه فاخته را به عنوان مکان سکونت هدف مشخص نمایید.
۹. جمعیت جدید فاخته‌ها به سمت مکان هدف حرکت می‌کند.

گام ۷: مکان‌های سکونت جدید فاخته‌ها در جمعیت دوم $(D_p(t+1))$ را به وسیله ۹-۱ در گام ۶ تعیین کنید (جایگذاری کنید $q \in D_p$ را با $h \in D_1$ و $H(q)$ با $Q(h)$ در ۲ و ۶ به ترتیب).

گام ۸: قرار دهید $t = t + 1$. اگر به ماکسیمم تعداد تکرارها رسیدید، توقف کنید، در غیر این صورت به گام ۶ بروید.

شکل ۲. گام‌های اصلی COA برای مساله مینی ماکس

۴ مثال عددی

در این تحقیق به منظور بررسی عملکرد روش پیشنهادی دو مثال عددی از مساله ایجاد شده است. برای حل نمونه‌های عددی، از تابع دایجسترا برای حل زیر مساله مهاجم و از الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل زیر مساله مدافع در محیط نرم‌افزار MATLAB استفاده می‌شود. داده‌های این مثال‌ها به صورت زیر در نظر گرفته شده‌اند:

— تعداد رأس‌ها، $n = 100$

— تعداد پال‌ها، $r = 1000$

- تعداد هسته ها، $k = 3, 4$
 - وزن های هر یال یعنی $w_{ij} (i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n)$ به طور تصادفی از مجموعه $\{1, \dots, 1000\}$
 - انرژی اولیه مهاجم برای $k = 3$ ، $\bar{\alpha} = 40$ ، برای $k = 4$ ، $\bar{\alpha} = 60$
 - کل بودجه دفاعی برای $k = 3$ ، $\gamma = 100$ ، برای $k = 4$ ، $\gamma = 150$
 - تعداد انواع امکانات، $T = 5$
 - برای $t \in \{1, \dots, T\}$ تعداد امکانات دفاعی نوع t (f_t) به طور تصادفی از $\{1, \dots, 5\}$
 - برای $t \in \{1, \dots, T\}$ ظرفیت یا توان دفاعی امکان نوع t (β_t) به طور تصادفی از $\{1, \dots, 20\}$
 - برای $t \in \{1, \dots, T\}$ هزینه ساخت امکان نوع t (ρ_t) به طور تصادفی از $\{1, \dots, 10\}$
- برای مثال اول از MDLP ($k = 3$)، روش تعامل فازی با COA، الگوریتم ژنتیک (GA) [۹] و جستجوی ممنوعه (TS) [۹] استفاده می شود. در گام ۱، کمینه و بیشینه انفرادی هر یک از توابع هدف محاسبه می شود که در جدول ۱ آمده است. لازم به ذکر است که زمان اجرا برای محاسبه بیشینه انفرادی نیز نمایش داده شده است. نتایج عددی نشان می دهد که COA زمان محاسباتی کمتری در مقایسه با GA و TS دارد؛ بنابراین از COA برای حل مثال های عددی استفاده شده است.

جدول ۱. کمینه و بیشینه انفرادی هر یک از توابع هدف

کمینه (f_i^L)	بیشینه (f_i^U)	زمان اجرا (COA)	زمان اجرا (GA)	زمان اجرا (TS)
۴۵	۱۱۰	۲۸/۲	۳۵/۴	۳۳/۱
۵۶	۱۴۶	۲۶/۸	۳۴/۱	۳۱/۶
۷۰	۲۲۵	۳۰/۱	۳۸/۷	۳۵/۵

مدافع فرض می کند که ابتدا هسته C_p در درجه اهمیت قرار دارد؛ سپس هسته C_p و در درجه سوم هسته C_1 مهم است. آنگاه، مدافع می خواهد که مقدار μ_p را اصلاح کند حتی اگر مقادیر μ_1 و μ_p برای حالتی بدتر تغییر داده شده اند و به طور مشابه مقدار μ_1 را اصلاح کند حتی اگر مقدار μ_p برای حالتی بدتر تغییر داده شده است. نتایج حاصل از روش تعامل فازی در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲. نتایج محاسباتی روش تعامل فازی برای MDLP

تکرار	۱	۲	۳	۴
$\bar{\mu}_1$	۱/۰	۰/۷	۰/۷	۰/۷
$\bar{\mu}_p$	۱/۰	۰/۹	۰/۸	۰/۸
$\bar{\mu}_p$	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۰/۹۵
$\mu_1(f_1(q^*, p^*))$	۰/۶۸۴	۰/۴۲۶	۰/۵۷۷	۰/۶۱۱
$\mu_p(f_p(q^*, p^*))$	۰/۶۷۴	۰/۶۸۵	۰/۶۵۶	۰/۷۰۲
$\mu_p(f_p(q^*, p^*))$	۰/۶۷۹	۰/۷۹۱	۰/۸۴۹	۰/۸۲۹
زمان اجرا	۳۹/۲	۳۴/۷	۳۲/۸	۳۱/۱

تکرارهای COA برای حل نمونه اول از MDLP به قرار زیر می باشد:

تکرار ۱: در اولین تکرار، مساله مینی ماکس با استفاده از COA در درجه عضویت مرجع اولیه $(1/0, 1/0, 1/0)$

حل می شود که نتایج آن با مقدار توابع عضویت متناظر در دومین ستون جدول ۲ نشان داده شده اند.

تکرار ۲: بر اساس نتایج تکرار ۱، چون رضایت مدافع با این درجه عضویت مرجع حاصل نگردید، مدافع مقدار عضویت مرجع را به صورت $\bar{\mu}_1 = 0/7, \bar{\mu}_2 = 0/9$ و $\bar{\mu}_3 = 1$ برای بهبود درجه رضایت μ_3 در مقابل μ_1 و μ_2 تغییر می دهد. برای مقادیر عضویت مرجع بهنگام شده، مساله مینی ماکس متناظر به وسیله COA حل می شود و مقدار تابع عضویت متناظر در سومین ستون جدول ۲ ارایه شده است.

تکرار ۳: از آنجا که رضایت مدافع با این درجه عضویت مرجع در تکرار قبلی حاصل نگردید، مدافع مقدار عضویت مرجع را به صورت $\bar{\mu}_1 = 0/7, \bar{\mu}_2 = 0/8$ و $\bar{\mu}_3 = 1$ را برای بهبود درجه رضایت μ_1 و μ_2 در مقابل μ_3 تغییر می دهد. برای مقادیر عضویت مرجع بهنگام شده، مساله مینی ماکس متناظر به وسیله COA حل می شود؛ مقدار تابع عضویت متناظر در چهارمین ستون جدول ۲ آمده است.

تکرار ۴: عطف به سومین تکرار، رضایت مدافع حاصل نگردید؛ زیرا مقدار μ_3 برای جوابش بد است. مدافع مقدار عضویت مرجع را به صورت $\bar{\mu}_1 = 0/7, \bar{\mu}_2 = 0/8$ و $\bar{\mu}_3 = 0/95$ برای بهبود درجه رضایت μ_1 و μ_2 تغییر می دهد. برای مقادیر عضویت مرجع بهنگام شده، مساله مینی ماکس متناظر به وسیله COA حل می شود. مقدار تابع عضویت متناظر در پنجمین ستون جدول ۲ نشان داده شده است. در این مساله، یک جواب رضایت بخش برای مدافع در چهارمین تکرار به دست می آید و روش پایان می یابد.

برای مثال دوم از MDLP ($k=4$)، در گام ۱، کمینه و بیشینه انفرادی هر یک از توابع هدف به وسیله COA محاسبه می شود که در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳. کمینه و بیشینه انفرادی هر یک از توابع هدف

زمان اجرا	بیشینه (f_i^U)	کمینه (f_i^L)	
۳۷/۱	۱۰۵	۴۲	f_1
۴۰/۹	۱۳۹	۵۳	f_2
۴۳/۱	۲۱۳	۶۳	f_3
۴۳/۶	۲۳۱	۷۵	f_4

مدافع فرض می کند که ابتدا هسته C_4 در درجه اهمیت قرار دارد؛ سپس هسته C_3 ، در درجه سوم هسته C_2 و در درجه چهارم هسته C_1 مهم است. نتایج حاصل از روش تعامل فازی در جدول ۴ آمده است.

جدول ۴: نتایج محاسباتی روش تعامل فازی برای MDLP

تکرار	۱	۲	۳	۴	۵
$\bar{\mu}_1$	۱/۰	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸
$\bar{\mu}_2$	۱/۰	۰/۹	۰/۸	۰/۸	۰/۸
$\bar{\mu}_3$	۱/۰	۰/۹	۰/۹	۰/۹۵	۰/۹۵
$\bar{\mu}_4$	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۰/۹۵
$\mu_1(f_1(q^*, p^*))$	۰/۶۷۵	۰/۵۶۹	۰/۵۹۷	۰/۶۴۱	۰/۶۷۲
$\mu_2(f_2(q^*, p^*))$	۰/۶۶۱	۰/۶۳۱	۰/۶۱۴	۰/۶۶۸	۰/۷۱۹
$\mu_3(f_3(q^*, p^*))$	۰/۶۷۳	۰/۶۳۶	۰/۷۲۹	۰/۷۶۳	۰/۸۰۱
$\mu_4(f_4(q^*, p^*))$	۰/۶۷۱	۰/۷۸۳	۰/۸۲۱	۰/۸۵۹	۰/۸۳۷
زمان اجرا	۴۷/۱	۴۵/۵	۴۴/۶	۴۳/۳	۴۲/۹

تکرارهای COA برای حل نمونه دوم از MDLP به قرار زیر می باشد:

تکرار ۱: در اولین تکرار، مساله مینی ماکس با استفاده از COA در درجه عضویت مرجع اولیه (۱/۰، ۱/۰، ۱/۰، ۱/۰) حل می شود که نتایج آن با مقدار توابع عضویت متناظر در دومین ستون جدول ۴ نشان داده شده اند.

تکرار ۲: بر اساس نتایج تکرار ۱، چون رضایت مدافع با این درجه عضویت مرجع حاصل نگردید، مدافع مقدار عضویت مرجع را به صورت $\bar{\mu}_1 = 0/8, \bar{\mu}_2 = 0/9, \bar{\mu}_3 = 0/9, \bar{\mu}_4 = 1$ برای بهبود درجه رضایت μ_4 تغییر می دهد. برای مقادیر عضویت مرجع بهنگام شده، مساله مینی ماکس متناظر به وسیله COA حل می شود و مقدار تابع عضویت متناظر در سومین ستون جدول ۴ ارایه شده است.

تکرار ۳: از آنجا که رضایت مدافع با این درجه عضویت مرجع در تکرار قبلی حاصل نگردید، مدافع مقدار عضویت مرجع را به صورت $\bar{\mu}_1 = 0/8, \bar{\mu}_2 = 0/8, \bar{\mu}_3 = 0/9, \bar{\mu}_4 = 1$ برای بهبود درجه رضایت μ_1 و μ_2 و μ_4 در مقابل μ_3 تغییر می دهد. برای مقادیر عضویت مرجع بهنگام شده، مساله مینی ماکس متناظر به وسیله COA حل می شود؛ مقدار تابع عضویت متناظر در چهارمین ستون جدول ۴ آمده است.

تکرار ۴: از آنجا که رضایت مدافع با این درجه عضویت مرجع در تکرار قبلی حاصل نگردید، مدافع مقدار عضویت مرجع را به صورت $\bar{\mu}_1 = 0/8, \bar{\mu}_2 = 0/8, \bar{\mu}_3 = 0/95, \bar{\mu}_4 = 1$ برای بهبود درجه رضایت μ_1 و μ_2 و μ_4 در مقابل μ_3 تغییر می دهد. برای مقادیر عضویت مرجع بهنگام شده، مساله مینی ماکس متناظر به وسیله COA حل می شود؛ مقدار تابع عضویت متناظر در پنجمین ستون جدول ۴ آمده است.

تکرار ۵: عطف به سومین تکرار، رضایت مدافع حاصل نگردید؛ زیرا مقدار μ_4 برای جوابش بد است. مدافع مقدار عضویت مرجع را به صورت $\bar{\mu}_1 = 0/8, \bar{\mu}_2 = 0/8, \bar{\mu}_3 = 0/95, \bar{\mu}_4 = 0/95$ برای بهبود درجه رضایت μ_1 و μ_2 و μ_4 تغییر می دهد. برای مقادیر عضویت مرجع بهنگام شده، مساله مینی ماکس متناظر به وسیله COA

حل می‌شود. مقدار تابع عضویت متناظر در ششمین ستون جدول ۴ نشان داده شده است. در این مساله، یک جواب رضایت‌بخش برای مدافع در پنجمین تکرار به دست می‌آید و روش پایان می‌یابد.

۵ نتیجه‌گیری

در این تحقیق، حالت خاصی از مسایل مکان‌یابی رقابتی، مساله مکان‌یابی تدافعی با هزینه ساخت و با در نظر گرفتن ظرفیت متفاوت برای امکانات بررسی شد. این مساله به دلیل در نظر گرفتن وابستگی بین مکان‌یابی امکانات دفاعی و بودجه طراح سیستم و ارزش دفاعی سازه‌های نظامی به واقعیت شبکه‌های حفاظتی نزدیک‌تر می‌شود. برای این مساله، یک مدل دوسطحی و چند هدفی عدد صحیح مختلط و یک روش ابتکاری کار بر مبنای روش تعامل فازی و الگوریتم جستجوی فاخته ارائه شد. درنهایت با استفاده از یک نمونه عددی تصادفی، کارایی روش حل پیشنهادی نشان داده شده است.

نتایج محاسباتی آشکار نمود که روش ابتکاری ارائه شده توانایی تولید جواب‌های باکیفیت مناسب را دارا می‌باشد. به نظر می‌رسد که استفاده از روش‌های فراابتکاری ترکیبی مانند ترکیب جستجوی فاخته با روش‌هایی همچون الگوریتم ژنتیک، شبیه‌سازی تبرید و ... و یا استفاده از الگوریتم‌های محلی پرسرعت مانند الگوریتم لونبرگ مارکوارت جهت بهبود جواب‌های حاصل می‌تواند راهکارهایی مناسب برای ادامه کار باشند. همچنین، تحقیقات آتی می‌تواند شامل بررسی مدل‌های فازی از مساله باشد.

منابع

- [1] Mahmoudbaboui, O., (2013). Location analysis in defense planning and passive defense, International E-Conference on Economy under Sanctions, Babolsar, Iran.
- [2] Aghataher, R., Fallah Zezoli, M., Zarafshar, M., Jafari, M., (2015). Presenting the Zoning Map of Susceptible Defense Centers in Forest Areas based on AHP and GIS (Case Study: Aliabad-e-Katool, Golestan Province), Scientific - Research Quarterly of Geographical Data, 24(95), 81-92.
- [3] Hanafi, A., Lotfi, A., (2016). Presenting a model of deploying portable missile systems in future wars by using game theory and GIS in Kermanshah Iran, Quarterly Journal Defensive Future Studies, 1(2), 67-92.
- [4] Fallah Zazuli, M., Aghataher, R., Zarafshar, M., Jafari, M., (2016). Potential maps of prone defense centers in western forest of Ilam-Iran by using an analytical hierarchy process (AHP), Journal of RS and GIS for Natural Resources, 7(2), 47-58.
- [5] Ahmadi, M., Gholamhosseini, E., Ardakaniali, S., Gholizadeh, E., (2017). The factors and elements that affect the location of beach-to-sea missile sites, Scientific Journal of Defense Policy, 25(100), 105-129.
- [6] Jafarzadeh, J., Valizadeh Kamran, K., (2018). Locating military bases with passive defense approach and using a combination of remote sensing and MCDM, Journal of Research and Urban Planning, 9(32), 41-52.
- [7] Saraskanroud, S., Mosavi M., Mahdavi, S., (2019). Geomorphological analysis in site selection of military centers using GIS, ANP (case studies : garrisons border cities of west Azerbaijan), Geographical Planning of Space Quarterly Journal, 9(33), 77-96.
- [8] Nouri, J., (2019). The Criteria for Locating Military Barracks by Considering the Aspects of Passive Defense, Scientific Journal of Passive Defense, 10(1), 31-44.
- [9] Uno, T., Katagiri, H., (2008). Single- and multi-objective defensive location problems on a network, European Journal of Operational Research, 188, 76-84.
- [10] Berman, O., Drezner T., Drezner, Z., Wesolowsky G.O., (2009). A defensive maximal covering problem on a network, International Transactions in Operational Research, 16, 69-86.

- [11] Uno, T., Kato, K., (2011). An interactive fuzzy satisficing method for multiobjective stochastic defensive location problems, IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Taipei, Taiwan.
- [12] Khanduzi, R., Peyghami, M.R., Maleki, H.R., (2015). Solving continuous single-objective defensive location problem based on hybrid directed tabu search algorithm, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 76 (1-4), 295-310.
- [13] Maleki, H.R., Khanduzi, R., Akbari, R., (2017). A novel hybrid algorithm for solving continuous single-objective defensive location problem, Neural Computing and Applications 28 (11), 3323-3340.
- [14] Sakawa, M., (1993). Fuzzy Sets and Interactive Multi-objective Optimization, Plenum Press, New York, USA.
- [15] Yang, X.S., Deb, S., (2009). Cuckoo search via levy flights, Proceedings of World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing, India, 210-214.
- [16] Rajabioun, R., (2011). Cuckoo optimization algorithm, Applied Soft Computing, 11, 5508-5518.