مجله تحقیق در عملیات در کاربردهای آن، سال هجدهم، شماره اول (پیاپی ۶۸)،بهار ۰۰، ص ص ۱۹-۱
شاپا ۷۲۸۶-۲۲۵۱

مدل‌سازی یک مساله مکان‌یابی تدافعی چندهدفه با هزینه ساخت و ظرفیت و حل به کمک یک الگوریتم جستجوی فاخته کارا

راحله خاندوزی [1*]، حمیدرضا ملکی [2]
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 ارایه یک مدل جدید برای مساله مکان‌یابی تدافعی چندهدفه (MDLP) با هزینه ساخت و با در نظر گرفتن ظرفیت متفاوت برای امکانات در یک شبکه می‌باشد. در MDLP جدید، جهت جلوگیری از دستیابی مهاجم به سایت‌های استراتژیک (هسته)، مدافع امکانات گوناگون را در رأس‌های شبکه مکان‌یابی می‌کند. در این راستا، یک مساله برنامه‌ریزی صحیح مختلط برای پیدا کردن جواب‌های استکلبرگ فرمول‌بندی شده است که مدافع و مهاجم به ترتیب تصمیم‌گیرنده‌های سطح بالا و پایین هستند. در این مطالعه، هدف استراتژی تدافعی، بیشینه‌سازی فاصله بین هسته‌ها و مهاجم است که هدفش رسیدن به نزدیک‌ترین رأس ممکن به هسته‌ها است. از طرفی ازآنجایی‌که مساله ارایه‌شده یک مساله NP– سخت است، برای یافتن یک جواب رضایت‌بخش، روش فازی تعاملی بر اساس الگوریتم جستجوی فاخته معرفی می‌شود. کاربرد روش با حل دو نمونه تصادفی از MDLP نشان داده می‌شود.

کلمات کلیدی: مساله مکان‌یابی تدافعی، تعادل استکلبرگ، برنامه‌ریزی صحیح مختلط، الگوریتم جستجوی فاخته.

۱ مقدمه
به‌طورکلی برای انجام مکان‌یابی امکانات دفاعی و پایگاه‌های نظامی، یا مدل‌های ریاضی استفاده می‌شود یا با سامانه اطلاعات جغرافیایی در سطح شبکه با تجزیه تحلیل مکانی و توصیفی صورت می‌گیرد. مکان‌یابی مناسب امکانات تدافعی بر اساس داده‌های مختلفی انجام می‌گیرد که این داده‌ها با توجه به اهداف و محدودیت‌های موجود تغییر خواهند کرد. استفاده بهینه از پتانسیل‌های منطقه‌ای نقش به‌سزایی در مکان‌یابی تأسیسات زیر بنایی از قبیل پایگاه‌های نظامی و کاهش خطرات ناشی از انواع تهدیدات دارد. در روش ارایه شده توسط محمودبابویی [۱] ابتدا مناطق مناسب برای احداث پایگاه‌ها تعیین‌شده و سپس محدودیت‌های موجود از قبیل دوری و نزدیکی به راه‌ها، دسترسی به تسهیلات مناسب از قبیل آب، برق، گاز، تلفن و یا بازار مصرف و عوامل زیست‌محیطی به

* عهده‌دار مکاتبات
آدرس الکترونیکی: khanduzi@gonbad.ac.ir

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.1.2.5]
[DOI: 10.52547/jamlu.18.1.1]

تفکیک ارزش‌گذاری شده و با استفاده از یک تکنیک تحلیل آماری مناسب‌ترین نواحی تعیین شده‌اند. آقاطاهر و همکاران [۲] با کاربرد مدل فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP[1]) و GIS[2] 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 استاندار 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 ازنظر 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 خلیج‌فارس، 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 تجزیه‌وتحلیل 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 تجزیه‌وتحلیل 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[3]) انجام گرفت. نوری [۸] روشی مناسب و کاربردی جهت شناسایی ابعاد

[1] Analytical Hierarchy Process
[2] Geographic information system
[3] Analytic Network Process

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.1.2.5]
[DOI: 10.52547/jamlu.18.1.1]

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 نویسندگانی بودند که یک مدل برنامه‌ریزی دوسطحی ۱-۰ به‌منظور مکان‌یابی امکانات دفاعی ارایه و مساله مکان‌یابی تدافعی[1] (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 این‌که 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. به‌این‌ترتیب 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.

اونو و کاتو [۱۱] در سال ۲۰۱۱ اثرات تصادفی بودن مکان و انرژی مهاجم را مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. همچنین یک مساله برنامه‌ریزی چند هدفی 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

[1]Defensive Location problem

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.1.2.5]
[DOI: 10.52547/jamlu.18.1.1]

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

اونو و کاتاگیری [۹] با معرفی مدل برنامه‌ریزی دوسطحی چندهدفه گام بزرگی برای حل مساله مکان‌یابی تدافعی برداشتند. علی‌رغم محبوبیت مدل آن‌ها، این مدل در عمل دارای معایب و نقاط ضعفی به شرح زیر می‌باشد: (۱) برقرار نبودن فرضیات ظرفیت و هزینه ساخت امکانات (۲) در نظر نگرفتن محدودیت بودجه (۳) مشکلات محاسباتی در حل نمونه‌های با ابعاد بالا از مدل.

در مورد اولین و دومین نقطه‌ضعف مدل ارایه‌شده توسط اونو و کاتاگیری [۹]، می‌توان گفت که مدل جدید بر اساس این فرضیات مطرح شده است که این منابع و محدودیت‌ها در مسایل موجود در دنیای واقعی برقرار هستند. در خصوص سومین ایراد واردشده به کار اونووکاتاگیری [۹]، می‌توان گفت که مساله NP- سخت حاصل را می‌توان با الگوریتم‌های فراابتکاری حل کرد. مزیت کاربرد الگوریتم‌های 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 محدودیت‌های جدید افزایش می‌یابد؛ بنابراین با توجه به مطالب عنوان‌شده، پیچیدگی مدل جدید و بزرگی ابعاد مساله، به نظر می‌رسد استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری با کارایی بالا ازنظر 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 مکان‌یابی تدافعی چند هدفه[1] (MDLP) با توجه به هزینه ساخت و با در نظر گرفتن ظرفیت متفاوت برای امکانات ارایه می‌شود. امروزه، در موضوع حفاظت شبکه، اهداف اقتصادی، نظامی و رقابتی جهت افزایش کارایی سازه‌های دفاعی به‌منظور ایجاد شبکه‌ای مقاوم مورد توجه و بررسی قرارگرفته‌اند. لذا ازآنجایی‌که کاهش هزینه‌های ساخت و افزایش ظرفیت امکانات به‌عنوان شاخص‌هایی مهم و اثرگذار در شرایط تأمین امنیت شبکه موجب حفاظت آن می‌شود، با در نظر گرفتن آن‌ها در مدل به دنبال بیشینه‌سازی فاصله مهاجم از سایت‌های استراتژیک هستیم که ناشی از مکان‌یابی امکانات می‌باشد. مدل ارایه شده به‌صورت یک مدل برنامه‌ریزی دوسطحی بوده و در رده مسایل NP– سخت قرار داد. به‌منظور حل مدل ارایه شده، یک رویکرد مبتنی بر روش تعامل فازی[2] (IMF) و الگوریتم جستجوی فاخته[3] (COA) ارایه و بر روی دو نمونه تصادفی از مساله موردبررسی قرار گرفت.

ساختار مقاله به این صورت است که در بخش ۲، مدل پیشنهادی برای مساله‌ی مکان‌یابی تدافعی چندهدفه ارایه می‌گردد. در بخش ۳ و ۴ به ترتیب روش حل مساله جدید و نتایج حل یک مثال بیان می‌گردد. درنهایت، نتیجه‌گیری و پیشنهادها در بخش ۵ ارایه می‌شود.

[1] Multiobjective Defensive Location Problem
[2] Interactive Fuzzy Method
[3] Cuckoo Search Algorithm

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.1.2.5]
[DOI: 10.52547/jamlu.18.1.1]

۲ مدل ریاضی مکان‌یابی تدافعی چندهدفه

در این مقاله، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح برای مساله DLP ارایه می‌گردد به‌طوری‌که 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، ازنظر 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. به‌عنوان‌مثال، 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.

درDLP، 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 متفاوت 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 براثر 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

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.1.2.5]
[DOI: 10.52547/jamlu.18.1.1]

سایت‌ها مطابق بودجه موجود به‌گونه‌ای باشد که بیشینه امکانات انتخاب شوند. با توجه به شرایط فوق مناسب‌ترین امکانات انتخاب شده و مدافع آن‌ها را در رأس‌های شبکه مکان‌یابی می‌کند.

۲-۱ نمادگذاری و فرضیات

پیش از ارایه مدل ریاضی مساله مکان‌یابی تدافعی چندهدفه، در این زیربخش مجموعه‌ها، پارامترها، متغیرهای تصمیم و فرضیات موجود در این مدل ارایه می‌شود.

۲-۱-۱ مجموعه‌ها و پارامترها

G: شبکه‌ای است که مدافع، امکانات دفاعی را روی آن مکان‌یابی می‌کند؛

n: تعداد رأس‌های شبکه؛

V: مجموعه رأس‌های شبکه، G، $V=\{v_1,...,v_n\}$، با i, j اندیس‌گذاری شده است؛

E: مجموعه یال‌های شبکه G، $|E|=r$؛

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

c_h: nامین هسته که مدافع می‌بایست از آن در برابر مهاجم دفاع کند برای $h\in\{1,...,k\}$ و $\{c_1,...,c_k\}\in V$؛

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

e_{ij}: یال بین رأس iام و رأس j ام؛

w_{ij}: وزن یال e_{ij} $(w_{ij}>0)$؛

$\boldsymbol{P}_{vc_h}$: مجموعه همه مسیرها از رأس دلخواه v به هسته c_h برای $h\in\{1,...,k\}$؛

γ: کل بودجه دفاعی؛

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

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: lامین یال روی مسیر مهاجم؛

v^{λ}: λامین رأس در بردار تصمیم مهاجم.

۲-۱-۲ متغیرها

q_{jt}: تعداد امکانات دفاعی از نوع t که روی رأس j ام قرار می‌گیرد؛ بنابراین $\boldsymbol{q}=(q_{11},...,q_{n-1T})$ بردار تصمیم مدافع است؛

$\boldsymbol{p}_h$: h امین مؤلفه بردار تصمیم مهاجم (مهاجم تصمیم می‌گیرد مسیرهایی از ξ به c_hها پیدا کند).

۲-۱-۳ فرضیات

در این مدل فرض بر این است که:

۱) فاصله‌ی بین رأس v و هسته c_hبه‌صورت زیر تعریف می‌شود:

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.1.2.5]
[DOI: 10.52547/jamlu.18.1.1]

$$d^{c_h}(v) \equiv \min_{p \in P_{vc_h}} \sum_{e_{ij} \in p} w_{ij} \qquad (۱)$$

۲) مدافع می‌تواند وسایل دفاعی را روی هر رأس شبکه جز ξ مکان‌یابی کند؛

۳) مهاجم قبل از ترک ξ دارای انرژی $\bar{\alpha} \succ ۰$ اولیه است؛

۴) مهاجم انرژی خود را به دو شکل مصرف می‌کند:

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

ب) اگر مهاجم از v_i به v_j برود، به دلیل برخورد با وسایل دفاعی در رأس j ام انرژی آن به‌اندازه $\sum_{t=۱}^{T} \beta_t q_{jt}$ کاهش می‌یابد.

بنابراین انرژی کاهش‌یافته مهاجم از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\bar{w}(e_{ij}, \mathbf{q}) = w_{ij} + \sum_{t=۱}^{T} \beta_t q_{jt} \ , \ j = ۱, \ldots, n-۱. \qquad (۲)$$

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

۶) مهاجم در λ امین رأس $\boldsymbol{p}_h$ یعنی $v^{\lambda}(\boldsymbol{p}_h)$ حضور دارد اگر انرژی مهاجم، $\alpha(v^{\lambda}(\mathbf{p}_h) \mid \mathbf{q})$، مثبت باشد. مقدار این انرژی از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\alpha(v^{\lambda}(\mathbf{p}_h) \mid \mathbf{q}) = \bar{\alpha} - \sum_{l=۱}^{\lambda} \bar{w}(e^l(\mathbf{p}_h), \mathbf{q}), h = ۱, \ldots, k \qquad (۳)$$

۲-۲ مدل دوسطحی

مدل ریاضی موردنظر از دسته مسایل برنامه‌ریزی دوسطحی می‌باشد. در ادامه به بیان مسایل سطح بالا و سطح پایین می‌پردازیم. هدف مهاجم رسیدن به هسته‌های $(c_۱, \ldots, c_k)$ یا نزدیک‌ترین رأس به هسته‌ها است، لذا توابع هدف مهاجم به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f_h^I(\mathbf{q}, \mathbf{p}_h) = min_{v \in \mathbf{p}_h} \{ d^{c_h}(v) \mid \alpha(v \mid \mathbf{q}) \geq ۰ \} \qquad (۴)$$

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

$$f_h^d(\mathbf{q}, \mathbf{p}_h) + f_h^I(\mathbf{q}, \mathbf{p}_h) = ۰, \forall h = ۱, \ldots, k \qquad (۵)$$

در مسایل مکان‌یابی امکانات رقابتی، هزینه ساخت و راه‌اندازی امکانات، پارامترهای بسیار مهمی برای مکان‌یابی سازه‌های دفاعی محسوب می‌شوند. پس یک بودجه دفاعی کل و امکانات باارزش ساخت متفاوت استفاده‌شده است. برای بیان این محدودیت به زبان ریاضی، رابطه زیر بیان می‌شود (مجموعه شدنی مدافع):

$$FD = \{ \mathbf{q} \mid \sum_{j=۱}^{n-۱} \sum_{t=۱}^{T} \rho_t q_{jt} \leq \gamma, \sum_{j=۱}^{n-۱} q_{jt} \leq f_t, q_{jt} \in \{ ۰, ۱, \ldots, f_t \}, j = ۱, \ldots, n-۱, t = ۱, \ldots, T \}. \qquad (۶)$$

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.1.2.5]
[DOI: 10.52547/jamlu.18.1.1]

از طرف دیگر، مجموعه شدنی مهاجم که با FI نمایش داده می‌شود، مجموعه تمام مسیرها از ξ به هسته‌های $c_h, h \in \{1,\ldots,k\}$ است. برای هسته $c_h, h \in \{1,\ldots,k\}$، فرض کنید FI_h مجموعه تمام مسیرها از ξ به هسته c_h را مشخص می‌کند؛ بنابراین مجموعه شدنی مهاجم به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$FI = \prod_{h=1}^{k} FI_h \qquad (۷)$$

فرم کلی ***MDLP*** عدد صحیح را به‌صورت زیر می‌توان فرمول‌بندی کرد:

$$\max_{\mathbf{q}} (f_1^d(\mathbf{q},\mathbf{p}_1),\ldots, f_k^d(\mathbf{q},\mathbf{p}_k))^T \qquad (۸)$$

$$s.t. \quad \mathbf{q} \in FD \qquad (۹)$$

که در آن $\mathbf{p}_1,\ldots,\mathbf{p}_k$ جواب‌های مسایل زیر هستند:

$$\min_{\mathbf{p}_h} f_h^d(\mathbf{q},\mathbf{p}_h), \forall\, h = 1,\ldots,k \qquad (۱۰)$$

$$s.t. \quad (\mathbf{p}_1,\ldots,\mathbf{p}_k) \in FI \qquad (۱۱)$$

در مدل فوق، رابطه (۸) نشان‌دهنده تابع هدف پیشرو (مدافع) است که شامل مکان‌یابی امکانات دفاعی متفاوت برای بیشینه‌سازی k هدف متناظر با کل فاصله بین هسته‌ها و مهاجم است. رابطه (۹) نشان‌دهنده محدودیت بودجه جهت مکان‌یابی امکانات است. رابطه (۱۰) نشان‌دهنده اهداف مهاجم است. مهاجم در پاسخ به استراتژی مدافع، مسیرهایی را برای کمینه‌سازی فاصله تا هسته‌ها انتخاب می‌کند و این تصمیم سبب کاهش انرژی مهاجم می‌شود. رابطه (۱۱) انتخاب مهاجم را از مجموعه همه مسیرهای از ξ به هسته‌ها برقرار می‌سازد.

۳ الگوریتم پیشنهادی

مدل ارایه شده در این مقاله یک مساله برنامه‌ریزی خطی دوسطحی و چندهدفه می‌باشد که در آن مساله سطح بالا یا مدافع چندهدفه و اهداف شامل بیشینه‌سازی فاصله مهاجم از هسته‌ها هستند؛ حال‌آنکه مهاجم در سطح پایین به دنبال کمینه‌سازی فاصله‌اش از تمام هسته‌ها است. لذا با یک مساله چندهدفه روبه‌رو هستیم. برای حل این مسایل از روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه استفاده می‌شود که در میان آن‌ها تعامل فازی مبتنی بر یک الگوریتم فراابتکاری از مقبولیت بیشتری برخوردار است. لذا در ادامه به معرفی روش‌های مذکور برای مسایل بهینه‌سازی چندهدفه می‌پردازیم.

۳-۱ روش تعامل فازی

درروش تعامل فازی ابتدا تصمیم‌گیرنده برای هریک از توابع هدف، مقادیری فازی با استفاده از توابع عضویت را تعیین می‌کند. توابع عضویت برای هریک از توابع هدف با توجه به تجربه و درک تصمیم‌گیرنده به‌صورت توابع خطی در نظر گرفته می‌شوند. تابع عضویت $\mu_{z^i}(x)$ برای i امین متغیر فازی که نشان‌دهنده مقدار تابع هدف $z^i(x)$ است، با توجه به حداقل و حداکثر تابع هدف به دست می‌آید. مقدار عددی به‌دست‌آمده از تابع عضویت میزان رضایت‌مندی تصمیم‌گیرنده را نشان می‌دهد؛ به‌طوری‌که اگر برای تابع $z^i(x)$ مقدار $\mu_{z^i}(x)=1$ به دست آید،

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.1.2.5]
[DOI: 10.52547/jamlu.18.1.1]

تصمیم‌گیرنده از نتیجه به‌دست‌آمده بیشترین رضایت را دارد و اگر این مقدار برابر صفر شد، نشان‌دهنده کمترین رضایت‌مندی از جانب تصمیم‌گیرنده است. نحوه محاسبه $\mu_{z^i}(x)$ برای توابع هدف به شرح ذیل بیان می‌شود:

$$\mu_{z^i}(\boldsymbol{x})=\begin{cases}۰, & z^i(x)\le z^i_{\min}\\ \dfrac{z^i_{\max}-z^i(x)}{z^i_{\max}-z^i_{\min}} & z^i_{\min}\le z^i(x)\le z^i_{\max}\\ ۱, & z^i(x)\ge z^i_{\max}\end{cases}$$

بعد از تعیین تابع عضویت، تصمیم‌گیرنده مقدار مرجعی برای تابع عضویت هر تابع هدف مشخص می‌کند. این مقدار مرجع با توجه به تجربه تصمیم‌گیرنده و رفتار توابع هدف موجود در مساله چندهدفه به دست می‌آید. با این مقدار مرجع می‌توان اثر و نقش هر تابع هدف را کم و زیاد نمود. لذا یکی از مهم‌ترین مزیت‌های این روش نقش تصمیم‌گیرنده در تصمیم‌گیری مقادیر تابع هدف است. سپس به‌منظور رسیدن به یک مصالحه خوب بین توابع هدف از روش مینی ماکس استفاده می‌شود که در قسمت زیر توضیح داده‌شده است. برای تبدیل مساله چندهدفه به مساله تک هدفه از رابطه زیراستفاده می‌گردد. آنگاه این تابع هدف تحت فرآیند کمینه کردن، توسط الگوریتم‌های فراابتکاری قرار می‌گیرد:

$$z(\boldsymbol{x})=\max_{i=۱,\dots,k}\mu^{ref}_{z^i}-\mu_{z^i}(\boldsymbol{x})$$

با توجه به رابطه بالا، منظور از روش مینی‌ماکس، کمینه‌کردن بیشینه مقدار اختلاف $\mu^{ref}_{z^i}$ (مقدار درجه عضویت هر تابع هدف) از مقدار به‌دست‌آمده برای هر تابع هدف است. این مساله با الگوریتم‌های فراابتکاری قابل‌حل است. اگر رضایت تصمیم‌گیرنده با نتایج به‌دست‌آمده حاصل نگردد، مقدار مرجع درجه عضویت هر تابع هدف توسط تصمیم‌گیرنده تغییر می‌کند. این کار تا زمانی‌که نتایج مطلوب مقابل قبول تصمیم‌گیرنده به دست نیاید، ادامه پیدا می‌کند [۱۴].

در این روش ابتدا تصمیم‌گیرنده برای هر یک از توابع هدف، مقادیری فازی با استفاده از توابع عضویت را مشخص می‌کند. توابع عضویت برای هر یک از توابع هدف با توجه به تجربه و درک تصمیم‌گیرنده و به‌صورت توابع خطی انتخاب می‌شوند. تابع عضویت $\mu_h(f_h(q,p_h))$ برای h امین متغیر فازی که نشان‌دهنده مقدار تابع هدف $f_h(\mathbf{q},\mathbf{p}_h)$ است، با توجه به حداقل و حداکثر تابع هدف ایجاد می‌شوند. مقدار عددی به‌دست‌آمده از تابع عضویت میزان رضایت‌مندی تصمیم‌گیرنده را بیان می‌کند؛ به‌طوری‌که اگر برای تابع $f_h(\mathbf{q},\mathbf{p}_h)$ مقدار $\mu_h(f_h(\mathbf{q},\mathbf{p}_h))=۱$ حاصل شود، تصمیم‌گیرنده بیشترین رضایت را دارد و اگر این مقدار برابر صفر شد، نشان‌دهنده کمترین رضایت‌مندی است. نحوه محاسبه $\mu_h(f_h(q,p_h))$ برای توابع هدف به‌صورت زیر مشخص می‌شود:

$$\mu_h(f_h(\mathbf{q},\mathbf{p}_h))=\begin{cases}۰ & f_h(\mathbf{q},\mathbf{p}_h)\le \overline{f}_h^{\,L},\\ \dfrac{f_h(\mathbf{q},\mathbf{p}_h)-\overline{f}_h^{\,L}}{\overline{f}_h^{\,U}-\overline{f}_h^{\,L}} & \overline{f}_h^{\,L}\le f_h(\mathbf{q},\mathbf{p}_h)\le \overline{f}_h^{\,U},\\ ۱ & \overline{f}_h^{\,U}\le f_h(\mathbf{q},\mathbf{p}_h).\end{cases} \qquad (۱۲)$$

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.1.2.5]
[DOI: 10.52547/jamlu.18.1.1]

که $\bar{f}_h^L$ و $\bar{f}_h^U$ کمینه و بیشینه انفرادی هر یک از توابع هدف تحت محدودیت‌های مدل می‌باشند. بعد از تعیین تابع عضویت، تصمیم‌گیرنده مقدار مرجعی برای تابع عضویت هر تابع هدف تعیین می‌کند. این مقدار مرجع با توجه به تجربه تصمیم‌گیرنده و رفتار توابع هدف موجود در مساله چندهدفه تعریف می‌شود. با این مقدار مرجع می‌توان اثر و نقش هر تابع هدف را کم‌وزیاد نمود. سپس با استفاده از روش مینی ماکس مساله چندهدفه به مساله تک هدفه تبدیل می‌شود که در رابطه (۱۳) بیان‌شده است. آنگاه این تابع هدف تحت فرآیند کمینه‌سازی، توسط الگوریتم‌های فراابتکاری حل می‌شود:

$$\max_{h=1,\ldots,k}\{\bar{\mu}_h - \mu_h(f_h(\mathbf{q},\mathbf{p}_h))\} \qquad (۱۳)$$

با توجه به رابطه بالا، اگر تصمیم‌گیرنده با توجه به نتایج رضایت نداشته باشد، مقدار مرجع درجه عضویت هر تابع هدف توسط تصمیم‌گیرنده تغییر می‌کند. این کار ادامه می‌یابد تا زمانی که نتایج مطلوب و قابل‌قبول تصمیم‌گیرنده حاصل شود [۱۵]. گام‌های روش تعامل فازی برای حل ***MDLP*** در شکل (۱) مشاهده می‌شود.

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

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

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

$$\min \max_{h=1,\ldots,k}\{\bar{\mu}_h - \mu_h(f_h(\mathbf{q},\mathbf{p}_h)) + \rho\sum_{h=1}^{k}\bar{\mu}_h - \mu_h(f_h(\mathbf{q},\mathbf{p}_h))\} \qquad (۱۴)$$

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

گام ٤: اگر رضایت مدافع با این درجه عضویت مرجع حاصل گردید، توقف کنید و جواب بهینه ***M***- پرتو فعلی جواب رضایت‌بخش مدافع است. وگرنه، مدافع می‌بایست درجه عضویت مرجع فعلی $(\bar{\mu}_1,\ldots,\bar{\mu}_k)$ را بر طبق مقادیر توابع عضویت تغییر دهد و به گام ۳ برگردید.

شکل ۱. گام‌های روش تعامل فازی برای حل ***MDLP***

در گام ۳، می‌بایست یک الگوریتم کارا برای به دست آوردن جواب بهینه مساله مینی‌ماکس استفاده کرد. با توجه به عملکرد خوب الگوریتم بهینه‌سازی فاخته (***COA***) در حل مسایل برنامه‌ریزی عدد صحیح، استفاده از آن برای حل مساله مینی‌ماکس پیشنهاد شده است. عملکرد الگوریتم ***COA*** در [۱۶] بر طبق مقادیری از پارامترهایش آزمایش‌شده و مقداری که سبب شود الگوریتم ***COA*** عملکرد بهتری داشته باشد انتخاب می‌گردد. این مقادیر همچنین در حل ***MDLP*** در نظر گرفته‌شده‌اند.

۳-۲ الگوریتم بهینه‌سازی فاخته

روش جستجوی فاخته در سال ۲۰۰۹ توسط یانگودب [۱۵] معرفی‌شده است که از پرورش تخم مزاحم در گونه‌هایی از فاخته الهام گرفته شده است. این روش از ترکیب با روش پروازلووی (جستجوی محلی و سراسری با استفاده از یک ساختار) ایجادشده است. در ادامه ساختار کلی و اجزای مهم الگوریتم بهینه‌سازی فاخته معرفی می‌شود [۱۶].

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.1.2.5]
[DOI: 10.52547/jamlu.18.1.1]

۳-۲-۱ تولید محل‌های سکونت اولیه فاخته‌ها (جمعیت اولیه جواب‌های کاندید)

برای حل یک مساله بهینه‌سازی، لازم است تا مقادیر متغیرهای مساله به فرم یک آرایه شکل گیرند. در الگوریتم بهینه‌سازی فاخته به این آرایه habitat یا محل سکونت می‌گویند. دریک مساله بهینه‌سازی N_{var} بعدی یک محل سکونت یک آرایه $1\times N_{\text{var}}$ خواهد بود که موقعیت فعلی زندگی فاخته‌ها را نشان می‌دهد. میزان مناسب بودن (یا مقدار سود) در محل سکونت فعلی با ارزیابی تابع سود (f) در محل سکونت به دست می‌آید. پس:

$$Profit = f\left(habitat\right)$$

برای شروع COA، یک ماتریس محل سکونت به سایز $N_{pop}\times N_{\text{var}}$ تولید می‌شود که N_{pop} اندازه جمعیت است. سپس برای هرکدام از این محل سکونت‌ها تعدادی تصادفی تخم تخصیص می‌یابد. در طبیعت هر فاخته بین ۵ تا ۲۰ تخم می‌گذارد. این اعداد به‌عنوان حد بالا و پایین تخصیص تخم به هر فاخته در تکرارهای مختلف استفاده می‌شود. دیگر عادت هر فاخته حقیقی این است که آن‌ها دریک دامنه مشخص تخم‌های خود را می‌گذارند. حداکثر دامنه تخم‌گذاری (ELR[1]) نامیده می‌شود.

دریک مساله بهینه‌سازی به حد بالای متغیرهای var_{hi} و حد پایین var_{low} هر فاخته دارای ELR ی خواهد بود که متناسب با تعداد کل تخم‌ها و تعداد تخم‌های فعلی فاخته و همچنین حد بالا و پایین متغیرهای مساله است. بنابراین ELR به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

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

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

۳-۲-۲ روش فاخته‌ها برای تخم‌گذاری و مهاجرت

هر فاخته به‌صورت تصادفی تخم‌هایی را در لانه پرندگان میزبان که در ELR خود قرار دارد، می‌گذارد. وقتی تمام فاخته‌ها تخم‌های خود را گذاشتند برخی از تخم‌ها که کمتر شبیه تخم‌های پرنده میزبان هستند شناسایی شده و از لانه بیرون انداخته می‌شوند. بنابراین بعد از هر تخم‌گذاری p٪ از تمام تخم‌ها (معمولاً ۱۰٪) که مقدار تابع سود آن‌ها کمتر است نابود می‌شوند. بقیه جوجه‌ها در لانه‌های میزبان تغذیه شده و رشد می‌کنند.

نکته جالب دیگر در مورد جوجه فاخته‌ها این است که فقط یک تخم در هر لانه امکان رشد دارد. چراکه وقتی جوجه‌های فاخته از تخم درمی‌آیند، تخم‌های خود پرنده میزبان را از لانه به بیرون پرت می‌کنند و اگر جوجه‌های پرنده میزبان زودتر از تخم خارج شده باشند جوجه فاخته بیشترین مقدار غذا را که پرنده میزبان می‌آورد خورده (بدن ۳ برابر بزرگ‌تری که دارد بقیه جوجه‌ها را کنار می‌زند) و پس از چند روز جوجه‌های خود پرنده میزبان از گرسنگی می‌میرند و فقط جوجه فاخته زنده می‌ماند.

[1] Egg Laying Radius

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.1.2.5]
[DOI: 10.52547/jamlu.18.1.1]

۳-۲-۳ مهاجرت فاخته‌ها

وقتی جوجه فاخته‌ها رشد کردند و بالغ شدند مدتی در محیط‌ها و گروه‌های خودشان زندگی می‌کنند ولی وقتی زمان تخم‌گذاری نزدیک می‌شود به محل سکونت‌های بهتر که در آنجا شانس زنده ماندن تخم‌ها بیشتر است، مهاجرت می‌کنند. پس از تشکیل گروه‌های فاخته در مناطق مختلف زیست کلی (فضای جستجوی مساله) گروه دارای بهترین موقعیت به‌عنوان نقطه هدف برای سایر فاخته‌ها جهت مهاجرت انتخاب می‌شود. وقتی فاخته‌های بالغ در اقصی نقاط محیط زیست زندگی می‌کنند تشخیص این‌که هر فاخته به کدام گروه تعلق دارد کار سختی است. برای حل این مشکل، گروه‌بندی فاخته‌ها توسط روش خوشه‌بندی K-میانگین انجام می‌شود (یک K بین ۳ تا ۵ معمولاً کفایت می‌کند). حال که گروه‌های فاخته تشکیل شدند سود میانگین گروه محاسبه می‌شود تا بهینگی نسبی محل زیست آن گروه به دست آید. سپس گروهی که دارای بیشترین مقدار متوسط سود (بهینگی) است، به‌عنوان گروه هدف انتخاب‌شده و گروه‌های دیگر به سمت آن مهاجرت می‌کنند.

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

۳-۲-٤ از بین بردن فاخته‌های قرارگرفته در مناطق نامناسب

با توجه به این واقعیت که همیشه تعادلی بین جمعیت پرندگان در طبیعت وجود دارد عددی مثل $N_{\max}$ حداکثر تعداد فاخته‌هایی را که می‌توانند در یک محیط زندگی کنند کنترل و محدود می‌کند. این تعادل به دلیل محدودیت‌های غذایی، شکار شدن توسط شکارچیان و نیز عدم امکان پیدا کردن لانه‌های مناسب برای تخم‌ها وجود دارد.

۳-۲-۵ شرط همگرایی

پس از چند تکرار تمام جمعیت فاخته‌ها به یک نقطه بهینه با حداکثر شباهت تخم‌ها به تخم‌های پرندگان میزبان و همچنین به محل بیشترین منابع غذایی می‌رسند. این محل بیشترین سود کلی را خواهد داشت و در آن کمترین تعداد تخم‌ها از بین خواهد رفت. همگرایی بیش از ۹۵٪ تمام فاخته‌ها به سمت یک نقطه، الگوریتم بهینه‌سازی فاخته را به انتهای خود می‌رساند.

گام‌های اصلی COA را می‌توان به‌صورت زیر بیان نمود:

گام ۱: مکان‌های سکونت فعلی فاخته‌ها را به‌صورت تصادفی مشخص نمایید؛

گام ۲: تعدادی تخم به هر فاخته اختصاص دهید؛

گام ۳: شعاع تخم‌گذاری هر فاخته را تعیین نمایید؛

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.1.2.5]
[DOI: 10.52547/jamlu.18.1.1]

گام ٤: فاخته‌ها در لانه میزبانانی که در شعاع تخم‌گذاری آن‌ها قرار دارند، تخم‌گذاری می‌کنند؛

گام ٥: تخم‌هایی که توسط پرندگان میزبان شناسایی می‌شوند از بین می‌روند؛

گام ٦: 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.

۳-۲-٦ 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 قابل‌قبول آن است. مساله تک هدفه حاصل، یک مساله پرکاربرد جهت مکان‌یابی امکانات تدافعی می‌باشد. این مساله ازجمله مسایل ***NP*** - سخت می‌باشد و نیاز به استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری با ساختار کارا جهت حل آن قطعی است. الگوریتم بهینه‌سازی فاخته دو جمعیتی، به‌جای 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

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.1.2.5]
[DOI: 10.52547/jamlu.18.1.1]

$h=1,\ldots,k$ برای k تابع هدف و جمعیت دوم (D_2)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:

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

سپس، برای یک جواب $\boldsymbol{q}$ در D_2، تابع هدف $H(\boldsymbol{q})$ با بررسی بهترین جواب با توجه به جمعیت اول به دست می‌آید.

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

گام ۱: مکان‌های سکونت فعلی فاخته‌ها ($D_1(0)$ و $D_2(0)$) را به‌صورت 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 ٤: برای هر مکان سکونت $\boldsymbol{q}\in D_2$، $H(\boldsymbol{q})$ را ارزیابی کنید.

گام ٥: مکان‌های سکونت را در بازه گسسته $[0,f_t]$ نگاشت کنید.

گام ٦: مکان‌های سکونت جدید فاخته‌ها در جمعیت اول ($D_1(t+1)$) را با توجه به مراحل زیر تعیین کنید:

1. تعدادی تخم به هر فاخته اختصاص دهید.
2. شعاع تخم‌گذاری هر فاخته را تعیین نمایید.
3. فاخته‌ها در لانه‌های میزبانانی که در شعاع تخم‌گذاری آن‌ها قرار دارند، تخم‌گذاری می‌کنند.
4. تخم‌هایی که توسط پرندگان میزبان شناسایی می‌شوند از بین می‌روند.
5. تخم فاخته‌هایی که شناسایی نشده‌اند پرورش می‌یابند.
6. محل سکونت فاخته‌های جدید را ارزیابی نمایید.
7. ماکسیمم تعداد فاخته‌هایی که در هر مکان امکان زندگی دارند را مشخص نمایید و آن‌هایی را که در مکان‌های نامناسب هستند از بین ببرید.
8. فاخته‌ها را با استفاده از روش ***K-means*** خوشه‌بندی و بهترین گروه فاخته را به‌عنوان مکان سکونت هدف مشخص نمایید.
9. جمعیت جدید فاخته‌ها به سمت مکان هدف حرکت می‌کند.

گام ۷: مکان‌های سکونت جدید فاخته‌ها در جمعیت دوم ($D_2(t+1)$) را به‌وسیله ۹-۱ در گام ۶ تعیین کنید (جایگذاری کنید $\boldsymbol{q}\in D_2$ را با $h\in D_1$ و $H(\boldsymbol{q})$ 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 مینی‌ماکس

٤ مثال عددی

در این تحقیق به‌منظور 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 به‌صورت زیر در نظر گرفته شده‌اند:

- تعداد رأس ها، $n=100$
- تعداد یال‌ها، $r=1000$

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.1.2.5]
[DOI: 10.52547/jamlu.18.1.1]

- تعداد هسته‌ها، $k = ۳,۴$
- وزن‌های هر یال یعنی $w_{ij}\ (i = ۱,...,m,\ j = ۱,...,n)$ به‌طور تصادفی از مجموعه $\{۱,...,۱۰۰۰\}$
- انرژی اولیه مهاجم برای $k = ۳$، $\bar{\alpha} = ۴۰$، برای $k = ۴$، $\bar{\alpha} = ۶۰$
- کل بودجه دفاعی برای $k = ۳$، $\gamma = ۱۰۰$، برای $k = ۴$، $\gamma = ۱۵۰$
- تعداد انواع امکانات، $T = ۵$
- برای $t \in \{۱,...,T\}$ تعداد امکانات دفاعی نوع t (f_t) به‌طور تصادفی از $\{۱,...,۵\}$
- برای $t \in \{۱,...,T\}$ ظرفیت یا توان دفاعی امکان نوع t (β_t) به‌طور تصادفی از $\{۱,...,۲۰\}$
- برای $t \in \{۱,...,T\}$ هزینه ساخت امکان نوع t (ρ_t) به‌طور تصادفی از $\{۱,...,۱۰\}$

برای مثال اول از MDLP ($k = ۳$)، روش تعامل فازی با COA، الگوریتم ژنتیک (GA) [۹] و جستجوی ممنوعه (TS) [۹] استفاده می‌شود. در گام ۱، کمینه و بیشینه انفرادی هر یک از توابع هدف محاسبه می‌شود که در جدول ۱ آمده است. لازم به ذکر است که زمان اجرا برای محاسبه بیشینه انفرادی نیز نمایش داده‌شده است. نتایج عددی نشان می‌دهد که COA زمان محاسباتی کمتری در مقایسه با GA و TS دارد؛ بنابراین از COA برای حل مثال‌های 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***)
$f_۱$	۴۵	۱۱۰	۲۸/۲	۳۵/۴	۳۳/۱
$f_۲$	۵۶	۱۴۶	۲۶/۸	۳۴/۱	۳۱/۶
$f_۳$	۷۰	۲۲۵	۳۰/۱	۳۸/۷	۳۵/۵

مدافع فرض می‌کند که ابتدا هسته $c_۳$ در درجه اهمیت قرار دارد؛ سپس هسته $c_۲$ و در درجه سوم هسته $c_۱$ مهم است. آنگاه، مدافع می‌خواهد که مقدار $\mu_۲$ را اصلاح کند حتی اگر مقادیر $\mu_۱$ و $\mu_۳$ برای حالتی بدتر تغییر داده‌شده‌اند و به‌طور مشابه مقدار $\mu_۱$ را اصلاح کند حتی اگر مقدار $\mu_۳$ برای حالتی بدتر تغییر داده‌شده 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
$\bar{\mu}_۱$	۱/۰	۰/۷	۰/۷	۰/۷
$\bar{\mu}_۲$	۱/۰	۰/۹	۰/۸	۰/۸
$\bar{\mu}_۳$	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۰/۹۵
$\mu_۱(f_۱(\boldsymbol{q}^*, \boldsymbol{p}^*))$	۰/۶۸۴	۰/۴۲۶	۰/۵۷۷	۰/۶۱۱
$\mu_۲(f_۲(\boldsymbol{q}^*, \boldsymbol{p}^*))$	۰/۶۷۴	۰/۶۸۵	۰/۶۵۶	۰/۷۰۲
$\mu_۳(f_۳(\boldsymbol{q}^*, \boldsymbol{p}^*))$	۰/۶۷۹	۰/۷۹۱	۰/۸۴۹	۰/۸۲۹
زمان اجرا	۳۹/۲	۳۴/۷	۳۲/۸	۳۱/۱

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.1.2.5]
[DOI: 10.52547/jamlu.18.1.1]

تکرارهای COA برای حل نمونه اول از MDLP به‌قرار زیر می‌باشد:

تکرار ۱: در اولین تکرار، مساله مینی‌ماکس با استفاده از COA در درجه عضویت مرجع اولیه (۱/۰،۱/۰،۱/۰) حل می‌شود که نتایج آن با مقدار توابع عضویت متناظر در دومین ستون جدول ۲ نشان داده‌شده‌اند.

تکرار ۲: بر اساس نتایج تکرار ۱، چون رضایت مدافع با این درجه عضویت مرجع حاصل نگردید، مدافع مقدار عضویت مرجع را به‌صورت $\bar{\mu}_1 = ۰/۷$، $\bar{\mu}_2 = ۰/۹$ و $\bar{\mu}_3 = ۱$ برای بهبود درجه رضایت μ_3 در مقابل μ_1 و μ_2 تغییر می‌دهد. برای مقادیر عضویت مرجع بهنگام شده، مساله مینی‌ماکس متناظر به‌وسیله COA حل می‌شود و مقدار تابع عضویت متناظر در سومین ستون جدول ۲ ارایه شده است.

تکرار ۳: ازآنجاکه رضایت مدافع با این درجه عضویت مرجع در تکرار قبلی حاصل نگردید، مدافع مقدار عضویت مرجع را به‌صورت $\bar{\mu}_1 = ۰/۷$، $\bar{\mu}_2 = ۰/۸$ و $\bar{\mu}_3 = ۱$ را برای بهبود درجه رضایت μ_1 و μ_3 در مقابل μ_2 تغییر می‌دهد. برای مقادیر عضویت مرجع بهنگام شده، مساله مینی‌ماکس متناظر به‌وسیله COA حل می‌شود؛ مقدار تابع عضویت متناظر در چهارمین ستون جدول ۲ آمده است.

تکرار ٤: عطف به سومین تکرار، رضایت مدافع حاصل نگردید؛ زیرا مقدار μ_2 برای جوابش بد است. مدافع مقدار عضویت مرجع را به‌صورت $\bar{\mu}_1 = ۰/۷$، $\bar{\mu}_2 = ۰/۸$ و $\bar{\mu}_3 = ۰/۹۵$ برای بهبود درجه رضایت μ_1 و μ_2 تغییر می‌دهد. برای مقادیر عضویت مرجع بهنگام شده، مساله مینی‌ماکس متناظر به‌وسیله COA حل می‌شود. مقدار تابع عضویت متناظر در پنجمین ستون جدول ۲ نشان داده‌شده است. در این مساله، یک جواب رضایت‌بخش برای مدافع در چهارمین تکرار به دست می‌آید و روش پایان می‌یابد.

برای مثال دوم از ***MDLP*** ($k = ۴$)، در گام ۱، کمینه و بیشینه انفرادی هر یک از توابع هدف به‌وسیله ***COA*** محاسبه می‌شود که در جدول ۳ آمده است.

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

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

مدافع فرض می‌کند 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.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.1.2.5]
[DOI: 10.52547/jamlu.18.1.1]

جدول ٤. نتایج محاسباتی روش تعامل فازی برای ***MDLP***

تکرار	۱	۲	۳	۴	۵
$\overline{\mu}_1$	۱/۰	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸
$\overline{\mu}_2$	۱/۰	۰/۹	۰/۸	۰/۸	۰/۸
$\overline{\mu}_3$	۱/۰	۰/۹	۰/۹	۰/۹۵	۰/۹۵
$\overline{\mu}_4$	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۰/۹۵
$\mu_1(f_1(\boldsymbol{q}^*, \boldsymbol{p}^*))$	۰/۶۷۵	۰/۵۶۹	۰/۵۹۷	۰/۶۴۱	۰/۶۷۲
$\mu_2(f_2(\boldsymbol{q}^*, \boldsymbol{p}^*))$	۰/۶۶۱	۰/۶۳۱	۰/۶۱۴	۰/۶۶۸	۰/۷۱۹
$\mu_3(f_3(\boldsymbol{q}^*, \boldsymbol{p}^*))$	۰/۶۷۳	۰/۶۳۶	۰/۷۲۹	۰/۷۶۳	۰/۸۰۱
$\mu_4(f_4(\boldsymbol{q}^*, \boldsymbol{p}^*))$	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*** به‌قرار زیر می‌باشد:

تکرار ۱: در اولین تکرار، مساله مینی‌ماکس با استفاده از ***COA*** در درجه عضویت مرجع اولیه (۱/۰,۱/۰,۱/۰,۱/۰)حل می‌شود که نتایج آن با مقدار توابع عضویت متناظر در دومین ستون جدول ۴ نشان داده شده‌اند.

تکرار ۲: بر اساس نتایج تکرار ۱، چون رضایت مدافع با این درجه عضویت مرجع حاصل نگردید، مدافع مقدار عضویت مرجع را به‌صورت $\overline{\mu}_1 = ۰/۸$، $\overline{\mu}_2 = ۰/۹$، $\overline{\mu}_3 = ۰/۹$ و $\overline{\mu}_4 = ۱$برای بهبود درجه رضایت μ_4تغییر می‌دهد. برای مقادیر عضویت مرجع بهنگام شده، مساله مینی‌ماکس متناظر به‌وسیله ***COA*** حل می‌شود و مقدار تابع عضویت متناظر در سومین ستون جدول ۴ ارایه شده است.

تکرار ۳: ازآنجاکه رضایت مدافع با این درجه عضویت مرجع در تکرار قبلی حاصل نگردید، مدافع مقدار عضویت مرجع را به‌صورت $\overline{\mu}_1 = ۰/۸$، $\overline{\mu}_2 = ۰/۸$، $\overline{\mu}_3 = ۰/۹$ و $\overline{\mu}_4 = ۱$ برای بهبود درجه رضایت μ_1 و μ_3 و μ_4در مقابل μ_2 تغییر می‌دهد. برای مقادیر عضویت مرجع بهنگام شده، مساله مینی‌ماکس متناظر به‌وسیله ***COA*** حل می‌شود؛ مقدار تابع عضویت متناظر در چهارمین ستون جدول ۴ آمده است.

تکرار ٤: ازآنجاکه رضایت مدافع با این درجه عضویت مرجع در تکرار قبلی حاصل نگردید، مدافع مقدار عضویت مرجع را به‌صورت $\overline{\mu}_1 = ۰/۸$، $\overline{\mu}_2 = ۰/۸$، $\overline{\mu}_3 = ۰/۹۵$ و $\overline{\mu}_4 = ۱$ برای بهبود درجه رضایت μ_1 و μ_2 و μ_4در مقابل μ_3 تغییر می‌دهد. برای مقادیر عضویت مرجع بهنگام شده، مساله مینی‌ماکس متناظر به‌وسیله ***COA*** حل می‌شود؛ مقدار تابع عضویت متناظر در پنجمین ستون جدول ۴ آمده است.

تکرار ۵: عطف به سومین تکرار، رضایت مدافع حاصل نگردید؛ زیرا مقدار μ_2برای جوابش بد است. مدافع مقدار عضویت مرجع را به‌صورت $\overline{\mu}_1 = ۰/۸$، $\overline{\mu}_2 = ۰/۸$، $\overline{\mu}_3 = ۰/۹۵$ و $\overline{\mu}_4 = ۰/۹۵$برای بهبود درجه رضایت μ_1 و μ_2 و μ_3 تغییر می‌دهد. برای مقادیر عضویت مرجع بهنگام شده، مساله مینی‌ماکس متناظر به‌وسیله ***COA***

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.1.2.5]
[DOI: 10.52547/jamlu.18.1.1]

حل می‌شود. مقدار تابع عضویت متناظر در ششمین ستون جدول ۴ نشان داده‌شده 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 ارایه شد. درنهایت با استفاده از یک نمونه عددی تصادفی، کارایی روش حل پیشنهادی نشان داده شده است.

نتایج محاسباتی آشکار نمود که روش ابتکاری ارایه‌شده 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 می‌توانند 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 Azerbayjan), 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.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.1.2.5]

[DOI: 10.52547/jamlu.18.1.1]

[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.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.1.2.5]
[DOI: 10.52547/jamlu.18.1.1]