

ارائه یک مدل پوششی مستحکم‌سازی به‌منظور محافظت از تسهیلات در معرض اختلال در مسئله r - میانه ممانعتی با رویکرد بازی استکلبرگ

سیدپارسا پرواسی^۱، رضا بشیرزاده^۲،* فرید خوش‌الحان^۳

۱. کارشناس ارشد دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی

۲. استادیار دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی

۳. استادیار دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی

(تاریخ دریافت: ۹۵/۰۳/۳۰، تاریخ دریافت روایت اصلاح‌شده: ۹۵/۰۹/۳۰، تاریخ تصویب: ۹۵/۱۲/۲۶)

چکیده

در پژوهش حاضر مدل سه‌سطحی^۱ مکان‌یابی تسهیلات دفاعی^۲ به‌منظور ایجاد پوشش کامل در مسئله r - میانه ممانعتی^۳ ارائه شده است. هدف مدل طراحی مناسب سیستم‌های خدمات‌رسان است، به‌نحوی که آن‌ها بعد از دریافت شدیدترین سناریوی^۴ اختلالات مهاجم (رقیب) از حداکثر توان خود برای سرویس‌دهی مجدد استفاده کنند. از این‌رو، تسهیلات دفاعی برای محافظت بیشتر از تسهیلات خدمات‌رسان^۵ در نظر گرفته شده است و در این زمینه مکان‌یابی بهینه این تسهیلات دفاعی دنبال می‌شود. این مدل سه‌سطحی براساس بازی‌های رهبر-پیرو و به‌صورت مدافع-مهاجم-مدافع برای پیشنهاد شده است. مدافع برای ایجاد اطمینان بیشتر از ادامه فعالیت تسهیلات خدمات‌رسان بعد از اختلال مهاجم، قصد تأسیس تعداد تسهیلات دفاعی در مکان‌های بالقوه را دارد. مکان‌یابی این تسهیلات با توجه به هزینه ثابت تأسیس تسهیلات و هزینه‌های جاری سیستم صورت می‌پذیرد. البته با توجه به این محدودیت که هر تسهیل خدمات‌رسان حداقل باید در شعاع پوشش یک تسهیل دفاعی باشد (سطح اول)، هزینه‌های جاری سیستم ممکن است تحت تأثیر شدیدترین سناریوی اختلالات مهاجم مشخص شود. این مسئله به‌عنوان یک بازی استکلبرگ استاتیک بین مهاجم (سطح ۲) و مدافع (سطح ۳) مدل‌سازی شده است. به‌منظور حل مدل، دو روش به‌کار گرفته شده است. در رویکرد اول، از شمارش صریح^۶ برای سطح اول و دوم و حل دقیق برای سطح سوم استفاده شده است. در رویکرد دوم، یک روش ترکیبی الگوریتم ژنتیک-شمارش صریح-حل دقیق به‌منظور حل مسائل در زمان معقول طراحی شده است. با مقایسه نتایج روش حل الگوریتم فرا ابتکاری پیشنهادی نسبت به روش دقیق در تعدادی از نمونه‌ها، نتایج محاسباتی بیانگر عملکرد مناسب این الگوریتم است.

واژه‌های کلیدی: بازی استکلبرگ، برنامه‌ریزی سه‌سطحی، پوشش کامل، محافظت احتمالی، r - میانه ممانعتی.

مقدمه

اهمیت این زیرساخت‌ها، به‌دنبال حفظ هرچه مطلوب‌تر این زیرساخت‌ها هستند. مدل‌های ممانعتی با افزایش امنیت و مستحکم‌سازی^۹ زیرساخت‌های حیاتی سعی در حفظ تداوم خدمات‌رسانی به مشتریان در هنگام بروز اختلالات عمده و غیرعمده دارند. ولمر^{۱۰} در سال ۱۹۶۴ برای اولین بار مدل ممانعتی را در بهینه‌سازی شبکه‌ها به‌کار گرفت [۳].

در ادامه، ادبیات مسئله مطرح و همچنین مسئله و فرضیات آن تشریح می‌شود که در این زمینه یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح سه‌سطحی (TIP) برای مسئله پیشنهاد شده است. سپس روش حل برای مدل پیشنهادی ارائه می‌شود و روش‌های حل، برای تعدادی مسئله نمونه با داده‌های تصادفی پیاده‌سازی می‌شود. درنهایت، نتایج و پیشنهادهاى تحقیقات آتی ارائه می‌شود.

زیرساخت‌های^۷ حیاتی^۸ شامل دارایی‌های فیزیکی مشخص از یک سیستم است که از دست‌دادن آن‌ها به اختلالات شایان توجهی در خدمت‌رسانی منجر می‌شود؛ مانند ارتباطات حمل‌ونقل مثل پل‌ها، تونل‌های و راه‌آهن، مراکز اورژانسی خدمات‌رسان به بیماران، نیروگاه‌های برق و سدها، دکل‌های مخابراتی و نمادهای ملی یک کشور که از دست‌دادن آن به شدت روحیه عمومی را تضعیف می‌کند [۱]؛ برای مثال، بمب‌گذاری سال ۲۰۰۳ استانبول از سوی القاعده در سرکنسولگری و بانک بریتانیا، ۵۷ نفر کشته غیرنظامی و ۷۰۰ زخمی به‌جای گذاشت [۲]. از این‌رو، دولتمردان کشورها با توجه به بودجه در دسترس و براساس

اسکاپرا و چرچ مسئله r -میانۀ ممانعتی را به صورت از بین رفتن یک زیرمجموعه R نایی از P تسهیل تعریف کردند که موجب بیشینه شدن متوسط مسافت سرویس دهی یا کل مسافت موزون می شود [۸]. سپس آن ها در سال ۲۰۰۸ دو رویکرد حل مختلف برای این مسئله پیشنهاد دادند [۶، ۹]. براساس این مدل مستحکم سازی، پژوهش های دیگری نیز با اضافه کردن فرضیات جدیدی به مسئله ارائه شده اند؛ مانند ظرفیت تسهیلات [۱۰]، محدودیت بودجه امنیتی [۱۱] و تعدادی تصادفی از تلفات ممکن [۷، ۱۲]. لوسدا^{۱۸} و همکاران یک مدل عدم قطعیت با نام مسئله ممانعتی احتمالی با سطوح شدت ممانعت برای مسئله r -میانۀ ممانعتی ارائه دادند [۱۳]. سپس ژو^{۱۹} و همکاران مسئله r -میانۀ ممانعتی با مستحکم سازی احتمالی را بررسی کردند. هدف این مسئله شناسایی تسهیلات آسیب پذیر و ارائه راهبردی برای حفاظت از این تسهیلات بود [۱۴]. در پژوهش های اخیر، به مکان یابی و تأثیر آن بر کاهش ریسک و هزینه های آتی تسهیلات در معرض اختلال توجه شده است [۱، ۴، ۱۵، ۱۶]. برای اولین بار آکسن^{۲۰} و همکاران پژوهشی ارائه دادند که به صورت مسئله سه گانه جایابی، مستحکم سازی و ممانعتی فرموله شد [۱]. آکسن و همکاران مفهوم ممانعت جزئی و برون سپاری تقاضا پس از ممانعت را برای اولین بار مطرح کردند [۲].

در مقابل، در پژوهش حاضر یک مدل سه سطحی براساس یک رویکرد مدافع-مهاجم-مدافع تحت یک بازی استکلبرگ پایه گذاری شده است که هر دو رویکرد RIM و RIC در قالب یک مدل به صورت هم زمان ارائه شده است. به این ترتیب، در سطح اول آن مدل براساس رویکرد RIC و در سطح سوم آن مدل براساس رویکرد RIM مدل سازی شده است.

بیان مسئله

همان طور که در بخش مرور مبانی نظری بیان شد، پژوهش هایی که در زمینه ادبیات ممانعتی ارائه شده است، بدین صورت بوده است که محافظت از تسهیلات در برابر حملات مهاجم، توسط خود تسهیلات انجام می شده است، اما در واقعیت این مسئله رخ نمی دهد. در دنیای

مروری بر مبانی نظری و پیشینه تحقیق

از مدل های ممانعتی در تشخیص مسیرهای ارتباطی یا دارایی های حساس یک سیستم در یک شبکه عرضه^{۱۱} استفاده می شود. فرض کنید در یک شبکه عرضه عمومی می توان نقاط استقرار تسهیلات خدمتی را گره ها و راه های ارتباطی بین نقاط تقاضا و تسهیلات را یال ها در نظر گرفت. اگر یک یا چند تسهیل در معرض خطر قرار گیرند یا از بین روند، هزینه اضافی برای تولید و حمل و نقل به سیستم تحمیل می شود. به طور معمول، ایجاد اختلال در این سیستم ها به دو صورت ممانعت روی گره ها و ممانعت روی یال ها مطرح می شوند. مدل های ارائه شده در زمینه ممانعت گره ای به دو دسته مدل های r -پوششی ممانعتی (RIC)^{۱۲} و مدل های r -میانۀ ممانعتی (RIM)^{۱۳} تقسیم می شوند [۴].

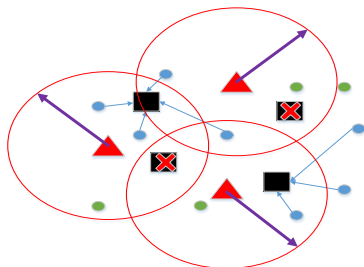
۱. مدل های r -پوششی ممانعتی

هدف این گونه مسائل مکان یابی تسهیلات این است که پوشش دهی تقاضاها بیشینه شود؛ برای مثال، در مکان یابی ایستگاه آتش نشانی لازم است ایستگاه ها به گونه ای مکان یابی شوند که نقاط تقاضا در یک حداکثر فاصله سرویس دهی یا زمان سفر مشخص قرار گیرند [۵]. چرچ^{۱۴} و همکاران برای اولین بار مدل های r -پوششی ممانعتی را در مسائل ممانعت تسهیلات به کار گرفتند. در آن پژوهش، مسئله r -پوششی ممانعتی را به صورت زیر تعریف کردند: از میان P مکان سرویس دهی مختلف، زیرمجموعه ای از R تسهیل انتخاب شود که در صورت از بین رفتن آن ها، بیشترین کاهش در پوشش دهی رخ دهد [۵]. اسکاپرا^{۱۵} و چرچ مسئله حداکثر پوشش^{۱۶} را بیان کردند. فرض اساسی این مدل ممانعتی جدید این بود که بیشترین تعداد الگوهای ممانعتی مخرب را از طریق تعداد مشخصی مستحکم ساز پوشش دهد [۶]. همچنین، لیبراتور و همکاران در ابتدای پژوهش خود مدل حداکثر پوشش را از منظر مستحکم ساز ارائه دادند و سپس مدل حداکثر پوشش احتمالی^{۱۷} را ارائه دادند [۷].

۲. مدل های r -میانۀ ممانعتی

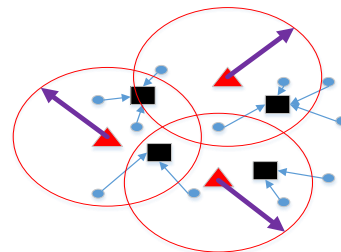
چرچ و همکاران برای اولین بار مدل های r -میانۀ ممانعتی را در مسائل ممانعت تسهیلات به کار گرفتند [۵]. همچنین،

۱- الف به‌روشنی پیداست، هر واحد دفاعی شعاع پوششی و هر مشتری به تسهیل خدمات‌رسانی اختصاص یافته است. شکل ۱- ب که بعد حمله مهاجم را نشان می‌دهد، یک راه‌حل تقریباً بهینه برای شکل ۱- الف است. طبق شکل ۱- ب، از بعضی از تسهیلات خدمات‌رسان ممانعت شده (مربع‌های ضربدر قرمز) و در نتیجه عملیات تخصیص مشتریان دوباره صورت گرفته است. همچنین، به دلیل اینکه مجموع کل ظرفیت تسهیلات خدمات‌رسان از کل تقاضای موجود مشتریان کمتر شده است، تأمین تقاضا از داخل سیستم برای بعضی از مشتریان با هزینه بیشتری نسبت به سایر مشتریان صورت می‌گیرد که این مشتریان با رنگ سبز نشان داده شده‌اند.



۱- ب) مسئله پوششی مستحکم‌سازی پس از ممانعت

امروزی سامانه‌ها و زیرساخت‌هایی وجود دارند که از این تسهیلات خدمات‌رسان محافظت می‌کنند؛ مانند پدافندهایی که از تأسیسات حساس هر کشور محافظت می‌کنند. در نتیجه، در پژوهش حاضر تسهیلاتی به‌عنوان تسهیلات دفاعی با شعاع برد مؤثر در نظر گرفته شده است تا با توجه به شعاع عملیاتی‌شان از تسهیلات خدمات‌رسان در برابر حملات مهاجم محافظت کنند. در شکل ۱، نمونه‌ای از مسئله پوششی مستحکم‌سازی به‌منظور محافظت از تسهیلات در معرض اختلال در مسئله ۲- میانه ممانعتی مشاهده می‌شود. دایره‌های آبی نمایانگر متقاضیان، مربع‌های سیاه نمایانگر تسهیلات خدمات‌رسان و مثلث‌های قرمز نمایانگر تسهیلات دفاعی است. همان‌طور که در شکل



۱- الف) مسئله پوششی مستحکم‌سازی قبل از ممانعت

شکل ۱. مسئله پوششی مستحکم‌سازی به‌منظور محافظت از تسهیلات در معرض اختلال در مسئله ۲- میانه ممانعتی

تسهیلات خدمات‌رسان ایجاد کند. در سطح سوم، مسئله دوباره از دید مدافع بررسی می‌شود. همچنین، سطح سوم به‌صورت مسئله ۲- میانه مدل‌سازی شده است؛ بنابراین، بدیهی است اهداف سطح سوم با اهداف سطح دوم در تعارض باشد و بازی استکلبرگ در سطح دوم و سوم مانند سطح اول و دوم دیده شود. با توجه به اینکه بعد از حمله مهاجم قسمتی از ظرفیت تسهیلات خدمات‌رسان از بین می‌رود، در سطح سوم مدافع سعی دارد مجموع هزینه‌های خدمات‌رسانی به متقاضیان را بعد از ممانعت کمینه کند. به‌این‌منظور، با توجه به ظرفیت باقیمانده تسهیلات خدمات‌رسان قسمتی از مشتریان را به تسهیلات خدمات‌رسان تخصیص می‌دهد و باقیمانده تقاضا مشتریان را با هزینه‌ای بیشتر از حالت معمول به تسهیلات خدمات‌رسان تخصیص می‌دهد. البته در سطح سوم با در نظر گرفتن احتمال موفقیت در محافظت از سیستم مستحکم‌شده در راستای واقعی‌تر شدن مدل سعی شده است [۱۴].

ایده اصلی مدل سه‌سطحی مکان‌یابی تسهیلات دفاعی به‌منظور ایجاد پوشش کامل در مسئله ۲- میانه ممانعتی طراحی یک شبکه خدمات‌رسان با هدف حداقل‌سازی مجموع هزینه‌های ثابت و عملیاتی یک سیستم، تحت معرض اختلالات بوده است. به‌این‌ترتیب، در سطح اول مدل مدافع سعی دارد از بین مکان‌های بالقوه برای احداث تسهیلات دفاعی، مکان‌هایی را انتخاب کند که هر تسهیل خدمات‌رسان حداقل تحت پوشش یک تسهیل دفاعی باشد. شایان ذکر است تسهیلات دفاعی دارای یک حداکثر شعاع پوششی ویژه خود هستند و در نتیجه تسهیلات خدمات‌رسانی خارج از این شعاع پوشش نمی‌توانند از آن تسهیلات دفاعی خدمات دریافت کنند. در سطح دوم، اهداف مدل در تعارض با اهداف سطح اول مدل است. در نتیجه، بین سطوح اول و دوم یک بازی استکلبرگ پدید می‌آید و مدل از دید مهاجم به مسئله نگاه می‌کند. در سطح دوم مدل، مهاجم سعی دارد با توجه به محدودیت بودجه، بیشترین اختلال را در

اندیس‌ها و مجموعه‌ها

مسافت زمانی که بیش از ظرفیت تسهیلات به آن‌ها تخصیص داده شود
 هزینه ارسال هر واحد از تقاضا به ازای هر واحد مسافت

CS

I مجموعه مشتری‌ها و اندیس $i \in I$
 J مجموعه تسهیلات خدمت‌رسان و اندیس $j \in J$
 K مجموعه مکان‌های بالقوه به منظور احداث تسهیلات دفاعی و اندیس $k \in K$

متغیرها

X_k اگر در مکان بالقوه k ام تسهیلات دفاعی احداث شود ۱ و در غیر این صورت صفر؛
 U_{ij} اگر مشتری i ام به تسهیل خدمات‌رسان j ام تخصیص یابد ۱ و در غیر این صورت صفر؛
 V_{ij} اگر مشتری i ام به تسهیل خدمات‌رسان j ام اضافه بر ظرفیت آن تسهیل تخصیص یابد ۱ و در غیر این صورت صفر؛
 Y_{jk} اگر تسهیل خدمات‌رسان j ام تحت پوشش تسهیل دفاعی مستقر در مکان k ام قرار گیرد ۱ و در غیر این صورت صفر؛
 S_j اگر از تسهیل j ام توسط مهاجم ممانعت شود ۱ در غیر این صورت صفر.

پارامترها

a_i تقاضای مشتری i ام
 d_{ij} فاصله مشتری i ام از تسهیل خدمت‌رسان j ام
 c_k هزینه احداث تسهیل دفاعی در مکان k ام
 B_{att} بودجه ممانعت مهاجم
 q_j ظرفیت تسهیل خدمت‌رسان j ام
 r شعاع منطقه تحت پوشش هر تسهیل دفاعی
 P_{jk} احتمال موفقیت سیستم تدافعی مستقر در مکان k ام در محافظت از تسهیل خدمات‌رسان j ام
 f_{jk} فاصله مکان احداث تسهیلات دفاعی k ام تا تسهیل خدمات‌رسان j ام
 CE هزینه ارسال هر واحد از تقاضا به ازای هر واحد

$$Z_1 = \min_{X,Y} (Z_2 + \sum_{k \in K} c_k X_k) \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_{k \in K} Y_{jk} \geq 1 \quad ; \forall j \in J \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J} Y_{jk} \leq M X_k \quad ; \forall k \in K \quad (3)$$

$$f_{jk} Y_{jk} \leq r \quad ; \forall k \in K, j \in J \quad (4)$$

$$Y_{jk'} = 1 \quad ; \forall k' \in \overline{K_j}, j \in J \quad (5)$$

$$X_k \in 0,1 \quad ; \forall k \in K \quad (6)$$

$$Y_{jk} \in 0,1 \quad ; \forall k \in K, j \in J \quad (7)$$

$$Z_2 = \max_S Z_3 \quad (8)$$

s.t.

$$\sum_{j \in J} S_j \leq B \quad (9)$$

$$S_j \in 0,1 \quad ; \forall j \in J \quad (10)$$

$$Z_3 = \min_U \left(CS \times \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} a_i d_{ij} U_{ij} \right) + \left(CE \times \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} a_i d_{ij} V_{ij} \right) \quad (11)$$

s.t.

$$\sum_{j \in J} U_{ij} \leq 1 \quad ; \forall i \in I \quad (12)$$

$$\sum_{i \in I} a_i U_{ij} \leq q_j \cdot (1 - S_j) \left(\prod_{k \in K} (1 - p_{jk} Y_{jk}) \right) + q_j \cdot \left(1 - \prod_{k \in K} (1 - p_{jk} Y_{jk}) \right) \quad ; \forall j \in J \quad (13)$$

$$\sum_{j \in J} U_{ij} + \sum_{j \in J} V_{ij} = 1 \quad ; \forall i \in I \quad (14)$$

$$U_{ij} \in 0,1 \quad ; \forall i \in I, j \in J \quad (15)$$

$$V_{ij} \in 0,1 \quad ; \forall i \in I, j \in J \quad (16)$$

مجموعه‌ای از مکان‌های تسهیلات فعال دفاعی تعریف کرد که در فاصله مجاز r از تسهیل زام قرار دارد. روابط ۶ و ۷ نشان می‌دهند متغیرهای X_k و Y_{jk} که متغیرهای تصمیم‌گیری مدافع در سطح اول به حساب می‌آیند، متغیرهایی باینری هستند.

هدف سطح دوم (Z_2) حداکثرسازی تابع هدف سطح سوم (حداقل هزینه سرویس‌دهی مدافع پس از ممانعت) است (رابطه ۸). بدین منظور، مهاجم از متغیر تحت کنترل خود، یعنی متغیر ممانعت S_j استفاده می‌کند. همچنین، محدودیت حداکثر بودجه ممانعت (توان تهاجمی) مهاجم در رابطه ۹ نشان داده شده است. رابطه ۱۰ نشان می‌دهد مسئله برنامه‌ریزی مهاجم در سطح دوم یک مدل ممانعت کامل با متغیرهای باینری S_j است.

تابع هدف سطح سوم در رابطه ۱۱ از دو قسمت تشکیل شده است. قسمت اول شامل مجموع هزینه خدمات‌رسانی به متقاضیان از طریق ظرفیت باقیمانده تسهیلات خدمت‌رسان است. هزینه اضافی زمانی بر سیستم تحمیل می‌شود که براساس ممانعت، ظرفیت تسهیلات از کل تقاضا موجود کمتر شود و مدافع مجبور باشد کل مشتریان داخل سیستم را پوشش دهد. قسمت دوم تابع هدف سطح

روابط ۱ تا ۷ سطح اول، ۸ تا ۱۰ سطح دوم و ۱۱ تا ۱۶ سطح سوم مدل مدافع-مهاجم-مدافع را نمایش می‌دهند. هدف سطح اول (رابطه ۱) حداقل‌سازی مجموع هزینه‌های ثابت استقرار تسهیلات دفاعی ($\sum_{k \in K} c_k \cdot X_k$) و مجموع هزینه‌های جاری بعد از ممانعت (Z_2) است. رابطه ۲ تضمین می‌کند هر تسهیل خدمات‌رسان حداقل تحت محافظت یک تسهیل دفاعی قرار گیرد (پوشش کامل). براساس رابطه ۳، اگر در محل k تسهیل دفاعی مستقر نشود، هیچ تسهیلی نیز تحت محافظت آن قرار نمی‌گیرد، ولی در صورت احداث، محدودیتی برای تعداد تسهیلات تحت محافظت تسهیل دفاعی وجود ندارد (M یک عدد مثبت خیلی بزرگ). براساس رابطه ۴، فقط تسهیلاتی می‌توانند تحت محافظت یک تسهیل دفاعی باشند که حداکثر فاصله r را با آن داشته باشند. روابط ۳ و ۴ صفرشدن متغیرهای تصمیم‌گیری Y_{jk} مربوط به تسهیلاتی را تضمین می‌کند که شرایط لازم را راستای محافظت‌شدن ندارند، ولی برای تخصیص مقدار یک برای متغیر مربوط به تسهیلاتی که در قلمرو تحت کنترل یک تسهیل دفاعی احداث شده قرار می‌گیرند تضمینی وجود ندارد. این وظیفه به کمک رابطه ۵ امکان‌پذیر می‌شود. می‌توان \bar{K}_j را

ابتکاری شبیه‌سازی فلزات^{۲۳} و جست‌وجوی همسایگی^{۲۴} را پیشنهاد داده‌اند [۲۴].

در این پژوهش، برای حل مسئله دو روش ارائه شده است. روش اول یک الگوریتم فرا ابتکاری بر پایه الگوریتم ژنتیک است. همچنین، مسئله بیان‌شده دارای متغیرهای باینری در هر سه سطح مسئله است. از این‌رو، می‌توان جواب دقیق مسئله را با شمارش صریح به‌دست آورد که این جواب می‌تواند مبنای مقایسه عملکرد روش فرا ابتکاری قرار گیرد. در رویکرد اول، الگوریتم ژنتیک برای سطح اول، شمارش صریح برای سطح دوم و حل دقیق برای سطح سوم به‌کار گرفته شده‌اند. در رویکرد دوم، از شمارش صریح برای سطوح اول و دوم و حل دقیق برای سطح سوم استفاده شده است.

۱. روش حل ژنتیک - شمارش صریح (کامل) - دقیق

الگوریتم ژنتیک (GA) یکی از معروف‌ترین الگوریتم‌های فرا ابتکاری است که برای حل بسیاری از مسائل واقعی نیز به‌کار گرفته شده است. در این روش، در میان جواب‌های موجود، جواب‌های برتر که موجب بهبود تابع هدف می‌شوند، برای تولید نسل بعدی جواب‌ها انتخاب می‌شوند و این سیر تکاملی تا ارضاشدن شرایط توقف، تکرار می‌شود. هالند برای اولین بار این الگوریتم را در سال ۱۹۷۵ ارائه داد [۲۵].

در اینجا، به‌منظور تصمیم‌گیری در زمینه مکان‌یابی تسهیلات در سطح اول مسئله ارائه‌شده از الگوریتم GA استفاده شده است. با توجه به ماهیت باینری متغیرهای تصمیم‌گیری ایجاد تسهیلات در مکان‌های بالقوه (x_k) یک رشته باینری به طول تعداد مکان‌های بالقوه به‌منظور نمایش ساختار جواب در نظر گرفته شده است. برای هر مکان مقدار صفر به‌معنی عدم انتخاب و عدد یک نشان‌دهنده بازشدن یک تسهیل دفاعی در آن مکان است. در الگوریتم ژنتیک، به‌منظور تعیین شایستگی هر جواب از تابع هدف دوبخشی سطح اول استفاده می‌شود. بخش اول شامل برآورد حداکثر هزینه خدمات‌رسانی تحت مختل‌کننده‌ترین سناریوهای مهاجم است و همچنین بخش دوم شامل هزینه‌های ثابت ایجاد تسهیلات دفاعی می‌باشد. مراحل اجرای الگوریتم در شبه کد شکل ۲ بیان می‌شود.

سوم به مشتریانی مربوط است که با توجه به ظرفیت موجود به هیچ تسهیلی تخصیص نیافتند. در نتیجه، رابطه ۱۲ بیان می‌کند هر مشتری می‌تواند حداکثر به یک تسهیل تخصیص داده شود. محدودیت ظرفیت ارائه خدمات هر تسهیل در رابطه ۱۳ در نظر گرفته شده است. براساس این محدودیت، میزان ظرفیت تقاضای تخصیص داده‌شده به هر تسهیل حداکثر به اندازه امید ریاضی ظرفیت آن تسهیل پس از در نظر گرفتن شرایط ممانعت مهاجم و مستحکم‌سازی مدافع است. در رابطه ۱۴ بیان می‌شود در صورتی که مشتریان نتوانند به هیچ تسهیلی به‌علت کمبود ظرفیت تخصیص یابند ($U_{ij} = 0$)، باید متغیر مربوط به تخصیص با حالت هزینه اضافه (بیش از حالت معمول) فعال شود تا مشتری بتواند به تسهیلی تخصیص یابد ($V_{ij} = 1$). روابط ۱۵ و ۱۶ نیز محدودیت علامت متغیر تصمیم‌گیری مدافع در سطح سوم است.

حل مسئله

مسئله بهینه‌سازی سه‌سطحی، حالتی توسعه‌یافته از مسئله بهینه‌سازی دوسطحی^{۲۱} است. ساده‌ترین خانواده مسائل دو سطحی - که در آن تمام توابع، پیوسته و خطی است - نیز NP-hard است [۱۷، ۱۸]. حتی اگر تمام توابع تعریف‌شده در مسائل دو سطحی خطی باشند، ناحیه موجه باز هم یک مجموعه غیرمحدب است [۱۹]. با وجود این، به‌دلیل کاربرد و اهمیت برنامه‌ریزی دو سطحی تاکنون تلاش‌های زیادی برای حل آن انجام گرفته است. روش‌های محاسباتی حل آن را می‌توان در کل به سه دسته رویکرد شمارش رئوس، رویکرد کوهن-تاگر^{۲۲} و رویکرد تابع جریمه تقسیم‌بندی کرد [۲۰].

در کنار رویکردهای بالا، با توجه به مشکلات متعدد در حل دقیق مسائل دوسطحی و پیچیدگی آن‌ها و همچنین کاربرد و اهمیت این مدل‌ها در مسائل دنیای واقعی و لزوم دستیابی به جواب در زمان معقول، به‌کارگیری روش‌های ترکیبی فرا ابتکاری و دقیق اصلی‌ترین گزینه برای حل این کلاس از مسائل به حساب می‌آید [۱۹]. نمونه‌های موفق از کاربرد الگوریتم ژنتیک در حل مسائل دو سطحی و سه‌سطحی را می‌توان در [۲۱، ۲۲، ۲۳] یافت. همچنین، علی‌اکبریان و همکاران در سال ۲۰۱۵ روش‌های فرا

Initialize: Fix charge of defensive centers (c), Distance matrix (f)
Generate a population of N candidate solutions X_k
For each solution (state of defensive centers)
if all facilities are covered **then** X_k will be saved in Pop_0 ;
Input
 Rate β of elitism
 Rate γ of mutation
 MaxIter
 StopCriteria
 iter = 1 ;
While stopping criteria satisfied
Repeat
 $n_e = \beta.N$ /*number of elitism*/
Select the best n_e solutions in Pop_{iter-1} and **Save** them in Pop_{iter}
 $n_c = N - n_e$ /*number of chromosomes*/ $i = 1$;
While $i \leq n_c$
Select two parents
Generate two new Chromosomes by crossover
For each new Chromosome
 $r = rand [0,1]$;
If $r \leq \gamma$ /*mutation*/
 Mutate the chromosome
End if
If all facilities are covered/* X_k is accepted*/
Calculate total fix charge:/*Part1*/
Calling Attacker-Defender solver to calculate Z_2 /*Part2*/
 $f(x) = Part1 + Part2$;
 $i = i + 1$;
End if
End
End
 $iter = iter + 1$;
Until $iter < MaxIter$
End
Output Best solution found

شکل ۲. شبیه‌سازی رویکرد ژنتیک - شمارش صریح (کامل) - دقیق

Core i7 و حافظه داخلی 4 GB 1333 MHz DDR3 و سیستم عامل Windows 7 اجرا شده است.

۱. ایجاد مسئله نمونه

ایجاد تصادفی پارامترهای مسئله براساس رویکرد به‌کار گرفته‌شده در پژوهش آکسن و همکاران در سال ۲۰۱۴ صورت پذیرفته است [۲]. در جدول ۱، این رویکرد مشاهده می‌شود. سپس برای ۳ تا ۷ تسهیلات خدمات‌رسان ($m = 2,3,4,5,6$)، ۳ تا ۴ مسئله نمونه تصادفی در هر اندازه تولید شد؛ برای مثال، نمونه ۵۱ یک مسئله با ۶ تسهیلات خدمات‌رسان، ۵۰ مشتری و ۱۸ مکان بالقوه برای تسهیلات دفاعی با مختصات تصادفی در یک فضای مربعی ۱۰۰۰ در ۱۰۰۰ است.

نتایج محاسباتی

هدف از انجام دادن آزمایش‌های محاسباتی، اعتبارسنجی مدل است. از آنجا که مسائل نمونه برای استناد در مورد مدل پیشنهادی در ادبیات موضوع وجود ندارد، تعدادی مسئله نمونه به‌طور تصادفی تولید شدند. سطح اول و دوم الگوریتم‌های ترکیبی پیشنهادی روی نرم‌افزار MATLAB 2012 کدنویسی شد. به‌منظور حل دقیق سطح سوم که یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح است، برای هر جواب ایجادشده در سطح دوم، کد نوشته‌شده در نرم‌افزار GAMS 24.1.3 فراخوانی شده و با سلور سیپلکس^{۲۵} حل شده است. کدهای نوشته‌شده روی رایانه با پردازنده 2/8 GHz Intel

جدول ۱. ایجاد مسئله نمونه برای مدل طرح شده

پارامترهای مسئله	مقدارها
m	{2,3,4,5,6}
$ I $	$10 \times m$
$ J $	$m + 1$
$ K $	$3(m + 1)$
(x_i, y_i)	$1000 \times (U(0,1), U(0,1))$
(x_j, y_j)	$1000 \times (U(0,1), U(0,1))$
(x_k, y_k)	$1000 \times (U(0,1), U(0,1))$
d_{ij}	$\left[(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$
f_{jk}	$\left[(x_j - x_k)^2 + (y_j - y_k)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$
a_i	Random {5,10,15,...,100}
c_k	Random {1000,2000,...,20000}
B_{att}	{2,3}, ($B_{att} = 2$ for $m = 2, 3$ and $B_{att} = 3$ for $m = 4, 5, 6$)
q_j	When q' and sum are: $q' = rand(1, m + 1)$, $sum = (1 + U(0,1)) \times \left(\sum_{i \in I} a_i \right)$, q_j is obtained by truncating the $(q'_j \times sum) / \left(\sum_{j \in J} q'_j \right)$ to the nearest integer multiples of 20.
r	60
P_u	0.95 if $f_{jk} = 0$
P_l	0.15 if $f_{jk} = r$
P_{jk}	$P_l + \frac{(P_u - P_l) * (r - f_{jk})}{r}$
CS	2
CE	5

۲. تنظیم پارامترها

ترکیب مناسب پارامترهای الگوریتم‌های فرا ابتکاری بر کیفیت جواب نهایی تأثیر فراوانی دارد [۲۶]. از این‌رو، به‌منظور مشخص کردن پارامترهای اثربخش‌تر، در این بخش از روش تاگوچی استفاده شده است. با توجه به این روش زمانی که مسئله بهینه‌سازی مطرح است، می‌توان از رابطه

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right)$$

بعدی استفاده کرد: y_i در اینجا متغیر پاسخ است. در این بخش، تعیین بهینه فاکتورهای الگوریتم‌های فرا ابتکاری ژنتیک صورت

می‌گیرد. فاکتورهای الگوریتم‌های ذکر شده در جدول ۲ قابل مشاهده است. مجموعه‌ای از ۱۷ نمونه در ۵ سایز مختلف با استفاده از روش بخش ایجاد مسئله نمونه تولید شده است. هر نمونه سه بار حل شد و از میانگین آن‌ها استفاده شد تا حل به‌دست‌آمده قابل‌اعتمادتر شود. از روش PRD به‌منظور اندازه‌گیری عملکرد روش‌ها استفاده شده است. روش PRD در مسائل مینیمم‌سازی به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

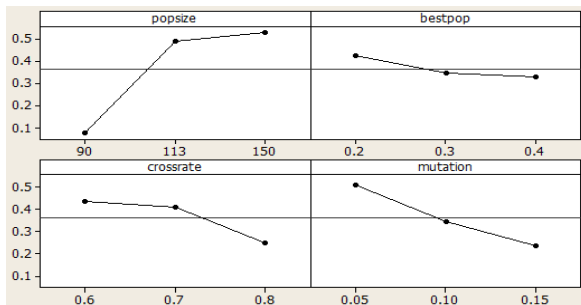
$$PRD = \frac{OF_i - OF_{min}}{OF_{max} - OF_{min}}$$

مختلف، ابتدا رویکرد شمارش صریح- شمارش صریح- دقیق به‌منظور جواب بهینه سراسری هر یک از آن‌ها محاسبه شد. سپس رویکرد ژنتیک- شمارش صریح- دقیق برای حل نمونه‌ها به‌کار گرفته شد. همچنین، مقدار بهینه تابع هدف سطح (Z_1^*) ، جواب بهینه متغیرها (X^*) و زمان CPU در جدول ۴ برای هر یک از نمونه‌ها نمایش داده می‌شود. به‌علاوه، در شکل ۵ زمان حل دو روش ارائه‌شده برای نمونه‌های عددی به تصویر کشیده می‌شود.

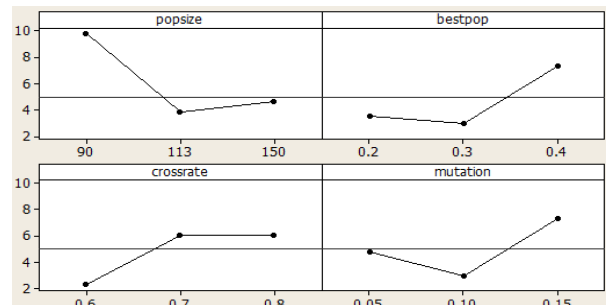
که OF_i و OF_{max} و OF_{min} به ترتیب جواب به‌دست‌آمده در نمونه i و بهترین و بدترین راه‌حل به‌دست‌آمده در سائز مورد نظر مسئله هستند. روش تاگوچی برای الگوریتم ژنتیک L9 پیشنهاد کرده است. نسبت S/N و Mean برای الگوریتم ژنتیک در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود. با توجه به شکل‌های ۳ و ۴، تنظیم پارامترهای الگوریتم ارائه‌شده در جدول ۳ مشاهده می‌شود.

۳. بررسی نتایج

پس از ایجاد ۱۷ مسئله نمونه تصادفی در پنج اندازه



شکل ۴. نمودار میانگین‌ها برای پارامترهای الگوریتم فرا ابتکاری



شکل ۳. نمودار نسبت S/N برای پارامترهای الگوریتم فرا ابتکاری

جدول ۲. عوامل الگوریتم فرا ابتکاری ژنتیک

فاکتورها	تعداد سطوح	مقدار هر سطح
Popsize * Maxiter	۳	150×30, 113×40, 90×50
Crossover Rate	۳	0.6, 0.7, 0.8
Mutation Rate	۳	0.05, 0.1, 0.15
Best Pop	۳	0.2, 0.3, 0.4

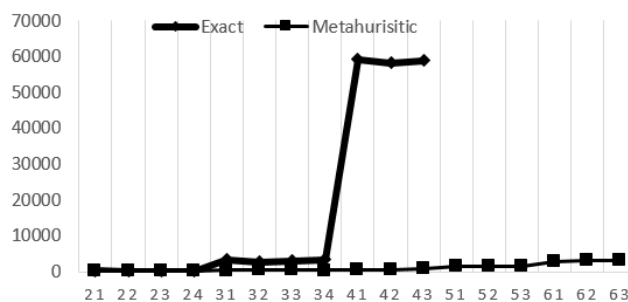
جدول ۳. تنظیم پارامترهای پیشنهادی برای الگوریتم ژنتیک ارائه‌شده

پارامترهای الگوریتم ژنتیک

Popsize * Maxiter	Crossover Rate	Mutation Rate	Best Pop
۵۰ * ۹۰	۰/۸	۰/۱۵	۰/۴

جدول ۴. نتایج محاسباتی روش دقیق و ژنتیک

شمارش صریح - دقیق		شمارش صریح - ژنتیک		CPU time (Sec)	Best Solution	CPU time (Sec)	ΔZ* (%)
B	نمونه‌ها	شمارش صریح - دقیق	شمارش صریح - ژنتیک				
۲	۲۱	۱۷۶۴۷۰	۱۰۱۰۱۰۰۰۰	۱۹۴	۱۷۶۴۷۰	۱۷۱	۰
۲	۲۲	۱۶۸۱۰۰	۱۱۰۰۱۰۱۱۰	۱۳۷	۱۶۸۱۰۰	۱۳۳	۰
۲	۲۳	۲۱۴۵۶۰	۰۰۰۰۱۰۰۰۱	۱۵۶	۲۱۴۵۶۰	۱۵۰	۰
۲	۲۴	۱۶۱۲۲۰	۱۰۰۰۰۰۰۰۱	۱۶۶	۱۶۱۲۲۰	۱۵۷	۰
۲	۳۱	۲۱۲۵۷۰	۱۰۰۰۰۱۰۰۰۰۱۰	۳۴۲۰	۲۱۳۰۲۰	۳۴۹	۰/۲۱۱
۲	۳۲	۲۵۸۰۲۰	۰۰۰۰۱۰۰۱۰۰۰۱	۲۶۵۷	۲۵۸۰۲۰	۳۵۸	۰
۲	۳۳	۳۰۳۷۱۰	۰۱۰۰۰۰۱۰۰۰۱۰	۳۰۴۵	۳۰۳۷۱۰	۳۵۶	۰
۲	۳۴	۲۲۷۱۵۰	۰۱۰۰۰۱۰۱۰۰۰۰	۳۳۵۶	۲۲۷۱۵۰	۳۵۴	۰
۳	۴۱	۳۲۵۲۸۰	۰۰۰۰۰۰۰۱۱۰۰۰۰	۵۹۳۰۱	۳۲۸۱۷۵۰	۶۵۹	۱/۰۶۶
۳	۴۲	۳۶۰۰۴۰	۱۱۱۰۰۰۰۰۰۱۱۰۰۱	۵۸۲۵۷	۳۶۰۸۶۰	۶۶۰	۰/۲۲۷
۳	۴۳	۱۸۵۹۳۰	۱۱۱۰۰۱۰۱۰۰۱۰۱۰۰	۵۸۹۳۳	۱۸۷۵۲۰	۷۰۳	۰/۸۵۵
۳	۵۱				۳۷۹۵۸۰	۱۳۷۸	
۳	۵۲				۳۹۰۷۸۰	۱۴۱۰	
۳	۵۳				۳۳۰۵۱۰	۱۴۳۱	
۳	۶۱				۳۵۱۴۱۰	۲۷۵۶	
۳	۶۲				۴۵۲۴۳۰	۳۰۲۱	
۳	۶۳				۳۴۸۷۳۰	۲۹۶۸	



شکل ۵. مقایسه زمان حل بین روش شمارش صریح - دقیق و ژنتیک - شمارش صریح - دقیق

توابع هدف در نمونه ۲۳ (۹ تسهیل دفاعی، ۳ تسهیل خدمت‌رسان، ۲۰ مشتری) در نظر گرفته شده است. در این بخش، پارامترهای هزینه حمل‌ونقل واحد تقاضا در فاصله واحد (CS) و بودجه ممانعتی (B) به ترتیب در جدول‌های ۵ و ۶ نشان داده می‌شود.

۴. آنالیز حساسیت

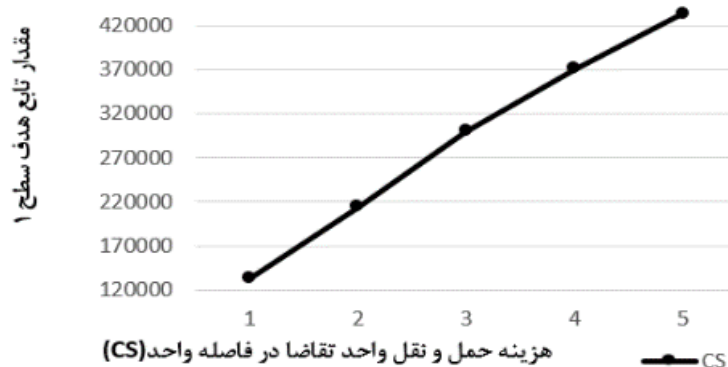
به منظور بررسی رفتار مدل ریاضی، تجزیه و تحلیل حساسیت در مثال عددی انجام می‌گیرد. برای تجزیه و تحلیل حساسیت، آثار تغییر پارامترهای هزینه حمل‌ونقل واحد تقاضا در فاصله واحد (CS) و بودجه ممانعتی (B) در

جدول ۵. تجزیه و تحلیل هزینه حمل‌ونقل واحد تقاضا در فاصله واحد در حالت عادی (CS)

هزینه حمل‌ونقل واحد تقاضا در فاصله واحد (CS)	هزینه در روش شمارش صریح- شمارش صریح- دقیق
۱	۱۳۳۱۴۰
۲	۲۱۴۵۶۰
۳	۲۹۹۸۸۰
۴	۳۷۰۹۹۰
۵	۴۳۳۲۲۰

می‌یابد، مهاجم می‌تواند به تسهیلات خدمات‌رسان بیشتری حمله کند؛ بنابراین، ظرفیت تسهیلات خدمات‌رسان بیشتر از دست می‌رود. در نتیجه، مدافع برای برآورده کردن نیازهای مشتریان، به تخصیص مجدد مشتریان به تسهیلات خدمات‌رسان احتیاج دارد و همچنین نسبت به زمانی که بودجه مهاجم کمتر است، مشتریان بیشتری از خارج سیستم خدمات دریافت می‌کنند. شکل ۷ صحت این موارد را نشان می‌دهد.

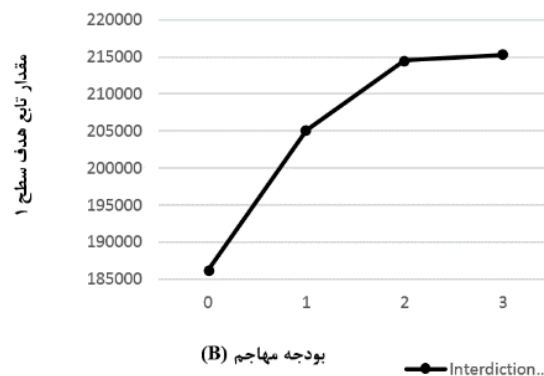
جدول ۵ نشان می‌دهد با افزایش هزینه حمل‌ونقل واحد تقاضا در فاصله واحد در حالت عادی (CS)، هزینه سیستم افزایش می‌یابد، زیرا با افزایش هزینه حمل‌ونقل واحد تقاضا در فاصله واحد هزینه تخصیص مشتریان به تسهیلات افزایش می‌یابد. روند این تغییرات در شکل ۶ نشان داده می‌شود. طبق جدول ۶، انتظار می‌رود با افزایش بودجه مهاجم، هزینه‌ها افزایش یابد. هنگامی که بودجه مهاجم افزایش



شکل ۶. تجزیه و تحلیل هزینه حمل‌ونقل واحد تقاضا در فاصله واحد (CS) روی تابع هدف سطح ۱

جدول ۶. تجزیه و تحلیل بودجه مهاجم (B) روی تابع هدف سطح ۱

بودجه مهاجم (B)	هزینه در روش شمارش صریح- شمارش صریح- دقیق
۰	۱۸۶۱۱۰
۱	۲۰۵۰۸۰
۲	۲۱۴۵۶۰
۳	۲۱۵۳۰۰



شکل ۷. تجزیه و تحلیل بودجه مهاجم (B) روی تابع هدف سطح

صریح- شمارش صریح- دقیق استفاده شده است که بر پایه روش حل شمارش کامل استوار است. طبق نتایج، زمان حل از طریق این روش برای نمونه با اندازه متوسط و بزرگ بسیار طولانی است. در نتیجه، الگوریتم فرا ابتکاری ژنتیک- شمارش صریح- دقیق که از ترکیب الگوریتم فرا ابتکاری برای سطح اول و روش‌های حل دقیق برای سطوح دوم و سوم تشکیل می‌شود، به منظور حل مسئله پیشنهاد شد. نتایج تحقیق و مقایسه آن با جواب‌های دقیق حاصل از روش شمارش صریح- شمارش صریح- دقیق، نشان‌دهنده دقت کافی و معقول بودن زمان اجرای الگوریتم برای مسائلی با اندازه‌های معمول در پژوهش‌های این زمینه است. در نهایت، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی حالت عدم قطعیت در زمینه توان تهاجمی مهاجم در نظر گرفته شود. همچنین، پیشنهاد می‌شود قدرت و شدت محافظت مختلف برای تسهیلات دفاعی با هزینه‌های متفاوت در نظر گرفته شود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، یک مدل سه‌سطحی مکان‌یابی تسهیلات دفاعی به منظور ایجاد پوشش کامل در مسئله r -میان‌ه ممانعتی ارائه شد. طراح سیستم (مدافع) می‌تواند با یک دیدگاه راهبردی و با پیش‌بینی آسیب‌پذیری سیستم در مقابل اختلالات آتی، در زمینه تعداد و مکان تسهیلات دفاعی تصمیم بگیرد. ایده جدید پژوهش حاضر، معرفی مفهوم تسهیلات مستحکم‌ساز است که از تسهیلات خدمت‌رسان در مقابل حمله مهاجم محافظت می‌کند. همچنین، موضوع احتمال موفقیت تسهیلات مستحکم‌ساز به منظور محافظت از تسهیلات خدمت‌رسان با توجه به فاصله آن‌ها از یکدیگر بیان شد. در نهایت، دو دیدگاه پوشش کامل و r -میان‌ه در قالب یک مدل ریاضی به صورت هم‌زمان آورده شده است که به ترتیب این دو دیدگاه در سطوح اول و سوم مدل قابل مشاهده هستند. همچنین، برای حل این مسئله به صورت دقیق از روش حل شمارش

مراجع

1. Aksen, D., Aras, N. & Piyade, N. (2013). "A bilevel p-median model for the planning and protection of critical facilities", *Journal of Heuristics*, Vol. 19, No. 2, PP. 373- 398.
2. Aksen, D., Akca, S. Ş. & Aras, N. (2014). "A bilevel partial interdiction problem with capacitated facilities and demand outsourcing", *Computers & Operations Research*, Vol. 41, PP. 346- 358.
3. Wollmer, R. D. (1964). "Removing arcs from a network", *Journal of Operations Research Society of America*, Vol. 12, No. 6, PP. 934- 940.
4. Aksen, D. & Aras, N. (2012). "A bilevel fixed charge location model for facilities under imminent attack", *Computers & Operations Research*, Vol. 39, No. 7, PP. 1364- 1381.

5. Church, R. L., Scaparra, M. P. & Middleton, R. S. (2004). "Identifying critical infrastructure: The median and covering facility interdiction problems", *Annals of the Association of American Geographers*, Vol. 94, No. 3, PP. 491- 502.
 6. Scaparra, M. P. & Church, R. L. (2008). "An exact solution approach for the interdiction median problem with fortification", *European Journal of Operational Research*, Vol. 189, No. 1, PP. 76- 92.
 7. Liberatore, F., Scaparra, M. P. & Daskin, M. S. (2011). "Analysis of facility protection strategies against an uncertain number of attacks: The stochastic R -interdiction median problem with fortification", *Computers & Operations Research*, Vol. 38, No. 1, PP. 357- 366.
 8. Church, R. L. & Scaparra, M. P. (2007). "Protecting critical assets: The r -interdiction median problem with fortification", *Geographical Analysis*, Vol. 39, No. 2, PP. 129- 146.
 9. Scaparra, M. P. & Church, R. L. (2008). "A bilevel mixed-integer program for critical infrastructure protection planning", *Computers & Operations Research*, Vol. 35, No. 6, PP. 1905- 1923.
 10. Scaparra, M. P. & Church, R. (2012). "Protecting supply systems to mitigate potential disaster a model to fortify capacitated facilities", *International Regional Science Review*, Vol. 35, No. 2, PP. 188- 210.
 11. Aksen, D., Piyade, N. & Aras, N. (2010). "The budget constrained r -interdiction median problem with capacity expansion", *Central European Journal of Operations Research*, Vol. 18, No. 3, PP. 269- 291.
 12. Liberatore, F., Scaparra, M. P. & Daskin, M. S. (2012). "Hedging against disruptions with ripple effects in location analysis", *Omega*, Vol. 40, No. 1, PP. 21- 30.
 13. Losada, C., Scaparra, M. P. & O'Hanley, J. R. (2012). "Optimizing system resilience: A facility protection model with recovery time", *European Journal of Operational Research*, Vol. 217, No. 3, PP. 519- 530.
 14. Zhu, Y., Zheng, Z., Zhang, X. & Cai, K. (2013). "The r -interdiction median problem with probabilistic protection and its solution algorithm", *Computers & Operations Research*, Vol. 40, No. 1, PP. 451- 462.
 15. Medal, H. R., Rainwater, C. E., Pohl, E. A. & Rossetti, M. D. (2014). "A bi-objective analysis of the r -all-neighbor p -center problem", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 72, PP. 114- 128.
 16. Alguacil, N., Delgado, A. & Arroyo, J. M. (2014). "A tri-level programming approach for electric grid defense planning", *Computers & Operations Research*, Vol. 41, PP. 282- 290.
 17. Bard, J. F. (1991). "Some properties of the bilevel programming problem", *Journal of Optimization Theory and Applications*, Vol. 68, No. 2, PP. 371- 378.
 18. Jeroslow, R. G. (1985). "The polynomial hierarchy and a simple model for competitive analysis", *Mathematical Programming*, Vol. 32, No. 2, PP. 146- 164.
 19. Talbi, El-Ghazali. (2013). "Metaheuristics for Bi-level Optimization", *Springer Heidelberg*, Vol. 482.
 20. Sakawa, M. & Nishizaki, I. (2009). "Cooperative and noncooperative multi-level programming", *Springer Science & Business Media*, Vol. 48.
 21. Hejazi, S. R., Memariani, A., Jahanshahloo, G. & Sepehri, M. M. (2002). "Linear bilevel programming solution by genetic algorithm", *Computers & Operations Research*, Vol. 29, No. 13, PP. 1913- 1925.
 22. Li, H., Jiao, Y. & Zhang, L. (2010). "Orthogonal genetic algorithm for solving quadratic bi-level programming problems", *Journal of Systems Engineering and Electronics*, Vol. 21, No. 5, PP. 763- 770.
 23. Konak, A., Kulturel-Konak, S. & Snyder, L. V. (2015). "A game-theoretic genetic algorithm for the reliable server assignment problem under attacks", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 85, PP. 73- 85.
 24. Aliakbarian, N., Dehghanian, F. & Salari, M. (2015). "A bi-level programming model for protection of hierarchical facilities under imminent attacks", *Computers & Operations Research*, Vol. 64, PP. 210- 224.
 25. Holland, J. H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*, The University of MIT press.
-

26. Zandieh, M., Amiri, M., Vahdani, B. & Soltani, R. (2009). "A robust parameter design for multi-response problems", *Journal of computational and applied mathematics*, Vol. 230, No. 2, PP. 463-476.

واژه‌های لاتین به ترتیب استفاده در متن

1. Tri-level
2. Defense Facilities
3. Interdict
4. Worst-case Scenario
5. Service Facilities
6. Explicit Enumeration
7. Infrastructure
8. Critical
9. Fortification
10. Wollmer
11. Supply Network
12. R- Interdiction Covering Problem
13. R- Interdiction Median Problem
14. Church
15. Scaparra
16. Maximum Covering Problem (MCP)
17. Stochastic Maximum Covering Problem
18. Losada
19. Zhu
20. Aksen
21. Bi Level Optimization (BOP)
22. Kuhn-Tucker
23. Simulated Annealing
24. Neighborhood Search
25. Cplex