



پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری

دوره ۵، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۹، صص ۶۰-۸۷

مدل‌سازی ریاضی دوسطحی مسئله مکان‌یابی و استحکام سازی تسهیلات سلسله مراتبی با محدودیت ظرفیت و بودجه تحت شرایط تخریب و حل آن با الگوریتم ژنتیک

راحله خاندوزی*

استادیار، گروه ریاضی و آمار، دانشکده علوم پایه و فنی مهندسی، دانشگاه گنبدکاووس، گلستان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۱۲

تاریخ ارسال: ۱۳۹۸/۱۲/۰۵

چکیده

اهمیت مکان‌یابی و استحکام‌سازی تسهیلات سلسله‌مراتبی در شرایط عملیات خرابکارانه، بسیاری از محققین را به اتخاذ تصمیمات مناسب ترغیب نموده است. در این مقاله، یک مدل برنامه‌ریزی دوسطحی معرفی شده که با در نظر گرفتن عملیات ممانعتی و ازکارافتادگی تسهیلات سلسله‌مراتبی در دو سطح، استراتژی‌های مناسب جهت مکان‌یابی و استحکام‌سازی آن‌ها انتخاب می‌نماید. با توجه به منابع مکان‌یابی موجود، تقاضای خدمات و بدترین سناریوی خرابی تسهیلات در هر دو سطح، تصمیمات تخصیص، مکان‌یابی و استحکام‌سازی تسهیلات موجود تعیین می‌شوند. برای نزدیکی بیشتر به واقعیت سیستم سلسله‌مراتبی از مفاهیم ظرفیت و بودجه استفاده شده است. هدف مدل کمینه‌سازی هزینه مکان‌یابی و فاصله خدمات‌رسانی بین نقاط تقاضا و تسهیلات در هر دو سطح است. در ادامه، چند نمونه عددی از مسئله ارائه و با رویکردهای ترکیبی دوسطحی مبتنی بر الگوریتم‌های فرا ابتکاری ژنتیک و کوچ‌پرندگان برای مسئله سطح اول و روش دقیق برای مسئله سطح دوم حل شده است.

واژگان کلیدی: شبکه سلسله‌مراتبی، مدل دوسطحی، استحکام‌سازی، ممانعت، الگوریتم ژنتیک.



۱- مقدمه

مکان‌یابی تسهیلات در شبکه‌های سلسله‌مراتبی یکی از مسائل ترکیبی مهم در حوزه بهینه‌سازی است که علاوه بر هم‌زمان در نظر گرفتن مسئله مکان‌یابی، مفهوم سلسله‌مراتبی نیز مطرح شده است. به نحوی که دارای چند سطح است و هر سطح از تسهیلات، خدمات مخصوصی را ارائه می‌دهند. کاربردهای زیاد این مسئله در دنیای واقعی و افزایش اختلالات ناشی از حمله‌های عمدی، لزوم توجه بیشتر به این موضوع علمی را افزایش داده است. مدل‌های مکان‌یابی-ممانعتی-استحکامی با افزایش کارایی شبکه‌های سرویس‌دهی به پایداری و امنیت خدمات در هنگام هجوم‌ها کمک می‌کنند. هدف اصلی این مدل‌ها، مکان‌یابی و استحکام‌سازی بهینه تسهیلات، کاهش فاصله سرویس‌دهی و بررسی میزان آسیب‌پذیری تسهیلات در معرض اختلالات است [۱]. دغدغه طراحان سیستم در دسترسی مشتریان به تسهیلاتی که ماهیت سلسله‌مراتبی دارند، نظیر آموزش، خدمات سلامت، مخابرات و مواردی از این قبیل، منجر به مطالعه و بررسی مسئله مکان‌یابی در این تحقیق شد. با توجه به اینکه باید مشتریان به راحتی بتوانند به این خدمات دسترسی داشته باشند و مشاهده شده است که استفاده از خدمات به دلیل تخریب تسهیلات و افزایش فاصله سفر کاهش می‌یابد. بنابراین در نظر گرفتن بحث استحکام‌سازی تسهیلات سلسله‌مراتبی ضروری است.

مدل ارائه‌شده در این مقاله بر اساس رویکرد طراح سیستم یا مدافع-مهاجم و شبکه سلسله‌مراتبی با دو نوع تسهیلات و خدمات فرمول‌بندی شده است. طراح در سطح اول به دنبال تعیین مکان بهینه و استحکام‌سازی تسهیلات نوع ۱ و ۲ به منظور کمینه‌سازی هزینه استقرار تسهیلات و فاصله خدمات‌رسانی بین مشتریان و تسهیلات است. از این رو فرض شده است تعداد نقاط کاندید برای احداث تسهیلات نوع ۱ و ۲ از قبل تعیین شده است. مسئله سطح دوم بر اساس مدل ممانعتی و از دیدگاه مهاجم تدوین شده است. برای این مسئله، یک مدل برنامه‌ریزی خطی دوسطحی ارائه گردیده است. به دلیل NP - سخت بودن مسئله یک روش ترکیبی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای زیرمسئله سطح بالا و روش دقیق برای زیرمسئله سطح پایین پیشنهاد



گردیده است. نتایج عددی و مقایسه با الگوریتم کوچ پرندگان، بیانگر عملکرد خوب روش ارائه شده با توجه به دقت و زمان اجرا است.

۲- ادبیات موضوع

مدل‌های ریاضی ارائه شده در زمینه شبکه‌های سرویس‌دهی سلسله مراتبی به دودسته مدل‌های مکان‌یابی سلسله مراتبی و مدل‌های ممانعتی/استحکامی سلسله مراتبی تقسیم می‌شوند.

۲-۱- مدل‌های مکان‌یابی سلسله مراتبی

در یک شبکه سلسله مراتبی برای ارائه یک یا چند خدمت خاص، سطوح مختلفی از تسهیلات وجود دارد. در این شبکه تسهیلات دارای t سطح بوده که پایین‌ترین سطح، سطح ۱ و بالاترین سطح، سطح t است. نخستین مطالعه در زمینه مکان‌یابی در سیستم‌های سلسله مراتبی توسط ناروللا^{۲۱} (۱۹۸۶ م) صورت گرفت [۲]. سپس پژوهشگران زیادی به مطالعه مدل‌های متفاوتی از این سیستم‌ها پرداختند و مقالات علمی زیادی در این زمینه منتشر شد. این مسائل در سه دسته مدل‌های مبنی بر جریان، میانه و پوششی تقسیم می‌شوند. ماریانو و سورا^{۲۲} (۲۰۰۱ م) یک مسئله مکان‌یابی تسهیلات سلسله مراتبی (HFLP)^{۲۳} با دو سطح تسهیلات ارائه کردند [۳]. تسهیلات سطح پایین‌تر ابتدا درخواست‌ها را پاسخ می‌دهند و سپس برخی از مشتریان برای خدمات بیشتر به تسهیلات سطح بالاتر ارجاع داده می‌شوند. ساهین و سورا^{۲۴} (۲۰۰۷ م) یک HFLP مبنی بر جریان و دوسطی را با هدف کمینه‌سازی فاصله تقاضا-وزن‌دار ارائه کردند [۴]. تکسیرا و انتونز^{۲۵} (۲۰۰۸ م) به بررسی مدل میانه از HFLP با حداکثر قابلیت دسترسی به خدمات برای شبکه ظرفیت‌دار پرداختند [۵]. نوع جدیدی از HFLP، توسط راتیک و همکاران^{۲۶} (۲۰۰۹ م) معرفی شد که به صورت یک مدل پوششی ماکزیمال جهت پوشش سطوح مختلف برای پاسخگویی هر نوع تقاضا فرمول‌بندی شده است [۶]. برخی از کاربردهای HFLP، در حوزه سلامت و اورژانس پزشکی، سیستم مدیریت پسماند، سیستم تولید و توزیع، سیستم آموزشی، سیستم مخابراتی و غیره است [۷-۱۱].

۲-۲- مدل‌های ممانعتی/استحکامی سلسله مراتبی



خرابی تسهیلات می‌تواند ناشی از حوادث و بلایای طبیعی نظیر زلزله، سیل، شرایط نامساعد آب‌وهوایی یا حملات عمدی باشد. فراهانی و همکاران (۲۰۱۴ م) یک مدل مکان‌یابی سلسله مراتبی پوششی تحت خرابی فرمول‌بندی کردند [۱۲]. در این مقاله احتمال خرابی برای تسهیلات در نظر گرفته شده و تسهیلات با سلسله‌مراتب برای حداکثر کردن پوشش تقاضای مشتریان مکان‌یابی می‌شوند. زرین پور و همکاران (۲۰۱۷ م) یک مدل مکان‌یابی-تخصیص برای طراحی شبکه سلسله مراتبی تحت خرابی تسهیلات و جریان دوسطحی و ارجاعی ارائه کردند [۱۳]. میاگوا^{۳۷} (۲۰۱۹ م) یک مدل ریاضی جدید برای تعیین تعداد بهینه تسهیلات سلسله مراتبی زمانی که تسهیلات سطح پایین در معرض تخریب قرار دارند، فرمول‌بندی کرد [۱۴]. فاصله متوسط مشتریان از نزدیک‌ترین تسهیلات باز برای دو نوع رفتار از مشتری به دست می‌آید. آنگاه تعداد بهینه تسهیلات با توجه به مقدار کمینه فاصله متوسط تعیین می‌شود.

عملیات ممانعتی نظیر حمله، اختلال عمدی و تأخیر در سرویس‌دهی آن دسته از عملیاتی هستند که مهاجم باهدف ایجاد اختلال در دستیابی متقاضیان به خدمات تسهیلات برنامه‌ریزی می‌کنند. در مقابل عملیات استحکامی جهت حفاظت از تسهیلات سیستم و کاهش اثر حملات عمدی طرح‌ریزی می‌شوند. این مسائل غالباً به‌صورت برنامه‌ریزی دوسطحی یا بازی استکلبرگ بین مدافع (پیشرو) و مهاجم (پیرو) مطرح است. برنامه‌ریزی دوسطحی، ابزاری برای مدل‌سازی تصمیم‌هایی است که در آن دو تصمیم‌گیرنده به‌صورت متوالی عمل تصمیم‌گیری را انجام می‌دهند. تصمیم‌گیرنده سطح اول، پیشرو و تصمیم‌گیرنده سطح دوم، پیرو نامیده می‌شود. در برنامه‌ریزی دوسطحی، ابتدا پیشرو تلاش می‌کند که هدف خود را بهینه کند. سپس پیرو استراتژی بهینه خود را بر اساس تصمیمات پیشرو انتخاب می‌کند. یک مسئله برنامه‌ریزی دوسطحی، ترکیبی از دو مسئله برنامه‌ریزی ریاضی است. برای اولین بار در مقاله علی‌اکبریان و همکارانش مدل ریاضی جدیدی برای ممانعت و استحکام‌سازی تسهیلات سلسله مراتبی ارائه شد [۱۵]. مدل پیشنهادی آن‌ها دوسطحی (مدافع-مهاجم) و از دید مدافع تدوین شده است. اکبری جعفرآبادی و همکاران، پژوهشی ارائه دادند که به‌صورت مسئله سه سطحی مدافع-مهاجم-مدافع و سلسله



مراتبی فرموله شده است [۱۶]. در سطح اول، مدافع تسهیلات را به منظور افزایش امنیت سیستم با کمترین هزینه ممکن و پوشش کامل تقاضای مشتری، استحکام سازی می‌کند. بدترین حالت سناریوی تلفات در سطح دوم مدل‌سازی می‌شود. در سطح سوم، یک مدافع تقاضای مشتریان را به منظور کمینه‌سازی کل هزینه‌های حمل‌ونقل و برون‌سپاری برآورده می‌سازد. فرقانی و همکاران یک مدل برنامه‌ریزی دوسطحی برای مسئله ممانعت جزئی برای تسهیلات سلسله مراتبی ظرفیت‌دار با محدودیت بودجه ارائه شد [۱۷]. فرقانی و دهقانیان یک مسئله ممانعت جزئی دوسطحی را در سیستم سلسله مراتبی معرفی کردند [۱۸]. مهاجم می‌توانست در سطوح مختلف عملیات ممانعتی انجام دهد و با توجه به سطح خدمات سبب کاهش ظرفیت تسهیلات شود. هدف مدافع انتخاب استراتژی بهینه برای برآورد نیاز مشتریان با توجه به ظرفیت تسهیلات و استفاده از گزینه برون‌سپاری است. فرقانی و دهقانیان همچنین یک مدل دوهدفه بانام مسئله ممانعت سلسله مراتبی ارائه دادند [۱۹]. هدف اول مهاجم کمینه‌سازی سود تقاضای برآورده شده کل مشتریان است. هدف دوم نیز حداقل کردن کل هزینه ممانعت است.

۳- طراحی مدل ریاضی مکان‌یابی-استحکام سازی-ممانعت سلسله

مراتبی

برای مدل ارائه‌شده در این مقاله ۸ مجموعه اصلی در نظر گرفته شده است که شامل مشتری‌ها، سایت‌های تسهیلات کاندید در سطح ۱ و ۲، سطوح سرویس‌دهی، خدمات و مجموعه تسهیلات کمکی است. در ادامه قبل از ارائه مدل، مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم‌گیری معرفی می‌شود.

۳-۱- مجموعه‌ها

مجموعه نقاط تقاضا (مناطق مشتریان) که با i اندیس گذاری شده‌اند؛

J_1 مجموعه‌ای از مکان‌های کاندید برای تسهیلات سطح ۱، که خدمات اولیه ارائه می‌کنند

و با j اندیس گذاری شده‌اند؛

J_2 مجموعه‌ای از مکان‌های کاندید برای تسهیلات سطح ۲ که خدمات اولیه و خدمات پیشرفته

ارائه می‌کنند و با k اندیس گذاری شده‌اند؛



S مجموعه خدمات که با S اندیس گذاری شده‌اند (خدمات اولیه، خدمات پیشرفته) $(S = \{ \dots \})$ ؛
 T_{ij}^1 مجموعه همه تسهیلات موجود (نه شامل $J_1 \cup J_2$) که دورتر از j از مشتری i هستند

$$(T_{ij}^1 = \{l \in J_1, J_2 \mid l \neq j, d_{il} > d_{ij}\})$$

T_{ij}^2 مجموعه همه تسهیلات موجود (نه شامل J_1) که دورتر از j از مشتری i هستند
 $(T_{ij}^2 = \{l \in J_1 \mid l \neq j, d_{il} > d_{ij}\})$

T_{ij}^3 مجموعه همه تسهیلات موجود (نه شامل J_2) که دورتر از j از مشتری i هستند
 $(T_{ij}^3 = \{l \in J_2 \mid l \neq j, d_{il} > d_{ij}\})$

T'_{jk} مجموعه همه تسهیلات موجود (نه شامل J_2) که دورتر از j از تسهیل k هستند
 $(T'_{jk} = \{l \in J_2 \mid l \neq k, d'_{jl} > d'_{jk}\})$

۲-۳- پارامترها

d_{ij} کوتاه‌ترین فاصله بین مشتری $i \in I$ و تسهیل $j \in J_1 \cup J_2$ ؛

d'_{jk} کوتاه‌ترین فاصله بین تسهیل $j \in J_1 \cup J_2$ و تسهیل $k \in J_2$ ؛

h_j هزینه ثابت احداث تسهیل $j \in J_1 \cup J_2$ ؛

b_j هزینه استحکام سازی تسهیل سلامت $j \in J_1 \cup J_2$ ؛

B کل بودجه دفاعی برای استحکام سازی تسهیلات؛

c_j هزینه تخریب تسهیل سلامت $j \in J_1 \cup J_2$ ؛

C کل بودجه ممانعتی؛

a_i تقاضای مشتری $i \in I$ ؛

q_j ظرفیت تسهیل سلامت $j \in J_1 \cup J_2$ ؛

α نسبت تقاضاهای ارجاعی برای خدمات پیشرفته بعد از دریافت کردن خدمات اولیه؛



β نسبت تقاضاهای ارسالی از هر نقطه تقاضا برای دریافت مستقیم خدمات پیشرفته.

۳-۳- متغیرهای تصمیم‌گیری

u_j متغیر ۰ و ۱، زمانی برابر ۱ است که در مکان کاندید $j \in J_1 \cup J_2$ ام احداث شود؛
 w_j متغیر ۰ و ۱، زمانی برابر ۱ است که تسهیل $j \in J_1 \cup J_2$ مستحکم شود؛
 v_j متغیر ۰ و ۱، زمانی برابر ۱ است که تسهیل $j \in J_1 \cup J_2$ ممانعت شود؛
 x_{ij}^1 متغیر ۰ و ۱، زمانی برابر ۱ است که تقاضای مشتری $i \in I$ برای خدمات اولیه قبل از حمله به تسهیل $j \in J_1 \cup J_2$ اختصاص داده می‌شود؛
 x_{ij}^2 متغیر ۰ و ۱، زمانی برابر ۱ است که تقاضای مشتری $i \in I$ برای خدمات پیشرفته قبل از حمله به تسهیل سلامت $j \in J_2$ اختصاص داده می‌شود؛
 z_{ij}^1 متغیر ۰ و ۱، زمانی برابر ۱ است که تقاضای مشتری $i \in I$ برای خدمات اولیه بعد از حمله به تسهیل $j \in J_1 \cup J_2$ اختصاص داده می‌شود؛
 z_{ij}^2 متغیر ۰ و ۱، زمانی برابر ۱ است که تقاضای مشتری $i \in I$ برای خدمات پیشرفته بعد از حمله به تسهیل سلامت $j \in J_2$ اختصاص داده می‌شود؛
 y_{jk} متغیر ۰ و ۱، زمانی برابر ۱ است که ابتدا تقاضا برای خدمات اولیه قبل از حمله به تسهیل $j \in J_1 \cup J_2$ اختصاص داده می‌شود و سپس برای دریافت خدمات پیشرفته به تسهیل $k \in J_2$ ارجاع داده می‌شود؛
 r_{jk} متغیر ۰ و ۱، زمانی برابر ۱ است که ابتدا تقاضا برای خدمات اولیه بعد از حمله به تسهیل $j \in J_1 \cup J_2$ اختصاص داده می‌شود و سپس برای دریافت خدمات پیشرفته به تسهیل $k \in J_2$ ارجاع داده می‌شود؛
 e_{ij}^1 میزان تقاضای مشتری $i \in I$ برای خدمات اولیه که توسط تسهیل $j \in J_1 \cup J_2$ قبل از حمله تأمین می‌شود؛
 e_{ij}^2 میزان تقاضای مشتری $i \in I$ برای خدمات پیشرفته که توسط تسهیل $j \in J_2$ قبل از حمله تأمین می‌شود؛
 f_{jk} میزان تقاضا برای خدمات پیشرفته که از تسهیل $j \in J_1 \cup J_2$ به تسهیل $k \in J_2$



قبل از حمله ارجاع داده می‌شود؛

میزان تقاضای مشتری $i \in I$ برای خدمات اولیه که توسط تسهیل $j \in J_1 \cup J_2$ بعد

از حمله تأمین می‌شود؛

میزان تقاضای مشتری $i \in I$ برای خدمات پیشرفته که توسط تسهیل $j \in J_2$ بعد از

حمله تأمین می‌شود؛

میزان تقاضا برای خدمات پیشرفته که از تسهیل $j \in J_1 \cup J_2$ به تسهیل $k \in J_2$

بعد از حمله ارجاع داده می‌شود.

۳-۴- مدل ریاضی دوسطحی

(۱)

$$Z_1 = \min \left(\sum_{j \in J_1 \cup J_2} h_j u_j + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_1 \cup J_2} d_{ij} a_i (x_{ij}^1 + x_{ij}^2) + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_1 \cup J_2} d_{ij} a_i ((1-x_{ij}^1)z_{ij}^1 + (1-x_{ij}^2)z_{ij}^1) \right)$$

s t.

$$\sum_{j \in J_1 \cup J_2} u_j = p \quad (۲)$$

$$\sum_{j \in J_1 \cup J_2} w_j b_j \leq B \quad (۳)$$

$$w_j \leq u_j \quad (۴)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{s \in S} e_{ij}^s \leq \sum_{i \in I} \sum_{s \in S} x_{ij}^s q_j \quad \forall j \in J_1 \cup J_2 \quad (۵)$$

$$\sum_{k \in J_2} f_{jk} \leq \sum_{k \in J_2} y_{jk} q_j \quad \forall j \in J_1 \cup J_2 \quad (۶)$$

$$\sum_{j \in J_1 \cup J_2} e_{ij}^1 = a_i (1-\alpha), \forall i \in I \quad (۷)$$

$$\sum_{j \in J_2} e_{ij}^2 = a_i \alpha, \forall i \in I \quad (۸)$$



$$\sum_{k \in J_2} f_{jk} = \beta (\sum_{i \in I} e_{ij}^1), \forall j \in J_1 \cup J_2 \quad (9)$$

$$u_j, w_j, y_{jk}, x_{ij}^s \in \{0,1\}, e_{ij}^s, f_{jk} \geq 0, \forall i \in I, \forall k, j \in J_1 \cup J_2, \forall s \in S \quad (10)$$

جایی که u, w, y, x, e, f مسئله زیر را حل می کنند:

$$Z_2 = \max (\sum_{i \in I} \sum_{j \in J_1 \cup J_2} d_{ij} a_i (z_{ij}^1 + z_{ij}^2)) \quad (11)$$

s.t.

$$\sum_{j \in J_1 \cup J_2} c_j v_j \leq C \quad (12)$$

$$v_j \leq u_j - w_j \quad (13)$$

$$\sum_{h \in T_{ij}^1} z_{ih}^1 \leq v_j \quad \forall i \in I, \forall j \in J_1 \quad (14)$$

$$\sum_{h \in T_{ij}^2} z_{ih}^2 \leq v_j \quad \forall i \in I, \forall j \in J_2 \quad (15)$$

$$\sum_{h \in T_{ij}^1} z_{ih}^1 + \sum_{h \in T_{ij}^2} z_{ih}^2 \leq v_j \quad \forall i \in I, \forall j \in J_2 \quad (16)$$

$$\sum_{h \in T_{jk}^1} r_{jh} \leq v_k \quad \forall k \in J_2, \forall j \in J_1 \cup J_2 \quad (17)$$

$$\sum_{k \in J_2} n_{jk} \leq \sum_{k \in J_2} r_{jk} q_j (1 - v_j) \quad \forall j \in J_1 \cup J_2 \quad (18)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{s \in S} m_{ij}^s \leq \sum_{i \in I} \sum_{s \in S} z_{ij}^s q_j (1 - v_j) \quad \forall j \in J_1 \cup J_2 \quad (19)$$

$$\sum_{j \in J_1 \cup J_2} m_{ij}^1 = a_i (1 - \alpha), \forall i \in I \quad (20)$$

$$\sum_{j \in J_2} m_{ij}^2 = a_i \alpha, \forall i \in I \quad (21)$$

$$\sum_{k \in J_2} n_{jk} = \beta (\sum_{i \in I} m_{ij}^1), \forall j \in J_1 \cup J_2 \quad (22)$$

$$m_{ij}^s \geq e_{ij}^s (1 - v_j), \forall j \in J_1 \cup J_2 \quad (23)$$

$$v_j, r_{jk}, z_{ij}^s \in \{0,1\}, m_{ij}^s, n_{jk} \geq 0, \forall i \in I, \forall k, j \in J_1 \cup J_2, \forall s \in S \quad (24)$$

در این مدل، روابط ۱ تا ۱۰ زیرمسئله مدافع و روابط ۱۱ تا ۲۴ زیرمسئله مهاجم را نمایش می دهند. Z_1 و Z_2 در روابط ۱ و ۱۱ هدف مسئله سطح بالا و پایین را تعیین می کند که شامل



۴ مؤلفه هستند: (۱) مجموع هزینه‌های ثابت احداث تسهیلات در سطح ۱ و ۲، (۲) مجموع فاصله بین مشتریان و نزدیک‌ترین تسهیلات برای دریافت خدمات اولیه و پیشرفته قبل از حمله، (۳) مجموع فاصله اضافی برای دریافت خدمات به سبب تخصیص مجدد مشتریان به نزدیک‌ترین تسهیلات بعد از عملیات ممانعتی مهاجم، (۴) فاصله بین مشتریان و نزدیک‌ترین تسهیلات برای دریافت خدمات اولیه و پیشرفته بعد از حمله.

محدودیت ۲ بیان می‌کند که دقیقاً p تسهیل نوع ۱ یا ۲ احداث می‌شوند. رابطه ۳، محدودیت بودجه مدافع را در استحکام سازی تسهیلات نشان می‌دهد. بر اساس محدودیت ۴، اگر در مکان $J \in J_1 \cup J_2$ تسهیل نوع ۱ یا ۲ احداث شود، عملیات استحکام سازی صورت می‌گیرد. محدودیت‌های ۵ و ۶ ظرفیت تسهیلات را برای ارائه خدمات اولیه و پیشرفته و خدمات ارجاعی قبل از حمله مشخص می‌کنند. روابط ۷ تا ۹ به ترتیب بیان می‌کنند که چه نسبت از تقاضای مشتریان برای خدمات اولیه، پیشرفته و ارجاعی از طریق تخصیص به تسهیلات سطح ۱ و ۲ قبل از حمله تأمین می‌شود. در رابطه ۱۰، متغیرهای تصمیم‌گیری سطح بالا به صورت باینری و پیوسته تعریف شده‌اند. رابطه ۱۲ محدودیت بودجه مهاجم را در تخریب تسهیلات سطح ۱ و ۲ تعیین می‌کند. قید ۱۳ از عملیات ممانعتی در تسهیلات احداث شده و مستحکم جلوگیری می‌کند. محدودیت‌های ۱۴ تا ۱۷ به ترتیب الزام تبعیت تخصیص مشتریان از تسهیلات سطح ۱ برای خدمات اولیه، تسهیلات سطح ۲ برای خدمات اولیه، تسهیلات سطح ۲ برای خدمات پیشرفته و خدمات ارجاعی را بعد از حمله نشان می‌دهند. محدودیت‌های ۱۸ و ۱۹ ظرفیت تسهیلات را برای ارائه خدمات اولیه و پیشرفته و خدمات ارجاعی بعد از حمله تعیین می‌کنند. روابط ۲۰ تا ۲۲ به ترتیب بیان می‌کنند که چه نسبت از تقاضای مشتریان برای خدمات اولیه، پیشرفته و ارجاعی از طریق تخصیص به تسهیلات سطح ۱ و ۲ بعد از حمله تأمین می‌شود. محدودیت ۲۳ تعیین می‌کند تقاضای مشتریان نمی‌تواند به یک تسهیل سطح ۱ یا ۲ اختصاص داده شود (همچون قبل حمله) اگر آن تسهیل به سبب حمله از بین رفته است. در ۲۴، متغیرهای تصمیم‌گیری سطح پایین به صورت باینری و پیوسته تعریف شده‌اند.



۴- الگوریتم‌های حل

الگوریتم‌های فرا ابتکاری برای حل مسائل بهینه‌سازی شبکه بسیار اثربخش هستند و در حل مسائل مشابه کارایی بالایی دارند [۲۰-۲۴]. لذا در این بخش دو الگوریتم فرا ابتکاری برای حل مسئله جدید ارائه می‌شود.

۴-۱- الگوریتم ژنتیک مبنی بر روش دقیق

الگوریتم ژنتیک (GA^2) به‌عنوان یک الگوریتم فرا ابتکاری تکاملی در حل مسائل بهینه‌سازی NP-سخت استفاده می‌شود. این الگوریتم به‌وسیله جان هلند^{۲۹} ابداع شد و توسط خودش و شاگردانش توسعه یافت [۲۵]. در مسئله ممانعتی/استحکامی روی شبکه سلسله مراتبی، الگوریتم ارائه‌شده دو مسئله بهینه‌سازی را با روندی تکراری حل می‌کند. به‌طوری‌که الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله مدافع و یک روش دقیق برای حل مسئله مهاجم استفاده می‌شوند. مراحل کلی اجرای الگوریتم ژنتیک مبنی بر روش دقیق در زیر نشان داده‌شده است.

۱) کروموزوم‌ها

در الگوریتم ژنتیک، یک جمعیت اولیه از راه‌حل‌های تصادفی ایجاد می‌شود. هر فرد در جمعیت به‌عنوان یک کروموزوم در نظر گرفته می‌شود و هر کروموزوم دارای ژن‌هایی است. برای مسئله ارائه‌شده، هر کروموزوم شامل دو بخش است که برای نشان دادن مکان‌یابی و عملیات استحکامی در مسئله سطح بالا استفاده می‌شوند.

۲) جمعیت اولیه

جمعیت اولیه به‌طور تصادفی تولید می‌شود و اندازه جمعیت با توجه به ابعاد مسئله تعیین می‌شود.

۳) عملگر ارزیابی

میزان بهینگی هر یک از کروموزوم‌ها یا افراد جمعیت با توجه به یک تابع برازندگی (تابع هدف زیرمسئله مدافع) محاسبه می‌شود. کروموزوم‌ها با مقدار برازندگی بالاتر شانس بیشتری برای حضور در نسل بعدی دارند.

۴) عملگر تقاطع یا ترکیب

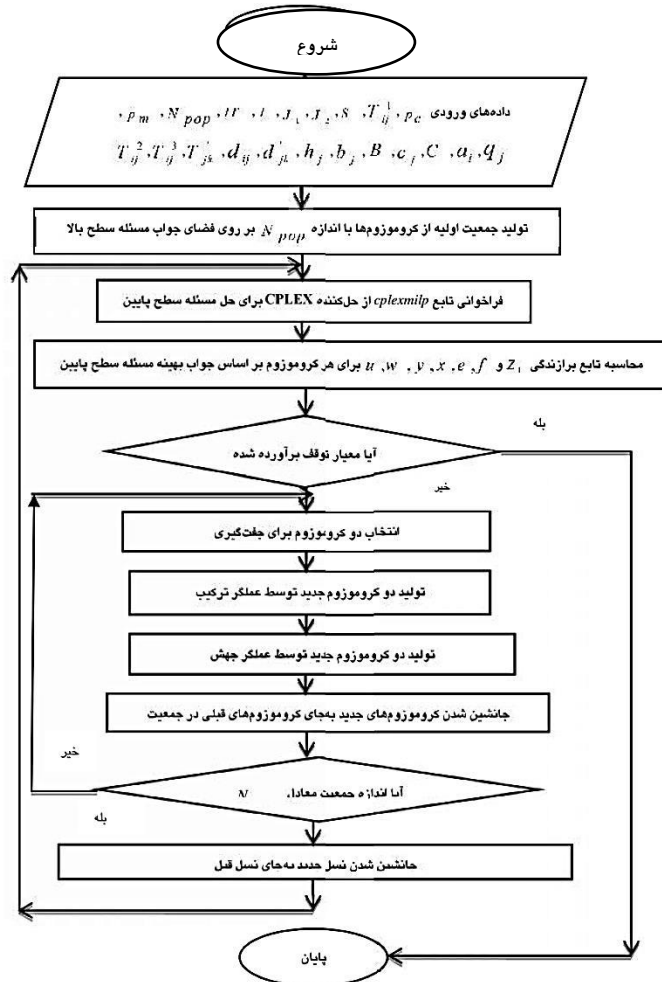
هدف عملگر تقاطع تولید جواب‌های جدید و افزایش سرعت در تولید جواب بهینه است. برای



اجرای این عملگر، یک نقطه برش تصادفی در دو کروموزوم والد انتخاب می‌شود و کروموزوم‌های جدید با بخش چپ نقطه برش و معاوضه یا جابجایی با بخش راست نقاط برش والدین تولید می‌شوند. سپس تابع برانندگی کروموزوم‌های جدید محاسبه می‌شود.

۵) عملگر جهش

هدف عملگر جهش، دوری از همگرایی زودرس و افزایش تراکم جمعیت است. در مکانیزم جهش ژنی، ابتدا یک والد به‌طور تصادفی انتخاب می‌شود و جهش ژنی برای اولین و دومین بخش کروموزوم والد اجرا می‌شود. این عملگر دو ژن از بخش‌ها انتخاب می‌کند و مقدار آن‌ها را عوض می‌کند. پیاده‌سازی روش ارائه‌شده طی مراحل زیر در شکل ۱ انجام می‌پذیرد.



شکل ۱ فلوجارت الگوریتم ژنتیک مبنی بر روش دقیق برای حل مسئله ارائه‌شده

۲-۴- الگوریتم کوچ پرندگان مبنی بر روش دقیق

الگوریتم کوچ پرندگان (PSO^{۲۰}) یکی از روش‌های فرا ابتکاری تکاملی برای حل مسائل بهینه‌سازی شبکه است که توسط کندی و ابرهارت^{۲۱} (۱۹۹۵ م) ارائه شد [۲۶]. این الگوریتم از



حرکت جمعی ماهی‌ها درون آب یا پرندگان هنگام مهاجرت الهام می‌گیرد. PSO با یک جمعیت اولیه که به‌طور تصادفی تولید شده، در ناحیه جواب مسئله حرکت می‌کند تا به نقطه کمینه سراسری برسد. اعضای این جمعیت ذره نامیده می‌شوند که به‌عنوان جواب‌های شدنی مسئله در نظر گرفته می‌شوند. در مسئله ممانعتی/استحکامی روی شبکه سلسله مراتبی، PSO باینری برای حل مسئله سطح بالا استفاده می‌شود. سپس یک روش دقیق برای حل زیرمسئله مهاجم استفاده می‌شود.

۱-۲-۴- موقعیت و سرعت ذرات

در PSO باینری، وضعیت هر ذره دو مقدار ۰ و ۱ را اختیار می‌کند و سرعت به‌صورت احتمال بیان می‌شود. فرض کنید X_{id} و V_{id} به ترتیب بردارهای مختصات موقعیت و سرعت ذره i ام در یک فضای جواب d بعدی باشند. در این صورت V_{id} احتمال یک بودن X_{id} را تعیین می‌کند. برای اجرای الگوریتم، ابتدا سرعت ذره از رابطه (۲۵) به‌روز می‌شود:

(۲۵)

$$V_{id}(k+1) = w V_{id}(k) + c_1 \cdot \text{rand}(P_{id}(k) - X_{id}(k)) + c_2 \cdot \text{rand}(P_{gd}(k) - X_{id}(k))$$

که در رابطه (۲۵)، w وزن اینرسی و یک عدد حقیقی بین ۰ و ۱، P_i و P_g به ترتیب بهترین مکان دیده شده در موقعیت‌های قبلی ذره i ام و بهترین ذره و بهترین موقعیت دیده شده در جمعیت، c_1 و c_2 ضرایب یادگیری (معمولاً $c_1 = c_2 = 2$ در نظر گرفته می‌شود)، rand عددی تصادفی در بازه $[0,1]$ و N تعداد ذرات است. سپس، این مقدار با استفاده تابع سیگموئید و رابطه (۲۶) به مقداری بین ۰ و ۱ تبدیل می‌شود و موقعیت ذره i ام در بعد ذره d ام با استفاده از رابطه (۲۷) به‌روزرسانی می‌شود.

$$S(V_{id}) = \frac{1}{1 + e^{-V_{id}}} \quad (۲۶)$$



$$X_{id}(k+1) = \begin{cases} 1, & rand < S(V_{id}(k+1)) \\ 0, & \text{وگرنه} \end{cases} \quad (27)$$

همچنین، با در نظر گرفتن تابع هدف مسئله سطح بالا، P_i و P_g نیز با توجه به روابط (28) و (29) بروز می‌شوند.

$$P_{id}(k+1) = \begin{cases} X_{id}(k+1), & Z_1(X_{id}(k+1)) < Z_1(P_{id}(k)) \\ P_{id}(k), & \text{وگرنه} \end{cases} \quad (28)$$

$$P_{gd}(k+1) = \begin{cases} P_{id}(k+1), & Z_1(P_{id}(k+1)) < Z_1(P_{gd}(k)) \\ P_{gd}(k), & \text{وگرنه} \end{cases} \quad (29)$$

۲-۲-۴ - گام‌های الگوریتم کوچ پرنندگان دوسطحي

- گام‌های اصلی PSO برای حل مسئله ارائه شده را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:
- گام ۱: پارامترهای مسئله را وارد کن ($I, J_1, J_2, S, T_{ij}^1, T_{ij}^2, T_{ij}^3, T_{jk}^1, d_{ij}^1, d_{jk}^1, h_j, b_j, B, C_j, C, a_i, q_j$);
 - گام ۲: یک جمعیت اولیه از ذرات بر روی فضای جواب مسئله سطح بالا ایجاد کن؛
 - گام ۳: حل‌کننده CPLEX را برای حل مسئله سطح پایین فراخوانی کن؛
 - گام ۴: بر اساس جواب مسئله مهاجم، تابع هدف مدافع (Z_1) را برای هر ذره محاسبه کن؛
 - گام ۵: تابع هدف هر ذره i را با بهترین مکان دیده شده در موقعیت‌های قبلی ذره i یعنی P_i مقایسه کن؛ اگر مقدار فعلی از P_i بهتر است آنگاه P_i را معادل مقدار فعلی قرار بده؛
 - گام ۶: اگر تابع هدف فعلی بهتر از P_g است آنگاه P_g را با توجه به بهترین موقعیت ذره و تابع هدف به‌روزرسانی کن؛
 - گام ۷: سرعت و موقعیت هر ذره را با توجه به رابطه (26) و (27) به‌روزرسانی کن؛
 - گام ۸: اگر موقعیت ذرات به فضای جواب مسئله مدافع متعلق نیست، روش برآوری قیود مسئله را اعمال کن وگرنه به گام ۹ برو؛
 - گام ۹: تا برقراری شرط توقف (بیشینه تعداد تکرار) گام‌های ۲ تا ۸ را تکرار کن.



۵- نتایج عددی

در این مقاله، از نمونه‌های عددی تصادفی برای بررسی صحت جواب‌های به‌دست‌آمده از مدل جدید با استفاده از الگوریتم ژنتیک دوسطحی و الگوریتم کوچ پرندگان دوسطحی استفاده می‌شود. برای تولید این مثال‌ها یک شبکه سلسله‌مراتبی در نظر گرفته شده است و مشخصات آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. شکل ۲ مکان‌های کاندید برای تسهیلات سطح ۱ و ۲ و مشتریان را روی صفحه مختصات نمایش می‌دهد.

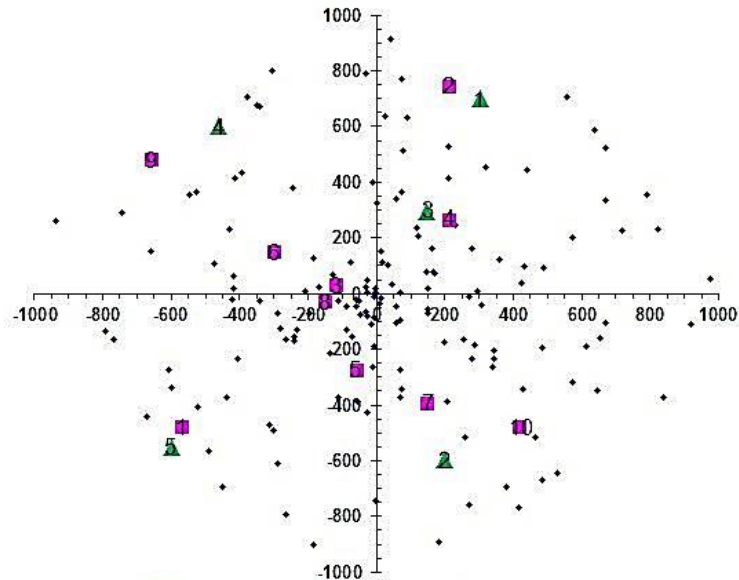
جدول ۱ الگوی تولید نمونه‌های عددی

پارامتر	مقدار
انواع خدمات	2
تعداد سطوح تسهیلات	2
تعداد مکان‌های کاندید برای تسهیلات سطح ۱	5
تعداد مکان‌های کاندید برای تسهیلات سطح ۲	10
تعداد مشتریان	150
تعداد تسهیلات سطح ۱	(3,4)
تعداد تسهیلات سطح ۲	(6,8)
هزینه ممانعت تسهیل در سطح ۱	$1500+100 \times U[0,135]$
هزینه ممانعت تسهیل در سطح ۲	$4500+100 \times U[0,405]$
بودجه ممانعتی	$30\% \sum_{j \in I_1, I_2} c_j, 50\% \sum_{j \in I_1, I_2} c_j, 70\% \sum_{j \in I_1, I_2} c_j$
هزینه استحکام سازی تسهیل در سطح ۱	$500+100 \times U[0,45]$
هزینه استحکام سازی تسهیل در سطح ۲	$1500+100 \times U[0,135]$
بودجه دفاعی	$30\% \sum_{j \in I_1, I_2} b_j, 50\% \sum_{j \in I_1, I_2} b_j, 70\% \sum_{j \in I_1, I_2} b_j$
نسبت تقاضای ارجاعی	0,2
نسبت تقاضای ارسالی	0,3
تقاضای مشتری	$10+5 \times U[0,18]$
هزینه استقرار تسهیل در سطح ۱	$1000+100 \times U[0,90]$



هزینه استقرار تسهیل در سطح ۲	$3000+100 \times U[0,270]$
------------------------------	----------------------------

برای مقایسه نتایج الگوریتم ژنتیک مبتنی بر روش دقیق و الگوریتم کوچ پرندگان مبتنی بر روش دقیق ۱۸ نمونه عددی از مسئله مکان یابی/ممانعتی/استحکامی شبکه سلسله مراتبی تولید شده است. عملکرد الگوریتم های GA و PSO بر طبق مقادیر متفاوتی از پارامترهایشان ارزیابی شده است و مقادیری که سبب شود نتایج عددی بهتری تولید شود، انتخاب شده است. این پارامترها و مقادیر انتخاب شده در جدول ۲ نشان داده شده اند. در GA، این پارامترها عبارتند از: احتمال تقاطع (p_c)، احتمال جهش (p_m)، تعداد تکرارها (IT) و اندازه جمعیت (n_{pop}). در PSO، این پارامترها عبارتند از: ضرایب ثابت c_1 و c_2 ، تعداد تکرارها (IT) و اندازه جمعیت (n_{pop}).



* مکان های کاندید برای تسهیلات نوع ۱ \blacktriangle مکان های کاندید برای تسهیلات نوع ۲ \blacksquare مکان مشتری ها

شکل ۲ مکان های کاندید برای ۵ تسهیل سطح ۱ و ۱۰ تسهیل سطح ۲ و ۱۵۰ مشتری

جدول ۲ تنظیم پارامترها برای الگوریتم های PSO و GA

الگوریتم	پارامترها	مقادیر تست شده	مقدار پیشنهادی
GA	p_c	۰/۰۸/۰/۷۵/۷	۰/۷۵



۰/۲۵	۰/۰.۳/۰.۲۵/۲	P_m	PSO
۲۰۰	۱۰۰،۱۵۰،۲۰۰	IT	
۱۰۰	۵۰،۷۵،۱۰۰	n_{pop}	
۲	۱.۲/۱.۵	C_1	
۲	۱.۲/۱.۵	C_2	
۲۰۰	۱۰۰،۱۵۰،۲۰۰	IT	
۱۰۰	۵۰،۷۵،۱۰۰	n_{pop}	

برای حل نمونه‌های عددی، الگوریتم‌های دوسطحی ارائه گردید که از حل‌کننده CPLEX در محیط نرم‌افزار MATLAB برای حل مسئله سطح پائین و GA و PSO برای حل مسئله سطح بالا استفاده می‌شود. در جدول ۳، مکان تسهیلات سطح ۱ و ۲ و عملیات ممانعتی و استحکامی به‌دست آمده از الگوریتم ژنتیک ترکیبی آورده شده است. میانگین تابع هدف مدافع، میانگین زمان اجرا هر یک از الگوریتم‌ها به ازای ۳۰ بار اجرای آن‌ها در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۳ نتایج محاسباتی نمونه‌های عددی با ترکیب متفاوتی از پارامترها که با الگوریتم ژنتیک دوسطحی حل شده‌اند

مثال	تعداد مکان‌های کاندید و مشتریان	تعداد تسهیلات	بودجه ممانعتی	بودجه دفاعی	سطوح خدمات رسانی	مکان قرارگیری تسهیلات	مکان عملیات ممانعتی	مکان عملیات استحکامی
۱	(۱۵۰،۱۰۰،۵)	(۶،۳)	کم	کم	سطح ۱	{۴،۳،۲}	{۳}	{۲}
					سطح ۲	{۱۰،۸،۵،۴،۳،۱}	{۱۰،۸}	{۴،۳}
۲	(۱۵۰،۱۰۰،۵)	(۶،۳)	متوسط	کم	سطح ۱	{۴،۳،۲}	{۴،۳}	{۲}
					سطح ۲	{۱۰،۸،۷،۴،۳،۱}	{۱۰،۸،۸}	{۴،۳}
۳	(۱۵۰،۱۰۰،۵)	(۶،۳)	زیاد	کم	سطح ۱	{۱،۲،۳}	{۴،۳}	{۲}
					سطح ۲	{۱۰،۸،۷،۴،۳،۱}	{۱۰،۸،۵،۱}	{۴،۳}
۴	(۱۵۰،۱۰۰،۵)	(۶،۳)	کم	متوسط	سطح ۱	{۴،۳،۲}	{۴}	{۳،۲}
					سطح ۲	{۱۰،۸،۵،۴،۳،۱}	{۱۰،۸}	{۸،۴،۳}



مثال	تعداد مکان‌های کاندید و مشتریان	تعداد تسهیلات	بودجه ممانعتی	بودجه دفاعی	سطوح خدمات رسانی	مکان قرارگیری تسهیلات	مکان عملیات ممانعتی	مکان عملیات استحکامی
۵			متوسط	متوسط	۱	{۴,۳}	{۴,۱}	{۳,۲}
					۲	{۱۰,۸,۷,۴,۳,۱}	{۸,۵,۱}	{۱۰,۴,۳}
۶			زیاد	متوسط	۱	{۱,۲,۳}	{۴,۱}	{۳,۲}
					۲	{۱۰,۸,۷,۴,۳,۱}	{۸,۷,۶,۵,۱}	{۱۰,۴,۳}
۷			کم	زیاد	۱	{۴,۳,۲}	{۱}	{۴,۳,۲}
					۲	{۱۰,۸,۵,۴,۳,۱}	{۵,۱}	{۱۰,۸,۴,۳}
۸			متوسط	زیاد	۱	{۴,۳,۲}	{۵,۱}	{۴,۳,۲}
					۲	{۱۰,۸,۷,۴,۳,۱}	{۱۰,۷,۵}	{۸,۴,۳,۱}
۹			زیاد	زیاد	۱	{۱,۲,۳}	{۵,۱}	{۴,۳,۲}
					۲	{۱۰,۸,۷,۴,۳,۱}	{۱۰,۷,۶,۵}	{۸,۴,۳,۱}
۱۰			کم	کم	۱	{۱,۲,۳,۴}	{۳}	{۲}
					۲	{۱۰,۸,۷,۶,۵,۴,۳,۱}	{۱۰,۵,۱}	{۸,۴,۳}
۱۱			متوسط	کم	۱	{۱,۲,۳,۴}	{۳,۱}	{۲}
					۲	{۱۰,۸,۷,۶,۵,۴,۳,۱}	{۸,۷,۵,۱}	{۱۰,۴,۳}
۱۲			زیاد	کم	۱	{۱,۲,۳,۴}	{۴,۳,۱}	{۲}
					۲	{۱۰,۹,۸,۷,۵,۴,۳,۱}	{۹,۸,۷,۶,۵,۱}	{۱۰,۴,۳}
۱۳			کم	متوسط	۱	{۱,۲,۳,۴}	{۴}	{۳,۲}
					۲	{۱۰,۸,۷,۶,۵,۴,۳,۱}	{۷,۵,۱}	{۱۰,۸,۴,۳}
۱۴	(۱۵۰,۱۰۰,۵)	(۸,۴)	متوسط	متوسط	۱	{۱,۲,۳,۴}	{۴,۱}	{۳,۲}
					۲	{۱۰,۸,۷,۶,۵,۴,۳,۱}	{۷,۶,۵,۱۰}	{۱۰,۸,۷,۴,۳,۱}
۱۵			زیاد	متوسط	۱	{۱,۲,۳,۴}	{۵,۴,۱}	{۳,۲}
					۲	{۱۰,۹,۸,۷,۵,۴,۳,۱}	{۹,۷,۶,۱۰,۲,۱}	{۵,۸,۴,۳}
۱۶			کم	زیاد	۱	{۱,۲,۳,۴}	{۱}	{۴,۳,۲}
					۲	{۱۰,۸,۷,۶,۵,۴,۳,۱}	{۹,۷,۶}	{۱۰,۸,۵,۴,۳,۱}
۱۷			متوسط	زیاد	۱	{۱,۲,۳,۴}	{۵,۱}	{۴,۳,۲}
					۲	{۱۰,۸,۷,۶,۵,۴,۳,۱}	{۹,۵,۶,۲}	{۱۰,۸,۷,۴,۳,۱}
۱۸			زیاد	زیاد	۱	{۱,۲,۳,۴}	{۵,۱}	{۴,۳,۲}
					۲	{۱۰,۹,۸,۷,۵,۴,۳,۱}	{۹,۷,۵,۲}	{۱۰,۸,۶,۴,۳,۱}



جدول ۴ مقایسه الگوریتم ژنتیک دوسطحی و الگوریتم کوچ پرندگان دوسطحی برای حل مدل ریاضی پیشنهادی

مثال	تعداد مکان‌های کاندید و مشتریان	تعداد تسهیلات	بودجه ممانعتی	بودجه دفاعی	الگوریتم ژنتیک دوسطحی		الگوریتم کوچ پرندگان دوسطحی	
					Z_1	زمان	Z_1	زمان
۱	(۱۵۰،۱۰،۵)	(۳،۶)	کم	کم	۹۵۰،۷۸۷	۲۵۱/۱	۱،۰۰۱،۲۵۵	۳۲۴/۵
۲			متوسط	کم	۱،۰۶۶،۴۰۹	۲۶۵/۲	۱،۱۱۲،۵۷۱	۳۳۹/۴
۳			زیاد	کم	۱،۱۶۵،۰۶۶	۲۷۲/۴	۱،۲۱۸،۰۶۵	۳۴۸/۵
۴			کم	متوسط	۸۴۸،۸۲۷	۲۷۴/۳	۹۰۳،۶۹۵	۳۲۵/۲
۵			متوسط	متوسط	۹۶۰،۷۴۱	۳۰۷/۸	۱،۰۱۰،۶۵۰	۳۵۷/۶
۶			زیاد	متوسط	۱،۰۴۸،۳۷۵	۳۱۴/۶	۱،۰۸۲،۰۴۳	۳۷۵/۱
۷			کم	زیاد	۷۸۱،۱۲۲	۳۲۳/۱	۸۱۰،۸۳۰	۳۹۴/۲
۸			متوسط	زیاد	۸۶۰،۴۷۷	۳۳۲/۸	۹۰۴،۰۹۷	۳۹۶/۶
۹			زیاد	زیاد	۹۵۲،۱۳۵	۳۴۵/۲	۱،۰۰۱،۵۵۹	۴۰۳/۸
۱۰	(۱۵۰،۱۰،۵)	(۸،۴)	کم	کم	۹۳۰،۷۷۱	۲۷۳/۵	۹۸۰،۲۴۹	۳۴۵/۵
۱۱			متوسط	کم	۱،۰۴۲،۰۸۱	۲۷۸/۱	۱،۰۹۰،۳۲۰	۳۵۲/۴
۱۲			زیاد	کم	۱،۱۴۰،۷۶۵	۲۸۲/۴	۱،۱۹۲،۷۰۴	۳۶۵/۳
۱۳			کم	متوسط	۸۳۰،۸۵۰	۲۹۵/۹	۸۸۴،۶۲۱	۳۶۳/۲



مثال	تعداد مکان‌های کاندید و مشتریان	تعداد تسهیلات	بودجه ممانعتی	بودجه دفاعی	الگوریتم ژنتیک دوسطی		الگوریتم کوچ پرندگان دوسطی	
					Z_1	زمان	Z_1	زمان
۱۴			متوسط	متوسط	۹۴۰.۵۲۶	۳۲۸/۸	۹۹۰.۴۳۷	۳۷۳/۷
۱۵			زیاد	متوسط	۱۰۰۲۹.۴۰۸	۳۳۷/۶	۱۰۰۶۱.۴۰۲	۳۹۳/۹
۱۶			کم	زیاد	۷۶۳.۴۹۹	۳۴۸/۱	۷۹۳.۶۱۳	۴۱۱/۱
۱۷			متوسط	زیاد	۸۴۱.۲۸۷	۳۵۴/۷	۸۸۵.۰۱۵	۴۱۶/۶
۱۸			زیاد	زیاد	۹۳۱.۰۹۲	۳۶۹/۹	۹۸۰.۵۲۷	۴۲۱/۸

آزمایش‌هایی به شرح ذیل داده شده است:

آزمایش ۱: جدول ۴ مقادیر تابع هدف مدافع Z_1 را برای ۱۸ نمونه عددی تصادفی از مسئله ممانعتی/استحکامی سلسله مراتبی با اجرای الگوریتم‌های ژنتیک دوسطی و کوچ پرندگان دوسطی نمایش می‌دهد. این آزمایش عملکرد خوب الگوریتم‌های ژنتیک دوسطی را روی همه نمونه‌ها تأیید می‌کند. در جدول ۴ مشاهده می‌شود که الگوریتم‌های ژنتیک دوسطی برحسب دقت محاسباتی جواب‌های بهتری از الگوریتم کوچ پرندگان دوسطی ارائه نموده است که این نتایج شامل میانگین مقادیر تابع هدف مدافع است که از ۳۰ بار تکرار الگوریتم‌های فوق حاصل می‌شود.

آزمایش ۲: در جدول ۴ هفتمین و نهمین ستون زمان اجرای موردنیاز برای حل نمونه‌ها توسط دو الگوریتم ژنتیک دوسطی و کوچ پرندگان دوسطی را نمایش می‌دهد. طبق نتایج این جدول، الگوریتم ژنتیک دوسطی برحسب زمان محاسباتی بهتر از الگوریتم کوچ پرندگان دوسطی است؛ همچنین مشاهده می‌شود که بین دقت جواب و زمان اجرای این دو الگوریتم رابطه مستقیم وجود دارد؛ به عبارت دیگر، الگوریتمی که بهترین جواب را در دقت دارد (الگوریتم ژنتیک دوسطی) دارای زمان اجرای پایین‌تری است و الگوریتمی که دارای زمان اجرای بالاتری است (الگوریتم کوچ پرندگان دوسطی) از دقت محاسباتی خوبی نیز برخوردار نیست.



آزمایش ۳: دو مقدار متفاوت برای تعداد تسهیلات سطح ۱ و تسهیلات سطح ۲ انتخاب شده است. همان‌طور که در جداول ۳ و ۴ مشاهده می‌شود، مقدار تابع هدف سطح بالا به این مقادیر حساس است. اگر تعداد این تسهیلات کم یا زیاد شود، روندهایی در عملکرد شبکه سلسله مراتبی مشاهده می‌شود. افزایش تعداد تسهیلات سطح ۱ و ۲ از ۳ و ۶ به ۴ و ۸ سبب کاهش تابع هدف می‌شود. به عبارت دیگر، با افزایش تسهیلات سطح ۱ و ۲، خدمات‌رسانی به مشتریان از طریق تسهیلات نزدیک‌تر انجام می‌شود که سبب کاهش تابع هدف سطح بالا می‌شود.

آزمایش ۴: سه سطح متفاوت از بودجه دفاعی و تهاجمی بر اساس هزینه تخریب و حفاظت تسهیلات سطح ۱ و ۲ انتخاب شده است. همان‌طور که در جدول‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌کنیم، عملکرد شبکه سلسله مراتبی در سرویس‌دهی به مشتریان برای خدمات نوع ۱ و ۲ به این سطوح حساس است. افزایش تدریجی سطح استحکام سازی سبب کاهش تابع هدف سطح بالا می‌شود. به عبارت دیگر، با افزایش سطح حفاظت تسهیلات سطح ۱ و ۲، مشتریان از تسهیلات امن‌تر با فواصل کمتر سرویس‌دهی می‌شوند و لذا تابع هدف سطح بالا کاهش می‌یابد.

آزمایش ۵: برای مقایسه کارایی الگوریتم‌های ژنتیک و کوچ پرندگان در حل ۱۸ نمونه عددی از مسئله جدید از آزمون آماری t استفاده می‌شود. جدول ۴ کارایی الگوریتم‌های ترکیبی را بر اساس آزمون t در سطح معنادار $0/05$ با تعداد تکرار ۳۰ برای هر دو الگوریتم نشان می‌دهد. در جدول ۴، دهمین ستون مقایسه بین الگوریتم ژنتیک دوسطحی و الگوریتم کوچ پرندگان دوسطحی برای نمونه‌هاست: چون t برای همه نمونه‌ها بزرگ‌تر از $t_{0/05,30+30-2}=2/017$ است، بنابراین الگوریتم ژنتیک دوسطحی دارای عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم کوچ پرندگان دوسطحی است. در این تحقیق، مسئله ممانعتی/استحکامی سلسله مراتبی با در نظر گرفتن محدودیت بودجه و ظرفیت، مدل‌سازی و حل آن برای ۱۸ نمونه عددی تصادفی با استفاده از دو الگوریتم فرا ابتکاری ژنتیک و کوچ پرندگان موردبررسی قرار گرفت. نتایج پژوهش حاضر در خصوص عملیات ممانعتی و استحکامی و کاربرد الگوریتم‌های فرا ابتکاری، مطابق با یافته‌های علی اکبریان و همکاران [۱۵] مبنی بر ارائه یک مدل دوسطحی بدون در نظر گرفتن ظرفیت و محدودیت بودجه



و همچنین مطابق با نتایج تحقیق اکبری جعفرآبادی و همکاران [۱۶] برای مدل‌سازی مسئله سه سطحی پوششی و تحقیق فرقانی و دهقانیان [۱۷] برای مسئله ممانعت جزئی بدون در نظر گرفتن عملیات استحکامی است که نشان دادند الگوریتم‌های فرا ابتکاری ضمن دستیابی به جواب‌های نزدیک به بهینه، زمان محاسباتی کمتری در مقایسه با الگوریتم‌های دقیق دارند.

۶- نتیجه‌گیری و فرصت‌های پژوهشی آینده

در این مقاله به مطالعه مسئله مکان‌یابی-استحکامی-ممانعتی بر روی یک شبکه سلسله مراتبی با محدودیت بودجه و ظرفیت باهدف کمینه‌سازی هزینه ثابت احداث تسهیلات در سطح ۱ و ۲ و فاصله بین مشتریان و نزدیک‌ترین تسهیلات برای دریافت خدمات اولیه و پیشرفته، پرداختیم. در این مسئله، عملیات ممانعتی و استحکامی در سطوح مختلف با توجه بودجه موجود صورت می‌گیرد و حمله در تسهیلات مستحکم نشده سبب کاهش ظرفیت می‌شود. برای فرمول‌بندی ریاضی این مسئله، یک مدل برنامه‌ریزی دوسطحی ارائه شده است. در زیرمسئله سطح بالا، مدافع، مکان‌یابی و استحکام سازی تسهیلات سطح ۱ و ۲ را به‌گونه‌ای انجام می‌دهد که تقاضای مشتریان برای خدمات اولیه و پیشرفته با کارایی بالایی سرویس‌دهی شود و از یک بودجه ثابت جهت احداث تسهیلات و حفاظت نیز تجاوز نکند.

از آنجایی که مسئله جدید NP-سخت است و کاربرد این مسئله در سیستم‌های واقعی با ابعاد بالا است، دستیابی به جواب‌های با دقت بالا و زمان کوتاه اهمیت دارد. لذا برای حل مسئله جدید از دو الگوریتم تقریبی دوسطحی استفاده شده است. رویکرد دوسطحی یک روش ترتیبی است که از الگوریتم‌های فرا ابتکاری ژنتیک و کوچ پرندگان برای حل مسئله سطح بالا و با فراخوانی حل‌کننده CPLEX به حل زیرمسئله سطح پایین می‌پردازد. به‌منظور بررسی نتایج عددی، ابتدا با توجه به دقت و زمان حل چند نمونه از مسئله، پارامترهای الگوریتم‌های فرا ابتکاری را تنظیم کردیم. سپس عملکرد دو رویکرد دوسطحی فرا ابتکاری را در حل ۱۸ نمونه از مسئله جدید بررسی نمودیم. نتایج عددی حاکی از کیفیت جواب‌های حاصل از الگوریتم ژنتیک دوسطحی است. در پایان نیز رفتار مدل با تغییر تعداد تسهیلات در سطوح مختلف، سطح بودجه دفاعی و تهاجمی موردبررسی و تحلیل قرار گرفت.

یافته‌های این تحقیق مدل و روش‌های حل کارا را برای طراحان دستگاه‌های سلسله مراتبی



همچون شبکه سلامت ارائه می‌دهد. مطالعه بر پایه تسهیلات سلسله مراتبی برای توسعه خدمات کارآمد برای پاسخگویی به تقاضای مشتریان به شکل مطلوب بیشتر است. این پژوهش یکی از انگشت‌شمار تحقیقاتی است که تأثیر مکان‌یابی و استحکام سازی بر فاصله خدمات‌رسانی بین مشتریان و تسهیلات سلسله مراتبی را بررسی کرده است. با توجه به منابع در زمینه مفاهیم مکان‌یابی سلسله مراتبی، استحکام و ممانعت، بر اساس شبکه‌های پویا، تصادفی و فازی پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده ارائه می‌شود: (۱) طراحی شبکه پویا در شبکه‌های سلسله مراتبی می‌تواند نقش مهمی در عملیات مکان‌یابی، استحکامی، ممانعتی و خدمات‌رسانی داشته باشد. (۲) ارائه یک مدل تصادفی با استفاده از پارامترهای تصادفی از جمله هزینه احداث تسهیلات، تقاضای مشتریان و بودجه‌های ممانعتی و استحکامی که در فرآیند خدمات‌رسانی تأثیر می‌گذارند. (۳) بررسی تئوری فازی برای عدم قطعیت در برخی داده‌ها و استفاده از آن در مدل‌سازی فازی شبکه سلسله مراتبی و عملیات استحکامی و ممانعتی.

۷- پی‌نوشت‌ها

1. Narula
2. Marianov and Serra
3. Hierarchical facility location problem
4. Şahin and Süral
5. Teixeira and Antunes
6. Ratick et al
7. Miyagawa
8. Genetic Algorithm
9. Holland
10. Particle Swarm Optimization
11. Kennedy and Eberhart



۸- منابع

- [1] 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*, 94(3), 491-502.
- [2] Narula, S. C. (1986). Minisum hierarchical location-allocation problems on a network: A survey. *Annals of Operations Research*, 6(8), 255-272.
- [3] Marianov, V., & Serra, D. (2001). Hierarchical location-allocation models for congested systems. *European Journal of Operational Research*, 135(1), 195-208.
- [4] Şahin, G., & Süral, H. (2007). A review of hierarchical facility location models. *Computers & Operations Research*, 34(8), 2310-2331.
- [5] Teixeira, J. C., & Antunes, A. P. (2008). A hierarchical location model for public facility planning. *European Journal of Operational Research*, 185(1), 92-104.
- [6] Ratick, S. J., Osleeb, J. P., & Hozumi, D. (2009). Application and extension of the Moore and ReVelle hierarchical maximal covering model. *Socio-Economic Planning Sciences*, 43(2), 92-101.
- [7] Şahin, G., Süral, H., & Meral, S. (2007). Locational analysis for regionalization of Turkish Red Crescent blood services. *Computers & Operations Research*, 34(3), 692-704.
- [8] Barros, A. I., Dekker, R., & Scholten, V. (1998). A two-level network for recycling sand: a case study. *European journal of operational research*, 110(2), 199-214.
- [9] Van Roy, T. J. (1989). Multi-level production and distribution planning with transportation fleet optimization. *Management Science*, 35(12), 1443-1453.
- [10] Moore, G. C., & ReVelle, C. (1982). The hierarchical service location problem. *Management science*, 28(7), 775-780.
- [11] Kim, J. G., & Tcha, D. W. (1992). Optimal design of a two-level hierarchical network with tree-star configuration. *Computers & industrial engineering*, 22(3), 273-281.



- [12] Farahani, R. Z., Hassani, A., Mousavi, S. M., & Baygi, M. B. (2014). A hybrid artificial bee colony for disruption in a hierarchical maximal covering location problem. *Computers & Industrial Engineering*, 75, 129-141.
- [13] Zarrinpoor, N., Fallahnezhad, M. S., & Pishvaei, M. S. (2017). Design of a reliable hierarchical location-allocation model under disruptions for health service networks: A two-stage robust approach. *Computers & Industrial Engineering*, 109, 130-150.
- [14] Miyagawa, M. (2019). Optimal Number of Hierarchical Facilities with Failures. *Geographical Analysis*.
- [15] Aliakbarian, N., Dehghanian, F., & Salari, M. (2015). A bi-level programming model for protection of hierarchical facilities under imminent attacks. *Computers & operations research*, 64, 210-224.
- [16] Akbari-Jafarabadi, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Mahmoodjanloo, M., & Rahimi, Y. (2015). A three-level mathematical model for an r-interdiction hierarchical facilities location problem. *Iranian Journal of Operations Research*, 6(2), 58-72.
- [17] Forghani, A., Dehghanian, F., Salari, M., & Ghiami, Y. (2020). A bi-level model and solution methods for partial interdiction problem on capacitated hierarchical facilities. *Computers & Operations Research*, 114, 104831.
- [18] Forghani, A., & Dehghanian, F. (2014). An interdiction median model for hierarchical capacitated facilities. *International Journal of Research In Industrial Engineering*, 3(1), 1-10.
- [19] Forghani, A., & Dehghanian, F. (2014). Interdiction problem as a tool to identify an effective budget allocation to quality improvement plans. *Iranian Journal of Operations Research*, 5(1), 52-66.



- [20] Amiri, M., TaghaviFard, M. T., &Aghaei, M. (2016). Development of Three-Objective Model for the Location–Allocation of Assistance Centers in a probabilistic Condition of availability to emergency Vehicles. *Modern Researches in Decision Making (Scientific Research Quarterly)*, 1(2), 1-27.
- [21] Kazemi, A., & Sarvandi, F (2018). Mathematical Modeling of Resource-Constrained Project Scheduling Problem and Solving It by Using Metaheuristic Algorithms. *Modern Researches in Decision Making (Scientific Research Quarterly)*, 3(4), 28-50.
- [22] Olfat, L (2017). Total Tardiness Minimization in Flow Shop with Intermediate Due Dates. *Modern Researches in Decision Making (Scientific Research Quarterly)*, 2(3), 25-47.
- [23] Notash, M., Zandieh, M., &Dorri Nokorani, B. (2015). Using a Genetic Algorithm Approach for Designing Multi-objective Supply Chain Network. *IJBQ*.18 (4):183-203
- [24] Taghavifard, S. M. T., Dehghani, M. H, & Aghaei, M. (2015). The Model for Lot Sizing Problem with Supplier Selection and Solving by NSGA-II (Case Study: Morvarid Panberiz Company). *IJBQ*.19 (2):65-89
- [25] Holland, J. H. (1992). *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. MIT press.
- [26] Kennedy, J., &Eberhart, R. (1995, November). Particle swarm optimization. In *Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks* (Vol. 4, pp. 1942-1948). IEEE.