



یک رویکرد برنامه ریزی سه سطحی برای مساله مکان یابی-استحکامی-ممانعتی در یک شبکه سلسله مراتبی

راحله خاندوزی (۱) ^۱

گروه ریاضی و آمار، دانشکده علوم پایه و فنی مهندسی، دانشگاه گنبد کاووس، گنبد کاووس، ایران

دبیر مسئول: بهروز علی زاده

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۲/۱۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۷/۲۲

چکیده:

اهمیت مکان یابی تسهیلات حیاتی در سیستم های خدمات رسانی سلسله مراتبی و استحکام سازی آن ها در برابر حملات عمدی موضوع اصلی بسیاری از تحقیقات می باشد، که با اتخاذ تصمیمات مناسب مکان یابی و استحکام سازی به پایداری سیستم خدمات در هنگام هجوم های عمدی کمک می کنند. در این مقاله برای اولین بار مساله مکان یابی تسهیلات سلسله مراتبی با در نظر گرفتن عملیات استحکامی و ممانعتی در یک مدل برنامه ریزی سه سطحی بین طراح سیستم، مدافع و مهاجم پیشنهاد شده است. هدف طراح سیستم در سطح اول حداقل سازی هزینه مکان یابی و فاصله خدمات رسانی بین نقاط تقاضا و دو دسته از تسهیلات می باشد. هدف مدافع اتخاذ عملیات استحکامی مناسب در سطح دوم به منظور حداقل سازی فاصله بین مشتریان و نزدیکترین تسهیلات برای دریافت خدمات اولیه و ارجاعی برای خدمات ثانویه با توجه به منابع مکان یابی موجود است. این در حالی است که مهاجم در سطح سوم مدل به عنوان پیرو به دنبال اتخاذ تصمیمات تخصیص مشتری به دو دسته تسهیل و عملیات ممانعتی به منظور حداکثر سازی فاصله های سیستم خدمات رسانی می باشد. برای حل مساله جدید، روش فرا ابتکاری ترکیبی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک، الگوریتم شبیه ساز تبرید و *CPLEX* پیشنهاد شده است و با حل چند نمونه عددی به بررسی و تحلیل نتایج و ارتباط بین پارامترهای مدل و اهداف سیستم خدمات رسانی سلسله مراتبی پرداخته شده است.

واژه های کلیدی: سلسله مراتبی، مدل سه سطحی، مکان یابی، استحکام سازی، ممانعت

رده بندی ریاضی: 90B10; 97M40; 90C10

۱ مقدمه

شبکه های سلسله مراتبی در سرویس دهی خدمات میان افراد و تسهیلات نقش مهمی ایفا می کنند. لذا، مکان یابی این تسهیلات حائز اهمیت است. به عنوان مثال، شبکه خدمات درمانی که متشکل از بیمارستان های عمومی و تخصصی است، یک شبکه سلسله مراتبی دو سطحی محسوب می شود. در این مثال، بیمارستان های عمومی، اولین سطح تسهیلات هستند و بیماران مستقیماً برای خدمات درمانی اولیه و تشخیص و جراحی های سرپایی مراجعه می کنند. بیمارستان های تخصصی نیز بعنوان دومین سطح تسهیلات، وظیفه درمان بیماران ارجاعی از بیمارستان های عمومی و همچنین عمل های جراحی پیشرفته را دارند. از سوی دیگر، موثرترین روش برای مکان یابی و استحکام سازی بیمارستان های عمومی و تخصصی در شبکه های بهداشت و درمان در برابر حملات عمدی و همچنین برآورده کردن نیازهای بیماران برای خدمات بهداشتی از نزدیک ترین بیمارستان های عمومی و تخصصی بسیار مهم است. شکل ۱ جهت ارجاع و جریان بین بیماران و بیمارستان های عمومی و تخصصی در شبکه بهداشت و درمان را نشان می دهد. طبق شکل ۱، یکی از سه رویداد زیر ممکن است رخ دهد:

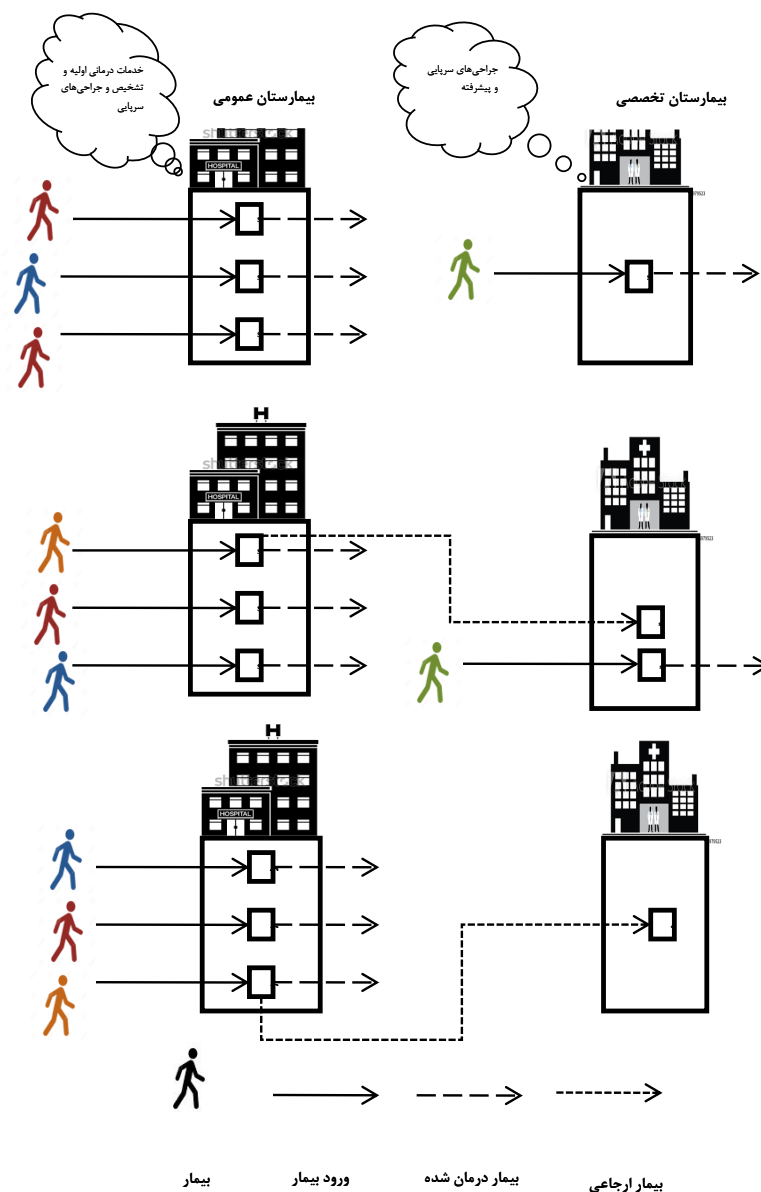
۱. یک بیمار به بیمارستان عمومی مراجعه می کند. در این مورد، بیمار توسط پزشک معاینه می شوند و بعد از دریافت مراقبت های اولیه و خدمات تشخیصی درمان می شوند. (بیمار قرمز)

۲. یک بیمار به بیمارستان عمومی مراجعه می کند. در این مورد، بیمار توسط پزشک مورد عمل جراحی سرپایی قرار می گیرد. (بیمار آبی)

۳. یک بیمار به بیمارستان تخصصی مراجعه می کند. در این مورد، بیمار توسط پزشک مورد عمل جراحی سرپایی قرار می گیرد. (بیمار سبز)

۴. بیمار از بیمارستان عمومی به بیمارستان تخصصی ارجاع می شود تا خدمات بستری دریافت کند. برای این بیمار، ارجاع در صورت وجود یک متخصص مرتبط و یک تخت خالی در بیمارستان تخصصی رخ می دهد. (بیمار نارنجی)

از سوی دیگر، افزایش اختلالات ناشی از حمله های عمدی و اتخاذ تصمیمات استحکامی مناسب، لزوم توجه بیشتر به این موضوع علمی را افزایش داده است. مدل های مکان یابی-استحکامی-ممانعتی با افزایش عملکرد سیستم های سرویس دهی به پایداری و امنیت خدمات با عملیات استحکامی در هنگام هجوم ها کمک می کنند. هدف اصلی این مدل ها، مکان یابی بهینه تسهیلات، کاهش فاصله خدمات رسانی بین مشتریان و تسهیلات و بررسی میزان آسیب پذیری آن ها در مقابل اختلالات است [۴]. برای اولین بار در سال ۲۰۱۵، علی اکبریان و همکارانش [۲] مدلی دوسطحی برای ممانعت و استحکام سازی تسهیلات سلسله مراتبی ارائه کردند. مدل مدافع-مهاجم توسط آن ها از دید مدافع تدوین شده است. اکبری جعفرآبادی و همکاران سال ۲۰۱۵، مدلی ریاضی ارائه کردند که به صورت مسئله سه سطحی مدافع-مهاجم-مدافع و سلسله مراتبی فرمول بندی شده بود [۱]. در سطح اول، هدف مدافع استحکام سازی تسهیلات به منظور افزایش امنیت سیستم با کمترین هزینه ممکن و پوشش کامل تقاضای مشتری قبل از عملیات ممانعتی است. بدترین حالت سناریوی تلفات توسط مهاجم در سطح دوم مدلسازی شده است. هدف مدافع در سطح سوم، تخصیص تقاضای مشتریان به تسهیلات به منظور کمینه سازی کل هزینه های حمل و نقل و برون سپاری است. فرقانی و دهقانپان در سال ۲۰۱۴ در [۵] یک مدل دوهدفه با نام مسئله ممانعت سلسله مراتبی ارائه کردند. هدف اول مهاجم کمینه سازی سود حاصل از برآورده شدن تقاضای کل مشتریان است و هدف دوم نیز حداقل کردن کل هزینه ممانعت است. فرقانی و دهقانپان همچنین در سال ۲۰۲۰، در [۶] یک مدل برنامه ریزی دوسطحی برای مسئله ممانعت جزئی برای تسهیلات سلسله مراتبی ظرفیت دار با محدودیت بودجه ارائه کرد. در سال ۲۰۲۰، خاندوزی در [۸] یک مدل برنامه ریزی دوسطحی برای مسئله مکان یابی دونوع تسهیلات سلسله مراتبی تحت عملیات ممانعتی و استحکامی ارائه کردند. مدافع در سطح اول به دنبال تعیین مکان بهینه تسهیلات و عملیات استحکام سازی تسهیلات به منظور کمینه سازی هزینه تسهیلات و فاصله خدمات رسانی بین مشتریان و تسهیلات بود. در مسئله سطح دوم، هدف مهاجم تعیین عملیات ممانعتی بود. در سال ۲۰۲۱، خاندوزی و رستگار یک مدل برنامه ریزی دوسطحی برای مسئله ممانعت و استحکام سازی تسهیلات سلسله مراتبی شامل سه نوع تسهیل برای کمینه سازی هزینه حمل و نقل و تخصیص بهینه مشتریان به تسهیلات با توجه به عملیات ممانعتی و استحکامی ارائه کردند. آن ها همچنین یک الگوریتم ترکیبی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و شبیه ساز تبرید برای حل مسئله ارائه و نتایج اجرای آن برحل نمونه هایی از مسئله، عملکرد خوب این الگوریتم را در مقابل الگوریتم های موجود در ادبیات تأیید کرده است [۹]. در سال ۲۰۲۲، یک مسئله مکان یابی هاب حداکثر پوشش با وجود اختلال در هاب های شبکه سلسله مراتبی توسط امانی قیوم و همکاران [۳] بررسی و یک مدل برنامه ریزی دوسطحی فرمول بندی شده است. در سطح اول، رهبر مکان یابی هاب ها را به منظور بیشینه سازی پوشش انجام داده است. در سطح دوم، هدف پیرو تخریب هاب ها است تا بیشترین آسیب به شبکه سلسله مراتبی وارد شود. خاندوزی و رستگار همچنین در سال ۲۰۲۲ در [۱۰] یک مدل دوسطحی با نام مسئله تعاونی ممانعت و استحکام سلسله مراتبی با محدودیت بودجه ارائه دادند. هدف سطح بالا تخصیص منابع دفاعی به سه نوع تسهیلات سلسله مراتبی است تا احتمال مختل کردن انواع تسهیلات به حداقل برسد. پس از این عملیات حفاظتی، تصمیم گیرنده سطح پایین وضعیت سه نوع تسهیلات را بررسی تا به شیوه ای مشارکتی باعث از بین رفتن ظرفیت یا حذف خدمات تسهیلات با بودجه محدود گردد. یک الگوریتم ترکیبی مبتنی بر جستجو ممنوعه و شبکه عصبی برای حل مسئله جدید نیز ارائه شده است. کرزه بر و توکل مقدم در سال ۲۰۲۲ در [۱۳] یک مدل ریاضی دوهدفه برای مسئله مکان یابی-مکان یابی مجدد تسهیلات سلسله



شکل ۱: جریان خدمات در شبکه بهداشت و درمان

مراتبی در شرایط بحران و رخداد اختلالات ارایه کردند. اولین تابع هدف بیشینه سازی تقاضای پوشش داده شده را نشان می‌دهد و دومین هدف کمینه‌سازی هزینه ناشی از تغییرات در ساختار تسهیلات را نشان می‌دهد. خاندوزی و همکاران در سال ۲۰۲۴ در [۱۱] یک مدل برنامه ریزی دوسطحی برای مسأله ممانعت و استحکامی سازی در یک شبکه بهداشت و درمان سلسله مراتبی ارایه کردند. هدف رهبر کمینه سازی هزینه استقرار تجهیزات حفاظتی و فاصله خدمات رسانی بین بیماران و تسهیلات سلامت است. در مقابل، هدف پیرو اختلال در شبکه بهداشت و درمان با از بین بردن تسهیلات سلامت و در نتیجه افزایش فاصله کلی سفر برای بیماران است.

مدل سه سطحی ارائه شده در این مقاله بر اساس رویکرد طراح سیستم-مدافع-مهاجم و شبکه سلسله مراتبی با دو نوع تسهیلات و خدمات فرمول‌بندی شده است. طراح در سطح اول به دنبال تعیین مکان بهینه 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. مسأله سطح دوم بر اساس مدل استحکامی و از دیدگاه مدافع و مسأله سطح سوم بر اساس مدل ممانعتی و از دیدگاه مهاجم تدوین شده‌اند. ساختار مقاله به این صورت می‌باشد که در بخش دوم مدل ریاضی سه سطحی برای مکان‌یابی-استحکامی-ممانعتی

شبکه سلسله مراتبی معرفی و مدل سازی شده است. در بخش سوم روش فراابتکاری ترکیبی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک، الگوریتم شبیه ساز تبرید و $CPLEX$ برای حل مسأله جدید بیان می شود. در بخش چهارم نتایج حل چند نمونه عددی ارائه شده است و در بخش پنجم، به نتیجه گیری و پیشنهاد های آتی خواهیم پرداخت.

۲ طراحی مدل ریاضی مکان یابی-استحکامی-ممانعتی سلسله مراتبی

برای مدل ریاضی سه سطحی برای مکان یابی-استحکامی-ممانعتی شبکه سلسله مراتبی در این مقاله ۵ مجموعه اصلی شامل مشتری ها، سایت های تسهیلات کاندید در سطح ۱ و ۲، سطوح سرویس دهی و خدمات در نظر گرفته شده است. در ادامه قبل از ارایه مدل، مجموعه ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم گیری معرفی می شود:

مجموعه ها:

I : مجموعه مشتری ها، $I = \{1, \dots, n\}$

J_1 : مجموعه سایت های تسهیلات کاندید در دسته ۱، $J_1 = \{1, \dots, m_1\}$

J_2 : مجموعه سایت های تسهیلات کاندید در دسته ۲، $J_2 = \{1, \dots, m_2\}$

S : مجموعه سطوح سرویس دهی،

V : مجموعه خدمات.

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 $k \in J_2$ ؛

a_i : تقاضا مشتری i ؛

f_j^s : هزینه ثابت احداث تسهیل $j \in J_1 \cup J_2$ در دسته s ؛

r_1 : تعداد عملیات ممانعتی بر روی تسهیلات در دسته اول؛

r_2 : تعداد عملیات ممانعتی بر روی تسهیلات در دسته دوم؛

q_1 : تعداد عملیات استحکامی بر روی تسهیلات در دسته اول؛

q_2 : تعداد عملیات استحکامی بر روی تسهیلات در دسته دوم؛

p_1 : تعداد تسهیلات در دسته اول؛

p_2 : تعداد تسهیلات در دسته دوم؛

α : نسبت تقاضای ارجاعی برای خدمات سطح بالا (سرویس نوع ۲) بعد از دریافت کردن خدمات سطح پایین (سرویس نوع ۱)؛

β : نسبت تقاضای ارسالی از هر نقطه تقاضا برای دریافت مستقیم خدمات تسهیلات در دسته دوم؛

$T_{ij}^1 = \{l \in J_1 \cup J_2 | l \neq j, d_{il} > d_{ij}\}$

مجموعه همه تسهیلات موجود (نه شامل $j \in J_1 \cup J_2$) که دورتر از j از مشتری $i \in I$ هستند؛

$T_{ij}^2 = \{l \in J_1 | l \neq j, d_{il} > d_{ij}\}$

مجموعه همه تسهیلات موجود (نه شامل $j \in J_1$) که دورتر از j از مشتری $i \in I$ هستند؛

$T_{ij}^3 = \{l \in J_2 | l \neq j, d_{il} > d_{ij}\}$

مجموعه همه تسهیلات موجود (نه شامل $j \in J_2$) که دورتر از j از مشتری $i \in I$ هستند؛

$T'_{jk} = \{l \in J_2 | l \neq k, d'_{jl} > d'_{jk}\}$

مجموعه همه تسهیلات موجود (نه شامل $j \in J_2$) که دورتر از j از تسهیل $k \in J_2$ هستند.

متغیرهای تصمیم:

e_{ij}^1 : میزان تقاضای مشتری $i \in I$ برای خدمات نوع اول که توسط تسهیل $J_1 \cup J_2$ در $j \in J_1 \cup J_2$ تامین می‌شود؛
 e_{ij}^2 : میزان تقاضای مشتری $i \in I$ برای خدمات نوع دوم که توسط تسهیل J_2 در $j \in J_2$ تامین می‌شود؛
 e_{jk}^3 : میزان تقاضا برای خدمات نوع دوم که از تسهیل $J_1 \cup J_2$ در $j \in J_1 \cup J_2$ به تسهیل $k \in J_2$ ارجاع داده می‌شود؛

$$x_j^s = \begin{cases} 1, & \text{اگر تسهیل در دسته } s \text{ در مکان } j \in J_1 \cup J_2 \text{ قرار بگیرد} \\ 0, & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

$$w_j^s = \begin{cases} 1, & \text{اگر تسهیل } j \in J_1 \cup J_2 \text{ در دسته } s \text{ مستحکم شود} \\ 0, & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

$$y_j^s = \begin{cases} 1, & \text{اگر تسهیل } j \in J_1 \cup J_2 \text{ در دسته } s \text{ ممانعت شود} \\ 0, & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

$$z_{ij}^v = \begin{cases} 1, & \text{اگر مشتری } i \in I \text{ به تسهیل } j \in J_1 \cup J_2 \text{ برای دریافت سرویس نوع } v \text{ اختصاص داده شود} \\ 0, & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

$$z'_{jk} = \begin{cases} 1, & \text{اگر تقاضا برای سرویس نوع ۱، ابتدا به تسهیل } j \in J_1 \cup J_2 \text{ اختصاص داده شود} \\ & \text{و آنگاه به تسهیل } k \in J_2 \text{ برای دریافت سرویس نوع ۲ ارجاع داده شود} \\ 0, & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

این مدل شامل سه سطح است: در سطح بالا، طراح سیستم مکان تسهیلات را تعیین می‌کند؛ در سطح میانی، مدافع یک یا چند تسهیل را مستحکم می‌کند و در سطح پایین، ممانعت‌گر یک یا چند تسهیل را تخریب می‌کند تا تسهیلات باقی مانده کارآمد عمل کنند و تقاضای مشتریان به بهترین شکل ممکن تامین شود. اساساً، سه نوع تصمیم توسط دو بازیگر مختلف اتخاذ می‌شود: (۱) طراح سیستم یا مدافع تصمیم می‌گیرد که کدام تسهیلات را مکان‌یابی و از آنها محافظت کند تا سیستم در خدمات رسانی به مشتریان کارآمد عمل کند. (۲) ممانعت‌گر تصمیم می‌گیرد که کدام تسهیلات را تخریب کند تا بیشترین آسیب به سیستم وارد شود.

اگرچه ما از اصطلاح "ممانعت‌گر" برای نشان دادن نقش اختلال در سیستم استفاده می‌کنیم، اما نشان دهنده رویدادهایی است که باعث آسیب می‌شود، به عنوان مثال یک تروریست یا یک حادثه طبیعی (طوفان، سیل، زلزله و غیره) که عملکرد سیستم را مختل می‌کنند. ما از اصطلاح "استحکامات" برای نشان دادن نوعی اقدام حفاظتی استفاده می‌کنیم که برای دفع یک حمله مخرب یا حادثه طبیعی انجام می‌شود. بنابراین، مدلی که ما در این زمینه پیشنهاد می‌کنیم کلی است ولی انتظار داریم که برای کاربردهای خاص طراحی شود.

مدل سه سطحی، مکان بهینه $p_1 + p_2$ تسهیل را تعیین می‌کند تا تابع هزینه سیستم به حداقل برسد. این تابع نشان‌دهنده هزینه مکان‌یابی تسهیلات و فاصله وزنی خدمت‌رسانی به مجموعه‌ای از نقاط تقاضا است که پس از حفاظت $q_1 + q_2$ تسهیل به سیستم تحمیل می‌شود. مقدار این تابع در مسأله سطح میانی محاسبه می‌شود که در آن مدافع منابع حفاظتی را بین تسهیلات ممانعت نشده تخصیص می‌دهد تا هزینه سیستم را کمینه کند. همچنین، محاسبه هزینه‌های سیستم پس از استحکام سازی تسهیلات، نیازمند حل مسأله سطح پایین‌تر است. در این سطح، هدف ممانعت $r_1 + r_2$ تسهیل برای بیشینه سازی کل هزینه سیستم است که شامل هزینه خدمت‌رسانی به مشتریان و هزینه نزدیکترین تسهیلات از دست رفته که برخی از تقاضاهای مشتریان را نمی‌توان پس از ممانعت تامین کرد و لذا از تسهیلات دورتر خدمات رسانی می‌شوند. فرم کلی مسأله سه سطحی مکان‌یابی-استحکامی-ممانعتی سلسله مراتبی را به صورت زیر می‌توان فرمولبندی کرد:

$$\min Z_{des} = \sum_{s \in S} \sum_{j \in J_1 \cup J_2} f_j^s x_j^s + F(x) \quad (1.2)$$

s.t.

$$\sum_{j \in J_1} x_j^1 = p_1 \quad (2.2)$$

$$\sum_{j \in J_2} x_j^2 = p_2 \quad (3.2)$$

$$x_j^s \in \{0, 1\}, \forall j \in J_1 \cup J_2, \forall s \in S \quad (4.2)$$

جایی که x_j^s مساله زیر را حل می کند:

$$F(x) = \min H(e) \quad (۵.۲)$$

s.t.

$$\sum_{j \in J_1} w_j^1 = q_1 \quad (۶.۲)$$

$$\sum_{j \in J_2} w_j^2 = q_2 \quad (۷.۲)$$

$$w_j^1 \leq x_j^1 \quad (۸.۲)$$

$$w_j^2 \leq x_j^2 \quad (۹.۲)$$

$$w_j^s \in \{0, 1\}, \forall j \in J_1 \cup J_2, \forall s \in S \quad (۱۰.۲)$$

جایی که w_j^s مساله زیر را حل می کند:

$$H(e) = \max \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_1 \cup J_2} d_{ij} e_{ij}^1 + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_2} d_{ij} e_{ij}^2 + \sum_{j \in J_1 \cup J_2} \sum_{k \in J_2} d'_{jk} e'_{jk} \quad (۱۱.۲)$$

s.t.

$$\sum_{j \in J_1 \cup J_2} e_{ij}^1 = a_i(1 - \alpha) \sum_{j \in J_1 \cup J_2} z_{ij}^1, \forall i \in I \quad (۱۲.۲)$$

$$\sum_{j \in J_2} e_{ij}^2 = a_i \alpha \sum_{j \in J_2} z_{ij}^2, \forall i \in I \quad (۱۳.۲)$$

$$\sum_{k \in J_2} e'_{jk} = a_i \sum_{k \in J_2} z'_{jk}, \forall j \in J_1 \cup J_2, \forall i \in I \quad (۱۴.۲)$$

$$\sum_{j \in J_1 \cup J_2} \sum_{k \in J_2} e'_{jk} = \beta \sum_{j \in J_1 \cup J_2} e_{ij}^1, \forall i \in I \quad (۱۵.۲)$$

$$\sum_{j \in J_1} y_j^1 = r_1 \quad (۱۶.۲)$$

$$\sum_{j \in J_2} y_j^2 = r_2 \quad (۱۷.۲)$$

$$y_j^s \leq x_j^s - w_j^s, \forall j \in J_1 \cup J_2, \forall s \in S \quad (۱۸.۲)$$

$$\sum_{h \in T_{ij}^1} z_{ih}^1 \leq y_j^1, \forall i \in I, \forall j \in J_1 \quad (۱۹.۲)$$

$$\sum_{h \in T_{ij}^2} z_{ih}^2 \leq y_j^2, \forall i \in I, \forall j \in J_2 \quad (۲۰.۲)$$

$$\sum_{h \in T_{ij}^2} z_{ih}^1 + \sum_{h \in T_{ij}^2} z_{ih}^2 \leq y_j^2, \forall i \in I, \forall j \in J_2 \quad (۲۱.۲)$$

$$\sum_{h \in T'_{jk}} z'_{jh} \leq y_k^2, \forall k \in J_2, \forall j \in J_1 \cup J_2 \quad (۲۲.۲)$$

$$y_j^s, z_{ij}^v, z'_{jk} \in \{0, 1\}, e_{ij}^v, e'_{jk} \geq 0, \forall i \in I, \forall j, k \in J_1, J_2, \forall s \in S, \forall v \in V \quad (۲۳.۲)$$

در این مدل، (۱.۲) هدف طراح سیستم را تعیین می کند که کمینه سازی کل هزینه مکان یابی تسهیلات دسته ۱ و ۲ و فاصله بین تسهیلات دسته ۱ و ۲ و مشتریان و فاصله ارجاعی است. قیدهای (۲.۲-۳.۲) نشان می دهند که به ترتیب p_1 و p_2 تسهیل در دسته ۱ و

۲ مکان‌یابی می‌شوند. در (۴.۲) متغیرهای تصمیم‌گیری مکان‌یابی در دسته‌های مختلف به صورت صفر و یک تعریف شده است. تابع هدف مدافع (۵.۲) مجموع فاصله‌های بین تسهیلات دسته ۱ و ۲ و مشتریان و فاصله‌های ارجاعی را کمینه می‌کند. محدودیت‌های (۶.۲-۷.۲) به ترتیب محدودیت عملیات استحکامی مدافع برای حفاظت تسهیلات دسته ۱ و ۲ است. قیدهای (۸.۲-۹.۲) مشخص می‌کند که فقط بر تسهیلات مکان‌یابی شده عملیات استحکامی انجام می‌شود. در (۱۰.۲) متغیرهای تصمیم‌گیری مربوط به عملیات استحکامی به صورت صفر و یک تعریف شده است. تابع هدف مهاجم (۱۱.۲) مجموع فاصله‌های بین تسهیلات دسته ۱ و ۲ و مشتریان و فاصله‌های ارجاعی را بیشینه می‌کند. روابط (۱۲.۲-۱۵.۲) به ترتیب بیان می‌کنند که کلیه تقاضای مشتریان در سطح ۲، ۱ و ارجاعی باید از طریق تخصیص به تسهیلات شبکه سرویس دهی تأمین شود. محدودیت‌های (۱۶.۲-۱۷.۲) به ترتیب محدودیت عملیات ممانعتی مهاجم برای حمله به تسهیلات دسته ۱ و ۲ است. قید (۱۸.۲) مشخص می‌کند که فقط بر تسهیلات مکان‌یابی شده و حفاظت نشده عملیات ممانعتی انجام می‌شود. محدودیت‌های (۱۹.۲)، (۲۰.۲)، (۲۱.۲) و (۲۲.۲) به ترتیب الزام تبعیت تخصیص مشتریان از تسهیلات دسته ۱ برای خدمت نوع ۱، تسهیلات دسته ۲ برای خدمت نوع ۱، تسهیلات دسته ۲ برای خدمات نوع ۲ و خدمات ارجاعی را نشان می‌دهند. در (۲۳.۲) متغیرهای تصمیم‌گیری مربوط به عملیات ممانعتی و تخصیص مشتریان به تسهیلات سطح ۱ و ۲ به صورت باینری و میزان تقاضا مشتریان برای خدمات نوع ۱ و ۲ و تقاضای ارجاعی پیوسته تعریف شده‌اند.

۳ روش حل

با توجه به طبیعت NP -سخت مسایل سه سطحی [۱]، حل مسأله جدید به صورت دقیق در زمانی بسیار طولانی امکان‌پذیر است. لذا با توجه به عملکرد خوب روش‌های فراابتکاری در دستیابی به جواب‌های با کیفیت بالا در دقت و زمان اجرا کوتاه، در این مقاله یک الگوریتم ترکیبی مبتنی بر دو الگوریتم فراابتکاری و یک روش دقیق ارائه شده است. در مدل ریاضی سه سطحی ارائه شده، زیر مسأله طراح سیستم و زیرمسأله مدافع شامل متغیرهای باینری و زیر مسأله مهاجم شامل متغیرهای باینری و پیوسته می‌باشد. برای این منظور، روش ترکیبی جدید شامل سه گام پیشنهاد شده است. در اولین گام، بهترین مقدار برای متغیرهای باینری در مسأله سطح اول به وسیله الگوریتم ژنتیک محاسبه می‌شود. در گام دوم با ثابت شدن متغیرهای باینری سطح اول در مسأله سطح دوم، مسأله سطح دوم به وسیله الگوریتم شبیه ساز تبرید حل می‌شود و بهترین مقدار برای متغیرهای باینری و پیوسته در مسأله سطح سوم (با توجه به ثابت بودن متغیرهای مسائل سطح اول و دوم) در گام سوم توسط حل‌کننده MIP از CPLEX با استفاده از تابع cplexmip از نرم‌افزار MATLAB بدست می‌آیند.

۱.۳ الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یک الگوریتم فراابتکاری تکاملی است که به وسیله جان هلند [۷] ابداع شد و توسط خودش و شاگردانش توسعه یافت. روش ترکیبی سه سطحی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک، الگوریتم شبیه ساز تبرید و روش دقیق یک روش بهینه‌سازی سلسله‌مراتبی است که برای یافتن نقطه تعادل سه تصمیم‌گیرنده استفاده می‌شود. در مسأله مکان‌یابی-ممانعتی-استحکامی روی شبکه خدمات‌رسانی سلسله‌مراتبی، روش ارائه شده سه مسأله بهینه‌سازی را با روندی تکراری حل می‌کند به طوری که الگوریتم ژنتیک برای حل مسأله طراح سیستم، الگوریتم شبیه ساز تبرید برای حل مسأله مدافع و یک الگوریتم دقیق برای حل مسأله مهاجم استفاده می‌شوند. محدودیت‌ها در زیرمسأله سطح اول برای انتقال داده‌ها از زیر مسأله سطح دوم جهت عملیات بهینه‌سازی استحکام‌سازی تسهیلات سلسله‌مراتبی استفاده می‌شوند و سپس زیر مسأله سطح سوم با روش دقیق حل می‌شود. مراحل کلی اجرای الگوریتم ژنتیک ارائه شده در زیر نشان داده شده است.

۱) کروموزوم‌ها در الگوریتم ژنتیک، یک جمعیت اولیه از راه‌حل‌های تصادفی ایجاد می‌شود. هر فرد در جمعیت به عنوان یک کروموزوم در نظر گرفته می‌شود و هر کروموزوم دارای ژن‌هایی است. برای مسأله طراح سیستم، هر کروموزوم شامل دو بخش است که برای نشان دادن عملیات مکان‌یابی تسهیلات نوع ۱ و ۲ در مسأله سطح اول استفاده می‌شوند. برای نمایش کروموزوم از یک ماتریس استفاده نموده ایم که مقادیر ماتریس از نوع صفر و یک هستند. این ماتریس، ماتریس مکان‌یابی است که مربوط به سایت‌های تسهیلات بوده؛ هر سطر آن مربوط به یک سطح سرویس دهی می‌باشد. عناصر آن سطر متناظر با تسهیلات نوع ۱ و ۲ است. ابعاد این ماتریس $|J_1 \cup J_2| \times |S|$ است که سطرهای آن تعداد سرویس‌ها و ستون‌های آن تعداد نقاط کاندید را جهت استقرار انواع تسهیلات نشان می‌دهد. درایه‌های این ماتریس صفر و یک می‌باشد و یک بودن هر عنصر به معنی احداث تسهیل است و صفر بودن آن به معنی عدم احداث تسهیل است.

$$X = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_1^2 & \cdots & x_1^{|J_1 \cup J_2|} \\ x_2^1 & x_2^2 & \cdots & x_2^{|J_1 \cup J_2|} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{|S|}^1 & x_{|S|}^2 & \cdots & x_{|S|}^{|J_1 \cup J_2|} \end{bmatrix}, \quad (1.3)$$

(۲) جمعیت اولیه جمعیت اولیه به طور تصادفی تولید می شود و اندازه جمعیت با توجه به ابعاد مساله طراح سیستم تعیین می شود. در این مرحله برای تولید ماتریس مکان یابی به صورت تصادفی و با توجه به محدودیت تعداد تسهیل در دسته ۱ و ۲ در هر سطح سرویس دهی عمل می شود. برای تولید ماتریس از مکانیزم چرخ رولت استفاده می کنیم. در این مقاله از روش انتخاب براساس تورنامنت برای انتخاب کروموزوم ها استفاده شده است.

(۳) عملگر ارزیابی میزان بهینگی هر یک از کروموزوم ها یا افراد جمعیت با توجه به یک تابع برازندگی (تابع هدف زیرمساله طراح سیستم) محاسبه می شود. کروموزوم ها با مقدار برازندگی بالاتر شانس بیشتری برای حضور در نسل بعدی دارند.

(۴) عملگر تقاطع یا ترکیب هدف عملگر تقاطع تولید جواب های جدید و افزایش سرعت در تولید جواب بهینه است. برای اجرای این عملگر، یک نقطه برش تصادفی در دو کروموزوم والد انتخاب می شود و کروموزوم های جدید با بخش چپ نقطه برش و معاوضه یا جابجایی با بخش راست نقاط برش والدین تولید می شوند. سپس تابع برازندگی کروموزوم های جدید محاسبه می شود.

(۵) عملگر جهش هدف عملگر جهش دوری از همگرایی زودرس و افزایش تراکم جمعیت است. در مکانیزم جهش ژنی، ابتدا یک والد به طور تصادفی انتخاب می شود و جهش ژنی برای اولین و دومین بخش کروموزوم والد اجرا می شود. این عملگر دو ژن از بخش ها انتخاب می کند و مقدار آنها را عوض می کند.

۲.۳ الگوریتم شبیه ساز تبرید

الگوریتم شبیه ساز تبرید، یک الگوریتم فراابتکاری کارا در حل مسایل بهینه سازی ترکیبیاتی و شبکه است. منشا این الگوریتم، بر پایه مطالعات کیرک پاتریک و همکاران در سال ۱۹۸۳ [۱۲] است. مفهوم اصلی روش شبیه ساز تبرید از فرآیند فیزیکی تبرید فلزات مذاب نشأت گرفته شده است. برای حل یک مساله بهینه سازی، الگوریتم شبیه ساز تبرید از یک جواب اولیه شروع می کند و سپس در یک حلقه تکرار راه حل های جدید با توجه به ساختار همسایگی تعیین شده به وجود می آورد. اگر جواب جدید، بهتر از راه حل قبلی باشد، الگوریتم آن را به عنوان جواب فعلی قرار می دهد، در غیر این صورت، آن را با احتمال $p = e^{-\frac{\Delta H}{T}}$ به همان شکل راه حل قبلی می پذیرد. در این رابطه، ΔH تفاوت سطح انرژی بین تابع هدف راه حل قبلی و راه حل جدید است و T پارامتر دما است. در اینجا، عدد تصادفی R با توزیع یکنواخت در بازه $[0, 1]$ انتخاب شده و با p مقایسه می گردد. اگر $R < p$ باشد، راه حل جدید پذیرفته می شود و جهت شروع گام بعد استفاده می گردد. در غیر این صورت راه حل جدید رد می شود. در هر دما، چندین تکرار انجام می شود و سپس دما کاهش می یابد. در تکرارهای اولیه دما بالا است تا احتمال پذیرش راه حل های نه چندان خوب هم وجود داشته باشد. با کاهش دما، در تکرارهای پایانی احتمال کمتری برای پذیرش جواب های بد وجود دارد و بنابراین الگوریتم شبیه ساز تبرید به جواب بهینه سراسری همگرا می شود.

راه حل اولیه: راه حل اولیه در الگوریتم شبیه ساز تبرید نشان دهنده یک جواب شدنی از فضای شدنی مساله سطح دوم است.

همسایگی: برای یک راه حل همسایگی از عملگر معاوضه استفاده می شود. در این عملگر دو مکان را به طور تصادفی انتخاب می کنیم و جای آنها را با هم تعویض می کنیم.

فرآیند کاهش دما: دمای درجه تصادفی بودن حرکت به سمت راه حل را مشخص می کند. لذا فرآیند کاهش دما در هر تکرار طبق رابطه ۲.۳ انجام می گیرد.

$$T_{k+1} = \alpha T_k, \alpha = \sqrt[L]{\frac{T_e}{T_f}} \quad (2.3)$$

که در آن α ضریب تبرید یا کاهش دما می باشد و T_k و T_{k+1} دما در تکرار k و $k+1$ و T_e و T_f دمای ابتدایی و نهایی و L تعداد تکرار است.

حلقه داخلی و خارجی: تعداد حلقه داخلی مشخص می کند که چند جواب جدید شدنی برای تولید یک مقدار دما وجود دارد و حلقه خارجی برای پایان دادن به روند جستجو اعمال می شود. در این مقاله، معیار حلقه داخلی و حلقه خارجی به ترتیب عبارتند از: ۱۰ و ۱۰۰۰.

۳.۳ الگوریتم ترکیبی سه سطحی

برای حل مساله مکان یابی-استحکامی-ممانعتی تسهیلات سلسله مراتبی جدید با روش ارایه شده، ابتدا الگوریتم ژنتیک از یک جواب اولیه در فضای جواب طراح سیستم حرکت می کند و مساله مدافع با الگوریتم شبیه ساز تبرید حل و سپس جواب بهینه مهاجم با استفاده از حل کننده

$CPLEX$ بدست می‌آید. بنابراین، تکرارهای روش ارایه شده شامل جستجوی بهترین مکان برای تسهیلات دسته ۱ و ۲ (x_j^s) با استفاده از الگوریتم ژنتیک است. زمانی که مکان تسهیلات دسته ۱ و ۲ تعیین شد، جواب بهینه زیرمسأله مدافع با الگوریتم شبیه ساز تبرید بدست می‌آید. الگوریتم شبیه ساز تبرید یک استراتژی بهینه برای عملیات استحکامی تسهیلات دسته ۱ و ۲ (w_j^s) ارایه می‌کند. بهترین مکان برای تسهیلات دسته ۱ و ۲ در زیرمساله سطح اول و بهترین عملیات استحکامی تسهیلات دسته ۱ و ۲ برای انتقال داده‌ها به زیر مساله سطح سوم جهت عملیات بهینه ممانعتی تسهیلات سلسله مراتبی و تخصیص مشتریان به تسهیلات سلسله مراتبی استفاده می‌شوند و سپس زیر مساله سطح سوم با روش دقیق حل می‌شود. این الگوریتم دقیق یک استراتژی بهینه برای تخصیص مشتریان به تسهیلات دسته ۱ و ۲ (z_{ij}^v, z_{jk}^v) و میزان تقاضا مشتریان برای خدمات نوع ۱ و ۲ و تقاضای ارجاعی (e_{ij}^v, e_{jk}^v) و یک جواب بهینه برای عملیات ممانعتی (y_j^s) توسط مهاجم ارایه می‌کند.

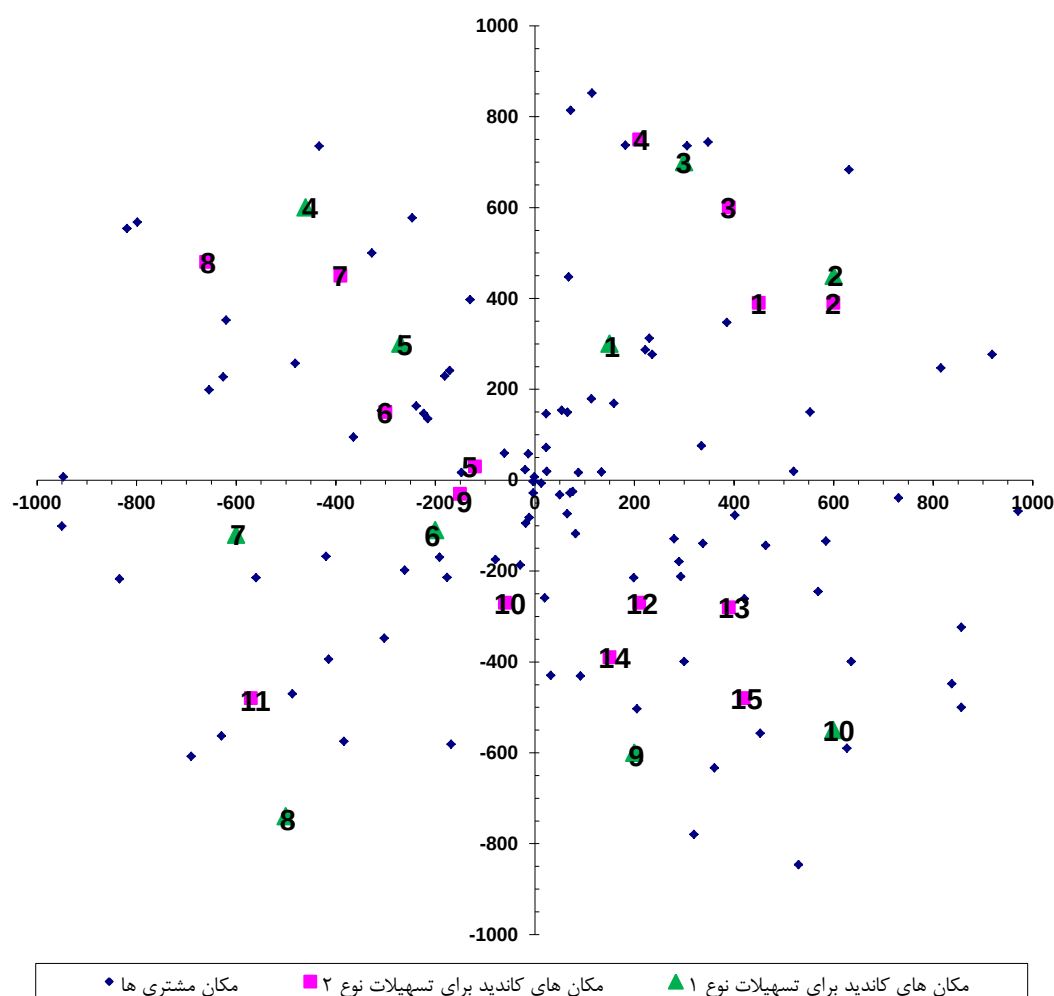
۴ حل مثالهایی از مساله با استفاده از روش ترکیبی

در این بخش ابتدا چند مثال عددی از مسأله جهت پیاده‌سازی روش ترکیبی ارایه می‌شود. برای تولید این مثال‌ها یک شبکه سلسله مراتبی در نظر گرفته شده و مشخصات نمونه‌های عددی در جدول ۱ ارایه شده است. شکل ۲ مکان کاندید برای تسهیلات نوع ۱ و ۲ و مشتریان را روی صفحه مختصات نمایش می‌دهد. عملکرد الگوریتم ژنتیک و الگوریتم شبیه ساز تبرید برطبق مقادیر متفاوتی از پارامترهایشان ارزیابی

جدول ۱: الگوی تولید نمونه های عددی

پارامتر	مقدار
انواع خدمات	۲
تعداد دسته تسهیلات	۲
تعداد مکان های کاندید برای تسهیلات نوع ۱	۱۰
تعداد مکان های کاندید برای تسهیلات نوع ۲	۱۵
تعداد تسهیلات دسته ۱	۷،۵
تعداد تسهیلات دسته ۲	۱۰،۸
تعداد عملیات استحکامی در دسته ۱	۳،۱
تعداد عملیات استحکامی در دسته ۲	۴،۲
تعداد عملیات ممانعتی در دسته ۱	۳،۱
تعداد عملیات ممانعتی در دسته ۲	۴،۲
تعداد مشتریان	۱۰۰
نسبت تقاضای ارجاعی	۲،۰
نسبت تقاضای ارسالی	۳،۰
تقاضای مشتری	$10 + 5 \times U[0, 18]$
هزینه احداث تسهیل نوع ۱	$1000 + 100 \times U[0, 90]$
هزینه احداث تسهیل نوع ۲	$3000 + 100 \times U[0, 270]$

شده است و مقادیری که سبب شده نتایج بهتری در حل این مسایل در این رده [۸، ۱۰] تولید شود، انتخاب شده است. این پارامترها و مقادیر انتخاب شده در جدول ۲ ارایه شده است.



شکل ۲: مکان های کاندید برای تسهیلات نوع ۱ و ۲ و مشتریان

جدول ۲: تنظیم پارامترها برای الگوریتم ژنتیک و الگوریتم شبیه ساز تبرید

الگوریتم	پارامتر	مقدار
الگوریتم ژنتیک [۸]	احتمال تقاطع	۷۵.۰
	احتمال جهش	۲۵.۰
	تعداد تکرارها	۲۰۰
	اندازه جمعیت	۱۰۰
الگوریتم شبیه ساز تبرید [۱۰]	دمای ابتدایی	۱.۰
	دمای نهایی	۰.۱۰
	تعداد حلقه داخلی	۱۰
	تعداد حلقه خارجی	۱۰۰۰
	تعداد تکرارها	۳۰۰

جدول ۳: نتایج محاسباتی نمونه‌های عددی با ترکیب متفاوتی از پارامترها که با روش ترکیبی حل شده‌اند

نمونه	p_1	p_2	r_1	r_2	q_1	q_2	Z_{des}	زمان
۱	۵	۸	۱	۲	۱	۲	۵۴۹۸۱۳	۳.۱۴۵
۲	۵	۸	۱	۲	۱	۴	۵۲۹۱۵۹	۸.۱۵۴
۳	۵	۸	۱	۴	۱	۲	۵۸۱۲۵۶	۳.۱۷۰
۴	۵	۸	۱	۴	۱	۴	۵۶۲۵۲۲	۱.۱۷۳
۵	۵	۸	۳	۲	۱	۲	۶۵۲۲۴۷	۶.۱۷۸
۶	۵	۸	۳	۲	۱	۴	۶۳۳۱۹۲	۱.۱۸۵
۷	۵	۸	۳	۴	۱	۲	۶۹۴۰۳۹	۸.۱۹۳
۸	۵	۸	۳	۴	۱	۴	۶۷۴۱۸۶	۵.۲۰۱
۹	۵	۱۰	۱	۲	۱	۲	۵۲۱۴۲۵	۱.۲۱۹
۱۰	۵	۱۰	۱	۲	۱	۴	۵۰۰۱۷۰	۵.۲۲۰
۱۱	۵	۱۰	۱	۴	۱	۲	۵۵۱۸۲۴	۸.۲۲۲
۱۲	۵	۱۰	۱	۴	۱	۴	۵۲۶۷۶۹	۸.۲۲۶
۱۳	۵	۱۰	۳	۲	۱	۲	۶۱۵۲۸۱	۶.۲۳۵
۱۴	۵	۱۰	۳	۲	۱	۴	۵۹۱۲۳۷	۵.۲۳۹
۱۵	۵	۱۰	۳	۴	۱	۲	۶۵۹۱۱۴	۵.۲۴۸
۱۶	۵	۱۰	۳	۴	۱	۴	۶۲۴۰۵۴	۷.۲۵۷
۱۷	۷	۸	۱	۲	۱	۲	۴۷۴۷۶۱	۶.۳۰۴
۱۸	۷	۸	۱	۲	۱	۴	۴۶۰۳۶۴	۴.۳۰۸
۱۹	۷	۸	۱	۴	۱	۲	۵۰۷۲۱۵	۶.۳۱۸
۲۰	۷	۸	۱	۴	۱	۴	۴۸۴۲۵۷	۴.۳۲۶
۲۱	۷	۸	۳	۲	۱	۲	۵۶۷۴۳۶	۸.۳۳۲
۲۲	۷	۸	۳	۲	۱	۴	۵۵۱۸۸۶	۵.۳۴۰
۲۳	۷	۸	۳	۴	۱	۲	۶۰۷۲۵۵	۱.۳۵۷
۲۴	۷	۸	۳	۴	۱	۴	۵۹۴۳۲۹	۴.۳۶۴
۲۵	۷	۱۰	۱	۲	۱	۲	۴۴۰۸۵۳	۲.۳۷۳
۲۶	۷	۱۰	۱	۲	۱	۴	۴۱۸۶۶۲	۴.۳۸۰
۲۷	۷	۱۰	۱	۴	۱	۲	۴۷۱۳۸۲	۸.۴۰۲
۲۸	۷	۱۰	۱	۴	۱	۴	۴۵۶۰۶۸	۶.۴۰۸
۲۹	۷	۱۰	۳	۲	۱	۲	۵۲۳۱۷۶	۲.۴۲۰
۳۰	۷	۱۰	۳	۲	۱	۴	۵۰۹۶۸۴	۷.۴۲۴
۳۱	۷	۱۰	۳	۴	۱	۲	۵۶۰۶۱۴	۸.۴۴۰
۳۲	۷	۱۰	۳	۴	۱	۴	۵۴۰۰۵۴	۵.۴۴۶

مدل حاصل با استفاده از الگوریتم ترکیبی مینی بر الگوریتم ژنتیک، الگوریتم شبیه ساز تبرید و $CPLEX$ حل شده است. نتایج حاصل از حل مدل با داده‌های فوق در جدول ۳ داده شده است. در اینجا ۶۴ نمونه عددی تصادفی از مسأله جهت پیاده‌سازی روش ترکیبی تولید شده است. در جدول ۳ مقدار میانگین تابع هدف و میانگین زمان اجرا الگوریتم ارائه شده به ازای ۳۰ بار اجرای آن ارائه شده است. به عنوان مثال در نمونه عددی ۱ ($p_1 = 5, p_2 = 8, r_1 = 1, r_2 = 2, q_1 = 1, q_2 = 2$)، مکان‌های ۱، ۵، ۶، ۸، ۱۰ برای احداث تسهیلات نوع ۱ و مکان‌های ۱، ۴، ۶، ۸، ۹، ۱۱، ۱۲، ۱۵ برای احداث تسهیلات نوع ۲ انتخاب شده است. همچنین عملیات ممانعتی در مکان‌های ۶ از تسهیلات نوع ۱ و ۶، ۱۵ از تسهیلات نوع ۲ و عملیات استحکامی در مکان‌های ۱ از تسهیلات نوع ۱ و ۹، ۱۲ از تسهیلات نوع ۲ انجام می‌شود. آزمایش‌هایی به شرح ذیل داده شده است:

آزمایش ۱: جدول ۳ نتایج کاربرد الگوریتم ترکیبی را روی هدف طراح سیستم سلسله مراتبی نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود نتایج تأثیر مثبت مکان‌یابی تسهیلات دسته ۱ و ۲ را تأیید می‌کند. نتایج همچنین نشان می‌دهد تسهیلات دسته ۲ دارای تأثیر بیشتر از تسهیلات دسته ۱ در کاهش فاصله سرویس دهی بین مشتریان و تسهیلات است.

ادامه جدول ۲

نمونه	p_1	p_2	r_1	r_2	q_1	q_2	Z_{des}	زمان
۳۳	۵	۸	۱	۲	۳	۲	۵۳۳۳۷۹	۱.۱۵۸
۳۴	۵	۸	۱	۲	۳	۴	۵۱۳۳۲۷	۲.۱۶۷
۳۵	۵	۸	۱	۴	۳	۲	۵۶۳۸۳۴	۷.۱۸۱
۳۶	۵	۸	۱	۴	۳	۴	۵۴۵۶۲۶	۵.۱۸۳
۳۷	۵	۸	۳	۲	۳	۲	۶۳۲۶۴۲	۱.۱۸۹
۳۸	۵	۸	۳	۲	۳	۴	۶۱۴۱۷۶	۳.۱۹۷
۳۹	۵	۸	۳	۴	۳	۲	۶۷۳۲۳۸	۴.۲۰۵
۴۰	۵	۸	۳	۴	۳	۴	۶۵۳۹۵۰	۷.۲۱۳
۴۱	۵	۱۰	۱	۲	۳	۲	۵۰۵۷۶۲	۸.۲۳۲
۴۲	۵	۱۰	۱	۲	۳	۴	۴۸۵۱۵۷	۵.۲۳۳
۴۳	۵	۱۰	۱	۴	۳	۲	۵۳۵۲۵۶	۶.۲۳۵
۴۴	۵	۱۰	۱	۴	۳	۴	۵۱۰۹۶۸	۱.۲۴۰
۴۵	۵	۱۰	۳	۲	۳	۲	۵۹۶۸۲۹	۴.۲۴۹
۴۶	۵	۱۰	۳	۲	۳	۴	۵۷۳۴۹۵	۹.۲۵۳
۴۷	۵	۱۰	۳	۴	۳	۲	۶۳۹۳۴۵	۷.۲۶۳
۴۸	۵	۱۰	۳	۴	۳	۴	۶۰۵۳۴۷	۵.۲۷۳
۴۹	۷	۸	۱	۲	۳	۲	۴۶۰۵۲۹	۹.۳۲۳
۵۰	۷	۸	۱	۲	۳	۴	۴۴۶۵۷۸	۶.۳۲۶
۵۱	۷	۸	۱	۴	۳	۲	۴۹۱۹۸۵	۴.۳۳۷
۵۲	۷	۸	۱	۴	۳	۴	۴۶۹۷۳۶	۱.۳۴۵
۵۳	۷	۸	۳	۲	۳	۲	۵۵۰۳۸۳	۸.۳۵۳
۵۴	۷	۸	۳	۲	۳	۴	۵۳۵۳۴۹	۲.۳۶۰
۵۵	۷	۸	۳	۴	۳	۲	۵۸۹۰۳۷	۶.۳۷۸
۵۶	۷	۸	۳	۴	۳	۴	۵۷۶۴۷۵	۱.۳۸۶
۵۷	۷	۱۰	۱	۲	۳	۲	۴۲۷۶۳۹	۶.۳۹۵
۵۸	۷	۱۰	۱	۲	۳	۴	۴۰۶۱۲۳	۲.۴۰۳
۵۹	۷	۱۰	۱	۴	۳	۲	۴۵۷۲۵۴	۷.۴۲۶
۶۰	۷	۱۰	۱	۴	۳	۴	۴۴۲۳۶۳	۲.۴۳۳
۶۱	۷	۱۰	۳	۲	۳	۲	۵۰۷۵۱۹	۴.۴۴۵
۶۲	۷	۱۰	۳	۲	۳	۴	۴۹۴۳۷۱	۶.۴۴۹
۶۳	۷	۱۰	۳	۴	۳	۲	۵۴۳۷۸۴	۳.۴۶۶
۶۴	۷	۱۰	۳	۴	۳	۴	۵۲۳۸۴۷	۱.۴۷۳

آزمایش ۲: جدول ۳ نتیجه عملیات استحکامی بر فاصله سرویس دهی را نشان می دهد. دو مقدار متفاوت برای تعداد عملیات استحکامی تسهیلات سلسله مراتبی انتخاب شده است. همان طور که در جدول ۳ مشاهده می کنیم، عملکرد شبکه سلسله مراتبی در سرویس دهی به مشتریان برای خدمات به این مقادیر حساس است. افزایش تعداد عملیات استحکامی سبب کاهش تابع هدف طراح سیستم می شود. به عبارت دیگر، با افزایش تعداد عملیات استحکامی، مشتریان از تسهیلات سلسله مراتبی امن تر با فاصله کمتر خدمات را دریافت می کنند و لذا روش ترکیبی تابع هدف کمتری را بدست می آورد.

آزمایش ۳: جدول ۳ همچنین نتیجه عملیات ممانعتی بر فاصله سرویس دهی را نشان می دهد. دو مقدار متفاوت برای تعداد عملیات ممانعتی تسهیلات سلسله مراتبی انتخاب شده است. مهاجم با انجام عملیات ممانعتی در تسهیلات سلسله مراتبی محافظت نشده، افزایش در فاصله بین مشتریان و تسهیلات سلسله مراتبی ایجاد می کند و لذا عملیات ممانعتی تأثیری مخرب بر میزان عملکرد شبکه سلسله مراتبی دارد. لذا هرچه تعداد عملیات ممانعتی بیشتر باشد الگوریتم ترکیبی تابع هدف بیشتری را بدست می آورد.

آزمایش ۴: در جدول ۳، نهمین ستون زمان مورد نیاز برای حل نمونه ها را بر حسب ثانیه نمایش می دهد. طبق نتایج این جدول، با افزایش

تعداد عملیات استحکامی، ممانعتی و تعداد تسهیلات دسته ۱ و ۲ زمان اجرای الگوریتم ترکیبی افزایش می‌یابد. از آنجا که تعداد تسهیلات و عملیات ممانعتی افزایش می‌یابد، تعداد تعاملات میان تسهیلات سلسله مراتبی و مشتریان به طور قابل توجهی رشد می‌کند.

۵ نتیجه گیری

در این مقاله، مسأله مکان‌یابی-استحکامی-ممانعتی در شبکه سلسله مراتبی معرفی و در قالب یک مدل برنامه‌ریزی سه سطحی فرمول‌بندی شده است. هدف مسأله کاهش اثرات عملیات ممانعتی به وسیله مکان‌یابی مناسب و احداث تسهیلات و عملیات استحکامی تسهیلات دسته ۱ و ۲ است. طراح سیستم می‌تواند با پیش‌بینی عملکرد سیستم در مقابل عملیات استحکامی مدافع و حمله مهاجم، در مورد مکان‌یابی تسهیلات دسته ۱ و ۲ تصمیم بگیرد. با توجه به ساختار سه سطحی، مسأله NP - سخت است. در نتیجه برای حل مسأله از روش ترکیبی مبنی بر دو الگوریتم فراابتکاری به نام الگوریتم ژنتیک و شبیه ساز تبرید به ترتیب برای سطح اول و سطح دوم و حل‌کننده $CPLEX$ برای سطح سوم می‌توان استفاده کرد. نتایج پژوهش و مقایسه جواب‌های ۶۴ نمونه عددی حاصل از روش ترکیبی، نشان دهنده افزایش امنیت و پایداری سیستم سلسله مراتبی با افزایش تعداد تسهیلات دسته ۲ نسبت به تسهیلات سطح ۱ است. همچنین مقایسه نتایج به ازای عملیات استحکامی و ممانعتی مختلف در تسهیلات دسته ۱ و ۲ می‌تواند در تصمیمات تخصیص مشتری به تسهیلات سلسله مراتبی موجب ایجاد نتایج معقول و مناسب شود. لذا، ارایه روش‌های فراابتکاری دیگر برای حل این مسأله و مقایسه با نتایج این مقاله به عنوان کار آتی پیشنهاد می‌گردد. همچنین، بررسی مسأله در شرایط عدم قطعیت که در آن میزان منابع مکان‌یابی، دفاعی و تهاجمی به طور قطعی معلوم نیست، یک تحقیق ارزشمند برای آینده است.

فهرست منابع

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Amani Ggaiuom, M. , Ghaderi, A., & Mahmoudi, A., 2022. A Bi-Level Programming Model for Hierarchical Maximal Covering Hub Location Problem under Disruption in Hubs. *Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems*, 10(20), 33–47. doi: 10.22084/ier.2023.25889.2075
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Holland, J. H., 1992. *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. MIT press.
- [8] Khanduzi, R., 2020. Bi-level mathematical modeling of the location and fortification problem of hierarchical facilities with capacity and budget constraints under destruction conditions and solving it with genetic algorithm. *Modern Research in Decision Making*, 5(3), 60–86.

- [9] Khanduzi, R., & Rastegar, A., 2021. Designing a cooperative hierarchical model of interdiction median problem with protection and its solution approach: A case study of health-care network. In *Intelligent IoT Systems in Personalized Health Care* (pp. 53-88). Academic Press.
- [10] Khanduzi, R., & Rastegar, A., 2022. An efficient and robust hybrid metaheuristic method to solve a hierarchical bi-level protection-interdiction problem on real healthcare system. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 33(10), e4396.
- [11] Khanduzi, R., Sadati, İ., & Akbari, V., 2024. A bilevel hierarchical covering model to protect a healthcare network against failures. *Operational Research*, 24(4), 61.
- [12] Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., & Vecchi, M. P., 1983. Optimization by simulated annealing. *science*, 220(4598), 671-680.
- [13] Korzebor, M. R., & Tavakkoli-Moghaddam, R., 2022. Bi-objective mathematical modelling for a location-relocation problem of hierarchical healthcare facilities under uncertainty and disaster. *Emergency Management*, 11(1), 5-16.



A tri-level programming approach for location-fortification-interdiction in a hierarchical network

Raheleh Khanduzi⁽¹⁾ ²

⁽¹⁾ Department of Mathematic and Statistic, Gonbad Kavous University, Gonbad Kavous, Iran

Communicated by: Behrooz Alizadeh

Received: 14 October 2024

Accepted: 6 May 2025

Abstract: The importance of locating critical facilities in hierarchical service delivery systems and fortification them against intentional attacks is the main subject of many researches, which helps the stability of the service system during intentional attacks by making appropriate decisions on location and fortification. In this paper, for the first time, the problem of locating hierarchical facilities with regard to the fortification and interdiction operations in a tri-level programming model between system designer, defender and attacker has been proposed. The aim of the system designer at the first level is to minimize the location cost and service distance between the demand points and two categories of facilities. The defender's objective is to adopt appropriate fortification operations at the second level in order to minimize the distance between customers and the nearest facility to receive primary services and referrals for secondary services according to available location resources. Meanwhile, the attacker in the third level of the model, as a follower, seeks to make decisions to assign customers to two categories of facilities and interdiction operations in order to maximize the service system distances. To solve the new problem, a hybrid metaheuristic method based on genetic algorithm, simulated annealing algorithm and CPLEX has been proposed, and by solving several numerical examples, the analysis of the results and the relation between the model parameters and the goals of the hierarchical service system is investigated.

Keywords: Hierarchical, Tri-level model, Location, Fortification, Interdiction.



©2024 Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

²Corresponding author

E-mail addresses: (R. Khanduzi) khanduzi@gonbad.ac.ir