مهندسی صنایع و مدیریت شریف، (تابستان ۱۴۰۲)
دوره‌ی ۳۹، شماره‌ی ۱، صص. ۱۱۱-۱۲۳، (پژوهشی)

Original Article

طراحی مدل پویای استوار تصادفی برای مکان‌یابی و تخصیص شبکه‌ی خدمات سلامت سلسله مراتبی با ظرفیت محدود و در شرایط اختلال

مهدی یوسفی‌نژاد عطاری* (استادیار)
گروه مهندسی صنایع، واحد بناب، دانشگاه آزاد اسلامی، بناب، ایران
سیما غایب‌لو (استادیار)
دانشکده‌ی مهندسی مکانیک و صنایع، دانشگاه زنجان
بهنام جعفرپور (کارشناس‌ارشد)
توحید فراش‌زاده میاندوآب (کارشناس‌ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بناب، بناب، ایران

در مکان‌یابی احداث بیمارستان‌ها رعایت نکاتی از جمله میزان جمعیت منطقه‌ی تحت پوشش، هزینه‌های حمل‌ونقل و فاصله‌ی فیزیکی بیمارستان‌ها بسیار مهم است. در پژوهش حاضر، یک مدل پویای استوار تصادفی برای مکان‌یابی و تخصیص شبکه‌ی خدمات سلامت با ظرفیت محدود و شرایط اختلال توسعه داده شده، تا علاوه بر در نظر گرفتن شرایط واقعی در طراحی از جمله اختلال، ظرفیت محدود و پویایی، منجر به کاهش هزینه‌ها نیز شود. تعریف ظرفیت محدود برای بیمارستان‌ها نشان داد که شبکه‌ی خدمات سلامت در شرایط اختلال نیاز به باز تعریف تعداد لایه‌های مختلف این شبکه دارد. برای حل مدل توسعه داده شده از دو روش فراابتکاری الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامطلوب و الگوریتم ازدحام ذرات استفاده شده است. مقایسه‌ی نتایج حاصل از الگوریتم‌های فوق با جواب‌های دقیق، کارایی الگوریتم‌های فوق را نشان داد.

واژگان کلیدی: مکان‌یابی بیمارستان، مدل پویای استوار تصادفی، ظرفیت محدود، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم ازدحام ذرات.

mahdi_108108@yahoo.com
ghayebloo.sima@znu.ac.ir
behnam_jafarpour68@yahoo.com
farrashzadeh.ie@gmail.com

۱. مقدمه

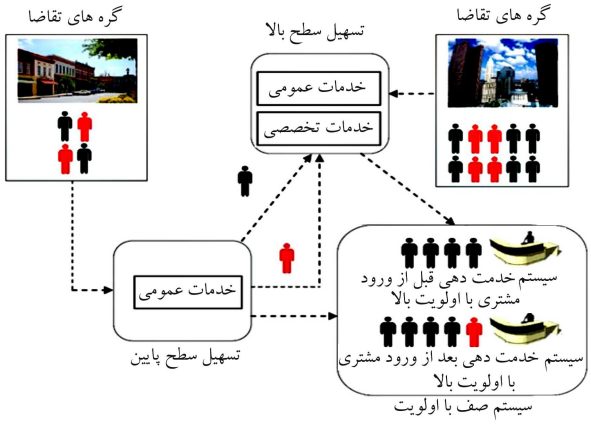
برای طراحی یک شبکه‌ی خدمات بهداشتی کارآمد، مهم است که چندین مسئله‌ی کلیدی از جمله ساختار سلسله‌مراتبی سیستم بهداشتی، دسترسی جغرافیایی، حداقل جمعیت نیازمند برای ارائه‌ی تسهیلات، دسته‌های مختلف عدم قطعیت مربوط به پارامترها، ترددها، استراتژی‌های مختلف خدمات و هزینه‌های مبتنی بر اضطرار بیماران، کیفیت خدمات و خطر وقوع رویدادهای غیرمنتظره در نظر گرفته می‌شود.

لازم به ذکر است که در کشورهای در حال توسعه، بیمارستان‌های سطح بالا تنها بیماران خاص را درمان می‌کنند. بنابراین، این ساختار توزیع سلسله‌مراتبی، برای بررسی‌هایی است که در آن یک تسهیلات سطح بالا می‌تواند خدماتی از تسهیلات سطح پایین و حداقل یک سرویس اضافی ارائه دهند.[۱] برای مدل‌سازی چنین شرایطی، با توجه به سیستم صف‌بندی، دو منبع اصلی عدم قطعیت مرتبط با تقاضا و سرویس در معرض مسئله‌ی بهینه‌سازی قرار می‌گیرد. از آن‌جا که بیماران فوریت مورد نیاز یکسانی ندارند، هزینه‌ها و استراتژی‌های ارائه‌ی خدمات بستگی به شرایط بیمار خواهد داشت. بنابراین، بیماران به دو دسته‌ی عمده شامل: «بیماران با اولویت بالاتر با بیماری‌های پرخطر یا شرایط فوری» و «بیماران با اولویت پایین‌تر با بیماری‌های کم‌خطر یا شرایط غیرفوری» تقسیم می‌شوند.[۲]

بر این اساس، هزینه‌ها و استراتژی‌های متفاوتی، برای ارائه‌ی خدمات به دسته‌های مختلف اتخاذ می‌شود. به طوری که بیماران با اولویت بالاتر می‌توانند خدمات بهداشتی فوری دریافت کنند، در حالی که بیماران با اولویت پایین‌تر در موقعیت‌های خاص باید منتظر بمانند. برای حفظ تردد در سطح قابل قبول، بیشترین میزان مدت انتظار دسته‌های مختلف بیماران در صف بیمارستان‌های در سطح پایین و بالا باید تعریف

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۹/۲۷، اصلاحیه ۱۴۰۱/۲/۲۴، پذیرش ۱۴۰۱/۳/۳.
DOI:10.24200/J65.2022.57263.2192

استناد به این مقاله:
یوسفی‌نژاد عطاری، مهدی، غایب‌لو، سیما، جعفرپور، بهنام، و فراش‌زاده میاندوآب، توحید، ۱۴۰۲. طراحی مدل پویای استوار تصادفی برای مکان‌یابی و تخصیص شبکه‌ی خدمات سلامت سلسله مراتبی با ظرفیت محدود و در شرایط اختلال. مهندسی صنایع و مدیریت شریف، ۳۹(۱)، صص. ۱۱۱-۱۲۳.



شکل ۱. ساختار شبکه‌ی خدمات بهداشت در مطالعه‌ی زرین‌پور (۲۰۱۷).

شود. مطابق مطالعه‌ی زرین‌پورو همکاران، ساختار شبکه‌ی خدمات بهداشتی مربوطه مطابق شکل ۱ نشان داده می‌شود.

چنان که مشاهده می‌شود، بیمارستان‌های سطح پایین می‌توانند جمعیتی نسبتاً کوچک را پشتیبانی کنند در حالی که بیمارستان‌های سطح بالاتر خدمات بهداشتی را به مناطق قابل دسترس گسترده‌تری، برای روبه‌رو شدن با تقاضای محلی و غیر محلی بیمارستان‌های سطح پایین‌تر در مناطق قابل دسترس ارائه می‌دهند. لازم به ذکر است که درصدی از بیماران با اولویت پایین‌ترکه توصیه می‌شود خدمات ویژه‌یی در بیمارستان‌های سطح بالا دریافت کنند باید مستقیماً از بیمارستان‌های سطح پایین به بیمارستان‌های سطح بالا انتقال یابند. در ضمن، درصدی از بیماران با اولویت بالاتر که به بیمارستان‌های سطح بالاتر ارجاع داده می‌شوند، باید توسط آمبولانس منتقل شوند. بنابراین، باید ضریبی را برای تفاوت در هزینه‌های حمل‌ونقل در نظر گرفت.

امروزه مشتریان در اکثر سیستم‌های خدماتی نظیر بانک‌ها، دستگاه‌های خدمات سلامت، سیستم‌های آموزشی و نیز شرکت‌های تولیدی، با هدف ایجاد بیشترین بهره‌وری در ارائه‌ی خدمات و با توجه به ارزش افزوده‌ی مشتریان اولویت‌بندی می‌شوند. بنابراین، در مدل پیشنهادی نیز اولویت‌بندی مشتریان با توجه به دو عامل تقسیم‌بندی هزینه‌ها و استراتژی‌های متفاوت در ارائه‌ی خدمت، در شرایط ازدحام برای طبقه‌های مختلف در نظرگرفته می‌شود. بدین ترتیب، مشتریان با اولویت بالاتر در بدو ورود به سیستم می‌توانند خدمات مورد نیاز خود را به سرعت دریافت کنند، در حالی که مشتریان با اولویت پایین‌تر ممکن است در موقعیت‌های پرازدحام منتظر بمانند. به منظور حفظ ازدحام در سطوح قابل قبول نیز یک حد بیشینه برای میانگین زمان انتظار مشتریان در صف تسهیلات خدمت‌دهی در نظر گرفته می‌شود.[۳و۴]

به طور کلی، از طراحان سیستم انتظار می‌رود به طور مداوم تسهیلات و خدمات را به کارگیرند. با این حال، ممکن است سیستمی به علت وقایع ناگوار ناشی از بلایای طبیعی یا خطرات ناشی از دخالت انسان از لحظه‌یی به لحظه‌ی دیگر در دسترس نباشد.[۵و۶] از این‌رو، قابلیت دسترسی مشتریان به خدمات ارائه شده می‌تواند به عنوان یکی دیگر از پارامترهای تأثیرگذار بر طراحی شبکه‌های خدمت‌دهی نظیر مراکز درمانی، ایستگاه‌های آتش‌نشانی، مراکز امداد اضطراری، ایستگاه‌های پلیس، بانک‌ها و غیره در نظر گرفته شود. قابلیت دسترسی فضایی خوب نتیجه‌ی استقرار کارایی تسهیلات، استفاده از روش‌های حمل‌ونقل مؤثر، یا ترکیبی از این دو عامل است. تقریباً در تمامی تحقیقات مرتبط با قابلیت دسترسی فضایی، فاصله یا زمان سفر به عنوان تأثیرگذارترین عامل برای استفاده‌ی بالقوه از منابع و مراکز شناخته شده است.[۴] از این رو مکان تسهیلات خدمت‌دهی باید به گونه‌یی تعیین شود که مشتریان بتوانند از هر نقطه با صرف کوتاه‌ترین زمان و کمترین هزینه به این مراکز برسند و از خدمات ارائه شده استفاده کنند. شایان ذکر است که اهمیت قابلیت دسترسی به سیستم‌های خدمت‌دهی در زمان وقوع اختلالاتی نظیر سیل، زلزله، جنگ و غیره دوچندان است. به عنوان مثال در صورت وقوع زلزله باید دسترسی به بیمارستان‌ها، پایگاه‌های انتقال خون، مراکز امداد اضطراری، منابع تأمین غذا و غیره به راحتی ممکن باشد. بنابراین، در مدل پیشنهادی، قابلیت دسترسی جغرافیایی با نزدیکی یک تسهیل به مشتریان بالقوه در نظرگرفته می‌شود.[۲]

به منظور حفظ قابلیت اطمینان سیستم، عملیات مسیریابی دوباره با کاهش ریسک انجام می‌شود، به گونه‌یی که مشتریان به دیگر تسهیلات عملیاتی که توانایی ارائه‌ی خدمت مورد نظر را دارند، دوباره تخصیص می‌یابند.[۷] برای بررسی چنین موقعیت‌هایی، در نوشتار حاضر وقایع اختلال‌آمیز تصادفی در قالب یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی مبتنی بر سناریو ارائه می‌شود. دسترسی جغرافیایی شبکه‌ی خدمات بهداشتی در مدل‌های مربوطه از لحاظ نزدیکی یک مرکز به بیماران واجد شرایط و ارزش آن که متأثر از سناریوی اختلال است، در نظرگرفته می‌شود. برای اطمینان از این امر، کمترین نیاز جمعیت برای مکان‌های انتخابی مورد توجه قرار گرفته است، به طوری که بیمارستان نمی‌تواند در مکان‌هایی با جمعیت محلی کمتر از مقدارهای از پیش تعیین شده تأسیس شود. اهداف اصلی شبکه‌ی خدمات بهداشتی مربوطه عبارت‌اند از:

۱. تعیین موقعیت بیمارستان‌های با سطح پایین‌تر و بالاتر؛
۲. تخصیص بیماران با کمترین و بالاترین اولویت به بیمارستان‌های پایین‌تر و بالاتر بر اساس سناریوی اختلال درک شده؛
۳. تخصیص بیماران دارای بالاترین و کمترین اولویت تشخیص داده شده به بیمارستان‌های سطح بالاتر برای دریافت خدمات تخصصی براساس سناریو اختلال شناخته شده.

تمامی موارد ذکرشده برای کمینه‌سازی هزینه‌ی ارائه‌ی امکانات جدید و هزینه‌های حمل‌ونقل و خدمات مورد انتظار انجام می‌شود.[۲و۷] در هنگام تصمیم‌گیری در مورد مکان‌یابی و تخصیص، باید منابع عدم قطعیت را که برای مقابله با این چالش رویکردهای مختلفی از جمله برنامه‌ریزی تصادفی و بهینه‌سازی استوار مورد استفاده قرار می‌گیرند. برنامه‌ریزی تصادفی یک ابزار کارآمد محسوب می‌شود و تفاوت آن با برنامه‌ریزی قطعی در وجود عدم قطعیت در بعضی از پارامترهای ورودی مسئله از قبیل مقادیر سمت راست است که ممکن است در زمان تصمیم‌گیری مشخص نباشد. بهینه‌سازی استوار نیز یک جایگزین مناسب دیگر است که راه‌حل‌هایی را برای حل عدم قطعیت پارامترها در مسائل بهینه‌سازی ارائه می‌دهد و می‌تواند راه‌حل مطلوب را از تمامی تفهیم‌های ممکن از ارزش‌های پارامتری در یک مجموعه عدم قطعیت حتمی ارائه دهد. همچنین، برای بررسی موضوع در دوره‌های زمانی مختلف، مدل پویا مورد استفاده قرار می‌گیرد.

با توجه به مطالب بیان شده، در این پژوهش یک مدل پویای استوار تصادفی برای مکان‌یابی و تخصیص شبکه‌ی خدمات سلامت با در نظرگرفتن عوامل مطرح برای یک مسئله‌ی واقعی شامل شرایط اختلال، ظرفیت محدود و پویایی توسعه داده شده است؛ در مطالعات انجام شده در گذشته چنین مدلی مشاهده نشده است (بخش ۲ را ببینید).

در ادامه‌ی این نوشتار، در بخش دوم ادبیات مرتبط با طراحی شبکه‌ی خدمات سلامت مرور شده است. بخش سوم به تعریف مسئله و تبیین فرض‌های مسئله

اختصاص یافته است. مدل برنامه‌ریزی ریاضی پیشنهادی برای مسئله‌ی تعریف شده در بخش چهارم ارائه شده و در بخش پنجم به تبیین روش‌های حل پیشنهادی شامل الگوریتم‌های ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب و ازدحام ذرات پرداخته‌ایم. در این بخش همچنین مقایسه‌ی نتایج حاصل از الگوریتم‌های فوق و مقایسه‌ی آنها با جواب‌های دقیق به دست آمده ارائه شده است. و نهایتاً در بخش ششم، خلاصه‌یی از نتایج تحقیق و برخی زمینه‌های تحقیقات آتی مورد بحث قرارگرفته است.

۲. ادبیات تحقیق

در این بخش ادبیات مرتبط با طراحی مدل‌های مکان‌یابی و تخصیص شبکه‌های خدمات سلامت در قالب دو زیربخش، شامل «مدل‌های مکان‌یابی و تخصیص سلسله‌مراتبی» و «مکان‌یابی تسهیلات تحت شرایط اختلال»، ارائه شده است. در زیربخش ۳.۲. نیز، مطالعات انجام گرفته با توجه به مشخصات اساسی مدل‌ها دسته‌بندی شده و تفاوت مدل ارائه شده در این مقاله با مطالعات انجام گرفته بررسی شده است.

۱.۲. مدل سلسله‌مراتبی و چند منظوره در سیستم‌های بیمارستانی

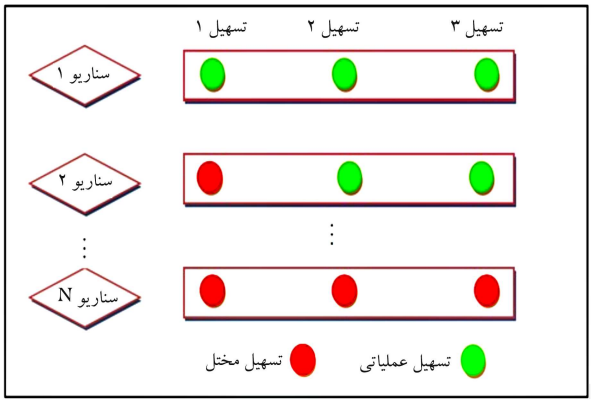
تحقیقات مربوط به مکان‌یابی در بستر شبکه‌ی خدمات بهداشتی در سال ۲۰۰۰ آغاز شد[۸] و در ادامه محققانی به بررسی کاربردهای این موضوع پرداختند. در زمینه‌ی مسائل مکان‌یابی سلسله مراتبی نیز در سال ۱۹۷۹ با توجه به امکان خدمات ارجاعی، مسئله‌ی تخصیص مکان سلسله مراتبی دو سطحی ارائه شد.

در سال ۲۰۰۲ یک مدل مکان‌یابی سلسله مراتبی برای مؤسسات مراقبت‌های بهداشتی زایمان و پرنатال با ارجاع‌های خدماتی در شهرداری ریودوژانیرو پیشنهاد شد.[۹] در سال ۲۰۰۶ نیز این کار تحقیقاتی با در نظرگرفتن محدودیت‌های ظرفیت گسترش یافت و با روش آزادسازی لاگرانژی حل شد.

محققان در سال ۲۰۱۲ یک مدل سلسله مراتبی برای تصمیم‌گیری در زمینه‌ی محل و عرضه خدمات بیمارستانی با هدف بیشترین دسترسی جغرافیایی به شبکه‌ی بیمارستان ارائه دادند. آنان در سال ۲۰۱۵ دو مدل سلسله مراتبی تخصیص مکان برای برنامه‌ریزی بیمارستان را در شرایط عدم اطمینان در ارتباط با تقاضا و عرضه‌ی خدمات بیمارستان نشان دادند.[۱۰] همچنین در سال ۲۰۱۲ یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی سلسله‌مراتبی به عنوان ابزاری برای حمایت از تصمیم‌گیرنده‌هایی که می‌خواهند امکان دسترسی بیماران به خدمات بیمارستانی را بیشینه کنند، ارائه شد. در آن مدل نیازهای جمعیت، ویژگی‌های سیستم بیمارستان، مسائل مربوط به کارایی، محدودیت‌های سیاسی و پیامدهای تغییرات برای هزینه‌ها نیز منظور شده است. این مدل به صورت یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح[۱] ترکیبی است که متغیرهای عدد صحیح با مکان بیمارستان‌ها مرتبط است و متغیرهای پیوسته نیز مربوط به بیماران درون شبکه است.[۱۰]

۲.۲. قابلیت اطمینان

چنان که بیان شد، تسهیلات خدمت‌دهی ممکن است گاهی اوقات به واسطه‌ی وقایع اختلال‌آمیز ایجاد شده توسط بلایای طبیعی یا مخاطره‌های انسانی کارآمد نباشند. برای بررسی چنین موقعیت‌هایی در مدل پیشنهادی، از مجموعه‌یی از سناریوهای اختلالی نظیر سیل، زلزله، اعتصاب کارکنان، حمله‌ی تروریستی و آتش‌سوزی که می‌تواند سیستم خدمت‌دهی را تحت تأثیر قرار دهد، استفاده شده است. هریک



شکل ۲. تأثیر سناریوهای اختلال آمیز بر وضعیت تسهیلات.

از اعضای مجموعه، یک سناریو با یک احتمال مشخص است که به موجب آن عملکرد تسهیلات دچار اختلال خواهد شد.[۱۱]

در شکل ۲ سناریوی اختلال‌آمیز نشان داده شده است. در هر یک از این سناریوها، N مجموعه با ۳ تسهیل و تسهیلات استقرار یافته می‌توانند عملیاتی یا مختل باشند.

در صورت وقوع اختلال، به منظور حفظ قابلیت اطمینان سیستم، عملیات مسیریابی دوباره با کاهش ریسک انجام می‌شود که به موجب آن در صورت غیرعملیاتی بودن نزدیک‌ترین تسهیل تخصیص یافته به مشتری، نزدیکترین تسهیل عملیاتی بعدی که توانایی ارائه‌ی خدمت مورد نظر را دارد، به مشتری تخصیص می‌یابد.

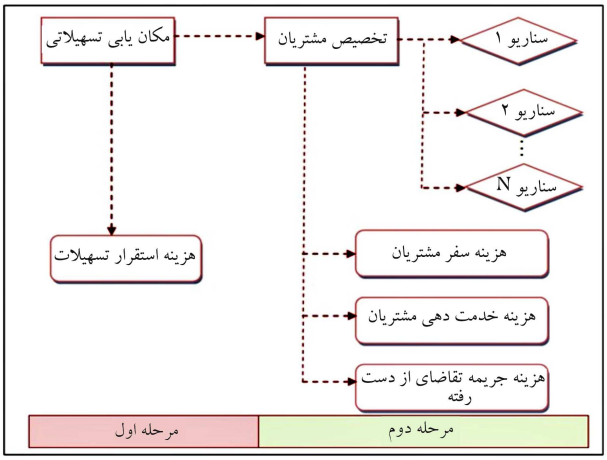
در مدل‌های متعارف مکان‌یابی، تصمیمات طراحی و عملیاتی در یک مرحله تعیین می‌شود. با این وجود، اگر عدم قطعیت در مدل مورد بررسی وجود داشته باشد، بهتر است تصمیمات در دو یا چندین مرحله اخذ شود؛ زیرا نمی‌توان پیش‌بینی کرد که چه مقادیری از پارامتر دارای عدم قطعیت به وقوع می‌پیوندد و تصمیمات مربوط به طراحی باید نسبت به همه‌ی حالت‌های ممکنِ پارامترِ دارای عدم قطعیت سازگاری داشته باشند. در مسائل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌یی، تصمیمات مرحله‌ی اول «اینجا و اکنون[۲]» باید با استفاده از مقدار مورد انتظار همه‌ی تصمیمات ممکن مسیریابی دوباره، قبل از مواجهه با عدم قطعیت اخذ شوند و تصمیمات مرحله‌ی دوم «انتظار و مشاهده[۳]» با مشاهده‌ی تمامی حالت‌های پارامتر دارای عدم قطعیت تعیین خواهد شد.[۱۱و۱۲]

مسئله‌ی پیشنهادی این مطالعه به صورت یک مسئله‌ی برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌یی مبتنی بر سناریو با مسیریابی دوباره مدل‌سازی می‌شود. تصمیمات مرحله‌ی اول، تصمیمات ساخت تسهیلات سطح پایین و سطح بالا را شامل می‌شود. در حالی که تصمیمات مرحله‌ی دوم، تصمیمات عملیاتی را با در نظرگرفتن وقایع احتمالی مشخص می‌کند. در شکل ۳ چارچوب مدل تصمیم‌گیری دومرحله‌یی نشان داده شده است. براساس این شکل، تصمیمات راهبردی، تصمیمات مربوط به مکان‌یابی تسهیلات است که باید در مرحله‌ی اول اتخاذ شود و تصمیمات مرحله‌ی دوم، تصمیمات عملیاتی مربوط به تخصیص مشتریان به تسهیلات است که با کمینه‌سازی هزینه‌ی سفر مشتریان، هزینه‌ی خدمت‌دهی و هزینه‌ی جریمه‌ی تقاضای از دست رفته محقق می‌شود. بنابراین، تصمیمات راهبردی، تصمیمات «اینجا و اکنون» هستند و تصمیمات عملیاتی، تصمیمات «انتظار و مشاهده» را مشخص می‌کنند.

مسئله‌ی مکان‌یابی تحت اختلالات، به ویژه در چند دهه‌ی گذشته، توجهات خاصی را به خود جلب کرده است. در سال ۲۰۱۰، محققان مسئله‌ی مکان‌یابی

جدول ۱. طبقه بندی مسائل مکان‌یابی ـ تخصیص سلسله‌مراتبی.

مرجع	سال انتشار	تعداد دوره‌های زمانی برنامه‌ریزی	نحوه مدل‌سازی اختلال			ساختار شبکه		در نظر گرفتن ظرفیت
			شبکه‌ی خدمات سلامت	برنامه‌ریزی تصادفی بر مبنای سناریو	بهینه‌سازی استوار	تک‌سطحی	سلسله‌مراتبی	
[۱۰]	۲۰۱۲	تک‌دوره‌یی	*				*	
[۷]	۲۰۱۳	تک‌دوره‌یی					*	
[۱۵]	۲۰۱۵	تک‌دوره‌یی		*		*		
[۲]	۲۰۱۷	تک‌دوره‌یی	*	*			*	*
[۱۶]	۲۰۲۰	تک‌دوره‌یی	*	*		*		
[۱۷]	۲۰۲۰	تک‌دوره‌یی	*	*		*		
[۱۸]	۲۰۲۱	تک دوره‌یی	*		*	*		*
مطالعه حاضر	۲۰۲۲	چند دوره‌یی	*		*		*	*



شکل ۳. چارچوب مدل تصمیم‌گیری دو مرحله‌یی.

معتبر در حضور اختلالات تصادفی را با گزینه‌یی برای تقویت امکانات انتخاب شده، مطرح کردند.[۱۳]

در سال ۲۰۱۱ نیز با استفاده از معیار بهینه‌سازی استوار پی[۴] برای ایجاد یک مدل قابل اعتماد برای طراحی شبکه‌ی منطقی در معرض خرابی امکانات، یک الگوریتم ژنتیک هیبریدی برای حل مشکل ارائه شد.[۱۴] در سال ۲۰۱۳ یک مسئله‌ی مکان‌یابی معتبر به عنوان یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌یی برای رسیدگی به عدم اطمینان در ارتباط با حوادث ناگوار فرموله شد.[۷]

همچنین در سال ۲۰۱۵ یک مدل مکان‌یابی قابل اطمینان، تحت اختلالات تسهیلات مستقل و یکسان پیشنهاد شد.[۱۵] در آن تحقیق فرض شد که مشتریان اطلاعات کاملی در مورد وضعیت عملیاتی تسهیلات ندارند و با توجه به کاهش هزینه‌ی حمل‌ونقل و هزینه‌های جریمه‌یی، از مجموعه‌یی از تسهیلات که به طور مناسب اولویت‌بندی شده‌اند، بهره می‌برند.

در سال ۲۰۱۷، محققان یک شبکه‌ی خدمات بهداشتی سلسله مراتبی قابل اعتماد و استوار با استفاده از الگوریتم بندرز طراحی کردند که با توجه ویژه به شرایط اختلال و سناریوهای مختلف، بیمارستان‌ها در آن شبکه، به دو دسته‌ی سطح بالا و سطح پایین تقسیم شده بودند و در آن سیستم صف با مدل M/M/۱ مورد استفاده قرار گرفت.[۲]

در سال ۲۰۲۰ نیز طراحی شبکه‌ی زنجیره تأمین خون قابل اطمینان با در نظر گرفتن اختلال برای مثالی از دنیای واقعی ارائه شد.[۱۶] در ادامه، در سال ۲۰۲۰ شبکه‌ی بیمارستانی با رویکرد مکان‌یابی تسهیلات و در نظرگرفتن اختلال طراحی شد[۱۷] که در آن به دلیل در نظرگرفتن اختلال، قابلیت اطمینان حاصل از ارائه‌ی خدمات در نظرگرفته شده است.

در سال ۲۰۲۱، یک مدل برنامه‌ریزی استوار برای مکان‌یابی و تخصیص بهینه‌ی تسهیلات بهداشتی دارای سطوح خدماتی متفاوت در شرایط عادی و بحرانی توسعه یافت.[۱۸] در مدل فوق به منظور جلوگیری از ازدحام در بیمارستان‌ها و مراکز درمانی، ایجاد مراکز موقت و سرپایی برای خدمات اولیه در نظرگرفته شده است.[۱۹]

۳.۲. نوآوری‌های این نوشتار

مطالعات موجود در ادبیات با در نظرگرفتن مشخصات کلیدی مطالعات مرتبط با موضوع مکان‌یابی و تخصیص سلسله مراتبی دسته‌بندی شده است. در جدول ۱ این دسته‌بندی نشان داده شده است. از آن‌جاکه در مطالعه‌ی انجام شده در سال ۲۰۱۱، مرور جامعی در رابطه با مدل‌های مکان‌یابی ـ تخصیص سلسله‌مراتبی با در نظر گرفتن اختلال انجام شده است،[۲۰] اینک مطالعات انجام گرفته بعد از مطالعه‌ی فوق را بررسی کرده‌ایم.

چنان که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، اکثر مطالعات انجام شده در شبکه‌ی خدمات سلامت بوده است. در رابطه با نحوه‌ی مدل‌سازی عدم قطعیت مرتبط با اختلال نیز، در غالب مطالعات، از برنامه‌ریزی تصادفی برمبنای سناریو استفاده شده است. با توجه به این که، در این نوع برنامه‌ریزی نیازمند توزیع آماری پارامترهای مدل هستیم و تعیین این توزیع‌ها معمولاً با قابلیت اطمینان بالا ممکن نیست، استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی استوار که به داده‌های ورودی کمتری نیاز دارد کاراتر است. در این مطالعه از رویکرد برنامه‌ریزی استوار برای مدل‌سازی عدم قطعیت موجود در

شرایط اختلال استفاده شده است. غالباً ارتباطی بین تسهیلات در سطوح مختلف وجود دارد که این مسئله در مدل‌سازی به شیوه‌ی سلسله‌مراتبی دیده می‌شود. در مطالعه‌ی حاضر نیز به جای استفاده از ساختار تک‌سطحی، از ساختار سلسله‌مراتبی در طراحی مدل مکان‌یابی ـ تخصیص استفاده شده است. همچنین به دلیل ارتباط موجود در موارد مدنظر در برنامه‌ریزی در دوره‌های مختلف، طراحی مدل فوق در چند دوره انجام شده است. به عنوان جمع‌بندی مطالب بیان شده، در این پژوهش مدلی برای مسئله‌ی مکان‌یابی و تخصیص برای شبکه‌ی خدمات سلامت توسعه داده شده است. در نظرگرفتن عدم قطعیت در قالب مفهوم مدل استوار تصادفی، ظرفیت محدود و همچنین در نظرگرفتن دوره‌های مختلف زمانی در قالب مدل برنامه‌ریزی پویا سهم علمی این مقاله در مقایسه با سایر مقالات چاپ شده است که در ردیف آخر جدول ۱ نشان داده شده است.

۳. تعریف مسئله

در این پژوهش، یک مدل برنامه‌ریزی استوار تصادفی برای مسئله‌ی مکان‌یابی و تخصیص شبکه‌ی سلامت برای پاسخ‌گویی به این سؤال که ظرفیت محدود شبکه‌ی خدمات سلامت چه تأثیری بر برآورد تقاضای این حوزه دارد، توسعه داده شده است. همچنین با حل مدل، امکان پاسخگویی به این دو فراهم خواهد شد:

۱. نرخ ورود تقاضای بیماران برای دریافت سرویس در بیمارستان‌ها تحت سناریوهای مختلف چه میزان است؟

۲. محل احداث بیمارستان‌های سطح پایین و سطح بالا در چه مناطقی خواهد بود؟

با جمع‌بندی مطالب بیان شده در این بخش می‌توان فرض‌های مسئله را چنین خلاصه کرد:

- نرخ ورود براساس فرایند پوآسن است؛
- هر بیمارستان به عنوان یک صف $M/M/1K$ عمل می‌کند؛
- بیماران بسته به نوع فوریت آنها، به طبقات بالاتر و پایین‌تر طبقه‌بندی می‌شوند؛
- هزینه‌های ارائه‌ی خدمات برای بیماران با درجه‌ی بالاتر و پایین‌تر متفاوت است، چرا که بیماران با اولویت بالاتر، نسبت به بیماران با اولویت پایین‌تر، نیاز به منابع و خدمات بهداشتی بیشتری دارند تا شرایطی که باعث رنجشان می‌شود، بهبود یابد؛
- در دوره‌های زمانی مختلف نرخ تقاضا تغییر می‌کند.

۴. مدل برنامه‌ریزی ریاضی پیشنهادی

در این بخش به مدل‌سازی مسئله‌ی مورد مطالعه می‌پردازیم. مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم‌گیری مورد استفاده در مدل پیشنهادی و مدل‌سازی در ادامه تعریف شده است.

۱.۴. علائم به کار رفته در مدل ریاضی

۱.۱.۴. مجموعه‌ها

I: مجموعه‌یی از گره‌های تقاضا $(i = 1, 2, 3, \ldots, I)$؛

J: مجموعه‌یی از مکان‌های انتخابی برای بیمارستان‌های سطح پایین $(j = 1, 2, 3, \ldots, J)$؛

K: مجموعه‌یی از مکان‌های انتخابی برای بیمارستان‌های سطح بالا $(k = 1, 2, 3, \ldots, K)$؛

H: مجموعه‌یی از مکان‌های نامزدی برای بیمارستان‌ها که شامل بیمارستان‌های پایین‌تر و بالاتر است $(H = J \cup K)$؛

P: مجموعه‌یی از نوع بیماران، شامل هر دو بیمار با کمترین و بالاترین اولویت $(P = \{L, HP\})$؛

S: مجموعه‌یی از سناریوهای مختلف.

- **پارامترها**

f_{ht}: هزینه‌ی نصب ثابت برای راه‌اندازی بیمارستان h در دوره‌ی t؛

Tc_{iht}: هزینه‌ی واحد حمل‌ونقل از گره تقاضا $i \in I$ به بیمارستان‌های سطح بالا و سطح پایین در دوره‌ی t؛

$Tc_{h'ht}$: هزینه‌ی واحد حمل‌ونقل از بیمارستان سطح پایین $h' \in J$ به بیمارستان سطح بالا $h \in K$ در دوره‌ی t؛

c^p_{iht}: هزینه‌ی واحد برای خدمت به بیماران نوعی $p \in P$ اقامت در گره تقاضا $i \in I$ به بیمارستان $h \in H$ در دوره‌ی t؛

$c^p_{h'ht}$: هزینه‌ی واحد برای خدمت به بیماران نوعی $p \in P$ از بیمارستان سطح پایین $h' \in J$ که به بیمارستان با سطح بالاتر $h \in K$ در دوره‌ی t ارجاع یا پیشنهاد داده می‌شود؛

d_{ih}: کوتاه‌ترین فاصله بین گره تقاضا $i \in I$ و بیمارستان $h \in H$؛

$d_{h'h}$: کوتاه‌ترین فاصله بین بیمارستان با سطح پایین $h' \in J$ و بیمارستان با سطح بالاتر $h \in K$؛

h^{ps}_i: نرخ تقاضای بیماران نوعی $p \in P$ در گره تقاضا $i \in I$ تحت سناریوی $s \in S$؛

μ^s_h: نرخ خدمات بیمارستان $h \in H$ تحت سناریوی $s \in S$؛

τ^p_h: بیشترین زمان انتظار مورد قبول از بیماران نوعی $p \in P$ در بیمارستان $h \in H$؛

$\beta^{ps}_{h'}$: درصد بیماران نوعی $p \in P$ در بیمارستان با سطح پایین‌تر $h' \in J$ که ارجاع داده شده‌اند یا برای دریافت خدمات خاص تحت سناریو $s \in S$ توصیه شده‌اند؛

Q^L: بیشترین تعداد بیمارستان‌های با سطح پایین‌ترکه می‌توانند تأسیس شوند؛

Q^H: بیشترین تعداد بیمارستان‌های با سطح بالاترکه می‌توانند تأسیس شوند؛

pop_h: جمعیت مستقر در محل تسهیلات انتخابی $h \in H$؛

$pop^L_{\min}$: کمترین جمعیت نیازمند به تأسیس بیمارستان‌های سطح پایین؛

$pop^H_{\min}$: کمترین جمعیت نیازمند به تأسیس بیمارستان‌های سطح بالا؛

π_{hi}: احتمال وجود hi نفر در سیستم؛

P_s: احتمال سناریوی s؛

$d^{DHs}_{\max}$: بیشترین فاصله‌ی قابل قبول برای دسترسی به بیمارستان سطح بالا در سناریوی S؛

$d^{LHs}_{\max}$: بیشترین فاصله‌ی قابل قبول برای دسترسی به بیمارستان سطح پایین در سناریوی S؛

$|H|$: تعداد بیمارستان‌های سطح بالا.

- **متغیرهای تصمیم‌گیری**

y_h: اگر بیمارستان درگره $h \in H$ بنا شود ۱ و برای سایر موارد صفر؛

x^{ps}_{ih}: بخشی از بیماران نوعی $p \in P$ مقیم درگره تقاضا $i \in I$ انتقال داده شده در بیمارستان $h \in H$ تحت سناریوی $s \in S$؛

$r^{ps}_{h'h}$: بخشی از بیماران نوعی $p \in P$ مقیم در بیمارستان با سطح پایین‌تر $h' \in J$ انتقال داده شده به بیمارستان با سطح بالاتر $h \in K$ برای دریافت خدمات خاص تحت سناریوی $s \in S$؛

ζ^{s}_{h}: اگر بیمارستان‌های سطح بالا و سطح پایین $h \in H$ تحت سناریوی $s \in S$ احداث شود ۱ و برای سایر موارد صفر؛

$\zeta^{ps}_{ih'h}$: اگر بین بیمارستان سطح بالای h و بیمارستان سطح پایین h' درگره تقاضای i با سناریوی s برای بیماران نوع p ارتباطی برقرار شود ۱.

حال پس از معرفی مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم، مدل ریاضی پیشنهادی ارائه می‌شود.

۲.۴. مدل ریاضی پیشنهادی اولیه

در این بخش مدل ریاضی پیشنهادی در حالتی ارائه شده که تمامی پارامترهای مدل قطعی در نظرگرفته شده‌اند. برای محدودیت‌های ۱۳ تا ۱۶ از منابع [۲۱و۲۲] استفاده شده است.

$$Min \sum_{t\in T}\sum_{h\in H} f_{ht}y_h + \sum_{t\in T}\sum_{s\in S} P_s Tc_{st} \quad (۱)$$

$$\sum_{h\in J} y_h \le Q^L \quad (۲)$$

$$\sum_{h\in K} y_h \le Q^H \quad (۳)$$

$$\sum_{i\in I}\sum_{p\in P} h^{ps}_i x^{ps}_{ih} \le \mu^s_h \qquad \forall h\in J, s\in S \quad (۴)$$

$$\sum_{i\in I}\sum_{p\in P} h^{ps}_i x^{ps}_{ih} + \sum_{i\in I}\sum_{h'\in J}\sum_{p\in P} \beta^{ps}_{h'} h^{ps}_i \zeta^{ps}_{ih'h} \le \mu^s_{h'} \qquad \forall h\in K, s\in S \quad (۵)$$

$$y_h = ۰ \qquad \forall h \in \left\{ J \,\middle|\, pop_h \le pop^L_{\min} \right\} \quad (۶)$$

$$y_h = ۰ \qquad \forall h \in \left\{ K \,\middle|\, pop_h < pop^H_{\min} \right\} \quad (۷)$$

$$x^{ps}_{ih} = ۰ \qquad \forall i\in I, p\in P, s\in S, h\in \left\{ H \,\middle|\, d_{ih} > d^{DHs}_{\max} \right\} \quad (۸)$$

$$r^{ps}_{h'h} = ۰ \qquad \forall h'\in J, p\in P, s\in S, h\in \left\{ K \,\middle|\, d_{h'h} > d^{LHs}_{\max} \right\} \quad (۹)$$

$$x^{ps}_{ih} \ge ۰ \qquad \forall i\in I, h\in H, p\in P, s\in S \quad (۱۰)$$

$$r^{ps}_{h'h} \ge ۰ \qquad \forall h'\in J, h\in K, p\in P, s\in S \quad (۱۱)$$

$$y_h \in \{۰,۱\}^{|H|} \qquad \forall h\in H \quad (۱۲)$$

$$(۱+\tau^{HP}_h \mu^s_h)\sum_{i\in I} h^{HPs}_i x^{HPs}_{ih} + \sum_{i\in I} h^{LPs}_i x^{LPs}_{ih} \le \tau^{HP}_h (\mu^s_h)^۲ \qquad \forall h\in J, s\in S \quad (۱۳)$$

$$(۱+۲\tau^{LP}_h \mu^s_h)\sum_{i\in I} h^{HPs}_i x^{HPs}_{ih} + (۱+\tau^{LP}_h \mu^s_h)\sum_{i\in I} h^{LPs}_i x^{LPs}_{ih} - \tau^{LP}_h \begin{bmatrix} \sum_{i\in I} (h^{HPs}_i)^۲ \phi^{HPs}_{ih} \\ + \sum_{i\in I} h^{LPs}_i h^{HPs}_i \varsigma^s_{ih} \end{bmatrix} \le \tau^{LP}_h (\mu^s_h)^۲ \qquad \forall h\in J, s\in S \quad (۱۴)$$

$$(۱+\tau^{HP}_h \mu^s_h)\begin{bmatrix} \sum_{i\in I} h^{HPs}_i x^{HPs}_{ih} \\ + \sum_{i\in I}\sum_{h'\in J} \beta^{HPs}_{h'} h^{HPs}_i \varsigma^{HPs}_{ih'h} \end{bmatrix} + \sum_{i\in I} h^{LPs}_i x^{LPs}_{ih} + \sum_{i\in I}\sum_{h'\in J} \beta^{LPs}_{h'} h^{LPs}_i \varsigma^{LPs}_{ih'h} \le \tau^{HP}_h (\mu^s_h)^۲ \qquad \forall h\in K, s\in S \quad (۱۵)$$

$$(۱+۲\tau^{LP}_h \mu^s_h)\begin{bmatrix} \sum_{i\in I} h^{HP}_j x^{HPs}_{ih} \\ + \sum_{i\in I}\sum_{h'\in J} \beta^{HPs}_{h'} h^{HPs}_i \zeta^{HPs}_{ih'h} \end{bmatrix} + (۱+\tau^{LP}_h \mu^s_h)\begin{bmatrix} \sum_{i\in I} h^{LPs}_i x^{LPs}_{ih} \\ + \sum_{i\in I}\sum_{h'\in J} \beta^{LPs}_{h'} h^{LPs}_i \zeta^{LPs}_{ih'h} \end{bmatrix} - \tau^{LP}_h \begin{bmatrix} \sum_{i\in I} (h^{HPs}_i)^۲ \phi^{HPs}_{ih} \\ + \sum_{i\in I}\sum_{h'\in J} (\beta^{HPs}_{h'} h^{HPs}_i)^۲ \delta^{HPs}_{ih'h} \\ + ۲\sum_{i\in I}\sum_{h'\in J} \beta^{HPs}_{h'} (h^{HPs}_i)^۲ \varpi^{HPs}_{ih'h} \\ + \sum_{i\in I} h^{HPs}_i h^{LPs}_i \varsigma^s_{ih} \\ + \sum_{i\in I}\sum_{h'\in J} \beta^{HPs}_{h'} h^{HPs}_i h^{LPs}_i \varepsilon^s_{ih'h} \\ + \sum_{i\in I}\sum_{h'\in J} \beta^{LPs}_{h'} h^{LPs}_i h^{HPs}_i \psi^s_{ih'h} \\ + \sum_{i\in I}\sum_{h'\in J} \beta^{LPs}_{h'} \beta^{HPs}_{h'} h^{LPs}_i \sigma^s_{ih'h} \end{bmatrix} \le \tau^{LP}_h (\mu^s_h)^۲ \qquad \forall h\in K, s\in S \quad (۱۶)$$

$$\sum_{h\in H} x^{ps}_{ih} = ۱ \qquad \forall i\in I, p\in P, s\in S \quad (۱۷)$$

$$\sum_{h\in K} r^{ps}_{h'h} = ۱ \qquad \forall h'\in J, p\in P, s\in S \quad (۱۸)$$

$$x^{ps}_{ih} \le (۱-\zeta^s_h) y_h \quad \forall i\in I, h\in H, p\in P, s\in S \quad (۱۹)$$

$$r^{ps}_{h'h} \le (۱-\zeta^s_h) y_h \qquad \forall h'\in J, p\in P, s\in S \quad (۲۰)$$

$$\begin{aligned} TC_s = & \sum_{i\in I}\sum_{h\in H}\sum_{p\in P} d_{ih} TC_{ih} h^{ps}_i x^{ps}_{ih} \\ & + \sum_{i\in I}\sum_{h'\in J}\sum_{h\in K}\sum_{p\in P} d_{h'h} TC_{h'h} \beta^{ps}_{h'} h^{ps}_i \zeta^{ps}_{ih'h} \\ & + \sum_{i\in I}\sum_{h\in H}\sum_{p\in P} c^p_{ih} h^{ps}_i x^{ps}_{ih} \\ & + \sum_{i\in I}\sum_{h'\in J}\sum_{h\in K}\sum_{p\in P} c^p_{h'h} \beta^{ps}_{h'} h^{ps}_j \zeta^{ps}_{ih'h} \quad \forall s\in S \end{aligned} \quad (۲۱)$$

$$\begin{aligned} & Where \ \varsigma^{Ps}_{ih'h} = x^{ps}_{ih} r^{ps}_{h'h} \qquad \phi^{HPs}_{ih} = (x^{HPs}_{ih})^۲ \\ & \varsigma^s_{ih} = x^{HPs}_{ih} x^{LPs}_{ih} \qquad \delta^{HPs}_{ih'h} = (\zeta^{HPs}_{ih'h})^۲ \\ & \varpi^{HPs}_{ih'h} = x^{HPs}_{ih} \zeta^{HPs}_{ih'h} \qquad \varepsilon^s_{ih'h} = x^{LPs}_{ik} \zeta^{HPs}_{ih'h} \\ & \psi^s_{ih'h} = x^{HPs}_{ih} \zeta^{LPs}_{ih'h} \qquad \sigma^s_{ih'h} = \zeta^{LPs}_{ih'h} \zeta^{HPs}_{ih'h} \end{aligned} \quad (۲۲)$$

معادله‌ی ۱ نشان‌دهنده‌ی تابع هدف است که هزینه‌ی کل را کمینه می‌کند و شامل هزینه‌های ثابت محل بیمارستان‌های سطح پایین‌تر و سطح بالاتر، هزینه‌های حمل‌ونقل مورد انتظار و هزینه‌های خدمت به بیماران با اولویت بالاتر و پایین‌تر در هرگونه اختلال است. معادلات ۲ و ۳ به ترتیب نشانگر بیشترین تعداد بیمارستان‌های با سطح پایین‌تر و سطح بالاتر هستند که ممکن است تأسیس شوند. معادلات ۴ و ۵ به ترتیب ثبات صف در بیمارستان‌های پایین‌تر و بالاتر را تضمین می‌کنند. معادلات ۶ و ۷

نشان می‌دهند که بیمارستان‌های با سطح پایین و سطح بالا در مکان‌های انتخابی با جمعیتی بالاتر از یک مقدار از پیش تعیین شده تأسیس می‌شود. معادله‌ی ۸ تضمین می‌کند که بیماران با بالاترین و کمترین اولویت نباید بیش از حداکثر فاصله‌ی قابل قبول (به عنوان مثال) را برای دسترسی به خدمات در بیمارستان‌ها تحت هر سناریو متحمل شوند. معادله‌ی ۹ حداکثر فاصله‌ی قابل قبول برای بیمارستان با سطح پایین را تعیین می‌کند تا بیماران با اولویت بالاتر و پایین‌تر را به بیمارستان‌های با سطح بالاتری تحت هر سناریویی ارجاع دهد. معادلات ۱۰ تا ۱۲ محدودیت‌های غیر منفی و باینری را در متغیرهای تصمیم‌گیری مربوطه اجرا می‌کنند. معادلات ۱۳ و ۱۴ تضمین می‌کنند که کیفیت خدمات بیمارستان از طریق محدودیت‌های مربوط به سطح تردد اعمال می‌شود به گونه‌یی که زمان انتظار بیماران با اولویت بالاتر و پایین‌تر در صف، از حداکثر میزان مجاز تجاوز نکند. معادلات ۱۵ و ۱۶ همان دو محدودیت قبلی هستند در حالتی که بیماران می‌توانند به طور مستقیم هر دو خدمات عمومی و تخصصی را در بیمارستان‌های سطح بالا دریافت کنند. علاوه بر این، درصدی از بیماران با اولویت بالاتر و پایین‌تر در بیمارستان با سطح بالا ممکن است به بیمارستان‌های با سطح بالاتر برای خدمات تخصصی‌تر انتقال یابند. معادله‌ی ۱۷ نشان می‌دهد که تقاضای بیماران با اولویت بالاتر و پایین‌تر باید توسط بیمارستان‌های با سطح پایین‌تر یا سطح بالاتر انجام شود. معادله‌ی ۱۸ تضمین می‌کند که به بیماران با اولویت بالاتر و اولویت پایین‌تری که به ارائه‌ی خدمات تخصصی نیاز داشته باشند، باید خدمات لازم ارائه شود. معادله‌ی ۱۹ اطمینان می‌دهد که بیماران با اولویت بالاتر و اولویت پایین‌تر باید فقط به بیمارستان‌های تأسیس شده و آنهایی که در جریان هستند، تحت هر سناریو، اختصاص داده شوند. معادله‌ی ۲۰ تضمین می‌کند که در تحقق اختلالاتی که می‌تواند تأسیسات تأسیس شده را تحت تأثیر قرار دهد، بیماران با اولویت بالاتر و اولویت پایین‌تر که نیاز به ارائه‌ی خدمات تخصصی دارند تنها می‌توانند در بیمارستان‌های با سطح بالای در حال جریان و تأسیس شده، مکان داده شوند. معادله‌ی ۲۱ مقدار هزینه‌ی متغیرکل برای هر سناریو را نشان می‌دهد. معادلات ۲۲ مربوط به تعریف متغیرهای واسط هستند.

۳.۴. خطی‌سازی مدل پیشنهادی

مدل پیشنهادی ارائه شده در زیر بخش ۲.۴. یک مدل برنامه‌ریزی درجه دو و عدد صحیح است که به کار بردن آن در شکل فعلی‌اش مشکل است. به منظور جداسازی غیرخطی ناشی از محدودیت‌های دوطرفه شامل یافته‌های متغیرهای پیوسته و همچنین، شرایط نامتقارن درجه دوم، از نابرابری‌های مککورمیک[۲۳] استفاده می‌شود که به عنوان پایه‌یی برای بسیاری از راهبردهای بهینه‌سازی جهانی مانند بارون[۲۴] و کوئین[۲۵] هستند. با کاربرد روش فوق، مدل پیشنهادی چنین بیان می‌شود:

معادلات ۱ تا ۲۲

$$\varsigma^{ps}_{ih'h} \geq x^{ps}_{ih} + r^{ps}_{h'h} - ۱ \quad \forall i \in I, h' \in J, h \in K, p \in P, s \in S \tag{۲۳}$$

$$\varsigma^{ps}_{ih'h} \leq r^{ps}_{h'h} \quad \forall i \in I, h' \in J, h \in K, p \in P, s \in S \tag{۲۴}$$

$$\varsigma^{ps}_{ih'h} \leq x^{ps}_{ih} \quad \forall i \in I, h' \in J, h \in K, p \in P, s \in S \tag{۲۵}$$

$$\phi^{HPs}_{ih} \geq ۲x^{HPs}_{ih} - ۱ \quad \forall i \in I, h \in H, s \in S \tag{۲۶}$$

$$\phi^{HPs}_{ih} \leq x^{HPs}_{ih} \quad \forall i \in I, h \in H, s \in S \tag{۲۷}$$

$$\varsigma^{s}_{ih} \geq x^{HPs}_{ih} + x^{LPs}_{ih} - ۱ \quad \forall i \in I, h \in H, s \in S \tag{۲۸}$$

$$\varsigma^{s}_{ih} \leq x^{HPs}_{ih} \quad \forall i \in I, h \in H, s \in S \tag{۲۹}$$

$$\varsigma^{s}_{ih} \leq x^{HPs}_{ih} \quad \forall i \in I, h \in H, s \in S \tag{۳۰}$$

$$\delta^{HPs}_{ih'h} \geq ۲\varsigma^{HPs}_{ih'h} \quad \forall i \in I, h \in J, h \in K, s \in S \tag{۳۱}$$

$$\delta^{HPs}_{ih'h} \leq \varsigma^{HPs}_{ih'h} \quad \forall i \in I, h' \in J, h \in K, s \in S \tag{۳۲}$$

$$\varpi^{HPs}_{ih'h} \geq \varsigma^{HPs}_{ih'h} + x^{HPs}_{ih} - ۱ \quad \forall i \in I, h' \in J, h \in K, s \in S \tag{۳۳}$$

$$\varpi^{HPs}_{ih'h} \geq x^{HPs}_{ih} \quad \forall i \in I, h' \in J, h \in K, s \in S \tag{۳۴}$$

$$\varpi^{HPs}_{ih'h} \geq \varsigma^{HPs}_{ih'h} \quad \forall i \in I, h' \in J, h \in K, s \in S \tag{۳۵}$$

$$\varepsilon^{s}_{ih'h} \geq x^{LPs}_{ih} + \varsigma^{HPs}_{ih'h} - ۱ \quad \forall i \in I, h' \in J, h \in K, s \in S \tag{۳۶}$$

$$\varepsilon^{s}_{ih'h} \geq \varsigma^{HPs}_{ih'h} \quad \forall i \in I, h' \in J, h \in K, s \in S \tag{۳۷}$$

$$\varepsilon^{s}_{ih'h} \leq x^{LPs}_{ih} \quad \forall i \in I, h' \in J, h \in K, s \in S \tag{۳۸}$$

$$\psi^{s}_{ih'h} \geq x^{HPs}_{ih} + \varsigma^{LPs}_{ih'h} - ۱ \quad \forall i \in I, h' \in J, h \in K, s \in S \tag{۳۹}$$

$$\psi^{s}_{ih'h} \leq \varsigma^{LPs}_{ih'h} \quad \forall i \in I, h' \in J, h \in K, s \in S \tag{۴۰}$$

$$\psi^{s}_{ih'h} \leq x^{HPs}_{ih} \quad \forall i \in I, h' \in J, h \in K, s \in S \tag{۴۱}$$

$$\sigma^{s}_{ih'h} \geq \varsigma^{HPs}_{ih'h} + \varsigma^{LPs}_{ih'h} - ۱ \quad \forall i \in I, h' \in J, h \in K, s \in S \tag{۴۲}$$

$$\delta^{s}_{ih'h} \geq \varsigma^{LPs}_{ih'h} \quad \forall i \in I, h' \in J, h \in K, s \in S \tag{۴۳}$$

$$\sigma^{s}_{ih'h} \leq \varsigma^{HPs}_{ih'h} \quad \forall i \in I, h' \in J, h \in K, s \in S \tag{۴۴}$$

$$\sigma^{s}_{ih}.\upsilon^{s}_{ih}.\phi^{HPs}_{ih}.\gamma^{HPs}_{ih} \geq ۰ \quad \forall i \in I, h \in H, s \in S \tag{۴۵}$$

$$\varsigma^{Ps}_{ih'h}.\delta^{HPs}_{ih'h}.\varpi^{HPs}_{ih'h}.\varepsilon^{s}_{ih'h}.\psi^{s}_{ih'h}.\sigma^{s}_{ih'h} \geq ۰ \quad \forall i \in I, h' \in J, h \in K, s \in S \tag{۴۶}$$

۴.۴. مدل برنامه‌ریزی تصادفی مبتنی بر سناریوی قوی

همان‌طور که پیشتر بیان شد، تصمیمات تخصیص و مکان‌یابی به طور قابل توجهی تحت تأثیر درجه‌یی از عدم قطعیت قرار می‌گیرد که در جریان برنامه‌ریزی و عملیات ظاهر می‌شود. به عنوان یک نتیجه، اعمال عدم قطعیت به این تصمیمات ضروری است، به طوری که یک طراحی شبکه کارآمد به دست می‌آید. مدل پیشنهادی در بخش قبلی شامل دسته‌های مختلفِ عدم قطعیت اعم از عدم اطمینانِ تأمین کننده که در جنبه‌های ظرفیت و قابلیتِ اطمینان در امکانات خدمات بهداشتی منعکس شده است، عدم قطعیتِ گیرنده که در نرخ تقاضا و ارجاع و عدم اطمینان مابین منعکس شده، در دسترس جغرافیایی است. مجموعه‌یی از سناریوها را در مدل تعریف کرده‌ایم که هرکدام با یک احتمال داده شده شرایط مختل را تعیین می‌کنند و تعداد پارامترهای نامعلوم بستگی به سناریوی تحقق یافته دارد. برای بررسی سناریوهای درون مدل ریاضی توسعه‌یافته، از رویکرد قوی پیشنهاد شده توسط لیونگ و همکاران[۲۶] استفاده شده است که پیشرفتی ازکارانجام شده توسط مولوی و همکاران[۲۷] بوده است. این روش شامل دو نوع استحکام: استحکام راه‌حل و

استحکام مدل است؛ اولی برای یافتن راه حلی مطلوب برای تمامی موارد ممکن از پارامترهای نامعلوم است و دومی برای تضمین تحقق یافتن راه حل، در تمام موارد ممکن از پارامترهای نامعلوم با استفاده از عملکردهای مجاز استفاده می‌شود.[۲۷] مدل پیشنهادی ارائه شده با اعمال فرمول‌بندی تصادفی مبتنی بر سناریوی قوی پیشنهاد شده توسط مولوی و همکاران به صورت روابط ۴۷ تا ۵۶ خواهد بود که در آن Λ به عنوان وزن مشخصی از واریانس جواب و O_s به عنوان تقاضای ناخوشایند تحت سناریوی s تعریف شده‌اند. همچنین θ_s و ϑ ضرایب برنامه‌ریزی استوار بر پایه‌ی سناریو هستند.

$$\begin{aligned} Min \sum_{t\in T}\sum_{h\in H} f_{ht}y_h + \sum_{t\in T}\sum_{s\in S} P_s Tc_{st} \\ +\Lambda \sum_{s\in S} P_s \left[\left(Tc_{st} - \sum_{t\in T}\sum_{s'\in S} P_{s'}Tc_{ts'}\right) + 2\theta_s\right] \\ +\vartheta \sum_{s\in S} P_s \left(\sum_{i\in I}\sum_{p\in P} h_i^{ps} o_{1i}^{ps} + \sum_{i\in I}\sum_{h'\in J}\sum_{p\in P} \beta_h^{ps} h_i^{ps} x_{ih'}^{ps} o_{2h'}^{ps}\right) \end{aligned} \quad (47)$$

$$\sum_{h\in H} x_{ih}^{ps} + o_{1i}^{ps} = 1 \quad \forall i\in I, p\in P, s\in S \quad (48)$$

$$\sum_{h\in H} r_{h'h}^{ps} + o_{2h'}^{ps} = 1 \quad \forall h'\in J, p\in P, s\in S \quad (49)$$

$$TC_s - \sum_{s'\in S} P_{s'}TC_{s'} + \theta_s \geq 0 \quad \forall s\in S \quad (50)$$

$$\theta_s . o_{1i}^{ps} . o_{2h'}^{ps} \geq 0 \quad \forall i\in I, h'\in J, p\in P, s\in S \quad (51)$$

$$\Omega_{ih'}^{ps} \geq x_{ih'}^{ps} + o_{2h'}^{ps} - 1 \quad \forall i\in I, h'\in J, p\in P, s\in S \quad (52)$$

$$\Omega_{ih'}^{ps} \leq x_{ih'}^{ps} \quad \forall i\in I, h'\in J, p\in P, s\in S \quad (53)$$

$$\Omega_{ih'}^{ps} \leq x_{2h'}^{ps} \quad \forall i\in I, h'\in J, p\in P, s\in S \quad (54)$$

$$\Omega_{ih'}^{ps} \geq 0 \quad \forall i\in I, h'\in J, p\in P, s\in S \quad (55)$$

$$Where \quad \Omega_{ih'}^{ps} = x_{ih'}^{ps} . o_{2h'}^{ps} \quad (56)$$

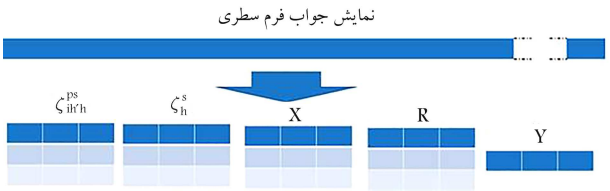
معادلات ۱ تا ۴۷

۵. روش‌های حل پیشنهادی

در این بخش به تبیین روش‌های حل پیشنهادی برای حل مدل ریاضی توسعه داده شده، شامل الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامطلوب و الگوریتم ازدحام ذرات خواهیم پرداخت.

۱.۵. نحوه‌ی نمایش جواب

برای نمایش جواب از یک رشته عدد اعشاری استفاده شد. این رشته با نگاشتی که در شکل ۴ نشان داده می‌شود به جوابی از مسئله تبدیل می‌شود. این رشته‌ی اعداد اعشاری، در واقع سطرهای سه ماتریس است که در یک سطر آمده‌اند. درگام اول رشته‌ی اعداد به سه ماتریس تبدیل می‌شود. دلیل استفاده از فرم سری به جای فرم ماتریسی، استفاده‌ی بهتر از توابع الگوریتم‌هاست. بدین صورت که الگوریتم به سمت یک رشته عدد اعشاری همگرا می‌شود که این رشته متناظر با جوابی از مسئله است.



شکل ۴. نمایش جواب به فرم سطری.

جدول ۲. وزن معیارهای ارزیابی برای محاسبه‌ی متغیر پاسخ.

معیارها	تعداد توابع ارزیابی شده	زمان اجرا
وزن‌ها	۲	۱

جدول ۳. سطوح عامل استفاده شده برای الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامطلوب.

		سطوح عامل‌ها		
		۱	۲	۳
پارامترها	تعداد جمعیت	۵۰	۱۰۰	۱۵۰
	احتمال عملگر جهش	۰/۷	۰/۸	۰/۹
	احتمال عملگر تقاطع	۰/۱	۰/۲	۰/۳

برای بخش Y که باید اعداد آن صفر و ۱ باشد، اعداد بزرگتر از ۰/۵، یک و اعداد کوچکتر مساوی ۰/۵، صفر در نظرگرفته شده است. پس از تعیین Y، Xها و Rهایی که نمی‌توانند با توجه به محدودیت‌های احداث و جمعیت و غیره مقدار بگیرند، صفر می‌شوند. پس از اعمال محدودیت‌های ذکر شده، باقی متغیرها از روی متغیرهای تصمیم محاسبه می‌شوند و در نهایت، هزینه‌ی کل محاسبه می‌شود که به عنوان تابع هدف در نظرگرفته شده است.

۲.۵. متغیر پاسخ

برای تنظیم پارامتر از متغیر پاسخ استفاده شده است که ترکیبی از دو معیار ارائه شده است و مقدار آن با استفاده از رابطه‌ی ۵۷ محاسبه می‌شود. ضرایب وزنی به کار رفته برای معیارها در جدول ۲ نشان داده شده است.

$$R_i = \frac{w_1\overline{RPD_1} + w_2\overline{RPD_2} + \ldots + w_n\overline{RPD_n}}{w_1 + w_2 + \ldots + w_n} \quad (57)$$

۳.۵. عوامل و سطوح مربوط به الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامطلوب

در جدول ۳ سطوح و عوامل مربوط به الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامطلوب آورده شده است. با مراجعه به جدول استاندارد آرایه‌های متعامد در روش تاگوچی و با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب،[۵] ارائه‌ی متعامد $L9(3^3)$ به عنوان مناسب‌ترین طرح برای مدل‌های سه تا شش انتخاب می‌شود. آرایه‌های متعامد این طرح در جدول ۴ آمده است. از آن‌جا که مقدار R_i در هر مسئله متفاوت است و به طور مستقیم قابل استفاده نیست از درصد انحراف نسبی[۶] برای هر مسئله استفاده می‌شود.

$$RPD = \frac{Alg_{sol} - Min_{sol}}{Min_{sol}} \times 100 \quad (58)$$

جدول ۴. آرایه‌های متعامد برای الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامطلوب.

شماره آزمایش	احتمال		تعداد جمعیت
	جهش	تقاطع	
۱	۱	۱	۱
۲	۲	۲	۱
۳	۳	۳	۱
۴	۲	۱	۲
۵	۳	۲	۲
۶	۱	۳	۲
۷	۳	۱	۳
۸	۱	۲	۳
۹	۲	۳	۳

جدول ۵. سطوح عامل استفاده شده برای الگوریتم ازدحام ذرات.

		سطوح عامل‌ها		
		۱	۲	۳
پارامترها	تعداد جمعیت	۵۰	۱۰۰	۱۵۰
	احتمال عملگر جهش	۰/۷	۰/۸	۰/۹
	احتمال عملگر تقاطع	۰/۱	۰/۲	۰/۳

در رابطه‌ی ۵۸، Alg_{sol} و Min_{sol} به ترتیب مقادیر R_i برای هر تکرار از آزمایش و بهترین حل به دست آمده هستند. بعد از تبدیل مقدار R_i به درصد انحراف نسبی، طبق ساختار طراحی پارامتر تاگوچی نسبت سیگنال به نویز براساس درصد انحراف نسبی محاسبه می‌شود. سپس میانگین نسبت سیگنال به نویز آزمایش‌ها برای هر سطح پارامتر محاسبه می‌شود.

بهترین مقدار هر پارامتر بیشترین مقدار میانگین نسبت سیگنال به نویز را دارد. در واقع، سطوح عامل‌هایی بهینه هستند که حداکثر نسبت سیگنال به نویز مورد نظر را نتیجه می‌دهند. پس از اجرای آزمایش تاگوچی، نتایج نسبت سیگنال به نویز و میانگین برای هر سطح از فاکتورها در الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامطلوب برای مدل ارائه شده مورد استفاده قرار گرفت.

سطح بهینه‌ی عوامل تعداد جمعیت،[7] احتمال عملگر جهش[8] و احتمال عملگر تقاطع،[9] برای الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامطلوب در مدل ارائه شده، به ترتیب برابر با ۱۵۰، ۰/۲ و ۰/۷ هستند.

۴.۵. عوامل و سطوح مربوط به الگوریتم ازدحام ذرات

در جدول ۵ سطوح و عوامل مربوط به الگوریتم ازدحام ذرات آورده شده است و آرایه‌های متعامد مربوطه در جدول ۶ آمده است.

سطح بهینه فاکتورهای تعداد جمعیت، احتمال جهش و عملگر تقاطع برای الگوریتم ازدحام ذرات در مدل ارائه شده، به ترتیب برابر با ۵۰، ۰/۲ و ۰/۷ هستند.

۵.۵. نتایج محاسباتی

در این بخش به منظور بررسی عملکرد الگوریتم تحقیق، تحلیل حساسیت روی

جدول ۶. آرایه‌های متعامد برای الگوریتم ازدحام ذرات.

شماره آزمایش	عملگر تقاطع	تعداد جمعیت	عملگر جهش
۱	۱	۱	۱
۲	۲	۱	۲
۳	۳	۱	۳
۴	۱	۲	۲
۵	۲	۲	۳
۶	۳	۲	۱
۷	۱	۳	۳
۸	۲	۳	۱
۹	۳	۳	۲

تعدادی از مجموعه‌های تحقیق انجام گرفته و نتایج به صورت زیر ارائه می‌شود.

همان‌طور که در جدول‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود، پاسخ‌های حاصل از حل الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با مدل ارائه شده، کیفیت مناسبی دارند، به طوری که بیشترین گپ محاسباتی برابر با ۹/۵ درصد است. همچنین می‌توان در جدول ۹ مشاهده کرد که زمان مدل ارائه شده به صورت نمایی افزایش می‌یابد، اما افزایش زمان الگوریتم‌های پیشنهادی دارای ساختاری منطقی و افزایشی تدریجی است.

بنابراین طبق مطالب فوق، می‌توان گفت الگوریتم ازدحام ذرات دارای بهترین عملکرد در بین الگوریتم‌هاست. این در حالی است که الگوریتم تکامل تفاضلی با وجود حصول نتایجی مناسب‌تر از الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامطلوب در برخی از مثال‌ها، درکل عملکردی مشابه با الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامطلوب دارد. تحلیل حساسیت بر اساس مقادیر مختلف ضریب بهره‌وری برای خدمت‌دهی نیز به صورت مقادیر ارائه شده در جدول ۹ تشریح می‌شود. چنان که مشاهده می‌شود، زمان حل در حالت وجود ضریب بالا به مراتب بیشتر از حالت وجود ضرایب پایین‌تر است. در حقیقت مسئله با ضرایب بالاتر سخت حل شده و نیاز به زمان بیشتری دارد. همچنین مقدار تابع هدف نیز به ازای ضرایب بالا به مراتب بیشتر از ضرایب پایین است که نشان‌دهنده‌ی عدم دسترسی الگوریتم به پاسخ‌های با کیفیت بالاتر برای ضرایب بهره‌وری بالاست.

با توجه به نتایج به دست آمده از روش تاگوچی، می‌توان بهینه‌ترین مقدار را برای هر عامل مورد نظر به شرح زیر در نظر گرفت:

- برای الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامطلوب، سطح بهینه‌ی ضرایب تعداد جمعیت، احتمال جهش و عملگر تقاطع در مدل ارائه شده، به ترتیب برابر با ۱۵۰، ۰/۲ و ۰/۷ هستند؛
- برای الگوریتم ازدحام ذرات سطح بهینه‌ی ضرایب تعداد جمعیت، احتمال جهش و عملگر تقاطع در مدل ارائه شده، به ترتیب برابر با ۵۰، ۰/۲ و ۰/۷ هستند؛
- هزینه‌ی کل زمانی کمینه می‌شود که پارامتر تعداد جمعیت در الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامطلوب در بالاترین سطح و مقدار خود باشد و متغیرهای احتمال تقاطع و احتمال جهش هر دو در پایین‌ترین مقدار در نظر گرفته شده باشند؛
- هزینه‌ی کل زمانی بیشینه می‌شود که پارامتر تعداد ذرات (تعداد جمعیت) و احتمال عملگر تقاطع در الگوریتم ازدحام در پایین‌ترین سطح و مقدار خود باشند و متغیر احتمال عملگر جهش مقدار میانی تعریف شده را اتخاذ کند.

جدول ۷. تحلیل حساسیت برای الگوریتم ازدحام ذرات.

ازدحام ذرات				سیپلکس				سناریو	نقاط تقاضا	بیمارستان های سطح بالا
اختلاف		تابع هدف		زمان (s)		تابع هدف				
۷۹/۵		۴۹۳۴۳۴۷۵		۲۱		۴۶۴۸۸۶۵۴		۲	۵	۲
۶۲/۷		۱۰۶۰۶۶۱۶۸		۲۶		۹۷۹۸۳۲۹۶		۳		
۵۰/۹		۱۱۴۰۰۸۸۹۸		۳۴		۱۰۳۱۷۶۶۵۶		۴		
۸/۷۱		۷۸۹۵۶۰۰۹		۳۷		۷۲۰۷۶۷۱۱۹		۲	۸	
۸/۵۲		۱۰۵۹۷۳۰۰۴		۴۰		۹۶۹۴۴۸۸۴		۳		
۷/۲۳		۱۳۳۰۲۲۷۹۲		۴۴		۱۲۳۴۰۰۳۹۱		۴		
۷/۸۴		۸۴۰۹۱۲۴۳		۴۸		۷۷۵۰۱۵۰۱		۲	۱۰	۴
۷/۶۹		۴۱۴۳۱۱۱۴		۴۸		۳۸۲۴۴۱۸۱		۳		
۷/۷۹		۵۲۲۵۲۷۹۱		۵۲		۴۸۱۸۲۱۸۹		۴		
۷۰/۸		۷۰۱۷۵۳۷۵		۵۸		۶۴۰۶۸۴۷۱		۲	۱۲	
۸۳/۴		۱۱۷۰۱۷۹۴۶		۵۹		۱۱۱۳۷۰۷۷۸		۳		
۷۷/۴		۷۶۸۳۲۲۰۷		۶۵		۷۳۱۶۷۹۱۲		۴		
۶۷/۷		۱۱۰۱۷۳۸۱۷		۶۴		۱۰۱۷۲۱۸۸۳		۲	۱۵	۵
۹۲/۷		۶۲۷۶۲۸۵۹		۷۶		۵۷۷۹۱۳۷۹		۳		
۲۷/۷		۶۰۹۸۷۱۳۲		۸۲		۵۶۵۵۵۳۲۴		۴		
۷۵/۷		۱۲۴۵۳۹۸۲۴		۷۹		۱۱۴۸۸۲۹۰۷		۲	۲۰	
۰۴/۹		۱۶۴۸۷۸۵۱۶		۸۷		۱۴۹۹۷۸۹۵۰		۳		
۷۵/۷		۱۴۵۴۶۰۴۵		۸۹		۱۳۴۱۸۵۶۷		۴		
۳۲/۶		۴۰۰۱۳۱۲۸		۸۵		۳۷۴۸۳۶۲۱		۲	۸	۲
۵۱/۸		۱۶۴۹۲۰۰۴۲		۱۰۰		۱۵۰۸۸۷۴۴۳		۳		
۳۴/۸		۱۲۱۰۹۷۴۷۰		۹۳		۱۱۱۰۰۲۸۵۶		۴		
۱۵/۸		۱۶۲۸۷۱۱۵		۹۸		۱۴۹۵۹۴۴۹		۲	۱۰	
۳۸/۸		۱۲۰۷۹۱۲۴۲		۹۴		۱۱۰۶۶۹۸۱۲		۳		
۲۷/۶		۹۹۲۵۵۸۴۹		۹۷		۹۳۰۳۶۳۳۳		۴		
۶۷/۸		۱۶۰۰۵۰۷۶۸		۱۰۶		۱۴۶۱۷۲۶۹۴		۲	۱۲	۳
۳۸/۷		۶۷۳۲۲۴۹۸		۱۰۰		۶۲۳۵۶۱۸۸		۳		
۷۰/۸		۶۴۱۸۴۸۰۷		۱۱۴		۵۸۶۰۳۰۰۷		۴		
۴۰/۹		۴۷۳۳۳۸۲۱		۱۱۶		۴۲۸۸۶۶۲۲		۲	۱۴	
۸۰/۵		۱۱۵۴۲۸۹۱۸		۱۱۲		۱۰۸۷۳۳۶۱۱		۳		
۱۱/۷		۱۶۷۶۳۵۱۹		۱۱۰		۱۵۵۷۱۹۲۴		۴		
۸۱/۶		۱۱۶۶۱۲۲۳۱		۱۲۲		۱۰۸۶۷۰۸۹۳		۲	۱۰	۴
۶۰/۸		۱۱۰۱۷۲۲۵۶		۱۱۴		۱۰۰۶۹۷۶۷۹		۳		
۴۵/۹		۶۵۷۷۴۷۸۵		۱۳۶		۵۹۵۶۰۵۸۳		۴		
۰۳/۸		۹۳۷۱۹۳۰۴		۱۴۳		۸۶۱۹۳۶۱۶		۲	۱۵	
۵۲/۸		۸۹۶۵۵۸۵۴		۱۳۳		۸۲۰۱۵۲۱۹		۳		
۷۹/۵		۹۶۱۶۲۷۸۴		۱۴۷		۹۰۵۹۵۳۸۸		۴		

جدول ۸. تحلیل حساسیت برای الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامطلوب.

ازدحام ذرات			ژنتیک با مرتب سازی مامطلوب			سناریو	نقاط تقاضا	بیمارستان های سطح بالا
تابع هدف		زمان (s)	تابع هدف		زمان (s)			
۴۹۳۴۳۴۷۵		۲۱	۴۸۹۵۱۸۳۳,۸۸		۲۴	۲	۵	۲
۱۰۶۰۶۶۱۶۸		۲۶	۱۰۵۹۰۳۸۹۳,۹		۲۷	۳		
۱۱۴۰۰۸۸۹۸		۳۴	۱۱۲۹۱۶۷۱۸,۷		۳۶	۴		
۷۸۹۵۰۰۹		۳۷	۷۸۳۵۲۵۳۰,۸		۴۲	۲	۸	
۱۰۵۹۷۳۰۰۴		۴۰	۱۰۴۹۳۲۳۴۶,۴		۴۱	۳		
۱۳۳۰۲۲۷۹۲		۴۴	۱۳۱۸۷۳۴۱۳,۹		۵۰	۴		
۸۴۰۹۱۲۴۳		۴۸	۸۳۳۶۵۶۵۴,۰۹		۵۶	۲	۱۰	۴
۴۱۴۳۱۱۱۴		۴۸	۴۱۳۱۶۱۷۶,۲۲		۵۵	۳		
۵۲۲۵۲۷۹۱		۵۲	۵۲۶۷۴۳۶۳,۱۴		۵۹	۴		
۷۰۱۷۵۳۷۵		۵۸	۶۹۴۷۹۹۲۴,۱۶		۶۴	۲	۱۲	
۱۱۷۰۱۷۹۴۶		۵۹	۱۱۶۲۱۱۳۲۲,۶		۶۵	۳		
۷۶۸۳۲۲۰۷		۶۵	۷۶۲۷۰۰۷۶,۳۳		۷۷	۴		
۱۱۰۱۷۳۸۱۷		۶۴	۱۰۹۷۹۳۲۲۱,۵		۶۵	۲	۱۵	۵
۶۲۷۶۲۸۵۹		۷۶	۶۲۷۹۹۶۹۱,۸۵		۸۹	۳		
۶۰۹۸۷۱۳۲		۸۲	۶۰۹۱۳۷۲۶,۵۶		۹۷	۴		
۱۲۴۵۳۹۸۲۴		۷۹	۱۲۴۰۸۲۶۷۴,۲		۸۱	۲	۲۰	
۱۶۴۸۷۸۵۵۱۶		۸۷	۱۶۴۰۵۰۶۵۸,۹		۹۷	۳		
۱۴۵۴۶۰۴۵		۸۹	۱۴۴۹۶۰۲۳,۰۳		۱۰۲	۴		
۴۰۰۱۳۱۲۶		۸۵	۳۹۸۵۸۷۶۹,۲۹		۱۰۱	۲	۸	۲
۱۶۴۹۲۰۰۴۲		۱۰۰	۱۶۵۶۶۳۶۲۶,۲		۱۱۱	۳		
۱۲۱۰۹۷۴۷۰		۹۳	۱۲۱۳۰۹۱۱۰,۷		۹۷	۴		
۱۶۲۸۷۱۱۶		۹۸	۱۶۳۳۴۸۹۹,۰۱		۹۹	۲	۱۰	
۱۲۰۷۹۱۲۴۲		۹۴	۱۱۹۶۴۹۷۲۴,۶		۱۱۰	۳		
۹۹۲۵۵۸۴۹		۹۷	۹۸۳۲۷۱۸۰,۲۵		۱۰۷	۴		
۱۶۰۰۵۰۷۶۸		۱۰۶	۱۶۱۵۴۱۳۵۵,۴		۱۱۲	۲	۱۲	۳
۶۷۳۲۲۴۹۸		۱۰۰	۶۶۹۷۴۴۴۳,۷۹		۱۱۷	۳		
۶۴۱۸۴۸۰۷		۱۱۴	۶۳۸۲۰۹۵۶,۳۳		۱۳۶	۴		
۴۷۳۳۳۸۲۱		۱۱۶	۴۷۷۶۶۱۴۹,۹۲		۱۳۵	۲	۱۴	
۱۱۵۴۲۸۹۱۷		۱۱۲	۱۱۵۰۱۵۶۶۱,۸		۱۲۹	۳		
۱۶۷۶۳۵۱۸		۱۱۰	۱۶۸۷۸۴۵۸		۱۱۳	۴		
۱۱۶۶۱۲۲۳۱		۱۲۲	۱۱۶۶۵۵۵۷۵,۵		۱۳۷	۲	۱۰	۴
۱۱۰۱۷۲۲۵۶		۱۱۴	۱۱۰۴۱۵۴۵۸,۷		۱۲۸	۳		
۶۵۷۷۴۷۸۵		۱۳۶	۶۶۲۷۸۲۵۲,۰۷		۱۵۵	۴		
۹۳۷۱۹۳۰۴		۱۴۳	۹۳۳۲۶۴۸۱,۸۹		۱۵۳	۲	۱۵	
۸۹۶۵۵۸۵۴		۱۳۳	۸۹۷۰۲۹۲۷,۸۸		۱۴۲	۳		
۹۶۱۶۲۷۸۴		۱۴۷	۹۵۷۳۰۵۳۸,۲۱		۱۶۳	۴		

جدول ۹. تحلیل حساسیت براساس مقادیر مختلف ضریب بهره‌وری برای خدمت‌دهی.

نمود	ضریب ۸۰ درصد				ضریب ۷۰ درصد				ضریب ۶۰ درصد			
	زمان حل (S)				پاسخ نهایی				تعداد تکرارها جهت رسیدن به پاسخ نهایی			
نمود ۱	زمان حل (S) ۱۵.۳	پاسخ نهایی ۸۳۱۸	تعداد تکرارها جهت رسیدن به پاسخ نهایی ۴۸۸	واریانس پاسخ ها در پاسخ نهایی	زمان حل	پاسخ نهایی	تعداد تکرارها جهت رسیدن به پاسخ نهایی	واریانس پاسخ ها در پاسخ نهایی	زمان حل	پاسخ نهایی	تعداد تکرارها جهت رسیدن به پاسخ نهایی	واریانس پاسخ ها در پاسخ نهایی
۲	۱۵.۶	۹۰۱۳	۴۰۵	۹	۹.۳	۷۱۱۰	۳۵۸	۶	۸.۶	۶۱۳۰	۴۶۸	۶
۳	۱۵.۹	۸۰۶۴	۳۹۳	۱۵	۱۱.۱	۷۷۰۴	۳۸۸	۷	۱۰.۸	۶۷۵۸	۴۱۷	۲
۴	۱۲.۸	۱۰۴۵۰	۳۴۶	۱۱	۱۰.۸	۷۲۰۰	۴۲۲	۸	۱۰.۵	۶۴۲۹	۳۰۰	۲
۵	۱۵.۰	۹۳۸۹	۴۸۵	۱۶	۱۱.۱	۸۷۰۹	۳۴۵	۸	۸.۰	۷۹۱۸	۴۱۹	۸
۶	۱۲.۵	۹۹۳۸	۳۵۶	۱۱	۱۰.۹	۸۰۲۵	۳۴۶	۵	۹.۱	۶۷۴۴	۳۹۴	۱
۷	۱۳.۶	۹۴۹۳	۳۹۵	۲۰	۹.۱	۸۳۵۲	۴۵۴	۴	۱۰.۸	۷۰۱۹	۴۷۹	۰,۹
۸	۱۴.۹	۹۴۴۰	۳۸۹	۱۲	۱۰.۸	۸۲۵۵	۳۴۹	۲	۱۱.۴	۷۱۷۹	۳۵۰	۲
۹	۱۵.۵	۹۵۸۱	۴۸۰	۱۹	۹.۴	۷۸۶۷	۳۸۳	۴	۱۱.۶	۶۸۴۱	۳۶۹	۴
۱۰	۱۴.۴	۱۰۵۰۵	۳۷۸	۱۰	۱۰.۶	۸۴۰۵	۳۵۱	۳	۱۱.۵	۷۱۸۴	۴۵۲	۰,۹
میانگین	۱۴۵/۵۰	۹۴۱۹/۱۰		۱۲	۸.۹	۹۴۶۴	۳۰۷	۱	۱۰.۶	۷۸۸۷	۴۹۱	۷
واریانس	۱۱/۳۶	۷۵۸/۸۰			۱۰۲/۰۰	۸۱۰۹/۱۰			۱۰۲/۹۰	۷۰۰۸/۹۰		

۶. نتیجه‌گیری

سیستم‌های مراقبت بهداشتی در اکثر کشورها در درجه‌ی اول برای بیشینه‌سازی سلامت، رعایت عدالت، کارایی و کیفیت جمعیت و در درجه‌ی دوم برای کنترل یا کمینه‌سازی هزینه‌های مراقبت‌های بهداشتی تلاش می‌کنند. به منظور پیگیری این اهداف، نیاز به تصمیم‌گیری در مواردی از جمله تعیین محل بیمارستان به بهبود دسترسی آن، تعیین ساختار بهینه‌ی شبکه‌ی بیمارستان است. برای پاسخگویی به این نیازهای تصمیم‌گیری، در این مطالعه یک مدل برنامه‌ریزی پویای استوار برای مسئله‌ی مکان‌یابی و تخصیص شبکه‌ی خدمات سلامت با در نظر گرفتن مسائل مطرح در دنیای واقعی از جمله ظرفیت محدود، در نظر گرفتن شرایط اختلال و عدم قطعیت در پارامترهای کلیدی توسعه داده شد. برای حل مدل پیشنهادی از الگوریتم‌های ژنتیک با مرتب‌سازی نامطلوب و ازدحام ذرات استفاده شد. نتایج محاسباتی حاصله کارایی الگوریتم‌های ارائه شده را به خوبی نشان دادند. همچنین تحلیل حساسیت بر اساس مقادیر مختلف ضریب بهره‌وری برای خدمت‌دهی نشان داد که زمان حل مسئله و همچنین مقدار تابع هدف برای ضرایب بالاتر بهره‌وری بیشتر از حالت مربوط به ضرایب پایین‌تر هستند که این مسئله‌ی عدم دسترسی به پاسخ‌های با کیفیت برای ضرایب بالاتر بهره‌وری است.

مواردی نظیر استفاده از سایر الگوریتم‌ها نظیر الگوریتم مورچگان، استفاده از ترکیب الگوریتم‌ها و مقایسه‌ی نتایج حاصله و مقایسه‌ی داده‌های حاصله در این تحقیق با تحقیق تجربیِ صورت گرفته را می‌توان به عنوان پیشنهادهایی برای انجام تحقیقات در آینده مطرح کرد.

مدیران می‌توانند موارد زیر را نیز به عنوان پیشنهادهای کلیدی حاصل از این تحقیق مدنظر قرار دهند:

- برنامه‌ریزی برای احداث بیمارستان‌های سطح بالا و سطح پایین باید با توجه به هم صورت گیرد، توجه به این موضوع می‌تواند هزینه‌های متعدد لجستیکی را کاهش دهد؛
- بخشی از بیماران که از بیمارستان‌های سطح پایین به بیمارستان‌های سطح بالا جابه‌جا می‌شوند توسط این تحقیق مشخص شده و با توجه به محدودیت ظرفیت در دنیای واقعی مدیران این مراکز درمانی می‌توانند ظرفیت‌های لازم را در زمان احداث در نظر بگیرند.

پانوشت‌ها

1. Mixed Integer Linear Programming
2. Here-and-Now
3. Wait-and-See
4. P-Robustness
5. Minitab

6. Rpd: Relative Percentage Deviation
7. npop: Number of Population
8. pm: Probability of Mutation
9. pc: Probability of Crossover

منابع (References)

1. Şahin, G., Süral, H. and Meral, S. "Locational analysis for regionalization of turkish red crescent blood services", *Computers & Operations Research*, **34**(3), pp. 692-704 (2007).
2. Zarrinpoor, N., Fallahnezhad, M.S. and Pishvaee, M.S. "Design of a reliable hierarchical location-allocation model under disruptions for health service networks: A two-stage robust approach", *Computers & Industrial Engineering*, **109**, pp. 130-150 (2017).
3. Bhattacherjee, A. "An empirical analysis of the antecedents of electronic commerce service continuance", *Decision Support Systems*, **32**(2), pp. 201-214 (2001).
4. Yiannakoulias, N., Bland, W. and Svenson, L.W. "Estimating the effect of turn penalties and traffic congestion on measuring spatial accessibility to primary health care", *Applied Geography*, **39**, pp. 172-182 (2013).
5. Snyder, L.V. and Daskin, M.S. "Reliability models for facility location: The expected failure cost case", *Transportation Science*, **39**(3), pp. 400-416 (2005).
6. An, Y. and et al. "Reliable p-median facility location problem: Two-stage robust models and algorithms", *Transportation Research Part B: Methodological*, **64**, pp. 54-72 (2014).
7. Aydin, N. and Murat, A. "A swarm intelligence based sample average approximation algorithm for the capacitated reliable facility location problem", *International Journal of Production Economics*, **145**(1), pp. 173-183 (2013).
8. Narula, S.C. and Ogbu, U.I. "An hierarchal location-allocation problem", *Omega*, **7**(2), pp. 137-143 (1979).
9. Galvão, R.D. and et al. "Load balancing and capacity constraints in a hierarchical location model", *European Journal of Operational Research*, **172**(2), pp. 631-646 (2006).
10. Mestre, A.M., Oliveira, M.D. and Barbosa-Póvoa, A. "Organizing hospitals into networks: A hierarchical and multiservice model to define location, supply and referrals in planned hospital systems", *OR Spectrum*, **34**(2), pp. 319-348 (2012).
11. Zhou, Z. and et al. "A two-stage stochastic programming model for the optimal design of distributed energy systems", *Applied Energy*, **103**, pp. 135-144 (2013).
12. Gabrel, V. and et al. "Robust location transportation problems under uncertain demands", *Discrete Applied Mathematics*, **164**, pp. 100-111 (2014).
13. Morton, A. "Structural properties of network revenue management models: An economic perspective", *Naval Research Logistics (NRL)*, **53**(8), pp. 748-760 (2006).
14. Peng, P. and et al. "Reliable logistics networks design with facility disruptions", *Transportation Research Part B: Methodological*, **45**(8), pp. 1190-1211 (2011).
15. Yun, L. and et al. "A reliability model for facility location design under imperfect information", *Transportation Research Part B: Methodological*, **81**, pp. 596-615 (2015).
16. Haghjoo, N. and et al. "Reliable blood supply chain network design with facility disruption: A real-world application", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **90**, p. 103493 (2020).
17. Bakhshandeh, S. and et al. "Designing of hospital chain network with facility location approach and disruption consideration", *Iranian Journal of Supply Chain Management*, **22**(66), pp. 38-51 (2020).
18. Alinaghian, M. and et al. "A novel robust model for health care facilities location-allocation considering pre disaster and post disaster characteristics", *Scientia Iranica*, **30**(2), pp.619-641 (2021).
19. Zheng, B. and et al. "Predictive modeling of hospital readmissions using metaheuristics and data mining", *Expert Systems with Applications*, **42**(20), pp. 7110-7120 (2015).
20. Daskin, M.S., *Network and Discrete Location: Models, Algorithms, and Applications*, John Wiley & Sons (2011).
21. Burkey, M.L., Bhadury, J. and Eiselt, H.A. "A location-based comparison of health care services in four US states with efficiency and equity", *Socio-Economic Planning Sciences*, **46**(2), pp. 157-163 (2012).
22. Zhou, Z., Zhang, J., Liu, P. and et al. "A two-stage stochastic programming model for the optimal design of distributed energy systems", *Applied Energy*, **103**, pp. 135-144 (2013).
23. McCormick, G.P. "Computability of global solutions to factorable nonconvex programs: Part I-Convex underestimating problems", *Mathematical Programming*, **10**(1), pp. 147-175 (1976).
24. Sahinidis, N.V. "Baron: A general purpose global optimization software package", *Journal of Global Optimization*, **8**(2), pp. 201-205 (1996).
25. Belotti, P. and et al. "Branching and bounds tighteningtechniques for non-convex MINLP", *Optimization Methods & Software*, **24**(4.5), pp. 597-634 (2009).
26. Leung, S.C. and et al. "A robust optimization model for multi-site production planning problem in an uncertain environment", *European Journal of Operational Research*, **181**(1), pp. 224-238 (2007).
27. Mulvey, J.M., Vanderbei, R.J. and Zenios, S.A. "Robust optimization of large-scale systems", *Operations Research*, **43**(2), pp. 264-281 (1995).