مدل‌سازی ریاضی دوهدفه برای مسئله مکان‌یابی - مکان‌یابی مجدد تسهیلات بیمارستانی سلسله‌مراتبی در شرایط عدم قطعیت و بحران

مطالعه موردی: پمپ‌بنزین‌های ناحیه ۳ منطقه ۷ شهر تهران

محمدرضا کرزه‌بر: دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
رضا توکلی مقدم *: استاد دانشکده مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۰۷
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۲۹

چکیده

با توجه به گسترش مناطق شهری، تغییرات جمعیتی و اینکه تسهیلات موجود طی سال‌های گذشته و به تدریج مکان‌یابی شده‌اند، این نیاز به وجود می‌آید که همه تسهیلات موجود تحت بررسی دوباره قرار گرفته و در صورت نیاز اصلاحاتی در ساختار شبکه‌ها ایجاد شود. در این مقاله با ارائه یک مدل مکان‌یابی- مکان‌یابی مجدد برای تسهیلات بیمارستانی با رویکرد سلسله مراتبی، وضعیت کنونی تسهیلات موجود بررسی شده و در صورت نیاز به ایجاد تغییرات در ساختار کنونی تسهیلات، راهکارهایی برای بستن، تغییر ظرفیت و بازکردن تسهیلات تازه ارائه خواهد شد. اهداف مدل پیشنهادی شامل بیشینه‌سازی پوشش تقاضا و کمینه‌سازی هزینه‌های ساختار است. در مدل پیشنهادی احتمال رخداد اختلالات و بحران‌هایی نظیر از دسترس خارج شدن یک تسهیل در نظر گرفته شده است. از طرف دیگر شعاع پوشش و میزان ظرفیت هر یک از تسهیلات بیمارستانی بر روی کیفیت و سرعت پاسخ‌دهی اثرگذار است؛ پس در این مقاله سطوح ظرفیت تسهیلات و شعاع پوشش تسهیلات به صورت متغیر در نظر گرفته می‌شود. شعاع پوشش متغیر بدین معنی است که هر تسهیل حداکثر تا چه شعاعی را پوشش بدهد. برای حل مدل ۲ هدفه پیشنهادی از روش محدودیت اپسیلون استفاده می‌شود. در پایان، مدل پیشنهادی بر روی تسهیلات بیمارستانی شهر قم به عنوان نمونه مطالعاتی پیاده‌سازی و نشان داده شده که با حل مدل پیشنهادی میزان پوشش تقاضا به میزان قابل قبولی افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: *مسئله مکان‌یابی- مکان‌یابی مجدد، تسهیلات بیمارستانی، شعاع پوشش متغیر، بحران.*

Bi-objective mathematical modelling for a location-relocation problem of hierarchical healthcare facilities under uncertainty and disaster

Mohammad Reza Korzebor[1], Reza Tavakkoli-Moghaddam*[2]

Abstract

Since the expansion of urban areas, demographic changes and the existing facilities have gradually been established over the past years, there is a need for them to take a re-examination and it improve in the structure of the networks if needed. This study aims to investigate the recent facilities by building a model for locating and relocating hospital facilities in a hierarchical approach. Additionally, there are some solutions for closing, changing the capacity and opening new facilities if it needs to change in the current structure of facilities. The purposes of this study consist of maximizing the demand coverage and minimizing the structure cost. This model considers the probability occurrence of disturbances and crises, such as the lack of the availability and easy access. On the other hand, coverage radius and the capacity of each hospital facility are affected on the quality and speed of responses so that this study attempts to examine the capacity levels related to facilities and their coverage radius. This means how long any facility can cover the maximum distance of the access point. It is used of the Epsilon-constraint method in order to solve the proposed bi-objective model. As a result, this model is implemented as a case study in Qom Hospital facilities and it is shown that the amount of the demand coverage is increased in an acceptable level.

Keywords: *Location-relocation problem, Hospital facilities, Variable coverage radius, Disaster.*

1 M.Sc., School of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
2 Professor, School of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

مقدمه

با توجه به گسترش مناطق شهری، تغییرات جمعیتی و اینکه تسهیلات موجود طی سال‌های گذشته و به تدریج مکان‌یابی شده‌اند، این نیاز به وجود می‌آید که همه تسهیلات موجود تحت بررسی مجدد قرار گرفته و در صورت نیاز اصلاحاتی در ساختار شبکه‌ها ایجاد شود. به این معنی که تصمیماتی که در هر برهه از زمان گرفته شده‌اند، یک‌بار به صورت یکپارچه و در ارتباط با هم مورد بررسی قرار بگیرند و بار دیگر بررسی شود که آیا مکان‌های تسهیلات به طور جامع بهینه هستند یا خیر؟ از این‌رو موضوع مکان‌یابی مجدد تسهیلات مطرح می‌شود که در آن سعی می‌شود تا همه منطقه مورد نظر از نظر بهینه بودن مکان تسهیلات بررسی شده و در صورت نیاز مکان‌یابی دوباره در آن انجام شود. این مکان‌یابی مجدد می‌تواند شامل تأسیس تسهیل تازه، بستن یک تسهیل موجود و تغییر سطح ظرفیت یک تسهیل باشد. در صورتی که مکان‌یابی مجدد بر روی منطقه مورد نظر صورت نگیرد، با یک تعداد جواب بهینه محلی روبرو خواهیم بود که هر کدام در زمانی خاص به دست آمده‌اند و نه تنها ممکن است جواب بهینه کلی را به ما ندهند، بلکه تغییرات تقاضای ایجاد شده در طول زمان هم در آنها در نظر گرفته نمی‌شود. جائو بیگاتی و همکاران [۱] در یک مدل سلسله‌مراتبی به مکان‌یابی مجدد برای تسهیلات پرداختند. در مدل آنها علاوه بر مکان‌یابی مجدد شبکه راه‌های ارتباطی هم بازطراحی می‌شود. به این ترتیب که همزمان تصمیم‌گیری می‌شود که کدام تسهیل و کدام راه باید به سطح تازهی تغییر کنند تا دسترسی به تسهیلات بیشینه شود. در تحقیق دیگر پائول و همکاران [۲] در یک تحقیق با در نظر گرفتن ماهیت سلسله‌مراتبی تسهیلات به بررسی مکان‌های تسهیلات موجود و انجام مکان‌یابی مجدد تسهیلات برای بهبود مکان تسهیلات و افزایش بهره‌وری پرداختند. آنها در مدل قطعی خود برای هر تسهیل شعاع پوشش را در نظر گرفتند؛ اما ظرفیت تسهیلات را نامحدود در نظر گرفته‌اند.

مطالعات بسیار زیادی پیرامون مکان‌یابی تسهیلات حوزه سلامت با پوشش تقاضا انجام شده است. بر اساس تحقیق احمدی جاوید و همکاران [۳] به طور کلی می توان مکان‌یابی در سیستم سلامت را به ۲ دسته مکان‌یابی تسهیلات اورژانسی و غیراورژانسی تقسیم کرد که دسته اول شامل مکان‌یابی تسهیلاتی مانند بیمارستان، درمانگاه و بانک‌های خون و دسته دوم هم شامل مکان‌یابی تسهیلاتی هم چون مراکز تروما، اورژانس، مراکز درمانی موقت و ایستگاه‌های آمبولانس است. در مکان‌یابی تسهیلات اورژانسی هم می‌توان تسهیلات را به ۲ بخش تقسیم کرد: تسهیلات ثابت همانند مراکز اورژانس و تسهیلات موقتی مثل اکیپ‌های امدادرسانی در شرایط خاص.

در موضوع تسهیلات ثابت سیلوا و سرا [۴] به مطالعه مکان‌یابی مراکز اورژانس پرداخته‌اند. آنها یک مدل مکان‌یابی پوششی مبتنی بر صف را در نظر گرفتند. براناس و همکاران [۵] به بررسی مکان‌یابی مراکز تروما، محل نگهداری و سکوی فرود هلیکوپتر پرداختند. کالسار و واکر [۶] مطالعه مکان‌یابی مجدد ایستگاه‌های آتش‌نشانی را انجام دادند. در موضوع تسهیلات موقت هم جیا و همکاران [۷] به گسترش مدلی پرداختند که در آن به مکان‌یابی انباشته‌های دارویی و سپس به مکان‌یابی مکان‌های توزیع اقلام دارویی پس از یک اختلال می‌پردازد.

یکی از چالش‌هایی که در مسئله مکان‌یابی تسهیلات مطرح است، در نظر گرفتن تسهیلات در نقاط مختلف به صورت یکسان و با خدمات و ظرفیت مشابه است. این در حالی است که ویژگی‌های نقاط مکان‌یابی‌شده، محدودیت‌ها، نوع و مقدار نیازهای موجود در هر منطقه لزوماً با یکدیگر مشابه نیستند و این تفاوت‌ها باعث می‌شود که یکسان در نظر گرفتن تسهیلات کارایی کافی را نداشته باشد. از جمله این تفاوت‌ها می‌توان به این مورد اشاره کرد که در منطقه‌ای با تراکم جمعیت زیاد به تسهیلاتی با ظرفیت بالا نیاز است. با وجود این شرایط برای رسیدن به یک جواب بهینه باید تسهیلاتی با ویژگی‌ها و ظرفیت‌های مختلف را در نظر گرفت که این مورد در ادبیات مکان‌یابی با عنوان سلسله‌مراتبی بودن تسهیلات شناخته می‌شود.

تحقیقات بسیار زیادی در زمینه مکان‌یابی تسهیلات سلسله‌مراتبی انجام شده است. اسمیت و همکاران [۸] با هدف ارائه یک مدل مکان‌یابی سلسله‌مراتبی با کاربردهای گسترده در شرایط گوناگون به مدلی دست یافتند که در آن ترکیبی از اهداف در برگیرنده عدالت در چارچوب سلسله‌مراتبی وجود داشت. جائو بیگاتی و همکاران [۱] در یک مدل سلسله‌مراتبی علاوه بر سلسله‌مراتبی در نظر گرفتن تسهیلات راه‌های ارتباطی را هم سلسله‌مراتبی در نظر می‌گیرند. در تحقیق آنها مدل به طور همزمان در مورد سطح تسهیل و راه ارتباطی تصمیم‌گیری می‌کند؛ بدین ترتیب که کدام تسهیل و راه ارتباطی باید به سطحی تازه تغییر کند تا دسترسی به همه سطوح تسهیلات بیشینه شود. کنان پهلیوان و همکاران [۹] تحقیقی را انجام دادند که در آن به ارائه مدل تازه سلسله‌مراتبی پرداختند که علاوه بر اینکه تسهیلات سلسله‌مراتبی هستند و هر تسهیل می‌تواند خدمات تسهیلات سطوح پایین‌تر از خود را هم ارائه بدهد؛ متقاضیان هم سلسله‌مراتبی فرض شده‌اند و هر متقاضی در هر سطح تقاضای خدمات سطوح پائین‌تر را هم دارد. در این مدل می‌توان تصمیمات گوناگونی همچون تأسیس یا حذف یک تسهیل و افزایش یا کاهش ظرفیت حمل‌ونقل عرضی هم گرفته می‌شود. خودمانی-یزدی و همکاران [۱۰] یک مدل سلسله‌مراتبی مکان‌یابی ۲ هدفه ارائه کردند. برای یک مرور کامل بر روی مسائل مکان‌یابی سلسله‌مراتبی می‌توان به تحقیق کونتراس و اورتیز-آستوکیزا مراجعه کرد.

یکی از فرضیاتی که در مسائل مکان‌یابی در گذشته رایج بوده، فرض فعال بودن تسهیلات در شرایط مختلف است. اما این فرض در دنیای واقعی برقرار نیست و امکان دارد تسهیلات به دلایل مختلفی دچار اختلال شده و متوقف شوند. دلایل رخداد اختلال می‌توانند طبیعی مثل اختلال در اثر زلزله و یا انسانی مثل اختلال در اثر اعتصاب باشند. بنابراین در نظر گرفتن احتمال رخداد اختلال در مسئله و ارائه مدلی که در شرایط پس از وقوع اختلال هم بتواند به کار خود ادامه دهد، از اهمیت و کاربرد بالایی برخوردار است.

زنجیرانی فراهانی و همکاران [۱۱] مدلی قابل اعتماد برای کاربرد در شرایط عادی و در زمان وجود اختلال ارائه کرده‌اند. آنها با هدف بیشینه کردن پوشش و با درنظرگرفتن احتمال رخداد اختلال مدل‌سازی کرده‌اند. قضاوتی و همکاران [۱۲] به دنبال مکان‌یابی تسهیلات سلسله‌مراتبی و درنظرگرفتن سناریوهای مختلف در شرایط وجود احتمال اختلال برای راه‌های ارتباطی هستند. شن و همکاران [۱۳] در مدلی قابل اعتماد، احتمال رخداد اختلال برای تسهیلات را در نظر گرفتند و مدل تصادفی دومرحله‌ای ارائه کردند. لیم و همکاران [۱۴] هم به ارائه مدلی قابل اعتماد با در نظر گرفتن احتمال رخداد اختلال پرداختند. در این تحقیق فرض می‌شود که برخی تسهیلات قابل اعتماد هستند و احتمال رخداد اختلال برای آنها وجود ندارد و برای برخی دیگر این احتمال وجود دارد. آزاد و همکاران [۱۵] احتمال رخداد اختلال را برای نقاط توزیع و همچنین وسیله‌های حمل‌ونقل در نظر گرفتند و به ارائه مدل طراحی زنجیره تأمین قابل اعتماد پرداخته‌اند. توکلی و همکاران [۱۶] به ارائه مدلی برای پاک‌سازی آوار در شرایط بحران پرداخته‌اند که در آن امکان مسدود شدن راه‌ها وجود دارد. جمال ارکات و همکاران [۱۷] هم به ارائه یک مدل مکان‌یابی و مسیریابی تسهیلات اورژانس پرداخته‌اند که در آن احتمال خرابی مسیرهای ارتباطی در زمان بحران در نظر گرفته شده است. روحانی نژاد و همکاران [۱۸] در تحقیق خود تلاش کردند تا تعادلی بین قابلیت اعتماد بر سیستم، سرمایه‌گذاری کل و هزینه‌های عملیاتی ایجاد کنند؛ در حالی که ساختار مدل آنها به صورت تسهیلات چندلایه‌ای و با ظرفیت محدود است. محمدی و همکاران [۱۹] هم مدلی قابل اعتماد با تسهیلات دارای ظرفیت محدود ارائه کردند که در آن عدم قطعیت تسهیلات و راه‌های ارتباطی را در نظر گرفته‌اند. اهداف این مدل کاهش هزینه کل و بیشینه زمان حمل‌ونقل است. برای مطالعات بیشتر در زمینه اختلال در تسهیلات به تحقیق اسکاپارا و چرچ [۲۰] مراجعه کنید.

از موارد دیگری که در مکان‌یابی و مکان‌یابی مجدد تسهیلات باید به آن توجه کرد، محدودیت‌های ظرفیت تسهیلات است؛ به این ترتیب که هر تسهیل با توجه به فاکتورهای مختلف دارای ظرفیتی محدود است که بیش از این ظرفیت نمی‌تواند به ارائه سرویس بپردازد. از این‌رو در نظر گرفتن ظرفیت محدود برای تسهیلات ضرورت می‌یابد. مایکل وایدنر و همکاران [۲۱] و جمالی و همکاران [۲۲] به ترتیب ظرفیت تسهیلات و وسایل نقلیه را محدود در نظر گرفتند. روحانی نژاد و همکاران [۱۸] و محمدی و همکاران [۱۹] هم همانطور که اشاره شد، ظرفیت تسهیلات را محدود در نظر گرفتند.

فاصله نقاط تقاضا با تسهیلات اثر مستقیمی بر روی سرعت دریافت خدمت دارد؛ از این رو توجه به شعاع پوشش تسهیلات اهمیت می‌یابد. در نظر گرفتن شعاع پوشش می‌تواند به اشکال مختلفی همچون حداکثر و یا حداقل شعاع پوشش، شعاع پوشش تدریجی و شعاع پوشش متغیر در نظر گرفته شود. پائول و همکاران [۲] در تحقیق خود حداقل و حداکثر شعاع پوشش را در نظر گرفته‌اند. کسیسی و همکاران [۲۳] شعاع پوشش تدریجی را برای تسهیلات در نظر گرفته‌اند. مهری و همکاران [۲۴] در مدل ارائه شده خود شعاع پوشش تسهیلات را محدود و به صورت متغیر در نظر گرفتند. این شعاع محدود در ساعات و شرایط مختلف متفاوت است.

بسیاری از مسائل مکان‌یابی دارای چند هدف هستند. اهدافی که معمولاً در مسائل مکان‌یابی در نظر گرفته می‌شوند، در ادامه به طور خلاصه بیان می‌شوند. هزینه یکی از رایج‌ترین مواردی است که در مسائل مکان‌یابی به عنوان هدف لحاظ می‌شود. هزینه دارای انواع مختلفی است که در ۲ نوع متغیر و ثابت تقسیم می‌شود. معمولاً در مسائل مکان‌یابی یک هدف که شامل همه انواع هزینه‌ها است را در نظر می‌گیرند. مورد بعدی میزان پوشش است که در مسائل پوشش حداکثری به کار می‌رود. به این ترتیب که یک هدف برای بیشینه‌سازی میزان پوشش تقاضا به مدل اضافه می‌شود.

رویکردهای مختلفی در برخورد با مسائل چندهدفه در نظر گرفته می‌شود. برخی از این رویکردها بدین شرح هستند: ۱) رویکرد سلسله‌مراتبی که در آن اهداف مختلف اولویت‌بندی شده و بر اساس اولویت خود بهینه‌سازی می‌شوند. ۲) رویکرد برنامه‌ریزی آرمانی که در آن همه اهداف مدل به عنوان محدودیت در نظر گرفته می‌شوند. برای هر تابع هدف هم یک مقدار مورد نظر از پیش تعیین می‌شود. هدف در این رویکرد به حداقل رساندن مقدار هر تابع هدف از مقدار از پیش تعیین شده است. ۳) رویکرد همزمان یا پارتو در آن به دنبال یافتن همه جواب‌هایی هستیم که ارزش یکسانی دارند و تصمیم‌گیری در انتخاب یک جواب بر عهده تصمیم‌گیرنده است. از میان رویکردهای همزمان یا پارتو، روش محدودیت اپسیلون در ادبیات اخیر مکان‌یابی تسهیلات بیشتر به کار گرفته شده است [۲].

اسمیت و همکاران [۸] چنانچه در قبل بیان شد به مدلی دست یافتند که در آن ترکیبی از اهداف در برگیرنده عدالت در چارچوب سلسله‌مراتبی وجود داشت. ژو و همکاران [۲۵] در تحقیق خود به ارائه مدلی برای مکان‌یابی تسهیلات سلسله‌مراتبی مراکز تروما در شنزن چین پرداخته‌اند. در این مدل چندهدفه به دنبال یافتن نقاط بهینه تسهیلات و ارتقای میزان تخصیص است. اهداف در این مدل شامل کمینه‌سازی زمان واکنش، بیشینه‌سازی پوشش، بیشینه‌سازی کیفیت سرویس‌دهی و کمینه‌سازی هزینه هستند. باتاچاریا و همکاران [۲۶] در تحقیق خود مدلی ۲ هدفه برای مکان‌یابی ارائه کردند که در آن به ایجاد یک موازنه بین کمینه‌سازی کل هزینه حمل‌ونقل و هم کمینه‌سازی بیشترین مسافت طی‌شده برای ارضای تقاضا از یک نقطه تقاضا تا یک تسهیل می‌پردازند. چانتا و همکاران [۲۷] هم در ۳ مدل ۲ هدفه به ایجاد موازنه بین عدالت و اهداف دیگر پرداختند. ۳ هدف دیگر شامل کمینه‌سازی بیشترین فاصله نقطه تقاضا تا تسهیل، کمینه‌سازی تقاضای پوشش‌داده‌نشده و کمینه‌سازی نقاط پوشش‌داده‌نشده روستایی می‌شود. منصوری و همکاران [۲۸] هم در مدلی ۲ هدفه زنجیره تأمین خون به کمینه‌سازی هزینه و کمبود پرداختند. عشقی و همکاران [۲۹] یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی ۲ هدفه برای مسأله

مکان‌یابی-مسیریابی-موجودی تحت شرایط وقوع بحران با در نظر گرفتن عدم قطعیت تقاضا و قابلیت اطمینان تسهیلات ارائه دادند که اهداف آن کمینه‌سازی هزینه های کل در فاز آماده‌سازی، پاسخگویی و زمان کل پاسخگویی هستند. آنها برای حل مدل ریاضی پیشنهادی از الگوریتم‌های ژنتیک بر مبنای رتبه‌بندی نامغلوب‌ها (NSGA-II) و گرگ خاکستری چندهدفه (MOGWO) استفاده کردند. عباسی و همکاران [۳۰] هم مدلی ریاضی ۲ هدفه برای مسئله مکان‌یابی-توزیع برای محصولات غیرپزشکی ارائه دادند که هدف اول آن کمینه‌سازی هزینه کل توزیع و هدف دوم آن کمینه‌سازی کل افق زمانی توزیع است. در این مقاله به ارائه یک مدل مکان‌یابی و مکان‌یابی مجدد برای ارزیابی تسهیلات موجود و ارائه پیشنهاداتی برای بهبود پوشش تقاضا پرداخته می‌شود و تسهیلات به صورت سلسله‌مراتبی در نظر گرفته می‌شوند. برای بالا بردن قابلیت اعتماد مدل ریسک اختلال تسهیلات در نظر گرفته می‌شود. ریسک اختلال به صورت در نظر گرفتن سناریوهای محتمل است. ظرفیت تسهیلات سلسله‌مراتبی محدود بوده و در ۳ سطح ظرفیت در نظر گرفته می‌شوند و سطح ظرفیت بهینه برای هر تسهیل تعیین می‌شود. برای بهینه‌سازی و بهبود پوشش تقاضا شعاع پوشش تسهیلات هم محدود بوده و به صورت متغیر در نظر گرفته می‌شود. در پایان به ارائه نمونه مطالعاتی تسهیلات بیمارستانی شهر قم پرداخته می‌شود و نتایج حل مدل ارائه می‌شود.

ادامه این مقاله بدین شرح است: ابتدا به بیان مسئله و مفروضات آن می‌پردازیم، سپس مدل ریاضی اصلی و مدل تکمیل‌کننده ارائه می‌شود. در بخش بعدی حل مدل با استفاده از روش محدودیت اپسیلون ارائه می‌شود. پس از آن هم نتایج عددی حاصل از نمونه مطالعاتی و تحلیل حساسیت ارائه می‌شود. در نهایت به نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی پرداخته می‌شود.

بیان مسئله و ارائه مدل ریاضی

در این مدل پیشنهادی فرض می‌شود که تعدادی تسهیل در سطوح مختلف در منطقه مورد بررسی وجود دارند و باید میزان پوشش تقاضا توسط این تسهیلات بررسی شوند و در صورتی که تغییری در ظرفیت و یا مکان تسهیلات وجود داشته باشد که از نظر میزان هزینه هم توجیه‌پذیر باشد؛ این تغییرات در مکان و ظرفیت تسهیلات ایجاد می‌شود. نهایتاً ساختار نویی از تسهیلات بیمارستانی ارائه می‌شود که در آن مکان و ظرفیت بعضی از تسهیلات تغییر یافته؛ اما در مقابل میزان پوشش تقاضا افزایش یافته است. در این مقاله مدلی اصلی و مدلی تکمیل‌کننده ارائه می‌شود و نقش مدل تکمیل‌کننده تعیین میزان بهینه توابع هدف در هر سناریو است. پس از تعیین میزان بهینه توابع هدف در هر سناریو این مقادیر بهینه در محدودیت‌های ویژه در مدل اصلی قرار گرفته و به مقدار بهینه کلی دست پیدا می‌کنیم.

در این مسئله به دنبال بررسی بهینگی تسهیلات موجود می‌باشیم؛ با این هدف که به سطح پوشش تقاضای بالاتری برسیم. به این منظور در بررسی خود با درنظرگرفتن صرفه اقتصادی به این اقدامات می‌پردازیم: تأسیس تسهیل، حذف تسهیل، افزایش و کاهش ظرفیت تسهیل.

مفروضات مسئله

- محدوده مورد مطالعه از تعدادی منطقه تشکیل شده و مناطق هم خود زیرمجموعه محدوده بزرگتری به نام ناحیه هستند.
- در این مقاله ۳ سطح تسهیل در نظر گرفته شده؛ تسهیل سطح w که پائین‌ترین سطح بوده و ارائه خدمات اولیه را عهده دارد. تسهیل سطح c که به ارائه خدمات تکمیلی می‌پردازد و در نهایت تسهیل سطح h که به ارائه پیشرفته‌ترین خدمات پرداخته و هم خدمات سطح c را هم ارائه می‌دهد.
- هر نقطه تقاضا باید به وسیله یک تسهیل سطح w و یک تسهیل سطح c و هم یک تسهیل سطح h پوشش داده شود؛ اما تسهیلات سطح h می‌توانند خدمات سطح c را هم ارائه بدهند. از این‌رو در صورتی که یک نقطه تقاضا تحت پوشش تسهیل سطح h قرار بگیرد، دیگر لزومی به قرار گرفتن آن نقطه تقاضا تحت پوشش تسهیل c وجود ندارد.
- در هر منطقه باید لااقل یک تسهیل در سطح w وجود داشته باشد.
- در یک منطقه نمی‌توان به طور همزمان هم تسهیل سطح c داشته باشیم و هم تسهیل سطح h داشته باشیم.
- در یک ناحیه نمی‌توان بیش از یک تسهیل سطح h قرار داد.
- تقاضا به صورت نقطه‌ای در نظر گرفته می‌شود.

مجموعه‌ها و اندیس‌ها

N	مجموعه نقاط شبکه
B	مجموعه مناطق موجود در مدل
R	مجموعه ناحیه‌های موجود در مدل
S	مجموعه سناریوهای موجود
F_r	محموعه گره‌های موجود در ناحیه r
$i \in N$	اندیس نشان‌دهنده نقاط تقاضا
$j \in N$	اندیس نشان‌دهنده نقاط نامزد برای تأسیس تسهیل
$l \in \{h,c,w\}$	اندیس مربوط به سطح تسهیل
t	اندیس مربوط به سطح ظرفیت
b	اندیس مربوط به منطقه
$N_b \in N$	گره‌های موجود در منطقه b
r	اندیس مربوط به ناحیه
s	اندیس مربوط به هر سناریو

پارامترها

h_i	تقاضای نقطه i
$F^l_{j,t}$	هزینه ثابت تأسیس تسهیل در سطح l در نقطه j با سطح ظرفیت t

$level_t$ میزان ظرفیت مربوط به سطح t

$Q^l_{j,t}$ ۱ اگر تسهیل در سطح l در نقطه j و سطح ظرفیت t از قبل وجود داشته باشد؛ ۰ در غیر این‌صورت

P^l تعداد تسهیل در سطح l که باید در پایان وجود داشته باشد.

$d_{i,j}$ فاصله بین دو نقطه i و j

M یک مقدار بسیار بزرگ

p_r سطح قابل قبول در انحراف از میزان بهینه هر سناریوها در مدل اصلی

متغیرهای تصمیم

ρ^*_s میزان بهینه تقاضای پوشش داده شده در هر سناریو

τ^*_s میزان بهینه هزینه در هر سناریو

$z^s_i \in \{0,$ ۱ در صورتی که تقاضای نقطه i در سناریوی s پوشش داده شود؛ ۰ در غیر این‌صورت

$x^l_{j,t} \in \{0,1\}$ ۱ در صورتی که تسهیل سطح l موجود در نقطه j در سطح ظرفیت t قبلا وجود نداشته باشد؛ ۰ در غیر این‌صورت

r_j شعاع پوشش تسهیل موجود در نقطه j

$a^{l,s}_{i,j} \in \{0,1\}$ ۱ در صورتی که نقطه تقاضای i به تسهیل j در سطح l در سناریوی s تخصیص یابد؛ ۰ در غیر اینصورت

$y^l_{j,t} \in \{0,1\}$ ۱ در صورتی که تسهیل سطح l در نقطه j و سطح ظرفیت t وجود داشته باشد؛ ۰ در غیر این‌صورت

مدل ریاضی

$$\text{Max} \sum_i h_i z^0_i \quad (۱)$$

$$\text{Min} \sum_{l,j,t} F^l_{j,t} x^l_{j,t} + \sum_{l,j} r^l_j(\varphi) \quad (۲)$$

$$\sum_{j \in N_b} a^{l,s}_{i,j} \geq z^s_i \qquad \forall i \in N_b, b \in B, l \in \{w,h\}, s \quad (۳)$$

$$\sum_{j \in F_r} \left(a^{c,s}_{i,j} + a^{h,s}_{i,j}\right) \geq z^s_i \qquad \forall i \in F_r, r \in R, s \quad (۴)$$

$$\sum_{j \in N_b, t} y^w_{j,t} \geq 1 \qquad \forall b \in B \quad (۵)$$

$$\sum_{j \in N_b, t} y^c_{j,t} + \sum_{j \in N_b, t} y^h_{j,t} \leq 1 \qquad \forall b \in B \quad (۶)$$

$$\sum_{j \in F_r, t} y^h_{j,t} \leq 1 \qquad \forall r \in R \quad (۷)$$

$$\sum_{l,t} y^l_{j,t} \leq 1 \qquad \forall j \quad (۸)$$

$$a^l_{i,j} \leq \sum_{l,t} y^l_{j,t} \qquad \forall i,j,l,t \quad (۹)$$

$$\sum_i a^{l,s}_{i,j} h_i \leq \left(\sum_t level_t y^l_{j,t}\right) u^s_j \qquad \forall j,l,s \quad (۱۰)$$

$$r_j \geq \sum_t d_{i,j} a^l_{i,j} \qquad \forall i,l,j \quad (۱۱)$$

$$r_j \leq M \sum_t y^l_{j,t} \qquad \forall l,j \quad (۱۲)$$

$$\sum_{j,t} x^l_{j,t} \leq P^l \qquad \forall l \in L \quad (۱۳)$$

$$x^l_{j,t} = \left| y^l_{j,t} - Q^l_{j,t} \right| \qquad \forall l,j,t \quad (۱۴)$$

$$\sum_i h_i z_i \geq (1 - p_r)\rho^*_s \quad (۱۵)$$

$$\sum_{l,j,t} F^l_{j,t} x^l_{j,t} + \sum_{l,j} r^l_j(\varphi) \leq (1 + p_r)\tau^*_s \quad (۱۶)$$

$$\forall s \in S \,/\, 0$$

تابع هدف (۱) میزان تقاضای پوشش داده شده را نشان می‌دهد. تابع هدف (۲) هزینه ناشی از تغییرات در ساختار تسهیلات را نشان می‌دهد. به این ترتیب که در صورت تأسیس تسهیل تازه یا تغییر در ظرفیت یک تسهیل و یا جابجایی یک تسهیل متغیر باینری $x^l_{j,t}$ مقدار یک گرفته و هزینه این تغییر محاسبه می‌شود. در قسمت دوم معادله هم هزینه شعاع پوشش هر تسهیل به صورت تابعی از شعاع محاسبه می‌شود. هر نقطه تقاضا به شرطی تحت پوشش قرار می‌گیرد که حداقل به یک تسهیل در سطح و به یک تسهیل در سطح h در منطقه خودش تخصیص پیدا کند. این شرط در رابطه‌ی (۳) در نظر گرفته شده است. با توجه به مفروضات مدل تسهیل در سطح c می‌تواند نقطه تقاضا را از تخصیص یافتن

به تسهیل سطح h بی‌نیاز کند؛ از این‌رو در رابطه‌ی (۴) این فرض اعمال می‌شود که با تخصیص یک نقطه تقاضا به یک تسهیل سطح c در یک ناحیه دیگر تخصیص آن نقطه به تسهیل سطح h الزامی نیست. رابطه (۵) الزام تأسیس حداقل یک تسهیل سطح w در هر منطقه را بیان می‌کند. فرض ممنوع بودن تأسیس همزمان ۲ تسهیل در سطوح h و c در رابطه‌ی (۶) در نظر گرفته شده است. رابطه‌ی (۷) تأسیس بیش از یک تسهیل در سطح h در یک ناحیه را محدود می‌کند. رابطه‌ی (۸) تأسیس بیش از یک تسهیل در یک نقطه را محدود می‌کند. رابطه‌ی (۹) بیان می‌کنند که تخصیص در صورتی به یک نقطه انجام می‌شود که تسهیلی در آن نقطه وجود داشته باشد. رابطه (۱۰) محدودیت ظرفیت تسهیلات است و از تخصیص بیش از سطح ظرفیت بهینه برای تسهیل و هم تخصیص به تسهیل مختل‌شده جلوگیری می‌کند. روابط (۱۱) و (۱۲) تعیین‌کننده میزان شعاع پوشش هر کدام از تسهیلات هستند. رابطه (۱۳) تعداد مجاز تغییرات شبکه در هر سطح را نشان می‌دهد. رابطه‌ی (۱۴) تشخیص می‌دهد که طی مکان‌یابی-مکان‌یابی مجدد تسهیل دچار تغییر شده و یا بدون تغییر مانده است. روابط (۱۵) و (۱۶) هم تعیین می‌کند که مقدار تابع هدف از مقدار بهینه در هر سناریو بیش از درصد مجاز لحاظ‌شده دچار انحراف نشود.

مدل تکمیل‌کننده

در مدل تکمیل‌کننده هم تمام محدودیت‌ها مثل مدل اصلی است؛ با این تفاوت که در تکمیل‌کننده به ازای هر سناریو مقدار بهینه ρ*s و τ*s به عنوان هدف به دست می‌آید.

$$\rho_s^* = \text{Max} \sum_i h_i z_i^s \qquad (۱۷)$$

$$\tau_s^* = \text{Min} \sum_{l,j,t} F_{j,t}^l x_{j,t}^l + \sum_{l,j} r_j^l(\varphi) \qquad (۱۸)$$

s.t.

$$\sum_{j \in N_b} a_{i,j}^{l,s} \geq z_i^s \qquad (۱۹)$$

$$\forall i \in N_b, b \in B, l \in \{w, h\}, s$$

$$\sum_{j \in F_r} \left(a_{i,j}^{c,s} + a_{i,j}^{h,s} \right) \geq z_i^s \qquad (۲۰)$$

$$\forall i \in F_r, r \in R, s$$

$$\sum_{j \in N_b, t} y_{j,t}^w \geq 1 \qquad \forall b \in B \qquad (۲۱)$$

$$\sum_{j \in_{N_b}, t} y_{j,t}^c + \sum_{j \in N_b, t} y_{j,t}^h \leq 1 \qquad (۲۲)$$

$$\forall b \in B$$

$$\sum_{j \in F_r, t} y_{j,t}^h \leq 1 \qquad \forall r \in R \qquad (۲۳)$$

$$\sum_{l,t} y_{j,t}^l \leq 1 \qquad \forall j \qquad (۲۴)$$

$$a_{i,j}^l \leq \sum_{l,t} y_{j,t}^l \qquad \forall i,j,l,t \qquad (۲۵)$$

$$\sum_i a_{i,j}^{l,s} h_i \leq \left(\sum_t level_t y_{j,t}^l \right) u_j^s \qquad (۲۶)$$

$$\forall j, l, s$$

$$r_j \geq \sum_t d_{i,j} a_{i,j}^l \qquad \forall i,l,j \qquad (۲۷)$$

$$r_j \leq M \sum_t y_{j,t}^l \qquad \forall l,j \qquad (۲۸)$$

$$\sum_{j,t} x_{j,t}^l \leq P^l \qquad \forall l \in L \qquad (۲۹)$$

$$x_{j,t}^l = \left| y_{j,t}^l - Q_{j,t}^l \right| \qquad \forall l,j,t \qquad (۳۰)$$

روش حل

با توجه به آنچه که در بخش مرور ادبیات بیان شد و ویژگی‌های روش محدودیت اپسیلون برای حل این مدل ۲ هدفه از روش حل دقیق محدودیت اپسیلون استفاده می‌شود. در این روش یکی از توابع هدف به عنوان تابع هدف نگه داشته می‌شود و بقیه توابع هدف به محدودیت‌های نامساوی با توجه به کمینه و یا بیشینه‌سازی بودن آن تابع هدف به صورت زیر تبدیل می‌شود. در این روش مقدار تابع هدف طی یک الگوریتم تکرارشونده مقدار اپسیلون را بهبود داده تا به یک سری جواب با ارزش برابر برسد [۳۱]. چانکونگ و هایمز [۳۲] نشان دادند که روش محدودیت اپسیلون یافتن همه جواب‌های پارتویی را برای یک مساله عمومی چندهدفه تضمین می‌کند.

$$\max ax \quad \rightarrow \quad ax \geq \varepsilon \qquad (۳۱)$$

$$\min ax \quad \rightarrow \quad ax \leq \varepsilon \qquad (۳۲)$$

در این مدل هم محدودیت اول که حاصل بیشینه‌سازی میزان تقاضای پوشش‌یافته است، به عنوان تابع هدف نگه داشته می‌شود، اما تابع هدف دوم که کمینه‌سازی هزینه و میزان تغییرات است، به عنوان محدودیتی در نظر گرفته شده و به صورت زیر تغییر می‌یابد:

$$\sum_{l,j,t} F_{j,t}^l x_{j,t}^l + \sum_j r_j(\varphi) \leq \varepsilon \qquad (۳۳)$$

در این روش ابتدا مقدار اولیه‌ای برای پارامتر اپسیلون (ε) در نظر گرفته می‌شود و طی تکرار در حل مدل مقدار اپسیلون (ε) بهبود داده می‌شود تا به جواب بهینه دست یابیم. در روش اپسیلون محدودیت مدل باید به صورت خطی باشد، اما مدل ارائه‌شده در این مقاله به صورت یک مدل آمیخته غیرخطی است؛ از این‌رو در ادامه روند خطی‌سازی مدل را تشریح می‌کنیم.

در مدل ارائه‌شده در این مقاله رابطه‌های (۱۴) و (۳۰) غیرخطی هستند و در صورت خطی‌سازی این معادلات به مدل خطی مختلطی دست می‌یابیم. در مورد این محدودیت غیرخطی وجود یک علامت قدر مطلق باعث غیرخطی شدن مدل شده که با توجه به وجود متغیر معادل قدر مطلق در تابع هدف خطی‌سازی به صورت زیر انجام می‌شود:

ابتدا ۲ متغیر باینری $x^1_{l,j,t}$ و $x^2_{l,j,t}$ را معرفی می‌کنیم و سپس روابط (۱۴) و (۳۰) را به صورت زیر بازنویسی می‌کنیم:

$$y^l_{j,t} - Q^l_{j,t} = x^1_{l,j,t} - x^2_{l,j,t} \qquad (۳۴)$$

$$x^l_{j,t} = x^1_{l,j,t} + x^2_{l,j,t} \qquad (۳۵)$$

به این ترتیب مدل ارائه‌شده در این مقاله تبدیل به مدل خطی آمیخته‌ای تبدیل می‌شود.

نتایج عددی

در این بخش با ارائه مطالعه‌ای موردی کاربردی بودن مدل ارائه‌شده را نشان می‌دهیم. شهر قم به عنوان یکی از کلانشهرهای کشور ایران با جمعیتی بالغ بر یک میلیون و ۳۰۰ هزار نفر شهری با جمعیت بالا و متراکم به حساب می‌آید؛ از این‌رو بهبود مکان تسهیلات حوزه سلامت برای افزایش کارآیی آنها ضروری است. در این مقاله به بررسی مکان‌یابی تسهیلات حوزه سلامت موجود و تسهیلات مورد نیاز تازه می‌پردازیم. در تصویر (۱) موقعیت جغرافیایی شهر قم و تقسیم‌بندی مناطق شهری قم قابل مشاهده است. شهر قم متشکل از ۸ منطقه شهری است که در این تصویر هر منطقه به لحاظ پراکندگی جمعیتی به چند بخش تقسیم شده است. هر کدام از این بخش‌ها به عنوان یک نقطه تقاضا در نظر گرفته می‌شوند.

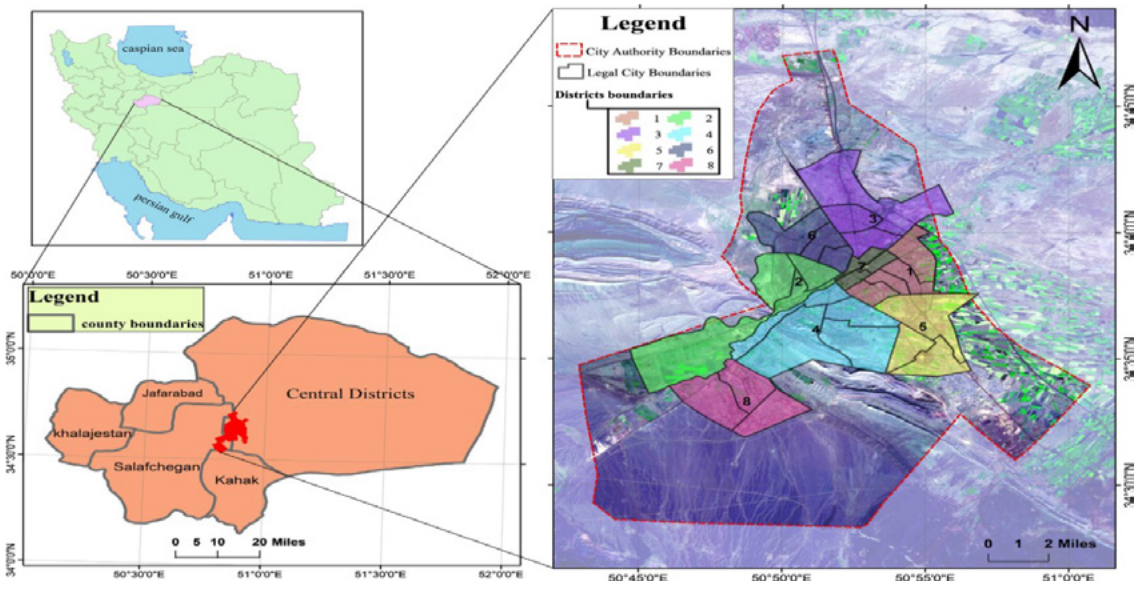
در جدول (۱) هم جمعیت کل، جمعیت مردان و زنان و هم تعداد خانوارها به تفکیک مناطق آورده شده است. بر اساس آخرین اطلاعات موجود از تسهیلات سلامت شهر قم دارای ۸ بیمارستان (۲ مورد از این بیمارستان‌ها تسهیل سطح h و بقیه تسهیلات سطح c به حساب می‌آیند) و ۲۶ درمانگاه فعال است. نقاط تقاضای در نظر گرفته شده در این مقاله هم تعداد ۶۷ نقطه است که این نقاط شامل نقاطی که در آنها تسهیل وجود دارد هم می‌شوند و هم همه نقاط موجود نامزد تأسیس تسهیل هم هستند.

در تصویر (۲) مکان تسهیلات موجود پیش از مکان‌یابی- مکان‌یابی مجدد و هم پس از مکان‌یابی- مکان‌یابی مجدد نمایش داده شده است. در این مسئله هیچ گونه محدودیتی در تعداد تغییرات در مکان و ظرفیت تسهیلات و هزینه مورد نیاز برای انجام تغییرات وجود ندارد.

با توجه به مفروضات مسئله برای پوشش هر نقطه تقاضا باید حداقل یک تسهیل سطح w و یک تسهیل سطح h و یا ۳ تسهیل در سطوح w، c و h آن نقطه را پوشش دهند. همانطور که در

جدول ۱: جمعیت مناطق شهر قم

نام منطقه	منطقه ۱	منطقه ۲	منطقه ۳	منطقه ۴	منطقه ۵	منطقه ۶	منطقه ۷	منطقه ۸	جمع کل
جمعیت	۱۹۲۰۶۰	۱۸۹۷۰۸	۱۷۱۳۶۳	۱۹۲۷۵۵	۷۸۴۰۱	۲۱۳۳۵۶	۴۱۶۲۵	۲۲۱۸۹۰	۱۳۰۱۱۵۸



تصویر۱: موقعیت جغرافیایی استان قم، شهرهای قم و تقسیم‌بندی مناطق شهری

تصویر ۲: مکان تسهیلات پیش از مکان‌یابی- مکان‌یابی مجدد

تصویر ۳: مکان تسهیلات پس از مکان‌یابی- مکان‌یابی مجد

تصویر (۳) مشاهده می‌شود و با توجه به مفروضات مسئله پیش از مکان‌یابی و مکان‌یابی مجدد فقط ۲ منطقه ۲ و ۳ تحت پوشش قرار می‌گیرند که با توجه به فاصله بسیار زیاد تسهیل سطح h در منطقه ۲ با نقاط تقاضا، پوشش تقاضا در این منطقه با شعاع بسیار بالا انجام می‌گیرد که این امر کیفیت ارائه سرویس را پائین می‌آورد؛ زیرا فاصله زیاد به معنی زمان طولانی تا دریافت سرویس است. پس از مکان‌یابی و مکان‌یابی مجدد و با بستن تسهیل سطح h موجود در منطقه ۲ و بازگشایی ۳ تسهیل سطح h در مناطق ۴، ۶ و ۸ و هم تغییراتی در تسهیلات سطوح w و c میزان پوشش تقاضا به مقدار چشم‌گیری افزایش یافته و هم بیشترین مقدار شعاع پوشش تسهیلات کاهش می‌یابد که در نتیجه آن هزینه متغیر کاهش و زمان مورد نیاز برای خدمات‌دهی کاهش می‌یابد. با تغییراتی که در مکان و ظرفیت تسهیلات در منطقه مورد مطالعه ایجاد شد، میزان پوشش تقاضا حدود ۲۵ درصد به حدود ۶۲ درصد افزایش یافت.

تحلیل حساسیت

در ابتدا و برای اعتبارسنجی مدل در یک مسئله نمونه مدل را با هر یک از توابع هدف حل می‌کنیم. همان‌طور که در جدول ۲ مشخص است، در حالت اول که نمایش جواب بهینه با در نظر گرفتن تابع هدف اول است، با توجه به اینکه هیچ گونه محدودیت برای هزینه وجود ندارد و تابع هدف دوم که کمینه‌سازی هزینه است، در نظر گرفته نمی‌شود؛ در تمام نقاط نامزد تسهیل تأسیس شده است. در حالت دوم که نمایش جواب بهینه با درنظرگرفتن تابع هدف دوم است؛ با توجه به اینکه صرفاً کمینه‌سازی هزینه‌ها مد نظر است؛ فقط تسهیلاتی تأسیس شده‌اند که بر اساس محدودیت‌های مدل تأسیس آنها اجباری است.

جدول ۲: جواب حاصله از حل مدل با ازای توابع هدف

جواب بهینه با در نظر گرفتن تابع هدف دوم	جواب بهینه با در نظر گرفتن تابع هدف اول	
۰	۳۷۵	مقدار تابع هدف اول
۲۱۹۷۸۰	۲۰۳۷۸۶۱،۸۱۶	مقدار تابع هدف دوم

در جدول ۳ جواب‌های بهینه پیشنهادی حاصل از حل مدل تک‌هدفه معادل با استفاده از روش محدودیت اپسیلون نمایش داده شده است. همانطور که مشخص است، ۴ جواب پیشنهاد

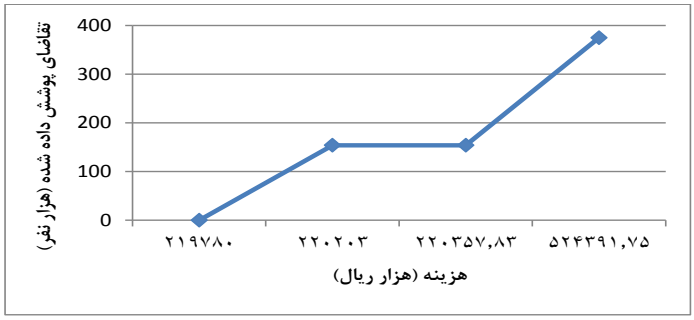
شده که انتخاب جواب مناسب با نظر تصمیم‌گیرنده اتفاق می‌افتد. تصویر ۴ نمودار جواب‌های حاصل از حل مدل معادل تک‌هدفه با استفاده از روش محدودیت اپسیلون است (نمودار پارتو). همان‌طور که قابل مشاهده است؛ جواب‌های به دست آمده با روش محدودیت اپسیلون با توجه به جواب‌های به‌دست‌آمده از حل مدل با هر یک از توابع هدف جواب‌هایی منطقی هستند.

در تصویر ۵ تغییرات تابع هدف اول به ازای افزایش تدریجی میزان تقاضا نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش میزان تقاضا میزان تقاضای پوشش‌یافته هم افزایش می‌یابد. در نقطه آخر میزان تقاضای پوشش‌یافته کاهش پیدا کرده و دلیل آن این است که تقاضا از بیشینه ظرفیت تسهیلات بیشتر شده و هم امکان تأسیس تسهیل تازه وجود ندارد؛ از این‌رو یک یا تعدادی از نقاط تقاضا از پوشش خارج می‌شوند.

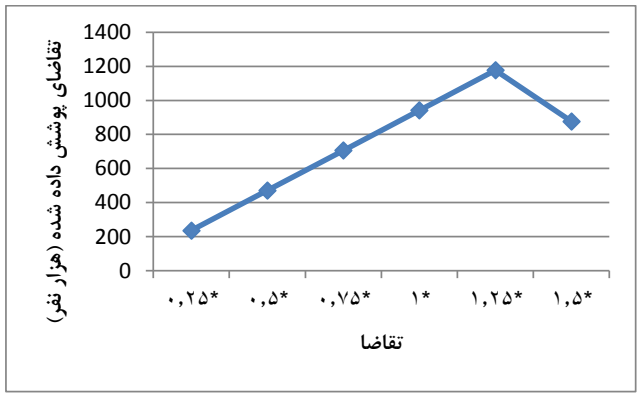
در تصویر۶ تغییرات تابع هدف دوم یعنی هزینه نمایش داده شده است. ۲ نوع تغییر در نمودار دیده می‌شود: تغییرات جزئی که در اثر افزایش شعاع پوشش است و دوم جهش موجود بین نقاط چهارم و پنجم که به دلیل تأسیس تسهیل تازه است.

جدول ۳: جواب‌های بهینه مدل تک‌هدفه معادل با روش محدودیت اپسیلون

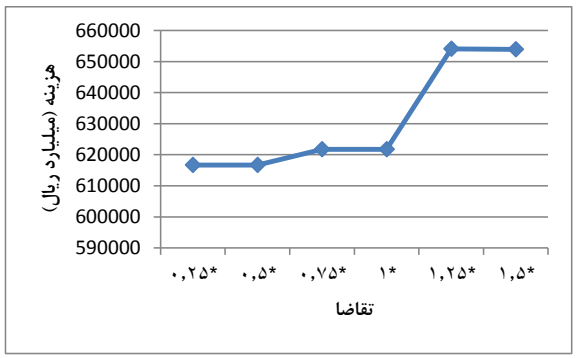
شماره جواب	۱	۲	۳	۴
مقدار تابع هدف اول	۰	۱۵۴	۱۵۴	۳۷۵
مقدار تابع هدف دوم	۲۱۹۷۸۰	۲۲۰۲۰۳	۲۲۰۳۵۷٫۸۳	۵۲۴۳۹۱٫۷۵



تصویر۴: جواب‌های بهینه مدل تک‌هدفه معادل با روش محدودیت اپسیلون (نمودار پارتو)



تصویر۵: تغییرات تابع هدف اول نسبت به افزایش تقاضا



تصویر۶: تغییرات تابع هدف دوم نسبت به افزایش تقاضا

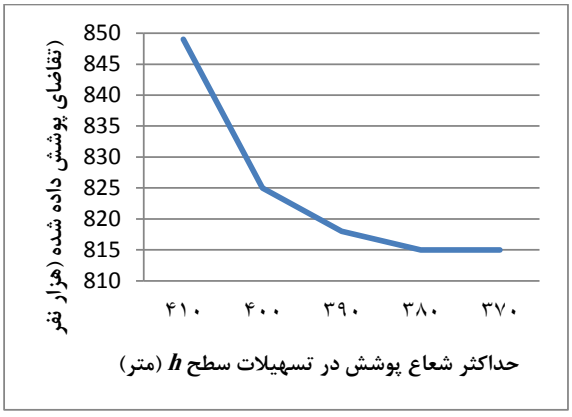
در این بخش به بررسی تأثیر تغییرات پارامترهای مدل بر روی خروجی‌های مدل می‌پردازیم. یکی از مهم‌ترین پارامترهای مدل حداکثر تعداد مجاز تغییر در ساختار شبکه شامل مکان یا ظرفیت تسهیلات و یا تأسیس و حذف آنهاست. در ادامه به بررسی تغییرات میزان تقاضای پوشش‌داده‌شده در اثر تغییر این پارامتر می‌پردازیم. تصویر ۷ نشان می‌دهد که در اثر کاهش تعداد تغییر مجاز در ساختار شبکه میزان تقاضای پوشش‌داده‌شده به شدت کاهش می‌یابد؛ از این‌رو در صورتی که تصمیم‌گیرنده توانایی اعمال تغییرات بیشتری را در ساختار شبکه داشته باشد؛ می‌تواند تقاضای بیشتری را پوشش دهد.

در ادامه به بررسی تغییرات میزان تقاضای پوشش‌یافته با تغییر در میزان مجاز حداکثر شعاع پوشش مجاز برای تسهیلات می‌پردازیم. تصویر ۸ نشان‌دهنده میزان تقاضای پوشش‌یافته با کاهش حداکثر شعاع پوشش مجاز برای تسهیلات سطح h است. این تصویر نشان می‌دهد که با کاهش حداکثر شعاع مجاز برای تسهیلات سطح h میزان تقاضای پوشش‌یافته در ابتدا کاهش چشمگیری می‌یابد؛ اما به مرور این میزان تغییر کمتر می‌شود. شیب کاهشی نمودار بیانگر این است که مناطقی که تسهیل سطح h ندارند و از تسهیلات موجود در مناطق دیگر سرویس می‌گیرند، به دلیل فاصله بیشتر از شعاع پوشش خارج شده و در نتیجه میزان پوشش تقاضا کاهش چشمگیری می‌یابد.

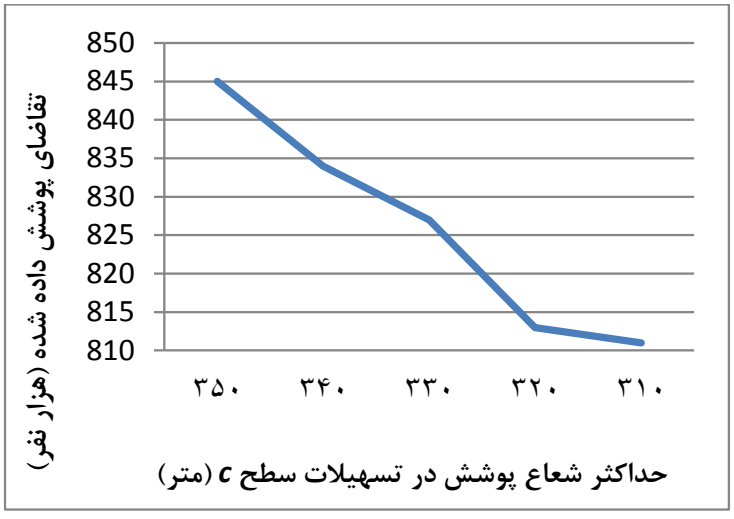
تصویر ۹ نشان‌دهنده میزان تقاضای پوشش‌یافته با کاهش حداکثر شعاع پوشش مجاز برای تسهیلات سطح c است. با توجه به این فرض که سرویس ارائه‌شده توسط تسهیلات سطح c به وسیله تسهیلات سطح h هم ارائه می‌شود؛ از این‌رو پوشش تقاضا توسط این تسهیلات از اهمیت کمتری برخوردار است و کاهش شعاع پوشش مجاز تقریباً اثر یکنواختی بر روی میزان تقاضای پوشش‌یافته می‌گذارد.

تصویر ۱۰ نشان‌دهنده میزان تقاضای پوشش‌یافته با کاهش حداکثر شعاع پوشش مجاز برای تسهیلات سطح w است. این تصویر بیان می‌کند که بخشی از تقاضای پوشش یافته در سطح w در شعاع بیش از ۱۹۰ واحد و بخشی دیگر در شعاع کمتر از ۱۷۰ واحد قرار گرفته‌اند و تقاضای اندکی در در فاصله ۱۷۰ تا ۱۹۰ واحدی قرار دارند. با کاهش حداکثر شعاع مجاز پوشش برای تسهیلات سطح w میزان تقاضای پوشش یافته هم کاهش می‌یابد.

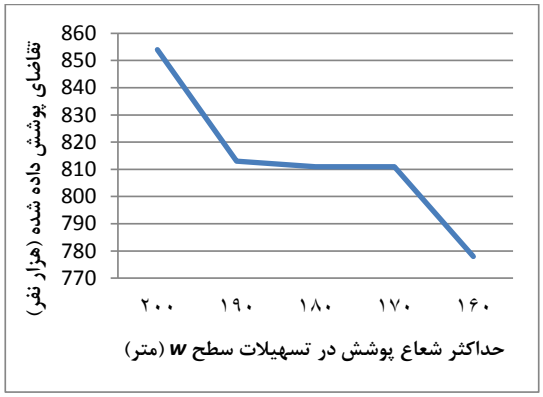
تصویر ۷: تغییرات میزان تقاضای پوشش داده شده در اثر تغییر تعداد تغییرات مجاز



تصویر۸ : میزان تقاضای پوشش‌یافته با کاهش حداکثر شعاع پوشش مجاز برای تسهیلات سطح h



تصویر ۹: میزان تقاضای پوشش‌یافته با کاهش حداکثر شعاع پوشش مجاز برای تسهیلات سطح c



تصویر ۱۰: میزان تقاضای پوشش‌یافته با کاهش حداکثر شعاع پوشش مجاز برای تسهیلات سطح w

نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدل مکان‌یابی- مکان‌یابی مجدد برای بررسی جامع مکان و ظرفیت تسهیلات موجود ارائه شد. بر اساس این مدل می‌توان ظرفیت و سطح تسهیلات موجود را تغییر داد و یا آنها را تعطیل کرد و هم می‌توان تسهیلات تازه‌ای را تأسیس کرد. از این‌رو می‌توان با تغییراتی که از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر هستند، به بهبود پوشش تقاضا بپردازیم. مدل غیرخطی آمیخته عدد صحیح با خطی‌سازی محدودیت غیرخطی به مدل خطی عدد صحیح تبدیل شد. برای حل مدل از روش محدودیت اپسیلون استفاده شد. در پایان با حل مدل بر اساس نمونه مطالعاتی دیده شد که میزان تقاضای پوشش با ۱۲ تغییر در ساختار شبکه به میزان ۳۷ درصد بهبود یافت. به عنوان پیشنهادهای آتی می‌توان به در نظر گرفتن عدم قطعیت در پارامترهای مدل، گسترش روش‌های حل ابتکاری و فراابتکاری، در نظر گرفتن محدودیت‌های زمانی، سیستم‌های صف و هم به کارگیری نرم افزار GIS برای تعیین و یا ارزیابی نقاط کاندید و امتیازدهی به نقاط کاندید اشاره کرد.

منابع

1. Bigotte, J. F., Krass, D., Antunes, A. P., & Berman, O. (2010). Integrated modeling of urban hierarchy and transportation network planning. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *44*(7), 506-522.

2. Paul, N. R., Lunday, B. J., & Nurre, S. G. (2017). A multiobjective, maximal conditional covering location problem applied to the relocation of hierarchical emergency response facilities. *Omega*, *66*, 147-158.

3. Ahmadi-Javid, A., Seyedi, P., & Syam, S. S. (2017). A survey of healthcare facility location. *Computers & Operations Research*, *79*, 223-263.

4. Silva, F., & Serra, D. (2008). Locating emergency services with different priorities: the priority queuing covering location problem. *Journal of the Operational Research Society*, *59*(9), 1229-1238.

5. Branas, C. C., MacKenzie, E. J., & ReVelle, C. S. (2000). A trauma resource allocation model for ambulances and hospitals. *Health Services Research*, *35*(2), 489.

6. Kolesar, P., & Walker, W. E. (1974). An algorithm for the dynamic relocation of fire companies. *Operations Research*, *22*(2), 249-274.

7. Jia, H., Ordóñez, F., & Dessouky, M. M. (2007). Solution approaches for facility location of medical supplies for large-scale emergencies. *Computers & Industrial Engineering*, *52*(2), 257-276.

8. Smith, H. K., Harper, P. R., & Potts, C. N. (2013). Bicriteria efficiency/equity hierarchical location models for public service application. *Journal of the Operational Research Society*, *64*(4), 500-512.

9. Pehlivan, C., Augusto, V., & Xie, X. (2014). Dynamic capacity planning and location of hierarchical service networks under service level constraints. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, *11*(3), 863-880.

10. Khodemani-Yazdi, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Bashiri, M., & Rahimi, Y. (2019). Solving a new bi-objective hierarchical hub location problem with an M/M/c queuing framework. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, *78*, 53-70.

11. 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.

12. Ghezavati, V., Soltanzadeh, F., & Hafezalkotob, A. (2015). Optimization of reliability for a hierarchical facility location problem under disaster relief situations by a chance-constrained programming and robust optimization. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, *229*(6), 542-555.

13. Shen, Z. J. M., Zhan, R. L., & Zhang, J. (2011). The reliable facility location problem: Formulations, heuristics, and approximation algorithms. *INFORMS Journal on Computing*, *23*(3), 470-482.

14. Lim, M., Daskin, M. S., Bassamboo, A., & Chopra, S. (2010). A facility reliability problem: Formulation, properties, and algorithm. *Naval Research Logistics (NRL)*, *57*(1), 58-70.

15. Azad, N., Davoudpour, H., Saharidis, G. K., & Shiripour, M. (2014). A new model to mitigating random disruption risks of facility and transportation in supply chain network design. *The International Journal of*

Advanced Manufacturing Technology, *70*(9-12), 1757-1774.

۱۶. توکلی، شایان، ربانی، مسعود، بزرگی امیری، علی. (۱۳۹۵). ارائه‌ی یک الگوی بهینه‌سازی برای مسئله‌ی پاک‌سازی آوار در فاز پاسخ به بحران. علمی پژوهشی مدیریت بحران، ۵(۲)، ۵-۱۶.

۱۷. ارکات، جمال، زمانی، شکوفه، قدس، پرک. (۱۳۹۴). مکان‌یابی و مسیریابی تسهیلات اورژانسی با فرض احتمال خرابی مسیرهای ارتباطی در زمان بحران. علمی پژوهشی مدیریت بحران، ۴(۲)، ۹۵-۱۰۶.

18. Rohaninejad, M., Sahraeian, R., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2018). An accelerated Benders decomposition algorithm for reliable facility location problems in multi-echelon networks. *Computers & Industrial Engineering*, *124*, 523-534.

19. Mohammadi, M., Jula, P., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2019). Reliable single-allocation hub location problem with disruptions. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *123*, 90-120.

20. Scaparra, M. P., & Church, R. L. (2019). Location problems under disaster events. In *Location science* (pp. 631-656). Springer, Cham.

21. Widener, M. J., & Horner, M. W. (2011). A hierarchical approach to modeling hurricane disaster relief goods distribution. *Journal of Transport Geography*, *19*(4), 821-828.

۲۲. جمالی، حسین، بشیری، مهدی، توکلی مقدم، رضا. (۱۳۹۴). بررسی و حل مسئله امدادرسانی ۲ سطحی نقاط آسیب‌دیده از بحران. علمی پژوهشی مدیریت بحران، ۴(۲)، ۵-۲۲.

23. Keçici, S., Aras, N., & Verter, V. (2012). Incorporating the threat of terrorist attacks in the design of public service facility networks. *Optimization Letters*, *6*(6), 1101-1121.

24. Mohri, S. S., Akbarzadeh, M., & Matin, S. H. S. (2020). A Hybrid model for locating new emergency facilities to improve the coverage of the road crashes. *Socio-Economic Planning Sciences*, *69*, 100683.

25. Zhu, Y., Du, Q., Tian, F., Ren, F., Liang, S., & Chen, Y. (2016). Location Optimization Using a Hierarchical Location-Allocation Model for Trauma Centers in Shenzhen, China. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *5*(10), 190.

26. Bhattacharya, U., Rao, J. R., & Tiwari, R. N. (1993). Bi-criteria multi facility location problem in fuzzy environment. *Fuzzy Sets and Systems*, *56*(2), 145-153.

27. Chanta, S., Mayorga, M. E., & McLay, L. A. (2014). Improving emergency service in rural areas: a bi-objective covering location model for EMS systems. *Annals of Operations Research*, *221*(1), 133-159.

۲۸. منصوری، الهام، حاجی آقایی کشتلی، مصطفی، توکلی مقدم، رضا. (۱۳۹۶). توسعه شبکه لجستیک پیشرو و معکوس در خدمات درمانی در شرایط عدم قطعیت و بحران. علمی پژوهشی مدیریت بحران، ۶(۱)، ۵-۱۷.

۲۹. علی اکبر عشقی، رضا توکلی مقدم، سعدالله ابراهیم نژاد و وحیدرضا قضاوتی، مدل‌سازی ریاضی استوار برای مسأله مکان‌یابی-مسیریابی-موجودی چندهدفه در شرایط وقوع بحران با در نظر گرفتن عدم قطعیت تقاضا و قابلیت اطمینان تسهیلات، نشریه مدیریت بحران، پذیرش چاپ، ۱۳۹۹.

30. Abbassi, A., Kharraja, S., El Hilali Alaoui, A., Boukachour, J., & Paras, D. (2020). Multi-objective two-echelon location-distribution of non-medical products. *International Journal of Production Research*, 1-17.

31. Mavrotas, G. (2009). Effective implementation of the ε-constraint method in multi-objective mathematical programming problems. *Applied Mathematics and Computation*, 213(2), 455-465.

32. Chankong, V., & Haimes, Y. Y. (2008). *Multiobjective decision making: theory and methodology*. Courier Dover Publications.