مهندسی صنایع و مدیریت شریف، (زمستان ۱۳۹۸)
دوره‌ی ۱-۳۵، شماره‌ی ۲/۲، ص. ۶۹-۸۰

Original Article

یک رویکرد حل ترکیبی برای مسئله‌ی مکان‌یابی - مقاوم‌سازی بیمارستان‌های دارای ظرفیت محدود

داود شیشه‌بری * **(دانشیار)**
یحیی زارع مهرجردی (استاد)
سعیده ساریخانی خرم (کارشناس ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه یزد

در این مقاله، مسئله‌ی مکان‌یابی بیمارستان‌های جدید و مقاوم‌سازی تعدادی از بیمارستان‌های موجود با توجه به بودجه‌ی محدود در دسترس مطرح شده است. ابتدا با به کارگیری ترکیبی رویکرد AHP و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، مکان‌های بالقوه برای احداث بیمارستان‌های جدید تعیین شده است. در ادامه، با استفاده از مدل ریاضی ارائه شده، مکان‌های بهینه برای احداث بیمارستان‌های جدید تعیین شده و همچنین تصمیمات مربوط به مقاوم‌سازی تعدادی از بیمارستان‌های موجود گرفته شده است. به منظور حل مدل با توجه به دوهدفه بودن آن، روش محدودیت اپسیلون تقویت شده (II) استفاده شده است. برای سنجش اعتبار مدل، یک مطالعه‌ی موردی بر اساس اطلاعات جمعیتی و جغرافیایی شهر یزد بررسی و تحلیل شده است. با توجه به امکان به کارگیری مدل در مسائل کاربردی و عملیاتی با ابعاد بزرگ و همچنین NP-Hard بودن مدل، یک الگوریتم ابتکاری دومرحله‌یی چندهدفه آزموده شده و بر اساس برخی مثال‌های عددی ارزیابی شده است.

واژگان کلیدی: مکان‌یابی، مقاوم‌سازی، بیمارستان، سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، روش محدودیت اپسیلون تقویت شده (II)، فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی، الگوریتم ابتکاری دومرحله‌یی چندهدفه.

shishebori@yazd.ac.ir
yzare@yazd.ac.ir
s.sarikhani70@gmail.com

۱. مقدمه

عدم قطعیت‌ها در یک سیستم، ممکن است بر اثر حوادث طبیعی، عوامل فنی یا انسانی و ... به وجود بیاید و بر عملکرد و کارایی مراکز خدمت‌دهی تأثیر به سزایی بگذارد. حوادث و بلایای طبیعی، خسارت‌ها و آسیب‌های مالی و جانی زیادی به انسان‌ها وارد می‌کنند. با بروز حوادث ناگهانی، ممکن است تسهیلات دچار اختلال شوند و در پی آن خدمت‌رسانی تسهیلات دچار مشکل شود. به طور کلی، برای مقابله با شرایط بحرانی، دو رویکرد کلی وجود دارد: الف) اقدامات پس از وقوع بحران. ب) اقدامات پیش از وقوع بحران. دانش مدیریت بحران شامل هر دو رویکرد است. رویکرد الف) شامل انجام فعالیت‌های برنامه‌ریزی شده‌ی نظام‌مند و داشتن آمادگی کافی برای مقابله با شرایط بحرانی است. در رویکرد ب)، به منظور کاهش ریسک ناشی از از کار افتادگی تسهیلات، روش‌های پیش‌گیرانه‌یی نیز ارائه می‌شود که می‌توان این روش‌ها را در سه دسته قرار داد: در روش‌های دسته‌ی اول، مکان‌یابی به شکلی صورت می‌گیرد که در برابر اختلال تسهیلات، کمترین میزان ممکن خسارات را داشته باشیم. اما در روش‌های دسته‌ی دوم، برای مقاوم‌سازی تعدادی از تسهیلات موجود تصمیم‌گیری می‌شود. روش‌های دسته‌ی سوم به صورت جامع‌تری با این موضوع برخورد می‌کنند و تصمیمات مربوط به مکان‌یابی تسهیلات جدید و مقاوم‌سازی تسهیلات موجود به صورت هم‌زمان گرفته می‌شود.

مراکز درمانی و بیمارستان‌ها که به عنوان مراکز حیاتی در زمان وقوع حوادث طبیعی به شمار می‌روند، ممکن است تحت تأثیر این حوادث دچار اختلال شوند و در نتیجه‌ی عدم توانایی در خدمت‌دهی مناسب، منجر به خسارات جانی و مالی زیادی شوند.

زلزله، یکی از بارزترین بحران‌ها و بلایای طبیعی قلمداد می‌شود که می‌تواند منجر به خسارت‌های جانی و مالی بسیار سنگینی شود. از فجایع زلزله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

الف) در زلزله‌ی ۲۰۰۵ در جنوب آسیا ۴۹ درصد بیمارستان‌ها کاملاً تخریب شدند.[۱]

ب) در زلزله‌ی بم در سال ۱۳۸۲ که به بزرگی ۶/۵ ریشتر بود، کلیه‌ی بیمارستان‌های منطقه‌ی زلزله دیده، عملکرد خود را از دست دادند و در هفته‌ی اول وقوع زلزله حدود ۱۰۴۳۲ بیمار در ۲۴ بیمارستان از ۴ شهر بزرگ کشور پذیرش شدند که حداقل تعداد کل موارد عدم پذیرش به علت نبودن تخت کافی ۶۴۶ مورد بوده است.[۲]

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۷/۶/۲۶، اصلاحیه ۱۳۹۷/۱۲/۱۸، پذیرش ۱۳۹۸/۲/۳.
DOI:10.24200/J65.2019.51047.1895

ج) در زلزله‌ی آذربایجان شرقی که به بزرگی ۶٫۲ ریشتر در سال ۱۳۹۱ رخ داد، بیمارستانی که دو سال پیش از زلزله در ورزقان احداث شده بود، تخریب شد و به کارگیری آن مقدور نبود.[۳]

د) در زلزله‌ی کرمانشاه به بزرگی ۷٫۳ ریشتر در ۲۱ آبان ۱۳۹۶ دست‌کم دو بیمارستان تازه تأسیس دچار خرابی‌های متعددی شدند که آنها را غیرقابل استفاده کرد. عدم مقاوم بودن این بیمارستان‌های تازه تأسیس و ناتوانی در پاسخگویی به مصدومان منجر به انتقال آنها به مراکز درمانی دورتر شد.[۴ و ۵] موضوعی که در این زلزله جای سؤال داشت این بود که ساختمان بیمارستان‌های تازه تأسیس شهرستان سرپل‌ذهاب که کمتر از یک سال از افتتاح آن می‌گذشت به نحوی دچار خسارت شد که امکان خدمت‌رسانی درمانی به بیماران و مصدومان اعزامی از شهرستان‌های سرپل‌ذهاب، دالاهو، گیلان غرب و قصر شیرین برای نیروی درمانی به درستی میسر نشد و ناگزیر تخت‌های بیمارستان به داخل حیاط منتقل شدند و بیماران بستری شده نیز از بیمارستان خارج شدند که این امر علاوه بر این که خدمت‌رسانی نیروی درمانی را با مشکلات زیادی مواجه کرد، باعث تشدید صدمات مصدومین اعزامی از شهرهای زلزله‌زده شد.

با توجه به محدودیت بودجه‌ی مالی و سرمایه‌گذاری، برای این‌که در شرایط بحران به دلایل از کار افتادگی بیمارستان‌ها، تکمیل ظرفیت نزدیک‌ترین بیمارستان‌ها و افزایش تقاضا، سیستم دچار مشکلات کمبود ظرفیت نشود، بهتر است با توجه به ظرفیت‌های محدود، تصمیمات مکان‌یابی و مقاوم‌سازی همزمان گرفته شود.

بنابراین، در پژوهش حاضر، به دنبال ارائه‌ی مدلی برای تعیین مکان بیمارستان‌های جدید و مقاوم‌سازی تعدادی از بیمارستان‌های موجود هستیم، به گونه‌یی که با توجه به میزان بودجه‌ی در اختیار بتوان تقاضاهای موجود را پاسخ گفت و کمترین فواصل ممکن برای دریافت خدمت را برای بیماران در شرایط عادی و حادثه‌دیدگان در شرایط بحران ایجاد کرد تا بتوان تلفات ناشی از کمبود ظرفیت و دور بودن بیمارستان‌ها را به خصوص در مواقع بحرانی بعد از حادثه‌یی مانند زلزله کاهش داد.

در زمان وقوع حوادث ناگهانی ممکن است تعدادی از بیمارستان‌ها و مراکز درمانی دچار سانحه شوند و توانایی ارائه‌ی خدمات را نداشته باشند. در این شرایط تقاضاهای مربوط به این مراکز به نزدیک‌ترین مراکز با ظرفیت‌های کافی انتقال داده می‌شود. اما در شرایطی که ظرفیت تمام مراکز تکمیل شده باشد به ناچار مصدومان به شهرهای اطراف انتقال داده خواهند شد که این امر علاوه بر امکان خسارت‌های جانی، هزینه‌های مالی چشمگیری نیز به دنبال دارد. به این ترتیب بیمارستان‌ها و مراکز درمانی سایر شهرها به عنوان تسهیل پشتیبان در نظرگرفته می‌شوند. همان طور که با ذکر مثال‌هایی بیان شد، کمبود ظرفیت بیمارستان‌ها در شرایط بحرانی استفاده از بیمارستان‌های شهرهای دیگر را ایجاب می‌کند.

نوآوری‌های تحقیق پیش‌رو را می‌توان به صورت کلی زیر دسته‌بندی کرد:

۱. با استفاده از مدل ریاضی دو هدفه و با در دست داشتن منابع مالی محدود به طور هم‌زمان به مکان‌یابی بیمارستان‌های جدید و مقاوم‌سازی بیمارستان‌های موجود پرداخته شده است که این توابع هدف فواصل میان متقاضیان تخصیص‌یافته به مراکز و همچنین تقاضای از دست رفته در شرایط بحرانی را که توسط تسهیل اورژانسی تأمین می‌شود، کمینه می‌کنند.

۲. در مدل ارائه شده، هر منطقه می‌تواند تقاضای خود را توسط چند بیمارستان تأمین کند. ظرفیت‌های مشخص هر بیمارستان در مدل ارائه شده منظور شده است که در شرایط عادی و بحران به صورت مجزاست؛ به عبارت دیگر هر بیمارستانی که احداث شود در شرایط عادی دارای یک ظرفیت مشخص است و در صورت وقوع شرایط بحرانی به شرط آن‌که دچار ازکار افتادگی نشده باشد، با توجه به امکانات و فضاهای موجود می‌تواند ظرفیت خود را افزایش دهد.

۳. در مدل‌های ریاضی معمول، مواردی مانند گسل، عوامل سازگار نظیر آتش‌نشانی و عوامل ناسازگار مثل پمپ بنزین و گاز منظور نمی‌شوند؛ بنابراین ضروری است که نقاط برگزیده ابتدا توسط ابزارهای دیگر سنجیده شوند و سپس به عنوان ورودی مدل ریاضی لحاظ گردند. این مورد با ترکیب رویکرد AHP و سیستم GIS و سپس استفاده از نتایج آن در مدل ریاضی به عنوان یکی دیگر از نوآوری‌های پژوهش انجام می‌شود.

۲. بررسی پیشینه‌ی موضوع

مطالعاتی که بررسی شده‌اند، به طور کلی شامل تحقیقاتی هستند که به مکان‌یابی، مقاوم‌سازی یا هر دو به صورت هم‌زمان پرداخته‌اند. در ادامه، این مطالعات دسته‌بندی و هر یک به تفصیل تشریح می‌شود.

۱.۲. مکان‌یابی مراکز بهداشتی - درمانی

پاول و باتا[۶] در پژوهشی به ارائه‌ی دو مدل پرداختند که مدل اول برای مکان‌یابی بیمارستان‌ها و مدل دوم برای تخصیص ظرفیت بعد از وقوع حادثه است. در این پژوهش در صورت تکمیل ظرفیت، امکان انتقال به بیمارستان‌های دیگر وجود دارد. اما هیچ تصمیمی در خصوص مقاوم‌سازی بیمارستان قابل اتخاذ نیست.

پوراحمد و همکاران[۷] در مطالعه‌یی به تعیین مکان بیمارستان‌ها پرداختند. آنها عوامل سازگاری، مطلوبیت و ظرفیت را در تصمیم‌گیری برای تعیین مکان در نظر گرفته‌اند و مکان‌های مناسب را به گونه‌یی که احتمال آسیب دیدن بیمارستان در زمان بروز حوادث کم باشد، شناسایی کردند. اما تعداد بیمارستان و مکان‌های مشخص برای احداث را تعیین نکرده‌اند و به همین سبب تخصیص ظرفیت نیز صورت نگرفته است و همچنین هیچ گونه تدبیری برای شرایط بحرانی که عوامل در طی آن تغییر می‌کنند، اندیشیده نشده است. روشی که آنها استفاده کردند تلفیقی از AHP و TOPSIS فازی است و از نرم‌افزار ARCGIS برای تعیین مکان استفاده کردند.

در مطالعه‌یی که ارکات و زمانی[۸] انجام دادند، فرض شده است که تعدادی بیمارستان مشغول به کار هستند. با وقوع بحران به دلیل افزایش سریع تقاضا و برای جلوگیری از ازدحام در بیمارستان‌ها، تعدادی درمانگاه موقت احداث می‌شوند. آنها با بهره‌گیری از مدل‌های صف به ارائه‌ی مدلی برای تعیین مکان‌های بهینه‌ی احداث درمانگاه‌های موقت و همچنین تخصیص متقاضیان به مراکز درمانی پرداخته‌اند، به نحوی که تعداد متقاضیان از دست رفته را کمینه کند. در مطالعه‌ی یاد شده، احتمال از کار افتادگی بیمارستان در صورت وقوع حادثه در نظرگرفته نشده است.

مستره و همکاران[۹] دو مدل مکان‌یابی - تخصیص برای کنترل عدم‌قطعیت در برنامه‌ریزی راهبردی شبکه‌های بیمارستان پیشنهاد دادند. هدف آنها ارائه‌ی مدلی برای کمینه کردن هزینه‌ها و تعیین میزان دسترسی جغرافیایی به بیمارستان است. مدل اول، تصمیمات مکان‌یابی و مدل دوم، تصمیمات مکان‌یابی ـ تخصیص را به عنوان سطح یک تصمیم‌گیری فرض کرده است. تقاضای جامعه غیرقطعی و به صورت سناریویی در نظر گرفته شده که حالت بحرانی نیز یک سناریو فرض

شده است. ضعف این مدل عدم لحاظ احتمال از کار افتادگی بیمارستان در سناریوهاست.

۲.۲. مقاوم‌سازی مراکز بهداشتی ـ درمانی

مسی و همکاران[۱۰] در مطالعه‌یی که انجام دادند به توسعه‌ی روش کاهش ریسک زمین لرزه برای ساختمان‌های عمومی پرداختند که برای بیمارستان‌ها نیز قابل به کارگیری است. آنها زمان مورد نیاز، بودجه و اولویت‌بندی‌ها را برای تعریف راهبرد کاهش ریسک در نظر گرفته‌اند. در مدل ارائه شده در این تحقیق ظرفیت و تقاضا بعد از وقوع زلزله بررسی شده و با توجه به هزینه‌های مقاوم‌سازی به تعیین راهبرد مقاوم‌سازی بیمارستان‌ها پرداخته شده است. برای تعریف راهبرد، اولویت‌بندی‌های را با توجه به خطرهای محلی، ظرفیت لرزه‌یی، تعداد افراد درگیر با خطر و ... در نظر گرفته است، که می‌توان گفت تأثیر مکان بیمارستان را هم در مدل خود دیده است؛ اما تصمیمی در مورد مکان نگرفته است بلکه برای مقاوم‌سازی بیمارستان بعد از این‌که بیمارستان احداث شده است، تصمیم‌گیری می‌کند.

مینیاتی و همکاران[۱۱] توسعه‌ی یک سیستم پشتیبانی برای تصمیم‌گیری به منظور کاهش اثرات منفی زمین لرزه برای ساختمان بیمارستان ارائه داده‌اند. مدلی که در این پژوهش مطرح شده است، ریسک حاصل از زمین لرزه را برای بیمارستان، با تخمین هزینه برای برنامه‌های مختلف مقاوم‌سازی، کاهش داده است. این مطالعه برای کنترل ریسک حاصل از زلزله، صرفاً آمادگی بیمارستان و حفظ عملکرد آن را در سیستم پشتیبانی بعد از زلزله منظورکرده و ظرفیت بیمارستان‌ها را در نظر نگرفته است.

۳.۲. مکان‌یابی ـ مقاوم‌سازی تسهیلات

در مباحث مکان‌یابی، خرابی و از کار افتادگی تسهیلات یک موضوع پر اهمیت قلمداد می‌شود که برای مواجهه و مقابله با آن و افزایش قابلیت اطمینان، رویکردهای مختلفی نظیر معرفی تسهیل پشتیبان، به کارگیری تسهیلات مازاد آماده به کار و نیز مقاوم‌سازی تسهیلات به کار گرفته می‌شود. در تحقیق حاضر، رویکرد مقاوم‌سازی تسهیلات به عنوان یک رویکرد کارآمد برای ارتقای قابلیت اطمینان بررسی شده است.

لی و همکاران[۱۲] در یک مقاله، ریسک ناشی از از کار افتادگی‌های پیش‌بینی نشده را در شبکه‌های توزیع مطالعه کردند و اثر مقاوم‌سازی تسهیلات بر پایایی شبکه‌ی توزیع را بررسی کردند. آنها یک مسئله‌ی مکان‌یابی p- میانگین پایا و یک مسئله‌ی مکان‌یابی پایای شارژ ثابت را بدون محدودیت ظرفیت مدل‌سازی کرده‌اند. در هر دو مدل برای از کار افتادگی تسهیلات، احتمال مشخصی را در نظر گرفته‌اند که مستقل فرض شده است. همچنین فرض شده است که در صورتی که تسهیلی مقاوم شود، کاملاً پایاست. عبدالهی و همکاران[۱۳] در پژوهشی، با استفاده از روش سلسله‌مراتبی AHP و با تعیین معیارهای مکانی، هم‌جواری و دسترسی در شرایط عادی و بحران، بیمارستان‌ها را به صورت جامع بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که بیش از نیمی از بیمارستان‌های شهر تهران در زمان زلزله کارایی پایینی دارند و به منظور مقابله با بحران، نیاز است مکان‌یابی و تجهیز و مقاوم‌سازی آنها مجدداً صورت گیرد. زیاری و خطیب‌زاده[۱۴] در مطالعه‌یی به گزینش مکان بهینه‌ی کاربری‌های درمانی پرداختند. آنها با تلفیق روش‌های AHP و تحلیل شبکه در محیط نرم‌افزار GIS مکان بهینه‌ی بیمارستان‌ها در شهر سمنان را تعیین کردند. معیارهایی که آنها در تحقیق خود به کار بردند، شامل تراکم جمعیت، شعاع دسترسی، هم‌جواری کاربری‌ها و نوع ارتباطات است. آنها پس از مقایسه‌ی معیارها و وزن‌دهی به آنها با استفاده از نرم‌افزار GIS و به کاربردن AHP در آن با هم‌پوشانی لایه‌های مربوط به معیارها بهترین مکان‌ها را تعیین کردند. در واقع مکان‌هایی که انتخاب می‌شوند، از نظر دسترسی و ایمن بودن در شرایط عادی و بحران با در نظرگیری معیارهای مربوط بررسی شده‌اند. مدال و همکاران[۱۵] در پژوهشی به ارائه‌ی مدل یکپارچه‌یی برای تصمیم‌گیری در مورد مکان‌یابی مراکز توزیع و مقاوم‌سازی زیرمجموعه‌یی از آنها پرداختند. در این پژوهش تصمیمات مکان‌یابی و مقاوم‌سازی به صورت هم‌زمان در نظر گرفته شده است. به منظورکاهش هزینه‌های ناشی از حوادثی از قبیل زلزله، مقاوم‌سازی مراکز با توجه به هزینه‌ها در نظرگرفته شده است. در این مطالعه ظرفیت مراکز نامحدود لحاظ شده است و در صورت تصمیم‌گیری برای مقاوم‌سازی یک مرکز، آن مرکز به طور قطعی در برابر هرگونه حادثه‌ی احتمالی مقاوم و آسیب ناپذیر در نظرگرفته می‌شود که با در نظرگرفتن هزینه‌ی معقول مقاوم‌سازی به این شکل توجیه اقتصادی نخواهد داشت. شیشه‌بری و همکاران[۱۶] در مقاله‌یی به تعیین مکان تسهیلات ناایمن و طراحی شبکه پرداختند به طوری که با توجه به محدودیت بودجه، قابلیت اطمینان تسهیلات را بالا بردند. در واقع با در نظر گرفتن از کار افتادگی تسهیلات، مکان تسهیلات و شبکه را طوری طراحی کردند که در مجموع قابلیت اطمینان تسهیلات افزایش یابد. علی‌اکبریان و همکاران[۱۷] مسئله‌ی مکان‌یابی r- ممنوع میانگین را برای تسهیلات سلسله‌مراتبی توسعه دادند؛ به گونه‌یی که بهترین راه محافظت تسهیلات در هر سطح، برای مقابله با بدترین مورد از کار افتادگی، انتخاب شود. مدلی که آنها در پژوهش خود ارائه کردند، یک مدل دوسطحی است؛ بنابراین برای خدمات پزشکی که برخی مراجعان به خدمات درمانگاهی نیاز دارند و برخی باید به بیمارستان ارجاع داده شوند، مناسب است. در ضمن محدودیت بودجه و ظرفیت را در نظر نگرفته‌اند

۴.۲. شکاف تحقیقاتی

در مطالعات بررسی شده، برخی محققان به ارائه‌ی رویکردها و مدل‌هایی برای مکان‌یابی بیمارستان‌ها پرداخته‌اند و برخی ظرفیت را محدود و برخی دیگر نامحدود فرض کرده‌اند. همچنین مطالعاتی نیز مقاومت بیمارستان‌ها را مورد توجه داشته‌اند؛[۱۸] مثلاً، به بررسی عملکرد بیمارستان‌ها پرداخته‌اند و مقاومت را به عنوان عاملی، که بر عملکرد بیمارستان در زمان حادثه اثرگذار است، در نظر گرفته‌اند. برخی با در نظر گرفتن ازکار افتادگی تسهیلات به فواصل بعد از ازکار افتادگی نیز توجه کرده‌اند و با در نظرگیری فواصل قبل و بعد از ازکار افتادگی، بهترین مکان را انتخاب کرده‌اند. به طور کلی می‌توان گفت که در هیچ یک از مطالعات بررسی شده، مقاوم‌سازی و مکان‌یابی بیمارستان‌ها با ظرفیت‌های محدود به طور همزمان در نظر گرفته نشده‌اند. اما در بسیاری از برنامه‌ریزی‌ها و توسعه‌های زیرساخت‌های شهری، بودجه‌های سرمایه‌گذاری و مالی با هدف بهبود وضعیت پاسخگویی به بیماران در شرایط عادی و شرایط بحران محدود بوده است و چه بسا می‌توان با آن بودجه‌ی محدود بحث مکان‌یابی و احداث بیمارستان‌های جدید و مقاوم‌سازی بیمارستان‌های موجود را طوری انجام داد که با صرف هزینه‌های کمتری بهترین و مطلوب‌ترین پاسخگویی را درکوتاه‌ترین زمان ممکن در شرایط یاد شده داشت. با توجه به این مقوله‌ی پر اهمیت و غیر قابل انکار، در تحقیق پیش‌رو به دنبال ارائه‌ی رویکردی کارآمد هستیم که با در نظرگرفتن ظرفیت مشخص برای بیمارستان‌ها، در مورد مکان‌یابی بیمارستان‌های جدید و مقاوم‌سازی بیمارستان‌های موجود تصمیم‌گیری شود. از بزرگترین مزایا و فواید تحقیق حاضر می‌توان به بهبود وضعیت پاسخگویی به بیماران در شرایط عادی و بحرانی با توجه به بودجه‌ی محدود سرمایه‌گذاری برای توسعه‌ی زیرساخت‌های شهری اشاره کرد. در

مسائل یاد شده در پیشینه‌ی موضوع، رویکردهای معمول حل دقیق برای مسائل تک‌هدفه عمدتاً الگوریتم محدودیت اپسیلون تقویت شده (II) و آزادسازی لاگرانژ بوده است. همچنین، رویکردهای حل ابتکاری یا فرااِبتکاری مورد استفاده عبارت از الگوریتم ژنتیک چندهدفه با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II)، شبیه‌سازی تبرید، جستجوی ممنوع، جستجوی صفر و یک، جستجوی متغیر همسایگی و غیره است. با توجه به ساختار مسئله‌ی مورد بررسی و نیز کارایی رویکردهای مختلف حل، در تحقیق حاضر، الگوریتم محدودیت اپسیلون تقویت شده (II) به عنوان رویکرد حل دقیق و یک الگوریتم ابتکاری پیشنهادی کارآمد به عنوان یک رویکرد حل تقریبی بحث و بررسی شده است.

۳. تعریف مسئله و مدل‌سازی ریاضی

مکان‌های بالقوه برای احداث تسهیلات به عنوان ورودی مدل‌های مختلف مکان‌یابی استفاده می‌شوند. تعیین این مکان‌های بالقوه باید با در نظرگرفتن معیارهای کمّی و کیفی مانند شرایط اقلیمی و جغرافیایی، همجواری‌های سازگار و ناسازگار، دسترسی‌های مناسب و . . . با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و سیستم اطلاعات جغرافیایی صورت گیرد. درواقع برای تعیین مکان‌های بالقوه، کلیه‌ی مکان‌های موجود ابتدا با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره که در این پژوهش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) است، مورد ارزیابی قرار گرفته و اولویت‌بندی شده و در نهایت تعدادی از آنها به عنوان مکان‌های بالقوه تعیین می‌شوند.

در این پژوهش به دنبال ارائه‌ی مدلی برای تعیین مکان بیمارستان‌ها در تعدادی از مکان‌های بالقوه‌ی تعیین شده و مقاوم‌سازی تعدادی از آنها هستیم، به گونه‌یی که با توجه به میزان بودجه‌ی در اختیار بتوان تقاضاهای موجود را ارضا کرد و همچنین کمترین فواصل ممکن برای دریافت خدمت را برای متقاضیان قبل و بعد از وقوع حادثه با تخصیص‌های مشخص، ایجاد کرد تا بتوان تلفات ناشی از کمبود ظرفیت و دور بودن بیمارستان‌ها را به خصوص در مواقع بحرانی بعد از حادثه‌یی مانند زلزله کاهش داد. از طرفی در زمان بحران ممکن است تقاضا به گونه‌یی افزایش یابد که ظرفیت‌های اضافه‌ی بیمارستان‌ها نیز پاسخگوی متقاضیان نباشد. در این شرایط معمولاً مصدومان به شهرهای اطراف منتقل می‌شوند، که هم از نظر هزینه‌ی انتقال و هم به وجود آمدن شرایط نامناسب برای بیمار شرایط نامساعدی را ایجاد می‌کند که سعی در کاهش آن داریم.

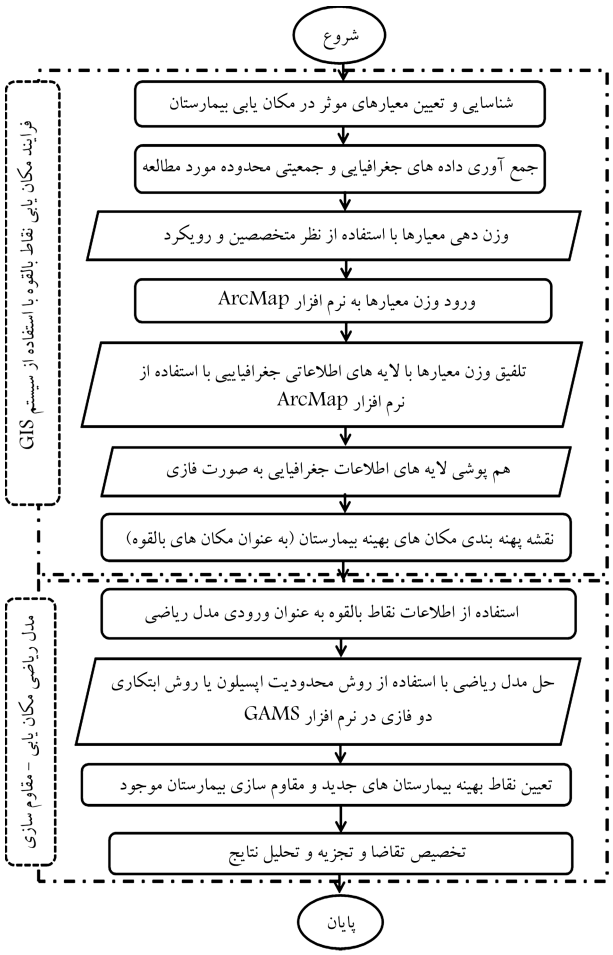
بنابراین به دنبال ارائه‌ی مدلی با دو هدف کمینه کردن بیشترین فاصله‌ی بیمارستان‌ها تا نقاط تقاضای تخصیصی به آن بیمارستان و کمینه کردن تقاضای برآورده نشده در شرایط بحرانی هستیم.

پس از تعیین نقاط بالقوه با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و معیارهای مختلف، این نقاط باید به عنوان نقاط دارای قابلیت کاربری بیمارستانی ارزیابی شوند و با توجه به بودجه، ظرفیت‌ها و موارد دیگر برای احداث و مقاوم‌سازی بهینه گزینش شوند.

شکل ۱ رویکرد ترکیبی کلی حل مسئله‌ی مکان‌یابی ـ مقاوم‌سازی بیمارستان‌ها را نشان می‌دهد.

۱.۳. مفروضات مسئله

در مدل ارائه شده در این پژوهش مفروضاتی لحاظ شده است که در ادامه به صورت



شکل ۱. رویکرد ترکیبی پیشنهادی حل مسئله‌ی مکان‌یابی - مقاوم‌سازی بیمارستان‌ها با ظرفیت مشخص.

اختصار بیان می‌شوند:

- در صورت مقاوم‌سازی یک بیمارستان، در زمان حادثه آن تسهیل به هیچ عنوان آسیب نمی‌بیند و در صورت عدم مقاوم‌سازی ممکن است دچار از کار افتادگی شود که در این صورت کاملاً غیر قابل استفاده خواهد بود.
- ظرفیت بیمارستان‌ها در زمان عادی مشخص است و در زمان بحران نیز با فرض افزایش ظرفیت‌های مشخص با توجه به توان هر بیمارستان مقادیر مشخصی تعیین شده است.
- بودجه‌ی در اختیار برای احداث بیمارستان‌ها و مقاوم‌سازی آنها محدود و مشخص است.
- تقاضا در زمان عادی قطعی و در زمان بحران به صورت غیرقطعی در نظرگرفته شده است.
- تقاضای هر نقطه می‌تواند توسط چند بیمارستان پاسخ داده شود.
- در زمان بحران مجموع تقاضاها مورد توجه قرار می‌گیرد در حالی‌که در زمان عادی تقاضا به ازای هر نقطه‌ی تقاضا به صورت مجزا در نظرگرفته شده است.
- تخصیص تقاضا فقط در زمان عادی انجام می‌شود و در زمان بحران که تقاضا افزایش می‌یابد، صرفاً سعی در کاهش تقاضای از دست رفته شده است.

- در صورتی که تقاضایی توسط بیمارستان‌های مستقر بی‌پاسخ بماند، به تسهیل اورژانسی منتقل می‌شود که هزینه‌ی بالایی دارد. استفاده از این تسهیل اورژانسی در واقع انتقال بیماران و مصدومان به بیمارستان‌های شهرهای دیگر است.
- تسهیلات اورژانسی فقط در زمان بحران قابل استفاده هستند.

۲.۳. مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای مسئله

در ادامه به معرفی مجموعه‌ها، پارامترها، متغیرها و محدودیت‌های مدل پرداخته شده و سپس هر یک از محدودیت‌ها به اختصار توضیح داده شده است. در ادامه، به خطی‌سازی مدل پرداخته شده است.

مجموعه‌ها:

I_1: مجموعه‌ی مکان‌های بالقوه‌ی بیمارستان‌های جدید؛

I_2: مجموعه‌ی مکان‌های بیمارستان‌های موجود؛

I: مجموعه‌ی مکان‌های بالقوه و موجود $(I_1, I_2 \subset I)$؛

J: مجموعه‌ی نقاط تقاضا؛

L: مجموعه‌ی تسهیلات اورژانسی؛

$i \approx ip \in I$ و $j \approx jp \in J$ و $l \in L$

پارامترها:

d_{ij}: فاصله‌ی بین نقطه‌ی تقاضای j و محل بیمارستان i؛

g_i: هزینه‌ی مقاوم‌سازی بیمارستان موجود i؛

f_i: هزینه‌ی استقرار بیمارستان جدید i؛

C_i^N: ظرفیت بیمارستان i در زمان عادی؛

C_i^E: ظرفیت بیمارستان i در زمان بحران؛

M: مقدار بزرگ؛

r: تعداد بیمارستان‌های از کار افتاده در شرایط بحران؛

b: بودجه در دست؛

q_j^N: تقاضای نقطه‌ی j در زمان عادی؛

q_j^E: تقاضای نقطه‌ی j در زمان بحران؛

q^E: مجموع تقاضا در زمان بحران؛

β: ضریب تعیین‌کننده‌ی بیشینه‌ی فاصله‌ی قابل قبول نقطه‌ی تقاضا تا بیمارستان در شرایط بحران (که در تحقیق حاضر برابر با ۱٫۲ در نظرگرفته شده است.)

متغیرهای صفر و یک:

W_{ij}^N: اگر در زمان عادی نقطه‌ی تقاضای j به بیمارستان i تخصیص یابد برابر با ۱، در غیر این صورت ۰؛

W_{ij}^E: اگر در زمان بحران نقطه‌ی تقاضای j به بیمارستان i تخصیص یابد برابر ۱، در غیر این صورت ۰؛

X_i: اگر استقرار بیمارستان جدید در مکان i صورت گیرد برابر با ۱، در غیر این صورت ۰ $(i \in I_1)$؛

m_i: اگر تصمیم بگیریم مقاوم‌سازی بیمارستان موجود i انجام شود برابر ۱، در غیر این صورت ۰ $(i \in I_2)$.

متغیرهای پیوسته:

O_{ij}^N: میزان نقطه‌ی j که توسط بیمارستان i در شرایط عادی برآورده می‌شود؛

O_{ipjp}^N: میزان تقاضای نقطه‌ی jp که توسط بیمارستان ip در شرایط عادی برآورده می‌شود؛

O_{ij}^E: میزان تقاضای نقطه‌ی j که توسط بیمارستان i در شرایط بحران برآورده می‌شود.

۳.۳. مدل ریاضی مکان‌یابی ـ مقاوم‌سازی (FLHP)

در ادامه مدل ریاضی پیشنهادی برای مکان‌یابی ـ مقاوم‌سازی بیمارستان‌ها در شرایط عادی (پیش از وقوع بحران) ارائه شده است.

$$\min max \left\{ d_{ij}.w_{ij}^N \right\} \quad (1)$$

$$\min\{q^E - \sum_{i \in I} \left(c_i^E.m_i \right)\}$$

$$s.t.$$

$$m_{ip}.O_{ip\,jp}^N + \sum_{\substack{i \neq ip \\ i \in I \\ d_{i\,jp} \leq \beta.d_{ip\,jp}}} \left(m_i.[c_i^N - \sum_j O_{ij}^N] \right) \geq O_{ip\,jp}^N \quad (2)$$

$$\forall (ip \in I, jp \in J) \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I} w_{ij}^N \geq 1 \qquad \forall j \in J \quad (4)$$

$$\sum_{i \in I} O_{ij}^N = q_j^N \qquad \forall j \in J \quad (5)$$

$$\sum_{j \in J} O_{ij}^N \leq c_i^N \qquad \forall i \in I \quad (6)$$

$$O_{ij}^N \leq w_{ij}^N.M \qquad \forall (i \in I, j \in J) \quad (7)$$

$$w_{ij}^N \leq O_{ij}^N.M\sigma_X \qquad \forall (i \in I, j \in J) \quad (8)$$

$$w_{ij}^N \leq x_i \qquad \forall (i \in I, j \in J) \quad (9)$$

$$\sum_{i \in I_1} f_i.x_i + \sum_{i \in I_2} g_i.m_i \leq b \quad (10)$$

$$\sum_{i \in I_2} c_i^N + \sum_{i \in I_1} c_i^N.x_i \geq \sum_{j \in J} q_j^N \quad (11)$$

$$m_i \leq x_i \qquad \forall i \in I_2 \quad (12)$$

$$r \leq \sum_{i \in I_2} (x_i - m_i) \quad (13)$$

$$x_i = 1 \qquad \forall i \in i_2 \quad (14)$$

$$x_i = m_i \qquad \forall i \in I_1 \quad (15)$$

$$x_i,\ m_i \in \{0, 1\} \qquad \forall i \in I \quad (16)$$

$$w_{ij}^N \in \{0, 1\} \qquad \forall i \in I, j \in J \quad (17)$$

$$O_{ij}^N \geq 0 \qquad \forall i \in I, j \in J \quad (18)$$

تابع هدف اول کمینه کردن بیشترین فاصله‌ی بین بیمارستان‌ها تا نقاط تقاضای تخصیص‌یافته به آن در شرایط عادی است. تابع هدف دوم کمینه کردن تقاضای برآورده نشده در شرایط بحرانی است؛ به عبارت دیگر تقاضاهایی که در شرایط بحران توسط مراکز احداث شده قابل پاسخ‌دهی نیستند و به مراکز بیمارستانی شهرهای دیگر (تسهیلات اورژانسی) انتقال می‌یابند و هزینه‌های جانی و مالی زیادی به دنبال دارند، کمینه می‌شوند. محدودیت ۳ این الزام را فراهم می‌کند که هر بیمارستان یا مقاوم‌سازی شود یا در صورتی که مقاوم‌سازی نشده باشد،

بیمارستان‌های مقاوم در فواصل قابل توجیهی از نقطه‌ی تقاضا موجود باشند که در مجموع ظرفیت خالی برای ارضای تقاضاهای بی‌پاسخ تخصیصی به آن بیمارستان را داشته باشند؛ به عبارت دیگر این محدودیت سعی بر آن دارد تا تقاضاهای در حال پاسخگویی در شرایط عادی به همان صورت در شرایط بحران نیز پاسخ داده شود؛ ضمن آن که تقاضاهای جدید به وجود آمده در آن نقطه‌ی تقاضا یا نقاط دیگر، توسط آن بیمارستان، در صورت مقاوم بودن و داشتن ظرفیت، یا بیمارستان‌های همجوار قابل پاسخگویی باشد که این امر با مقاوم‌سازی بیمارستان‌های موجود یا مکان‌یابی بیمارستان‌های جدید برآورده می‌شود. محدودیت ۴ این الزام را فراهم می‌کند که هر نقطه‌ی تقاضا حداقل به یک بیمارستان تخصیص داده شود. از آن‌جایی که تقاضای هر نقطه می‌تواند توسط یک یا بیش از یک بیمارستان پاسخ داده شود، پس هر نقطه تقاضا می‌تواند به بیش از یک بیمارستان اختصاص یابد. محدودیت ۵ برآورده شدن تقاضای هر نقطه توسط بیمارستان‌ها را نشان می‌دهد، به طوری که مجموع تقاضاهایی که توسط بیمارستان‌های مختلف پاسخ داده می‌شود برابر با مقدار تقاضای نقطه‌ی j باشد. قید ۶ مربوط به ظرفیت هر بیمارستان می‌شود که مجموع تقاضای تخصیص‌یافته به آن از ظرفیت بیمارستان بیشتر نشود. عبارت‌های ۷ و ۸ به ترتیب کنترل می‌کنند تا در صورتی که تقاضایی به یک بیمارستان تخصیص یافت آن نقطه‌ی تقاضا نیز به آن بیمارستان تخصیص یابد و در صورتی که تقاضایی به آن تخصیص نیافت آن نقطه نیز به بیمارستان تخصیص نیابد. قید ۹ مربوط به این موضوع است که نقاط تقاضا فقط به بیمارستان‌هایی که احداث می‌شوند یا موجود هستند تخصیص یابند. عبارت ۱۰ محدودیت مربوط به بودجه است که مجموع هزینه‌های احداث بیمارستان‌های جدید و مقاوم‌سازی بیمارستان‌های موجود نباید از میزان بودجه‌ی در اختیار بیشتر شود. مجموع ظرفیت‌های بیمارستان‌های موجود و جدید باید از مجموع تقاضاها بیشتر باشد که این مورد در عبارت ۱۱ آمده است. محدودیت ۱۲ عنوان می‌کند که بیمارستان‌های موجود می‌توانند در صورت نیاز مقاوم‌سازی شوند. محدودیت ۱۳، کمینه‌ی تعداد بیمارستان‌های موجودی که مقاوم نشده و در حادثه دچار ازکار افتادگی می‌شوند را بیان می‌کند. عبارت ۱۴ مربوط به این نکته می‌شود که بیمارستان‌های موجود به عنوان بیمارستان‌های از قبل احداث شده درنظرگرفته شده‌اند. عبارت ۱۵ نیز بیان‌گر آن است که بیمارستان‌هایی که برای احداث انتخاب می‌شوند، باید حتماً مقاوم‌سازی نیز شوند. عبارت‌های ۱۶، ۱۷ و ۱۸ نوع متغیرهای مدل را نشان می‌دهند.

تابع هدف دوم به دلیل وجود پارامتر تقاضای بحرانی (q^E) به عنوان یک مقدار ثابت، می‌تواند به شکل عبارت ۱۹ بازنویسی شود.

$$\max\{\sum_{i\in I}\left(c_i^E.m_i\right)\} \qquad (۱۹)$$

۴.۳. خطی‌سازی مدل

در محدودیت ۳ ضرب دو متغیر صفر و یک m_{ip} و پیوسته $O^N_{ip\,jp}$ و همچنین ضرب متغیرهای m_i و $\sum_J O^N_{ij}$ سبب غیرخطی شدن محدودیت شده‌اند. برای خطی‌سازی این محدودیت، از روش‌های ارائه شده در مرجع[۱۹] استفاده شده و تغییر متغیرهای کارآمد انجام شده است.

عبارات ۲۰ تا ۲۴ تغییر متغیرها را نشان می‌دهد. سایر محدودیت‌هایی که به دلیل تغییر متغیر باید به مدل افزوده شوند نیز در ادامه به صورت قیدهای ۲۵ تا ۲۷ ذکر شده‌اند.

$$yo^N_{ip\,jp} = m_{ip}.O^N_{ip\,jp}\ \forall(ip\in I, jp\in J) \qquad (۲۰)$$

$$yo^N_{ip\,jp} \le m_{ip}.M\ \forall(ip\in I, jp\in J) \qquad (۲۱)$$

$$yo^N_{ip\,jp} \le O^N_{ip\,jp}\ \forall(ip\in I, jp\in J) \qquad (۲۲)$$

$$yo^N_{ip\,jp} \ge O^N_{ip\,jp} - (۱ - m_{ip}).M \quad \forall(ip\in I, jp\in J) \qquad (۲۳)$$

$$qo_i = m_i.\sum_{j\in J} O^N_{ij} \qquad \forall i\in I \qquad (۲۴)$$

$$qo_i \le m_i.M \qquad \forall i\in I \qquad (۲۵)$$

$$qo_i \le \sum_j O^N_{ij} \qquad \forall i\in I \qquad (۲۶)$$

$$qo_i \ge \sum_j O^N_{ij} - (۱ - m_i).M \qquad \forall i\in I \qquad (۲۷)$$

براساس تغییر متغیرها و مطالب ذکر شده، محدودیت غیرخطی ۳ به محدودیت خطی ۲۸ تبدیل می‌شود.

$$yo^N_{ip\,jp} + \sum_{\substack{i\ne ip\\ i\in I}} (m_i.c_i - qo_i) \ge O^N_{ip\,jp}$$
$$d_{i\,jp} \le \beta.d_{ip\,jp}$$
$$\forall(ip\in I, jp\in J) \qquad (۲۸)$$

با توجه به چارچوب مدل پیشنهادی می‌توان نشان داد که مسئله‌ی مورد بررسی یک مسئله‌ی NP-hard است. در ادامه، این موضوع به صورت یک ویژگی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

ویژگی (۱): مسئله‌ی مکان‌یابی - مقاوم‌سازی بیمارستان‌ها با منابع محدود یک مسئله‌ی NP-hard است.

اثبات: با حذف تابع هدف اول و حذف محدودیت‌های ۳، ۷ و ۸، مدل ریاضی ارائه شده به مدل مسئله‌ی پوشش جزئی تقلیل می‌یابد. از آن‌جایی که مسئله‌ی پوشش جزئی، یک مسئله‌ی NP-hard است[۲۰]، بنابراین به سادگی می‌توان نتیجه گرفت که مسئله‌ی مورد بررسی در تحقیق حاضر نیز یک مسئله‌ی NP-hard است.

۵.۳. مدل ریاضی تخصیص در زمان بحران

مدل ریاضی مکان‌یابی ـ مقاوم‌سازی (FLHP) فقط به بحث مکان‌یابی بیمارستان‌های جدید و مقاوم‌سازی بیمارستان‌های موجود و نیز تخصیص تقاضاها در زمان عادی می‌پردازد. اما پیشنهاد مشخصی برای تخصیص تقاضاها در زمان بحران ندارد. این امر به این دلیل است که در زمان عادی مشخص نیست که کدام بیمارستان قرار است در زمان وقوع زلزله دچار از کار افتادگی شود. علاوه بر این، میزان تقاضای هر ناحیه در زمان بحران در شرایط عادی به صورت مشخصی قابل پیش‌بینی نیست. به همین دلیل، مدل دیگری با عنوان مدل ریاضی تخصیص در زمان بحران تخصیص تقاضا[۱] ارائه شده است تا تخصیص مصدومان و حادثه‌دیدگان در زمان کمی پس از وقوع زلزله را مشخص کند. برای حل مدل دوم، اطلاعات ورودی شامل بیمارستان‌های از کار افتاده و نیز برآورد مشخص‌تری از تقاضاست که این اطلاعات در زمان حل مدل قطعاً در دسترس خواهند بود.

نکته‌ی دیگر این است که از آن‌جایی که مدل DAL یک مدل ریاضی خطی ساده است، زمان حل آن (خصوصاً در پس از وقوع زلزله که زمان امدادرسانی از

اهمیت بسیار حیاتی برخوردار است) بسیار ناچیز خواهد بود.

$$\min \sum_{i\in I}\sum_{j\in J} d_{ij}O_{ij}^{E} + \sum_{l\in L}\sum_{j\in J} d_{lj}O_{lj}^{E} \qquad (۲۹)$$

$$s.t. \sum_{i\in I} O_{ij}^{E} + \sum_{l\in L} O_{lj}^{E} = q_{j}^{E} \quad \forall j \in J \qquad (۳۰)$$

$$\sum_{j\in J} O_{ij}^{E} \le c_{i}^{E} \quad \forall i \in I \qquad (۳۱)$$

$$O_{ij}^{E} \ge ۰ \quad \forall (i \in I, j \in J) \qquad (۳۲)$$

تابع هدف این مدل، مجموع فواصل تخصیص تقاضاها در زمان بحران به بیمارستان‌های سالم مانده و تسهیلات اورژانسی (بیمارستان‌های شهرهای اطراف) را کمینه می‌کند. رابطه‌ی ۳۰ پاسخگویی تقاضاهای مربوط به هر یک از نقاط تقاضا را در زمان بحران تضمین می‌کند. عبارت ۳۱ محدودیت ظرفیت هر یک از بیمارستان‌ها در شرایط بحران را نشان می‌دهد. رابطه‌ی ۳۲ غیرمنفی بودن متغیر تصمیم را نشان می‌دهد.

۴. روش‌های حل مدل ریاضی

با توجه به دوهدفه بودن مدل (FLHP)، برای به دست آوردن نقاط پارتو، روش محدودیت اپسیلون تقویت شده (II) و در ابعاد بزرگ به دلیل NP-hard و زمان‌بر بودن آن از الگوریتم ابتکاری دومرحله‌یی چندهدفه استفاده شده است. در ادامه به توضیح این روش‌ها پرداخته می‌شود.

۱.۴. روش محدودیت اپسیلون تقویت شده (II)

روش محدودیت اپسیلون یکی از رویکردهای شناخته شده برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه است که با انتقال تمام توابع هدف به جز یکی از آنها در هر مرحله به محدودیت، به حل مسئله می‌پردازد.[۲۱] در روش محدودیت اپسیلون، فرایند بهینه‌سازی فقط برای یکی از توابع هدف انجام می‌شود، درحالی‌که توابع هدف دیگر به کران‌های بالای خود می‌رسند. بنابراین، هیچ تضمینی برای کارا بودن راه‌حل‌های تولید شده وجود ندارد و ممکن است راه‌حل‌های ناکارآمد تولید شود. علاوه بر این، ممکن است برخی از جواب‌های تولید شده یکدیگر را مغلوب کنند که این مقوله می‌تواند تا اندازه‌ی زیادی از کارایی روش محدودیت اپسیلون بکاهد.

در سال‌های اخیر، رویکردهای بهبود یافته‌یی از روش محدودیت اپسیلون ارائه شده است تا به این ترتیب نقص‌ها و کاستی‌های آن برطرف شود. مثلاً، ماوروتاس در سال ۲۰۰۹، به منظور غلبه بر برخی از نقص‌های این روش، دو تغییر جزئی اما مؤثر در روش محدودیت اپسیلون کلاسیک ایجاد کرد و یک نسخه‌ی تقویت شده / تکامل‌یافته از روش محدودیت اپسیلون ارائه داد.[۲۲] در رویکرد بهبود یافته‌ی وی، ابتدا، با اضافه کردن متغیرهای کمبود مثبت (متغیرهای مازاد برای مسائل بیشینه‌سازی) محدودیت‌های نامساوی توابع هدف به محدودیت‌های مساوی تبدیل می‌شوند، سپس با افزودن مجموع متغیرهای کمبود به تابع هدف اصلی، کارایی این روش تقویت می‌شود.

در ادامه‌ی تحقیقات یاد شده، با توجه به این‌که در فرمول‌سازی محدودیت اپسیلون تقویت شده توالی بهینه‌سازی توابع هدف محدود شده نادیده گرفته شد، ماوروتاس و فلوریس در سال ۲۰۱۳، فرمول‌سازی جدیدی به منظور انجام نوعی بهینه‌سازی لغت‌نامه‌یی بر روی توابع هدف باقی‌مانده ارائه دادند.[۲۳] گام‌های روش محدودیت اپسیلون به شرح زیر است:

۱. انتخاب یکی از توابع هدف به عنوان تابع هدف اصلی.

۲. حل مسئله هر بار با توجه به یکی از توابع هدف و به دست آوردن مقادیر بهینه‌ی هر تابع هدف.

۳. تقسیم‌بندی بازه‌ی بین دو مقدار بهینه توابع هدف فرعی به تعداد از قبل مشخص و به دست آوردن یک جدول مقادیر برای $\varepsilon_2, \ldots, \varepsilon_n$.

۴. حل مسئله هر بار با تابع هدف اصلی (تابع هدف اول) و هر یک از مقادیر $\varepsilon_2, \ldots, \varepsilon_n$ (با افزودن مجموع متغیرهای کمبود به تابع هدف اصلی، کارایی این روش تقویت می‌شود.)

۵. گزارش جواب‌های پارتویی یافت شده.

با این فرمول‌سازی، حل‌کننده ابتدا مقدار بهینه‌ی تابع f_1 را پیدا می‌کند؛ سپس برای بهینه‌سازی f_2 تلاش می‌کند و به همین ترتیب بقیه‌ی توابع هدف را بهینه می‌کند. علاوه بر این، در نسخه‌ی بهبودیافته محدودیت اپسیلون تقویت شده[۲] در هر تکرار متغیر کمبود / مازاد مربوط به درونی‌ترین تابع هدف بررسی می‌شود. در حقیقت با استفاده از ضریب‌گذر و جلوگیری از تکرارهای زائد، تا حد زیادی به الگوریتم سرعت می‌بخشد.

۲.۴. روش ابتکاری دومرحله‌یی چندهدفه

این روش ابتکاری بر اساس این اصل پیشنهاد می‌شود که کاهش تعداد متغیرهای عدد صحیح می‌تواند بر روی کاهش قابل توجه پیچیدگی مدل ریاضی و به دنبال آن کاهش زمان حل تأثیر قابل توجهی داشته باشد. به منظور کاهش تعداد متغیرهای عدد صحیح، رویکردها و روش‌های مختلفی ارائه شده است.[۲۴] در این پژوهش، با توجه به ماهیت و ساختار مسئله و مدل مورد بررسی، در مرحله‌ی اول، متغیرهای مکان‌یابی بیمارستان‌های جدید و مقاوم‌سازی بیمارستان‌های موجود بر اساس رتبه‌بندی ظرفیت، هزینه‌ی مکان‌یابی/مقاوم‌سازی و نیز بودجه‌ی محدود در دسترس، به صورت پارامترهای صفر و یک ورودی تعیین می‌شود. در مرحله‌ی دوم، مقادیر مربوط به متغیر تصمیم مکان‌یابی بیمارستان‌های جدید (x_1) به عنوان پارامتر از پیش تعیین شده به مدل ریاضی (FLHP) وارد شده و با روش اپسیلون تقویت شده (II) حل می‌شود. به این ترتیب تعداد متغیرهای عدد صحیح مدل ریاضی و به دنبال آن زمان حل به اندازه‌ی قابل توجهی کاهش می‌یابد. گام‌های کلی الگوریتم دومرحله‌یی چندهدفه پیشنهادی به شرح زیر است:

مرحله‌ی (I):

گام ۱. ابتدا میانگین ظرفیت بیمارستان‌های موجود و نیز بیمارستان‌های جدید هر کدام به صورت جداگانه محاسبه می‌شود.

گام ۲. هر یک از بیمارستان‌های موجود که ظرفیت آنها از میانگین ظرفیت کل بیمارستان‌های موجود تعیین شده در گام ۱ بیشتر است، برای مقاوم‌سازی انتخاب و برای رتبه‌بندی بر اساس ظرفیت به گام ۴ منتقل می‌شود.

گام ۳. هر یک از بیمارستان‌های جدید که ظرفیت آنها از میانگین ظرفیت کل بیمارستان‌های جدید تعیین شده در گام ۱ بیشتر است، برای احداث انتخاب و برای رتبه‌بندی بر اساس ظرفیت به گام ۴ منتقل می‌شود.

گام ۴. بیمارستان‌های جدید و موجود انتخاب شده برای رتبه‌بندی در گام دوم و سوم، با یکدیگر وارد یک بردار می‌شوند و عناصر این بردار بر اساس ظرفیت بیمارستان مربوط رتبه‌بندی می‌شوند.

گام ۵. فرایند مکان‌یابی/مقاوم‌سازی بیمارستان‌های انتخاب شده در گام ۴ انجام می‌شود و این فرایند تا زمانی ادامه می‌یابد که مجموع هزینه‌های مکان‌یابی/مقاوم‌سازی بیمارستان‌های تعیین شده از میزان بودجه‌ی در دسترس تجاوز نکند.

مرحله‌ی (II):

گام ۶. بیمارستان‌های جدید انتخاب شده برای احداث به عنوان پارامتر ورودی و به صورت بردار صفر و یک وارد مدل ریاضی (FLHP) می‌شوند. (به این ترتیب، تعداد متغیرهای صفر و یک مدل به اندازه‌ی قابل توجهی کاهش می‌یابد.)

گام ۷. مدل ریاضی (FLHP) تقلیل یافته حل می‌شود و چگونگی تخصیص نقاط تقاضا به بیمارستان‌ها و میزان برآورده شدن آنها توسط هر یک از بیمارستان‌ها مشخص می‌شود.

۵. مطالعه‌ی موردی

استان یزد با ۷۶۴۶۹ کیلومتر مربع مساحت، هشتمین استان بزرگ کشور از نظر وسعت شناخته شده است و با توجه به موقعیت جغرافیایی و پیشرفت قابل توجه پزشکی آن، یکی از استان‌های پیشرو در زمینه‌ی ارائه‌ی خدمات پزشکی تخصصی و فوق‌تخصصی به بیماران شناخته می‌شود. علاوه بر این، ارزان بودن هزینه‌ی ارائه‌ی خدمات به بیماران و نیز همجواری این استان با استان‌های محروم جنوب و جنوب شرق کشور، منجر به افزایش چشمگیر تقاضا برای ارائه‌ی خدمات پزشکی و درمانی در این استان شده است. شهر یزد، مرکز این استان، دارای بیشترین فراوانی بیمارستان‌های تخصصی و فوق‌تخصصی است. شکل ۲ نقشه‌ی جغرافیایی بیمارستان‌های موجود شهر یزد را نشان می‌دهد.

۱.۵. فرایند مکان‌یابی نقاط بالقوه با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)

به منظور مکان‌یابی بیمارستان‌ها، ابتدا با استفاده از نظر خبرگان و متخصصان مربوط و نیز روش AHP، وزن معیارهای دارای اهمیت تعیین و در ادامه با به کارگیری نرم‌افزار GIS نقاط بالقوه شناسایی می‌شود و سپس این نقاط به عنوان نقاط ورودی مدل ریاضی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این پژوهش با بررسی و ارزیابی عامل‌ها و معیارهای لازم برای مکان‌یابی با به کارگیری نقشه‌های ۱:۵۰۰۰۰ شهر یزد، لایه‌های مورد نظر شامل معیارهای طبیعی همچون گسل و معیارهای انسانی مانند لایه‌ی دانشگاه‌ها، آتش‌نشانی‌ها، پارک‌ها، شریان‌های ارتباطی، تراکم جمعیت و پمپ‌های بنزین و گاز که مهم‌ترین شاخص‌های مکان‌یابی مراکز درمانی در شهر هستند، تهیه شده است.

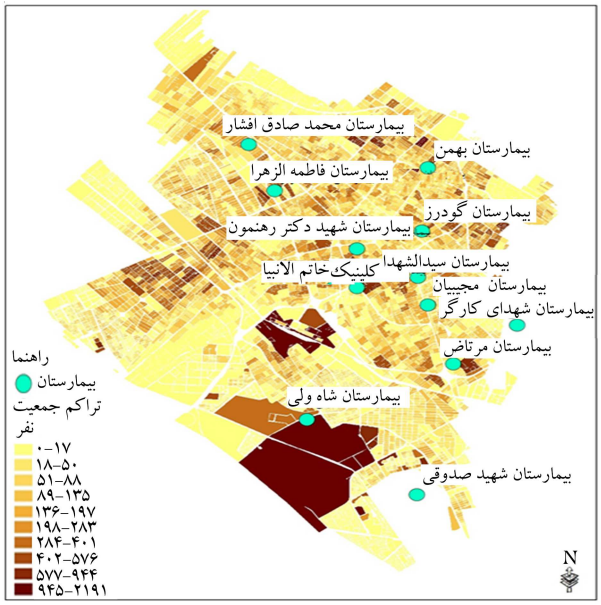
هر یک از لایه‌های تعیین شده سازگاری و ناسازگاری‌هایی با مکان‌یابی بیمارستان دارند. اندیشه و قواعد تعیین شده بر این اساس است که هرچه لایه‌هایی نظیر پارک‌ها، دانشگاه‌ها، آتش‌نشانی‌ها، تراکم جمعیتی و شریان‌های ارتباطی به بیمارستان نزدیک باشند، بهتر است و هرچه لایه‌هایی نظیر پمپ‌های گاز و بنزین و گسل‌ها از بیمارستان‌ها دورتر باشند، مطلوب‌تر است.[۲۵] به منظور تعیین وزن هر یک از معیارهای دارای اهمیت در بحث مکان‌یابی، نیاز به نظر متخصصان برای تعیین مقایسات زوجی معیارها با یکدیگر است که مقوله‌ی مهمی در روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) است. برای انجام مقایسات زوجی بین معیارها، پرسش‌نامه‌یی مناسب طراحی شده است. در طراحی این پرسش‌نامه، با متخصصان و افراد خبره‌ی برنامه‌ریزی شهری، ستاد مدیریت بحران و صاحب‌نظران جغرافیای شهری، بحث و مشورت و نظرسنجی شده است و معیارهای پر اهمیت در تعیین مکان‌های مناسب به منظور احداث بیمارستان تعیین شد. این معیارها شامل موارد ذکر شده در جدول ۱ است.

تعداد افراد خبره و صاحب‌نظر در این زمینه که نسبت به موضوع مورد مطالعه از دانش و آگاهی نسبتاً خوبی برخوردار بودند، برابر ۱۴ نفر شناسایی و پرسش‌نامه توسط آنها تکمیل شد. اطلاعات پرسش‌نامه‌های تکمیل شده، جمع‌بندی و برای تعیین وزن معیارها، وارد نرم‌افزار Expert Choice ۱۱/۰ شده است. وزن نهایی معیارها در نرم‌افزار یاد شده بر اساس روش میانگین هندسی محاسبه و استخراج شده است. نتایج نهایی در جدول ۱ آمده است.

همان طور که ملاحظه می‌شود معیار تراکم جمعیت و معیار معابر شهری (شریان) به ترتیب دارای بیشترین وزن نهایی‌اند. میانگین شاخص ناسازگاری به دست آمده برای پرسش‌نامه‌های تکمیل شده برابر ۰/۰۶ است که کمتر از مقدار ۰/۱۰ است و قابل قبول بودن نتایج را نشان می‌دهد.

در نرم‌افزار ArcMap اطلاعات مربوط به هر یک از معیارها به صورت لایه‌های مکانی تهیه می‌شود و مورد استفاده قرار می‌گیرد. وزن معیارها نیز در قسمت مربوط به وزن‌های لایه‌ها وارد نرم‌افزار می‌شوند و با انجام دستورات مربوط به هم‌پوشانی لایه‌ها بهترین مکان‌ها تعیین می‌شوند.[۲۶]

در نهایت تمام لایه‌ها وزن‌دار می‌شوند و بر اساس قواعد در نرم‌افزار ArcMap



شکل ۲. نقشه‌ی موقعیت جغرافیایی فعلی بیمارستان‌های شهر یزد.

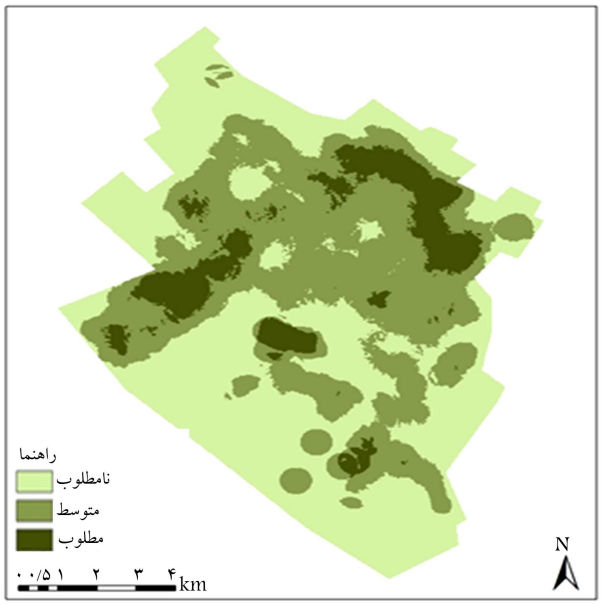
جدول ۱. معیارهای مکانی مؤثر لحاظ شده در مکان‌یابی بیمارستان‌ها و وزن آنها.

ردیف	معیار	وزن نهایی
۱	دوری از گسل	۰/۰۲۷
۲	معابر شهری (شریان)	۰/۲۲۲
۳	تراکم جمعیت	۰/۴۰۶
۴	دوری از پمپ گاز	۰/۰۵۴
۵	دوری از پمپ بنزین	۰/۰۵۳
۶	نزدیکی به دانشگاه	۰/۰۲۶
۷	نزدیکی به آتش نشانی	۰/۱۰۳
۸	نزدیکی به فضای سبز	۰/۱۰۹

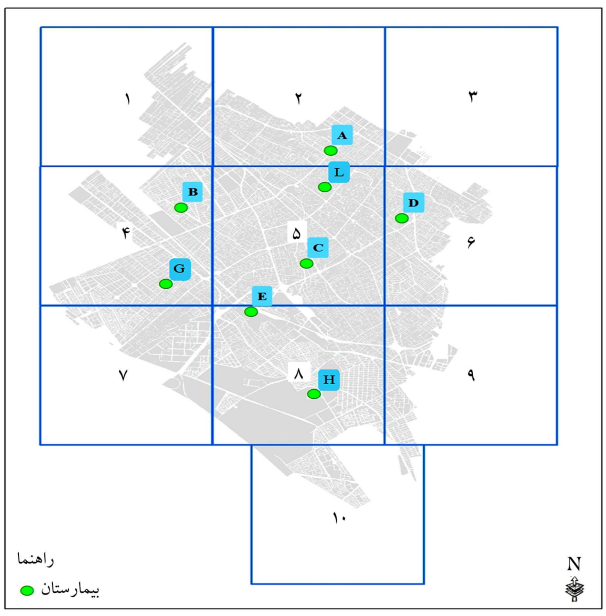
پیاده‌سازی و با بهره‌مندی از دستور Fuzzy Overlay پهنه‌بندی نهایی برای جانمایی بیمارستان در شهر یزد در شکل ۳ مشخص شده است.

به منظور میسرسازی انجام محاسبات و تجزیه و تحلیل‌ها همان طور که در شکل ۴ مشخص شده است، کلیه‌ی مناطق شهر یزد به ۱۰ حوزه تقسیم شده و اطلاعات مربوط به هرکدام از آنها جمع‌آوری و تهیه شده است.

جستجو در نواحی جغرافیایی، که براساس معیارهای کمّی و کیفی مطلوب توسط نرم‌افزار ArcMap مناسب تشخیص داده شده‌اند، برای انتخاب دقیق مکان‌های بالقوه انجام و محل دقیق مکان‌هایی که قابلیت استفاده به عنوان کاربری بیمارستان را دارند، به عنوان نقاط بالقوه تعیین می‌شوند. مثلاً، نواحی جغرافیایی مناسب در شکل ۳ و مکان‌های بالقوه انتخابی در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. مکان‌های A، B، C، D، E، G، H و L به ترتیب با شماره‌های ۱۳ تا ۲۰ در مدل ریاضی استفاده می‌شوند.



شکل ۳. پهنه‌بندی نهایی لایه‌های جغرافیایی.



شکل ۴. نقشه‌ی مکان‌های بالقوه پیشنهادی برای مکان‌یابی بیمارستان‌های جدید (نتایج حاصل از GIS).

۲.۵. ورود داده‌های حاصل از نرم‌افزار ArcMap و حل مدل ریاضی

برای حل مدل ریاضی، اطلاعات مربوط به جمعیت و مساحت هریک از حوزه‌های شهر یزد و فاصله‌ی هر یک از بیمارستان‌های موجود و همچنین مکان‌های بالقوه احداث بیمارستان تا حوزه‌های مختلف شهری جمع‌آوری شده و تقاضای هر حوزه با توجه به تجربه‌ی صاحب‌نظران و با توجه به جمعیت هر حوزه برآورد شده است.

ظرفیت بیمارستان‌های موجود بر اساس اطلاعات ذکر شده در وب‌سایت‌های مربوط استخراج شده است. همچنین، مقادیر مربوط به هزینه‌ی احداث بیمارستان جدید، هزینه‌ی مقاوم‌سازی بیمارستان موجود، ظرفیت‌های عادی مربوط به هرکدام از بیمارستان‌های جدید در مکان‌های بالقوه به ترتیب بر اساس توزیع‌های یکنواخت $U \sim [۱۰۰۰, ۵۰۰۰]$، $U \sim [۵۰۰, ۷۰۰]$ و $U \sim [۵۰, ۳۰۰]$ تولید شده‌اند. با توجه به این‌که در مسئله‌ی مورد بررسی، مکان‌یابی بیمارستان‌های جدید و مقاوم‌سازی بیمارستان‌های موجود صورت می‌گیرد و به منظور ورود اطلاعات مثال‌های انتخاب شده به این ترتیب عمل می‌شود که هزینه‌ی مکان‌یابی بیمارستان‌های موجود و هزینه‌ی مقاوم‌سازی بیمارستان‌های جدید برابر صفر در نظرگرفته می‌شود. همچنین مقدار مفروض برای بودجه برابر با ۱۵۰۰۰ واحد پولی و برای میانگین تقاضای کل در شرایط بحرانی برابر با ۲۰۰۰۰۰ نفر در نظرگرفته شده است.

جدول ۲ شش نقطه‌ی پارتو را که از حل مدل ریاضی با استفاده از روش محدودیت اپسیلون تقویت شده (II) به دست آمده است، نشان می‌دهد. ستون سوم نشان‌دهنده‌ی نقاطی است که بیمارستان در آن احداث می‌شود و ستون چهارم نشان‌دهنده‌ی بیمارستان‌هایی است که برای مقاوم‌سازی انتخاب شده‌اند.

۳.۵. تحلیل حساسیت پارامترهای مدل ریاضی

به ازای مقادیر مختلف بودجه و کمینه‌ی تعداد ازکار افتادگی بیمارستان‌ها، مدل اول (FLHP) حل شده و نتایج آن در جدول ۳ آمده است. همان طور که از نتایج مندرج در این جدول آشکار است، با افزایش بودجه، بیشینه‌ی فاصله کاهش یافته است. همچنین مشخص است که افزایش بودجه، فواصل بعد ازکار افتادگی را نیز تحت تأثیر قرار داده و کاهش می‌دهد.

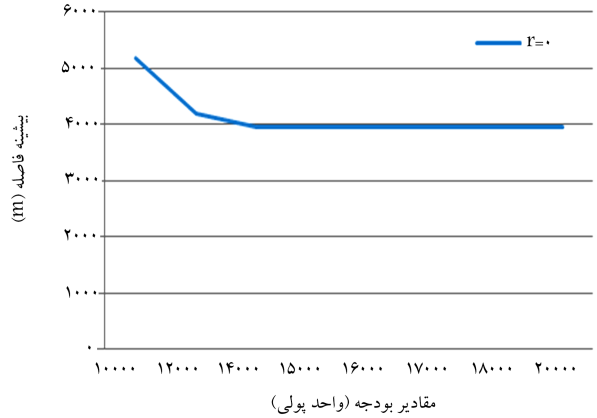
همان طور که در شکل ۵ مشخص است با فرض اینکه با وقوع حادثه حداقل صفر بیمارستان دچار ازکار افتادگی شود، با افزایش بودجه می‌توان بزرگترین فواصل را تا حد زیادی کاهش داد و از این طریق به پاسخگویی بهتر به متقاضیان خدمات

جدول ۲. نتایج حاصل از حل مدل (جبهه‌ی پارتو).

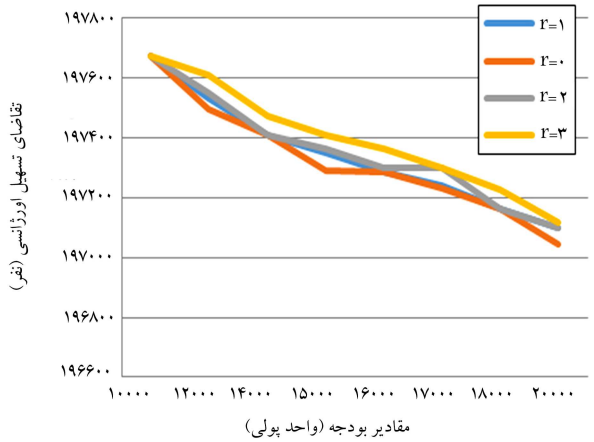
نقطه‌ی پارتو	تابع هدف		مکان‌های برگزیده برای	
	اول	دوم	استقرار	مقاوم‌سازی
۱	۳۶۲۰	۱۹۷۴۴۹	۱۳،۱۴،۱۸،۲۰	۱،۳،۶ ،۸
۲	۳۷۰۴	۱۹۷۳۲۸	۱۳،۱۴،۱۷،۲۰	۳،۶،۱۱
۳	۳۷۷۰	۱۹۷۱۷۹	۱۳،۱۴،۱۵،۱۶،۱۷	۳
۴	۳۹۵۸	۱۹۷۱۳۴	۱۳،۱۴،۱۶،۱۷،۲۰	-
۵	۳۹۶۰	۱۹۷۱۰۰	۱۳،۱۵،۱۶،۱۷،۲۰	۳
۶	۴۴۰۰	۱۹۷۰۵۵	۱۵،۱۶،۱۷،۱۹،۲۰	۲

جدول ۳. نتایج مرجح حل مدل به ازای مقادیر مختلف بودجه (b) و سناریو تعداد ازکار افتادگی (r) با روش محدودیت اپسیلون تقویت شده (II).

b	$r=0$		$r=1$		$r=2$		$r=3$		$r=4$		$r=5$	
	بیشینه‌ی فاصله	تقاضای تسهیل اورژانسی	بیشینه‌ی فاصله	تقاضای تسهیل اورژانسی	بیشینه‌ی فاصله	تقاضای تسهیل اورژانسی	بیشینه‌ی فاصله	تقاضای تسهیل اورژانسی	بیشینه‌ی فاصله	تقاضای تسهیل اورژانسی	بیشینه‌ی فاصله	تقاضای تسهیل اورژانسی
۱۰۰۰۰	۵۱۸۰	۱۹۷۶۷۲	۵۱۸۰	۱۹۷۶۷۲	۵۱۸۰	۱۹۷۶۷۲	۵۱۸۰	۱۹۷۶۷۲	۵۱۸۰	۱۹۷۷۵۸	۵۱۸۰	۱۹۷۸۵۵
۱۲۰۰۰	۴۱۸۰	۱۹۷۴۹۳	۴۴۰۰	۱۹۷۵۳۳	۴۱۸۰	۱۹۷۵۵۱	۴۱۸۰	۱۹۷۶۰۹	۵۱۲۰	۱۹۷۶۵۰	۴۴۰۰	۱۹۷۶۷۳
۱۴۰۰۰	۳۹۶۰	۱۹۷۴۰۹	۳۹۶۰	۱۹۷۴۰۹	۳۹۶۰	۱۹۷۴۰۹	۴۴۰۰	۱۹۷۴۷۱	۴۴۰۰	۱۹۷۵۱۲	۳۹۶۰	۱۹۷۶۱۰
۱۵۰۰۰	۳۹۶۰	۱۹۷۲۹۲	۳۹۶۰	۱۹۷۳۵۰	۳۹۶۰	۱۹۷۳۶۴	۳۹۶۰	۱۹۷۴۰۸	۴۴۰۰	۱۹۷۴۴۹	۳۹۶۰	۱۹۷۵۶۵
۱۶۰۰۰	۳۹۶۰	۱۹۷۲۸۷	۳۹۶۰	۱۹۷۲۸۷	۳۹۶۰	۱۹۷۳۰۱	۳۹۶۰	۱۹۷۳۶۳	۴۴۰۰	۱۹۷۴۰۴	۳۹۶۰	۱۹۷۵۰۲
۱۷۰۰۰	۳۹۶۰	۱۹۷۲۲۹	۳۹۶۰	۱۹۷۲۴۲	۳۹۶۰	۱۹۷۳۰۰	۳۹۶۰	۱۹۰۷۳۰۰	۴۴۰۰	۱۹۷۳۱۱	۴۴۰۰	۱۹۷۴۲۷
۱۸۰۰۰	۳۹۶۰	۱۹۷۱۶۳	۳۹۶۰	۱۹۷۱۶۳	۳۹۶۰	۱۹۷۱۶۳	۴۴۰۰	۱۹۷۲۲۵	۴۴۰۰	۱۹۷۳۱۱	۳۹۶۰	۱۹۷۳۶۴
۲۰۰۰۰	۳۹۶۰	۱۹۷۰۴۶	۳۹۶۰	۱۹۷۱۰۰	۳۹۶۰	۱۹۷۱۰۰	۴۴۰۰	۱۹۷۱۱۷	۴۴۰۰	۱۹۷۲۰۳	۳۹۵۸	۱۹۷۳۰۳



شکل ۵. بیشترین فاصله‌های موجود با مقادیر مختلف بودجه ($r=0$).



شکل ۶. تقاضای ارضا شده توسط تسهیل اورژانسی به ازای مقادیر مختلف بودجه و تعداد خرابی (r).

بیمارستانی پرداخت. بر این اساس بهترین میزان بودجه مقدار ۱۴۰۰۰ واحد پولی است که پس از آن با افزایش بودجه تغییری در میزان بیشترین فاصله ایجاد نخواهد شد. با توجه به اهمیت هر دو تابع هدف، باید این تحلیل برای تابع هدف دوم نیز صورت گیرد که در شکل ۶ نشان داده شده است.

شکل ۶ تغییرات تقاضای ارجاع داده شده به تسهیل اورژانسی به ازای مقادیر مختلف r را نشان می‌دهد. همان طور که در این شکل قابل مشاهده است، با افزایش بودجه، تقاضای ارسالی به تسهیل اورژانسی به میزان قابل توجهی کاهش خواهد یافت.

۴.۵. حل مدل و تجزیه و تحلیل

نتایج حاصل از حل مدل با الگوریتم‌های محدودیت اپسیلون تقویت شده (II) و نیز الگوریتم ابتکاری دومرحله‌یی چندهدفه را نشان می‌دهد. زمان حل و مقادیر توابع هدف نقاط پارتو به ازای حل این دو الگوریتم نشان می‌دهد که در ابعاد بزرگ نیز الگوریتم ابتکاری پیشنهادی از کارایی مطلوبی برخوردار است.

همان گونه که مشاهده می‌شود مقدار میانگین اختلاف زمان حل دو الگوریتم محدودیت اپسیلون تقویت‌شده (II) و الگوریتم ابتکاری دومرحله‌یی چندهدفه برابر ۲۶٫۸۶ درصد است؛ به عبارت دیگر، الگوریتم ابتکاری به طور متوسط فقط به ۲۶٫۸۶ درصد زمان حل الگوریتم محدودیت اپسیلون تقویت شده (II) نیاز دارد که این امر به معنای بهبود قابل توجه در زمان حل الگوریتم است. از طرف دیگر، با مقایسه‌ی مقدار میانگین توابع هدف می‌توان به این نتیجه دست یافت که توابع هدف اول و دوم فقط به ترتیب به اندازه‌ی ۰٫۵ و ۰٫۲ درصد از مقدار بهینه فاصله دارند. شاخص پراکندگی مورد مطالعه، انحراف معیار انتخاب شده است که یکی از مهم‌ترین معیارهای بررسی شاخص پراکندگی جواب‌ها به شمار می‌رود. همان طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود انحراف معیار اختلاف زمان حل برابر ۱۵٫۶۶ درصد است؛ در حالی‌که درصد تفاوت انحراف معیار توابع هدف اول و دوم در دو الگوریتم، فقط به ترتیب به اندازه‌ی ۰٫۶۹ و ۸٫۳۲ درصد است که این موضوع بیانگر پراکندگی مناسب در جواب‌های حاصل از الگوریتم ابتکاری است. در جمع‌بندی کلی می‌توان گفت که الگوریتم ابتکاری پیشنهادی چه از نظر زمان حل و چه از نظر کیفیت جواب از مطلوبیت لازم و قابل قبولی برخوردار است.

جدول ۴. مقایسه‌ی مقادیر هدف و زمان حل با دو الگوریتم حل.

شماره مسئله	(i,j)	روش اپسیلون تقویت شده (ε-augmecon2)			روش حل ابتکاری دومرحله‌یی دوهدفه			اختلاف زمان حل (٪)
		f_1	f_2	زمان (ثانیه)	f_1	f_2	زمان (ثانیه)	
۱	(۲۰،۱۰)	۳۹۶۰	۱۹۷۱۶۳	۱۲٫۷۸	۳۹۶۰	۱۹۷۱۶۳	۰٫۹۷	۷٫۵۹
۲	(۲۰،۱۰)	۳۹۶۰	۱۹۷۳۶۴	۲۳٫۹۵	۴۴۰۰	۱۹۷۵۳۹	۰٫۸۶	۳٫۵۹
۳	(۲۰،۱۰)	۵۱۸۰	۱۹۷۷۴۰	۴۴٫۹۱	۵۱۸۰	۱۹۸۲۱۷	۷٫۳۵	۱۶٫۳۷
۴	(۲۰،۱۰)	۵۱۸۰	۱۹۷۷۹۲	۱۷٫۶۶	۵۳۸۰	۱۹۷۹۶۷	۶٫۷۲	۳۸٫۰۵
۵	(۲۰،۱۰)	۵۳۸۰	۱۹۷۹۴۰	۱۶٫۳۰	۵۳۸۰	۱۹۸۲۵۹	۹٫۸۲	۶۰٫۲۵
۶	(۲۰،۱۵)	۴۰۸۸	۱۹۴۹۹۰	۳٫۷۲	۴۰۸۸	۱۹۴۹۹۰	۰٫۹۴	۲۵٫۲۷
۷	(۲۰،۱۵)	۴۰۸۸	۱۹۴۹۹۰	۳٫۶۴	۳۹۳۷	۱۹۵۸۸۴	۱٫۰	۲۷٫۴۷
۸	(۲۰،۱۵)	۳۹۳۷	۱۹۵۹۰۲	۴٫۳۷	۴۰۸۸	۱۹۵۸۰۴	۰٫۹۸	۲۲٫۴۳
۹	(۲۰،۱۵)	۴۷۲۳	۱۹۵۷۴۸	۴٫۱۷	۴۰۸۸	۱۹۶۶۰۱	۱٫۱۶	۲۷٫۸۲
۱۰	(۲۰،۱۵)	۴۸۵۹	۱۹۴۹۹۰	۵٫۴۸	۴۶۰۰	۱۹۵۹۹۸	۲٫۱۸	۳۹٫۷۸
میانگین		۴۵۳۵٫۵	۱۹۶۴۶۱٫۹	۱۳٫۷۰	۴۵۱۰٫۱	۱۹۶۸۴۲	۳٫۲۰	۲۶٫۸۶
انحراف معیار		۵۵۷٫۲۱	۱۱۹۲٫۲۸	۱۲٫۴۴	۵۶۱٫۰۷	۱۰۹۳٫۰۹	۳٫۲۲	۱۵٫۶۶

۶. نتیجه‌گیری

مسئله‌ی مورد بررسی به طور هم‌زمان شرایط بحران و عادی را مدنظر قرار داده و سعی داشته است که مکان بیمارستان‌های جدید و مقاوم‌سازی بیمارستان‌های موجود به گونه‌یی تعیین شود که با منابع مالی محدود در دست و ظرفیت‌های عادی و اضافه‌یی که در زمان بحران قابل استفاده است، کمترین فاصله‌ها را داشته باشد.

با در نظر گرفتن تصمیمات مقاوم‌سازی بیمارستان‌های موجود و مکان‌یابی بیمارستان‌های جدید به صورت هم‌زمان، فواصل بعد از از کار افتادگی نسبت به زمانی که مکان‌یابی بدون در نظرگرفتن ازکارافتادگی و مقاوم‌سازی انجام شود، کاهش می‌یابد و این امر می‌تواند گام مؤثری در مدیریت بحران باشد. ظرفیت بیمارستان‌ها در شرایط عادی و نیز وقوع بحران محدود است و در نظرگرفتن آن در مدل نتایج واقعی‌تری به دست می‌دهد.

با لحاظ کردن سناریوهای مختلف برای حالت بحران و در نتیجه پارامترهای تعداد از کار افتادگی و تقاضا بعد از از کار افتادگی می‌توان تصمیمات منطقی و مناسبی گرفت. همچنین مقایسه‌ی نتایج به ازای بودجه‌های مختلف می‌تواند در تصمیمات مربوط به تخصیص بودجه موجب ایجاد نتایج بهتری شود.

تابع هدف اول در مدل ریاضی ارائه شده در این تحقیق به دنبال کمینه کردن بیشترین فاصله است. با انتخاب ضریب عددی β به مقدار مورد نظر تصمیم‌گیرنده، فاصله‌ی بعد از از کار افتادگی از مقدار خاصی نسبت به فاصله‌ی قبل از از کار افتادگی تجاوز نخواهد کرد. به عبارتی یا بیمارستان جدید احداث می‌شود یا بیمارستان موجود مقاوم می‌شود که در این صورت بعد از حادثه سالم می‌ماند و به این ترتیب فاصله‌ی بعد و قبل از حادثه برابر خواهد بود؛ یا این‌که بیمارستان موجود مقاوم نمی‌شود و کارایی خود را در حادثه از دست می‌دهد و تقاضای تخصیص‌یافته به آن به بیمارستان‌های دیگر انتقال می‌یابد که در این صورت فاصله‌ی آن بیش از β برابر فاصله‌ی تخصیصی قبل از حادثه نخواهد شد.

به منظور تخصیص تقاضاهای ایجاد شده بعد از شرایط بحران و از کار افتادگی برخی از بیمارستان‌ها، در پژوهش حاضر، مدل دومی (DAL) ارائه شده است که در زمان وقوع بحران (زلزله) مورد استفاده قرار می‌گیرد. داده‌های ورودی این مدل ریاضی بیمارستان‌های در دسترس است که بعد از وقوع زلزله سالم مانده‌اند. همچنین، خروجی مدل ریاضی نحوه‌ی تخصیص تقاضاهای ایجاد شده بعد از بحران است. مدل ریاضی (DAL) یک مدل ریاضی خطی است که زمان حل آن بسیار ناچیز است.

برای پژوهش‌های آتی موارد زیر پیشنهاد می‌شود: (الف) در این مقاله مقاوم‌سازی به صورت صفر و یک در نظر گرفته شده است؛ به عبارت دیگر یک بیمارستان یا به صورت کامل مقاوم می‌شود و به هیچ‌وجه دچار از کار افتادگی نمی‌شود یا این‌که مقاوم‌سازی نمی‌شود و احتمال از کار افتادگی در آن وجود دارد، که می‌تواند به صورت پیوسته در نظر گرفته شود و برای هر بیمارستان درصدی از مقاوم‌سازی اعمال شود. (ب) علاوه بر این، رویکردهای پیش‌گیرانه‌ی دیگری نظیر استفاده از بیمارستان‌های صحرایی و موقتی نیز می‌تواند به مسئله و مدل ریاضی اضافه و بحث و بررسی شود. (ج) تقاضا در شرایط بحرانی در مدل بصورت غیرقطعی در نظر گرفته شده و به جای آن مقدار مورد انتظار تقاضا استفاده شده است. در پژوهش‌های آینده می‌توان پارامتر تقاضا بعنوان ورودی مدل را به صورت تابع توزیع احتمالی مورد بررسی قرار داد.

پانوشت‌ها

1.)Demand Allocation (DAL)(

2. augmecon2

منابع (References)

1. Khanke, H. "Hospital preparedness in accidents and disasters, country program", *University of Social Welfare and Rehabilitation Sciences*, **3**, pp.15-24 (In Persian) (2012).
2. Eskandari, M., Seyf, A. and Heshmati, V. "Hospital readiness to deal with an earthquake", *6th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering*, pp.34-41, Tehran, Iran (2011).
3. Najjar, Esmaeel, "Undersecretary of State and Head of Crisis Organization", *Khorasan News Agency-Informatine*, Webda.mums.ac.ir (2013) .
4. "Kermanshah earthquake and catastrophe called new buildings", Alef news agency, November, 16, 2017, at http://www.alef.ir/news/3960825186.html.
5. "Destruction of Sarpol Zahab Hospital / Disruption of electricity and water in some parts of Kermanshah province", Mehr news agency, November, 13, 2017, at https://www.mehrnews.com/news/4142566.
6. Paul, J. and Batta, R. "Models for hospital location and capacity allocation for an area prone to natural disasters", *International journal of operational research*, **3**(5), pp. 473-496 (2006).
7. Poorahmad, A., Ashlagy, M., Ahar, H. and et al. "The location hospitals using fuzzy logic combining AHP and TOPSIS environment ARCGIS", *Geography and Environmental Planning Journal*, **25**(2), pp. 1-24. (In Persian) (2014).
8. Arkat, J. and Zamani, S. "The problem of locating health centers with the assumption of overcrowding in crisis situations", *10th International Industrial Engineering Conference*, pp.85-93 (In Persian) (2014).
9. Mestre, Am., Oliveira, MD. and Barbosa Póvoa, AP. "Location-allocation approaches for hospital network planning under uncertainty", *European Journal of Operational Research*, **240**(3), pp. 791-806 (2015).
10. Masi, A., Santarsiero, G. and Chiauzzi, L. "Development of a seismic risk mitigation methodology for public buildings applied to the hospitals of Basilicata region (Southern Italy)", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **65**, pp. 30-42 (2014).
11. Miniati, R., Capone, P. and Dietrich, H. "Decision support system for rapid seismic risk mitigation of hospital systems. Comparison between models and countries",*International Journal of Disaster Risk Reduction*, **9**, pp. 12-25 (2014).
12. A. "Reliable facility location Li, Q., Zeng, B. and Savachkin, design under disruptions", *Computers & Operations Research*, **40**, pp. 901-909 (2013).
13. Abdollahi, G., Nastaran, M., Mokhtarzadeh, S. and et al. "Zoning of Tehran city in order to establish hospitals in normal and crisis circumstances (earthquake)", *Scientific Journal of Rescue & Relief*, **14**, pp. 1-15. (In Persian) (2012).
14. Ziyari, Y. and Khatibzade, F. "Integrating AHP model and analyze network in GIS Environment for locating of remedial control (hospital) (case study of semnan)", *Urban Management*, **29**, pp. 247-258. (In Persian) (2012).
15. Medal, R., Pohl, A. and Rossetti, D. "A multi-objective integrated facility location-hardening model: analyzing the pre- and post-disruption tradeoff", *European Journal of Operational Research*, **237**, pp. 257-270 (2014).
16. and Jabalameli, M.S. "A reliable Shishebori, D., Snyder, L.V. budget-constrained facility location/network design problem with unreliable facilities", *Networks and Spatial Economics*, **14**3-4, pp. 549-580 (2014).
17. Aliakbarian, N., Dehghanian, F. and Salari, M. "A bi-level programming model for protection of hierarchical facilities under imminent attacks", *Computers & Operations Research*, **64**, pp. 210-224 (2015).
18. Mir Hassani, S. A. and Hooshmand Khaligh, F. "Stochastic Programming" Amirkabir University of Thechnology. (In Persian) (2016).
19. Williams, H. P. "Model building in mathematical programming", *John Wiley & Sons* (2013).
20. Gãlvao, R. D., Espejo, L.G.A. and Boffey, B. "A comparison of Lagrangean and surrogate relaxations for the maximal covering location problem", *European Journal of Operational Research*, **124**(2), pp. 377-389 (2000).
21. Tavakkoli Moghaddam, R., Alinaghian, M., Norouzi, N. and et al. "Solving a new vehicle routing problem considering safety in hazardous materials transportation: a real-case study", *Journal of Transportation Engineering*, **3**, pp. 223-238 (In Persian) (2012).
22. Mavrotas, G. "Effective implementation of theε-constraint method in multi-objective mathematical programming problems", *Applied mathematics and computation*, **213**(2), pp. 455-465 (2009).
23. Mavrotas, G. and Florios, K ."An improved version of the augmented -constraint method (AUGMECON2) for finding the exact pareto set in multi-objective integer programming problems", *Applied Mathematics and Computation*, **219**(18), pp. 9652-9669 (2013).
24. Shishebori, D., Karimi-Nasab, M. and Snyder, L. V. "A two-phase heuristic algorithm for designing reliable capacitated logistics networks under disruptions", *European Journal of Industrial Engineering*, **11**(4), pp. 425-468 (2017).
25. Asakereh, A., Soleymani, M. and Sheikhdavoodi, M. J. "A GIS-based Fuzzy-AHP method for the evaluation of solar farms locations: Case study in Khuzestan province, Iran", *Solar Energy*, **155**, pp. 342-353 (2017).
26. Jafari, H.R. and Karimi, S. "Site selection for the establishment of industrial sites in qom province; using GIS", *Journal of Environmental Studies*, **37**, pp. 45-52. (In Persian) (2005).