مسأله مکان‌یابی- مقاوم‌سازی بیمارستان‌ها با منابع محدود در شرایط بحران و ازکارافتادگی تسهیلات

سعیده ساریخانی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه یزد، یزد، ایران

داود شیشه بری (مسئول مکاتبات)، استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه یزد، یزد، ایران

E-mail: shishebori@yazd.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۶/۰۸/۲۵ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۰۹

چکیده:

امروزه کاهش همزمان هزینه‌های مکان‌یابی و نیز هزینه‌های حمل و نقل در استقرار امکانات و تسهیلات شهری از اهمیت حساس و قابل توجهی برخوردار است. این موضوع زمانی حساسیت فوق‌العاده‌ای پیدا می‌کند که منطقه مورد بررسی در شرایط بحران قرار گرفته و عبور و مرور وسایل نقلیه و حمل و نقل‌های اجتناب‌ناپذیر در آن شرایط بسیار سخت و دشوار بوده و ممکن است خسارت‌های مالی و جانی جبران ناپذیری را در پی داشته باشد. در این مقاله، یک مدل یکپارچه مکان‌یابی - مقاوم‌سازی معرفی شده که با درنظر گرفتن شرایط بحران و ازکارافتادگی تسهیلات، مکان‌های مناسب جهت استقرار بیمارستان‌های جدید را تعیین و به طور همزمان تعدادی از بیمارستان‌های موجود را جهت مقاوم‌سازی انتخاب می‌نماید. با توجه به بودجه در دست، تقاضای نقاط مختلف و پیش‌بینی‌های صورت گرفته در مورد شرایط بحران، تصمیمات مکان‌یابی بیمارستان‌های جدید و مقاوم‌سازی بیمارستان‌های موجود به صورت بهینه تعیین می‌شود. با توجه به اهمیت زمان در ارائه خدمات بیمارستانی اورژانسی، یکی از اهداف مدل، کمینه‌سازی بیشترین فاصله‌های تخصیص یافته است. هدف دیگر کمینه کردن تعداد تقاضاهایی است که در زمان بحران، به مکانی خارج از محدوده مورد نظر مانند شهرهای اطراف انتقال داده می‌شوند. با توجه به دوهدفه بودن مدل، روش محدودیت اپسیلون و نرم افزار GAMS 24.1.2 استفاده شده است. با توجه به امکان به‌کارگیری مدل در مسائل کاربردی و عملیاتی با ابعاد بزرگ و همچنین NP-Hard بودن مدل، الگوریتم فراابتکاری NSGA-II به کار گرفته شده و کارایی رویکرد پیشنهادی مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم فراابتکاری NSGA-II، بیمارستان، مدیریت بحران، محدودیت اپسیلون، مقاوم‌سازی، مکان‌یابی.

۱. مقدمه

عدم قطعیت‌ها در یک سیستم خدمت‌دهی ممکن است بر اثر حوادث طبیعی، عوامل فنی یا انسانی و... بوجود بیایند، که این عدم قطعیت‌ها بر مراکز خدمت‌دهی و عملکرد آن‌ها تأثیر می‌گذارند. با بروز حوادث ناگهانی، ممکن است تسهیلات دچار اختلال شوند و در پی آن خدمت‌رسانی تسهیلات به صورت مؤثر انجام نشود. علاوه بر این ممکن است در اثر شرایط بحرانی نظیر وقوع زلزله، جاری شدن سیل، گردبادهای سهمگین و به دنبال آن از کارافتادگی تسهیلات در دسترس، هزینه‌های حمل و نقل شهری، انتقال کالاها و خدمات اضطراری و نیز انتقال مصدومان به مراکز خدماتی درمانی همجوار افزایش قابل توجهی را در پی داشته باشد. برای کاهش ریسک ناشی از خرابی تسهیلات روش‌های متعددی پیشنهاد شده است. روش اول اینکه مکان‌یابی به شکلی صورت گیرد که در برابر اختلال تسهیلات، کمترین میزان ممکن ریسک را داشته باشیم، یا روش دوم اینکه برای مقاوم‌سازی تعدادی از تسهیلات تصمیم‌گیری شود و یا به عنوان روش سوم ممکن است تصمیمات مربوط به مکان‌یابی و مقاوم‌سازی به صورت همزمان گرفته شود.

مراکز درمانی و بیمارستان‌ها که به عنوان مراکز حیاتی در زمان وقوع حوادث طبیعی به شمار می‌روند، ممکن است تحت تأثیر حوادث مذکور دچار اختلال شده و در نتیجه‌منجر به خسارات جانی و مالی زیادی شوند.

در زلزله بم در سال ۱۳۸۲ که به بزرگی ٦,٥ ریشتر بود، کلیه بیمارستان‌های منطقه زلزله‌دیده، عملکرد خود را از دست دادند و در هفته اول وقوع زلزله حدود ۱۰٤۳۲ بیمار در ۲٤ بیمارستان از ٤ شهر بزرگ کشور پذیرش شدند که حداقل تعداد کل موارد عدم پذیرش به علت نبودن تخت کافی ٦٤٦ مورد بوده است[Hatam Abadi, 2006; Eskandari et al. 2011].

در زلزله‌ی آذربایجان شرقی که به بزرگی ٦,۲ ریشتر بود، برای رسیدگی به مصدومان زلزله به دلیل عدم وجود تعداد کافی بیمارستان سالم، مصدومان به شهرهای اطراف منتقل شدند و با این حال به علت ظرفیت محدود بیمارستان‌های شهرهای اطراف مجبور به انتقال برخی مصدومان به شهرهای دورتر شدند که این امر موجب تأخیر در رسیدگی و بهبودشان شده و منجر به تلفات جانی شد [Sabouhi and Bozorgi Amiri, 2017].

در زلزله کرمانشاه به بزرگی ۷/۳ ریشتر در ۲۱ آبان ۱۳۹٦ دست¬کم دو بیمارستان تازه تاسیس دچار خرابی های متعددی شده که آنها را غیر قابل استفاده نمود. عدم مقاوم بودن این بیمارستان‌های تازه تاسیس و ناتوانی در پاسخ¬گویی به مصدومان منجر به انتقال آنها به مراکز درمانی دورتر شد [Mehr Agency, Oct. 2017]. موضوعی که در این زلزله جای سوال داشت این بود که ساختمان بیمارستان‌های تازه تاسیس شهرستان سرپل ذهاب که کمتر از یکسال از افتتاح آن می‌گذشت و بیمارستان معین برای مناطق زلزله زده محسوب می¬شد به نحوی دچار خسارت شد که امکان خدمت رسانی درمانی به بیماران و مصدومان اعزامی از شهرستان‌های سرپل ذهاب، دالاهو، گیلان غرب و قصر شیرین برای کادر درمانی به درستی میسر نگردید و ناگزیر تخت‌های بیمارستان به داخل حیاط منتقل و بیماران بستری شده نیز از بیمارستان خارج شدند که این امر علاوه بر این که خدمت رسانی کادر درمانی را با مشکلات زیادی مواجه کرد، باعث تشدید صدمات مصدومین اعزامی از شهرهای زلزله زده شد.

در صورت وقوع حادثه، ممکن است برخی بیمارستان‌ها دچار آسیب شوند، و ارائه خدمات توسط آن‌ها ممکن نباشد. برای اینکه بیماران و یا مصدومانی که به دلیل خرابی و یا تکمیل ظرفیت بیمارستانی که در نزدیکی آن‌ها بوده است، به بیمارستان‌های دیگر اعزام می‌شوند، در کمترین فاصله ممکن به بیمارستان سالم و با ظرفیت کافی برسند، بهتر است تصمیمات مکان‌یابی و مقاوم‌سازی به صورت همزمان گرفته شود، و برای

اینکه در صورت وقوع حادثه، و به دنبال آن اختلال در واحدها و افزایش تقاضا، با کمبود ظرفیت مواجه نشویم، توجه به ظرفیت‌های بیمارستانی در تصمیمات مکان‌یابی- مقاوم‌سازی اهمیت دارد.

تاکنون به منظور مدیریت بخشی از بحران ناشی از حوادث طبیعی بخصوص زلزله، تصمیماتی برای مقاوم‌سازی و احداث بیمارستان‌ها و مراکز درمانی از سوی سازمان‌های مختلف گرفته شده است اما اینکه در این تصمیم‌گیری‌ها انتخاب مکان مراکز با ظرفیت‌های مشخص و مقاوم‌سازی برخی از این مراکز به طور همزمان به گونه‌ای باشد که کمترین هزینه و کمترین فاصله ممکن را در شرایط عادی و بحرانی داشته باشد، مهم و اساسی است که بر اساس آخرین اطلاع نویسندگان، تاکنون تحقیق و مطالعه‌ای در این زمینه انجام نشده است.

تصمیمات مکان‌یابی و مقاوم‌سازی بیمارستان‌ها، به عنوان مراکز مهم و حیاتی به خصوص بعد از وقوع حادثه، با ظرفیت‌های مشخص، با توجه به نیاز و تقاضای پیش‌بینی شده برای خدمات بیمارستان‌ها باید مدبرانه تعیین شود.

در ارائه خدمات بیمارستانی، برخی بیماران به معالجه فوری نیاز دارند و در این موارد فاصله فرد تا بیمارستان اهمیت ویژه‌ای دارد. مکان بیمارستان‌ها بایستی به گونه‌ای تعیین شود که تمامی نقاط را پوشش داده و کمترین فاصله‌های ممکن را تا نقاط تقاضا داشته باشند. بنابراین مساله مورد بررسی در پژوهش پیش رو یک مساله مکان‌یابی- مقاوم‌سازی با ظرفیت محدود است.

از نتایج حاصل از این پژوهش می‌توان برای تصمیم‌گیری در مورد مکان بیمارستان‌ها، مراکز درمانی، مراکز اورژانس و امداد و نجات، پناهگاه‌های جنگی و غیره، و همچنین تصمیمات مقاوم‌سازی آن‌ها استفاده کرد. به‌نظر می‌رسد که نتایج حاصل، در تصمیمات مربوط به مدیریت بحران مفید و کاربردی است و می‌تواند برای اهداف بشر دوستانه مورد استفاده قرار بگیرد.

۲. مرور ادبیات موضوع

مطالعاتی که مورد بررسی قرار گرفته‌اند، به طور کلی شامل مطالعاتی هستند که به مکان‌یابی، مقاوم‌سازی و یا هر دو موضوع پرداخته‌اند. برخی از این مطالعات مربوط به مراکز اورژانسی مثل بیمارستان و مراکز امداد و نجات هستند، و برخی در مورد سیستم‌های توزیع مطالعه انجام داده‌اند که قابل تعمیم به انواع دیگر تسهیلات مثل بیمارستان نیز هستند. در ادامه، مطالعات مذکور دسته‌بندی شده و هر یک به تفصیل تشریح می‌شود.

الف) مکان‌یابی مراکز بهداشتی - درمانی

پاول و باتا [Paul and Batta, 2006] در پژوهشی به ارائه دو مدل پرداختند که مدل اول برای مکان‌یابی بیمارستان‌ها و مدل دوم برای تخصیص ظرفیت بعد از وقوع حادثه است. در پژوهش مذکور در صورت تکمیل ظرفیت، امکان انتقال به بیمارستان‌های دیگر وجود دارد. اما هیچ تصمیمی در خصوص مقاوم‌سازی بیمارستان قابل اتخاذ نیست.

پوراحمد و همکاران [PoorAhmad et al. 2011] در مطالعه‌ای با درنظر گرفتن عوامل مختلف مکان‌های بهینه را به گونه‌ای که احتمال آسیب دیدن بیمارستان در زمان بروز حوادث کم باشد، شناسایی کردند. در مطالعه مذکور تخصیص ظرفیت صورت نگرفته است.

مستر و همکاران [Mestre et al. 2015]، دو مدل مکان‌یابی- تخصیص برای کنترل عدم قطعیت در برنامه‌ریزی استراتژیک شبکه‌های بیمارستان پیشنهاد دادند. مدل اول، تصمیمات مکان‌یابی و مدل دوم، تصمیمات مکان‌یابی-تخصیص را به عنوان سطح یک تصمیم‌گیری فرض کرده است. در مطالعه مذکور حالت بحرانی یک سناریو فرض شده است.

ب) مقاوم‌سازی مراکز با درنظر گرفتن ازکارافتادگی تسهیلات

نوتی و ونزی [Nuti and Vanzi, 1998] در مطالعه‌ای که انجام دادند، به ارزیابی دسترس‌پذیری بیمارستان بعد از زلزله

پرداختند، همچنین مکان و سایر عوامل مؤثر در دسترس‌پذیری را مورد مطالعه قرار داده و رابطه بین جمعیت و مکان بیمارستان و دسترس‌پذیری بیمارستان را با مفروض نمودن ظرفیت محدود بیمارستان‌ها نشان داده‌اند. این پژوهش صرفا دسترس‌پذیری بیمارستان‌های موجود را ارزیابی کرده و پیشنهادی برای تصمیم‌گیری در مورد احداث یا مقاوم‌سازی بیمارستان‌ها ندارد.

برمن و همکاران [Berman et al. 2013] در مقاله خود تأثیر اهداف مختلف و همچنین خرابی های مرتبط را بر الگوهای مکان‌یابی بهینه بررسی نمودند. در واقع آن دسته از مسائل مکان-یابی که در آن تسهیلات کاملا قابل اطمینان نیستند و ازکارافتادگی تسهیل ممکن است اتفاق بیفتد را مورد مطالعه قرار دادند. شیشه‌بری و همکاران [Shishebori et al. 2014] در مقاله‌ای با در نظر گرفتن ازکارافتادگی تسهیلات، مکان تسهیلات و شبکه را طوری طراحی نمودند که در مجموع قابلیت اطمینان تسهیلات افزایش یابد. در مطالعه‌ای که مسی و همکاران [Masi et al. 2014] انجام دادند به توسعه روش کاهش ریسک زمین‌لرزه برای ساختمان‌های عمومی‌پرداختند که برای بیمارستان‌ها نیز قابل بکارگیری است. در مدل ارائه شده در این پژوهش ظرفیت و تقاضا بعد از وقوع زلزله بررسی شده و با توجه به هزینه‌های مقاوم‌سازی به تعیین استراتژی مقاوم‌سازی بیمارستان‌ها پرداخته شده است. اما تصمیمی در مورد مکان‌یابی بیمارستان‌های جدید نگرفته است. بلکه برای مقاوم‌سازی بیمارستان‌ها تصمیم‌گیری می‌کند. مینیاتی و همکاران [Miniati et al. 2014] توسعه یک سیستم پشتیبانی برای تصمیم‌گیری به منظور کاهش اثرات منفی زمین‌لرزه 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. چن و یو [Chen and Yu., 2016] به ارائه مدلی جهت برنامه‌ریزی پس از ازکارافتادگی مراکز اورژانس پرداختند. در این مدل بر مکان‌یابی و یافتن شبکه مناسب حمل و نقل این مراکز تمرکز شده است و هدف بهبود اثربخشی مراکز اورژانس بعد از وقوع حادثه است. قابل ذکر است که مدل ریاضی ارائه شده توسط آن‌ها تک‌هدفه بوده و ظرفیت مراکز نیز در نظر گرفته شده است. اویانگ [Ouyang, 2016] سیستم‌های زیربنایی را که در منطقه وسیعی توزیع می شوند را مورد بررسی قرار دادند. ایشان در مدل خود ازکارافتادگی تسهیلات را در نظر گرفتند و تنها با تعیین مکان بهینه سعی در کاهش تأثیرپذیری تسهیلات از حملات ممکن دارند. بونمه و همکاران [Boonme et al. 2017] در مقاله خود به ارائه مدل مکان‌یابی تسهیلات در لجستیک اورژانسی بشردوستانه پرداخته و جهت مکان‌یابی تسهیلات شرایط قبل و بعد از فاجعه را بررسی کرده اند. ایشان چهار مدل قطعی، تصادفی، پویا، و استوار را در این جهت ارائه دادند.

ج) مکان‌یابی – مقاوم‌سازی همزمان تسهیلات

اکسن و ارس [Aksen and Aras, 2012] در پژوهشی که انجام دادند، یک مدل دو سطحی مکان‌یابی برای تسهیلات در معرض حمله ناگهانی ارائه دادند. در این مقاله تصمیمات مکان‌یابی– محافظت تسهیلات را مورد مطالعه قرار دادند. لی و همکاران [Li et al. 2013] در یک مقاله، ریسک ناشی از خرابی‌های پیش‌بینی نشده را در شبکه‌های توزیع مورد مطالعه قرار دادند و اثر مقاوم‌سازی تسهیلات بر پایایی شبکه توزیع را بررسی نمودند. آنها یک مساله مکان‌یابیp–میانگین[1]پایا و یک مساله مکان‌یابی پایای شارژ ثابت را بدون محدودیت ظرفیت مدل‌سازی نموده‌اند. در هر دو مدل برای خرابی تسهیلات، احتمال مشخصی را درنظر گرفته‌اند که مستقل فرض شده‌اند. همچنین در این مساله، فرض بر آن است که در صورتی که تسهیلی مقاوم شود، کاملا پایا است. هرناندز و همکاران [Hernandez et al. 2014] در مطالعه خود با محوریت مکان‌یابی استوار، با در نظر گرفتن خرابی تسهیلات، و با هدف اینکه مجموع فواصل را قبل و بعد از خرابی و همچنین تعداد تسهیلات باز شده را به حداقل برسانند، به مکان‌یابی بهینه پرداخته‌اند. برای تسهیلات محدودیت ظرفیتی فرض نشده است

و تصمیمی برای مقاوم‌سازی گرفته نشده است. مدال و همکاران [Medal et al. 2014] در پژوهشی به ارائه مدل یکپارچه ای برای تصمیم‌گیری در مورد مکان‌یابی مراکز توزیع و مقاوم‌سازی زیر مجموعه‌ای از آن‌ها پرداختند. در مطالعه مذکور، ظرفیت مراکز نامحدود در نظر گرفته شده است شده است. علی‌اکبریان و همکاران [Aliakbarian et al. 2015] مساله مکان‌یابی r-ممنوع میانگین[۲]را برای تسهیلات سلسله مراتبی توسعه دادند، به گونه‌ای که بهترین راه محافظت تسهیلات در هر سطح، برای مقابله با بدترین مورد خرابی، انتخاب شود. مدلی که در پژوهش خود ارائه نمودند، یک مدل دوسطحی است، بنابراین برای خدمات پزشکی که برخی مراجعین به خدمات کلینیکی نیاز دارند و برخی باید به بیمارستان ارجاع داده شوند، مناسب است. اما آنها در مطالعه‌شان محدودیت بودجه و ظرفیت را در نظر نگرفته‌اند. مطالعات پراکنده دیگری نیز در زمینه مکان‌یابی تسهیلات در شرایط بحران با فرضیات ویژه‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است که جهت مطالعه بیشتر می‌توان به مراجع [Beheshtinia and Ghasemi, 2018]، [Beheshtinia et al. 2018]، [Cheraghi and Hosseini-Motlagh, 2017] و [Hosseini-Motlagh, 2015 and Jokar] مراجعه نمود.

د) شکاف‌های تحقیقاتی و نوآوری پژوهش

در مطالعات بررسی شده، برخی محققان به ارائه مدل‌هایی برای مکان‌یابی بیمارستان‌ها پرداخته و برخی ظرفیت را محدود و برخی دیگر نامحدود فرض کرده‌اند. همچنین مطالعاتی نیز مقاومت بیمارستان‌ها را مورد توجه داشته‌اند، به عنوان مثال، به بررسی عملکرد بیمارستان‌ها پرداخته و مقاومت را به عنوان عاملی که بر عملکرد بیمارستان در زمان حادثه اثرگذار است، در نظر گرفته‌اند. برخی با درنظر گرفتن ازکارافتادگی تسهیلات به فواصل بعد از خرابی نیز توجه نموده و با توجه به فواصل قبل و بعد از خرابی بهترین مکان را انتخاب نموده‌اند. به طور کلی می‌توان گفت که در هیچ یک از مطالعات بررسی شده، مقاوم سازی، مکان‌یابی، و ظرفیت‌های محدود تسهیلات و به طور خاص بیمارستان‌ها، به طور همزمان در نظر گرفته نشده‌اند. در تحقیق پیش رو به دنبال ارائه مدلی هستیم که با در نظر گرفتن ظرفیت مشخص برای بیمارستان‌ها، در مورد تعیین مکان‌یابی بیمارستان‌های جدید و مقاوم‌سازی بیمارستان‌های موجود تصمیم‌گیری شود.

۳. تعریف مسأله

مسأله مورد بحث در این پژوهش، به این صورت قابل تعریف می‌باشد: مکان‌یابی بیمارستان‌های جدید و مقاوم‌سازی بیمارستان‌های موجود، در تعدادی از مکان‌های بالقوه بایستی به‌گونه‌ای انجام شود، که ظرفیت کافی برای ارضای تقاضا وجود داشته باشد و تخصیص ظرفیت‌های محدود این بیمارستان‌ها به مناطق مختلف شهر نیز باید به گونه‌ای صورت بگیرد که علاوه بر اینکه در شرایط عادی دچار کمبود ظرفیت نشویم بلکه در شرایط بحرانی وقوع حادثه نیز، با ظرفیت‌های اضافه‌ای که هر یک از بیمارستان‌های مستقر شده می‌توانند ایجاد کنند، و همچنین درنظر گرفتن مکانی جهت انتقال بیماران درصورت مواجهه با کمبود ظرفیت در شرایط بحرانی، قادر به پاسخ گویی به تقاضاهای بوجود آمده باشیم.

در این پژوهش به دنبال ارائه مدلی برای مکان‌یابی بیمارستان‌های جدید و مقاوم‌سازی بیمارستان‌های موجود هستیم، به گونه‌ای که با توجه به میزان بودجه‌ی در اختیار بتوان تقاضاهای موجود را ارضا نموده 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 بخصوص در مواقع بحرانی بعد از حادثه‌ای مانند زلزله کاهش داد.

از طرفی در شرایط بحران ممکن است تقاضا به گونه‌ای افزایش یابد که ظرفیت‌های اضافه بیمارستان‌ها نیز پاسخگوی متقاضیان نباشد. در این شرایط معمولا مصدومان به شهرهای اطراف منتقل

می‌شوند، که هم از نظر هزینه انتقال و هم بوجود آمدن شرایط نامناسب برای بیمار شرایط نامساعدی را ایجاد می‌نماید که سعی در کاهش آن داریم.

بنابراین مدل با دو هدف کمینه‌سازی بیشترین فاصله بیمارستان‌ها تا نقاط تقاضای تخصیص یافته به بیمارستان و کمینه‌سازی تقاضای برآورده نشده در شرایط بحرانی ارائه می‌شود.

اندیس‌ها و مجموعه‌ها:

I_1: مجموعه مکان‌های بالقوه بیمارستان

I_2: مجموعه مکان‌های بیمارستان‌های موجود

I: مجموعه مکان‌های بالقوه و موجود بیمارستان‌ها (I_1, $I_2 \subset I$)

J: مجموعه نقاط تقاضا

$i \approx ip \in I$

$j \approx jp \in J$

پارامترها:

φ_{ij} : فاصله بین نقطه تقاضای j و محل بیمارستان i

g_i: هزینه مقاوم‌سازی بیمارستان i

f_i: هزینه استقرار بیمارستان i

c_i: ظرفیت بیمارستان i در زمان عادی

c'_i: ظرفیت بیمارستان i در زمان بحران

M: مقدار بزرگ

b: بودجه در دست

d_j: تقاضای نقطه j در زمان عادی

d': مجموع تقاضا در زمان بحران (پارامتر غیرقطعی با میانگین و انحراف معیار $m_{d'}$ و $\sigma_{d'}$)

β: ضریب تعیین کننده حداکثر فاصله قابل قبول نقطه تقاضا تا بیمارستان در شرایط بحران

N: عدد بزرگ

متغیرها:

متغیرهای صفر و یک:

w_{ij}: اگر نقطه تقاضای j به بیمارستان i تخصیص یابد برابر با ۱، در غیر این صورت ۰

x_i: اگر استقرار بیمارستان در مکان i صورت گیرد برابر با ۱، در غیر این صورت ۰

m_i: اگر مقاوم سازی بیمارستان i انجام شود برابر با ۱، در غیر این صورت ۰

متغیر پیوسته:

O_{ij} : میزان تقاضای نقطه ی j که توسط بیمارستان i براورده می‌شود.

توابع هدف و محدودیت‌های مدل ریاضی:

در این پژوهش قصد مکان‌یابی تعدادی بیمارستان‌ها و یا مراکز اورژانس جدید در میان تعدادی از نقاط بالقوه را داریم. تخصیص تقاضا به این بیمارستان‌ها بایستی به گونه‌ای انجام شود که پوشش کامل تقاضا صورت گرفته و کمترین فواصل پیموده شوند. از طرفی به دنبال این هستیم که در شرایط بحرانی، که تقاضا افزایش یافته و ممکن است بیمارستان‌های مقاوم نشده دچار ازکارافتادگی شوند، کمترین میزان انتقال متقاضیان به بیمارستان‌های شهرهای اطراف را داشته باشیم. در صورت ازکارافتادگی یک بیمارستان، بایستی حداقل یک بیمارستان سالم در فاصله قابل قبولی از نقطه تقاضا موجود باشد که ظرفیت کافی جهت براورده کردن تقاضاهای تخصیص یافته به آن بیمارستان را داشته باشد. در ادامه مدل ریاضی پیشنهادی ارائه شده است.

$$\min max\{\varphi_{ij.} w_{ij}\} \quad (۱)$$

$$\min\{d' - \sum_i (c'_i . m_i)\} \quad (۲)$$

s.t.

$$m_{ip}.O_{ipjp} + \sum_{\substack{i\neq ip \\ i\in I \\ \varphi_{ijp}\leq\beta.\varphi_{ipjp}}} \left(m_i.[c_i - \sum_j O_{ij}]\right) \geq O_{ipjp} \qquad \forall(ip\in I, jp\in J) \quad (۳)$$

$$\sum_i w_{ij} \geq 1 \qquad \forall j\in J \quad (٤)$$

$$\sum_i O_{ij} = d_j \qquad \forall j\in J \quad (٥)$$

$$\sum_j O_{ij} \leq c_i \qquad \forall i\in I \quad (٦)$$

$$O_{ij} \leq w_{ij}.M \qquad \forall(i\in I, j\in J) \quad (٧)$$

$$O_{ij}.N \geq w_{ij} \qquad \forall(i\in I, j\in J) \quad (٨)$$

$$w_{ij} \leq x_i \qquad \forall(i\in I_1, j\in J) \quad (٩)$$

$$w_{ij} \leq 1 \qquad \forall(i\in I_2, j\in J) \quad (١٠)$$

$$\sum_i f_i.x_i + \sum_i g_i.m_i \leq b \quad (١١)$$

$$\sum_{i\in I} c_i.x_i \geq \sum_{j\in J} d_j \quad (١٢)$$

$$m_i \leq x_i \qquad \forall i\in I_2 \quad (١٣)$$

$$x_i = m_i \qquad \forall i\in I_1 \quad (١٤)$$

$$x_i \in \{0,1\} \qquad \forall i\in I_1 \quad (١٥)$$

$$m_i \in \{0,1\} \qquad \forall i\in I \quad (١٦)$$

$$w_{ij} \in \{0,1\} \qquad \forall(i \in I, j \in J) \qquad (۱۷)$$

$$O_{ij} \geq 0 \qquad \forall(i \in I, j \in J) \qquad (۱۸)$$

تشریح توابع هدف و محدودیت‌ها

همان طور که قبلا اشاره شد هدف از مدل‌سازی فوق، مکان‌یابی بیمارستان‌های جدید و مقاوم‌سازی بیمارستان‌های موجود است به گونه‌ای که بیشترین فواصل تا نقاط تقاضای تخصیص یافته کمینه شود و علاوه بر ارضای تقاضا در شرایط عادی، تقاضای ایجاد شده در شرایط بحرانی را تا حد قابل قبولی براورده نماید. تابع هدف اول کمینه کردن بیشترین فاصله بین بیمارستان‌ها تا نقاط تقاضای تخصیص‌یافته به آن است. تابع هدف دوم کمینه کردن تقاضای براورده نشده در شرایط بحرانی است، به عبارت دیگر تقاضاهایی که در شرایط بحران توسط مراکز مستقر شده قابل پاسخ نیستند و به مراکز بیمارستانی شهرهای دیگر انتقال می‌یابند و هزینه‌های جانی و مالی زیادی به دنبال دارند کمینه می‌شود. محدودیت (۳) این الزام را فراهم می‌کند که هر بیمارستان یا مقاوم‌سازی شود و یا درصورتی که مقاوم‌سازی نشده باشد بیمارستان‌های قابل استفاده در فواصل قابل توجیهی از آن موجود باشند که در مجموع ظرفیت خالی جهت ارضای تقاضاهای بی‌پاسخ تخصیصی به آن بیمارستان را داشته باشند. این فواصل قابل توجیه توسط ضریب β مشخص می‌گردد و مقدار آن بر اساس نظر تصمیم‌گیرنده و قابلیت اطمینانی که انتظار دارد تعیین می‌شود. محدودیت (٤) این الزام را فراهم می‌کند که هر نقطه تقاضا حداقل به یک بیمارستان تخصیص داده شود. از آن جایی 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) براورده شدن تقاضای هر نقطه توسط بیمارستان‌ها را نشان می‌دهد. به طوری که مجموع تقاضاهایی که توسط بیمارستان‌های مختلف پاسخ داده می‌شود برابر با مقدار تقاضا باشد. قید (٦) مربوط به ظرفیت هر بیمارستان می‌شود که مجموع تقاضای تخصیص یافته به آن از ظرفیت بیمارستان بیشتر نشود. عبارات (۷) و (۸) به ترتیب کنترل می‌کنند تا در صورتی که تقاضایی به یک بیمارستان تخصیص یافت آن نقطه تقاضا نیز به آن بیمارستان تخصیص یابد و در صورتی که تقاضایی به آن تخصیص نیافت آن نقطه نیز به بیمارستان تخصیص نیابد. قیدهای (۹) و (۱۰) مربوط به این موضوع است که نقاط تقاضا فقط به بیمارستان‌هایی که مستقر شده‌اند یا از قبل موجود هستند تخصیص یابند. عبارت (۱۱) محدودیت مربوط به بودجه است که مجموع هزینه‌های احداث و مقاوم‌سازی بیمارستان‌ها نباید از میزان بودجه‌ی در اختیار بیشتر شود. مجموع ظرفیت‌های موجود بایستی از مجموع تقاضاها بیشتر باشد که این مورد در عبارت (۱۲) آمده است. بیمارستان‌های موجود می‌توانند جهت مقاوم‌سازی انتخاب شوند. قید (۱۳) این موضوع را بیان می‌کند. در محدودیت (١٤) نشان داده می شود که بیمارستان‌های جدید حتما مقاوم هستند. عبارات (۱۵)، (١٦)، (۱۷) و (۱۸) نوع متغیرهای مدل را نشان می‌دهند.

٤. خطی سازی مدل

از آن جهت که حل مدل غیرخطی نسبت به مدل خطی سخت‌تر است و زمان بیشتری نیاز دارد، مدل به شکل زیر خطی‌سازی می شود:

تابع هدف دوم به دلیل وجود پارامتر غیر قطعی تقاضای زمان بحران، به شکل عبارت (۲۸) بازنویسی می‌شود. یکی از راه‌های کلاسیک حل مسائل غیر قطعی، قطعی نمودن پارامتر غیر قطعی است و برای این کار می‌توان مقدار مورد انتظار پارامتر را جایگزین آن پارامتر کرد.

در محدودیت (۳) ضرب دو متغیر صفر-یک m_{ip} و پیوسته O_{ipjp} و همچنین ضرب متغیرهای m_i و $\sum_j O_{ij}$ سبب غیر خطی شدن محدودیت شده‌اند. جهت خطی‌سازی این

محدودیت تغییر متغیر انجام می‌دهیم. عبارات (۱۹) و (۲۳) تغییر متغیرها را نشان می‌دهد. سایر محدودیت‌هایی که به دلیل تغییر متغیر باید به مدل افزوده شوند نیز در ادامه آمده است.

$$\begin{cases} yo_{ipjp} = m_{ip}.O_{ipjp} & (۱۹) \\ yo_{ipjp} \le m_{ip}.M \quad \forall(i,j) & (۲۰) \\ yo_{ipjp} \le O_{ipjp} \quad \forall(i,j) & (۲۱) \\ yo_{ipjp} \ge O_{ipjp} - (1-m_{ip}).M \quad \forall(i,j) & (۲۲) \end{cases}$$

$$\begin{cases} qo_i = m_i.\sum_j O_{ij} \quad \forall i & (۲۳) \\ qo_i \le m_i.M \quad \forall i & (۲٤) \\ qo_i \le \sum_j O_{ij} \quad \forall i & (۲۵) \\ qo_i \ge \sum_j O_{ij} - (1-m_i).M \quad \forall i & (۲٦) \end{cases}$$

محدودیت غیرخطی (۳) به محدودیت خطی (۲۷) تبدیل شده است. همچنین تابع هدف (۲) به شکل عبارت (۲۸) بازنویسی می‌گردد.

$$yo_{ipjp} + \sum_{\substack{i \ne ip \\ \varphi_{ijp} \le \beta.\varphi_{ipjp}}} (m_i.c_i - qo_i) \ge O_{ipjp} \quad \forall(ip \in I, jp \in J) \qquad (۲۷)$$

$$\min\{\mathrm{m_{d'}} - \sum_i (c'_i.m_i)\} \qquad (۲۸)$$

محدودیت غیرخطی (۳) به محدودیت خطی (۲۹) تبدیل شده است. همچنین تابع هدف (۲) به شکل عبارت (۳۰) بازنویسی می‌گردد.

$$yo_{ipjp} + \sum_{\substack{i \ne ip \\ \varphi_{ijp} \le \beta.\varphi_{ipjp}}} (m_i.c_i - qo_i) \ge O_{ipjp} \quad \forall(ip,jp) \qquad (۲۹)$$

$$\min\{\mathrm{m_{d'}} - \sum_i (c'_i.m_i)\} \qquad (۳۰)$$

این مسأله درصورت اعمال فرض‌های ساده شونده به مسأله پوشش مجموعه تبدیل می شود که یک مسأله NP-hard و خطی از نوع عدد صحیح مختلط است. با توجه به دوهدفه بودن مدل برای حل مسأله در ابعاد بزرگ از الگوریتم NSGA-II استفاده شده و برای ابعاد کوچک مسأله با استفاده از روش اپسیلون محدودیت کارایی این الگوریتم سنجیده شده است.

۵. حل مدل و سنجش کارآیی آن

مدل پیشنهادی با استفاده از روش محدودیت اپسیلون در نرم‌افزار GAMS 24.1.2 و با به‌کارگیری سالور CPLEX حل شده است. مشخصات سخت‌افزاری حل‌کننده نیز به صورت دو هسته‌ای و RAM 4.00 GB است. به منظور بررسی صحت کارکرد مدل، داده‌های ورودی مدل که در جدول ۱ آمده است، به صورت تصادفی تولید شده و نتایج آن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

جدول ۱. پارامترهای ورودی مدل

i	f_i	g_i	c_i	cp_i
۱	۰	۱۸۱	٤۳۳	٤۷۷
۲	۰	۱۳۵	٤۷۳	۵۲۱
۳	٦٦۱	۰	۳۷۳	٤۱۱
٤	٤۰۸	۰	۲۲۸	۲۵۱
۵	٦۵۲	۰	۲۵۱	۲۷۷

هزینه احداث بیمارستان در نقاط مختلف f_i در بازه یکنواخت [٤۰۰،۷۰۰] تولید شده و در ستون متناظر جدول ۱ آمده است. هزینه مقاوم‌سازی هر بیمارستان در صورت استقرار با استفاده از توزیع یکنواخت در بازه [۱۰۰،۲۰۰] تولید شده و در ستون g_i آمده است. ظرفیت بیمارستان‌ها در زمان عادی به صورت تصادفی در بازه یکنواخت [۲۰۰،۵۰۰] تولید شده و با نام c_i در جدول قابل مشاهده است. ظرفیتی که بیمارستان در زمان بحران در صورت سالم ماندن و استفاده از فضاها و امکانات موجود

می‌تواند داشته باشد با cp_i نشان داده شده است. این میزان ظرفیت برابر با ده درصد افزایش ظرفیت به ازای هر بیمارستان است. جدول ۲ مربوط به تقاضای هر یک از نقاط تقاضا است. این داده ها بطور تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه [۱۰۰،۳۰۰] تولید شده است.

جدول ۲. مقادیر پارامتر تقاضا

j	d_j
۱	۱۸۸
۲	۱۷۹
۳	۲٦٤
٤	۱۵۲
۵	۱٤۸

فاصله بین مکان بالقوه بیمارستان‌ها و نقاط تقاضا به صورت یکنواخت [۱۰۰،۳۰۰] تولید شده و در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳. فواصل بین نقاط تقاضا و مکان بالقوه تسهیلات

φ_{ij}	۱	۲	۳	٤	۵
۱	۱۲۲	۱۵۱	۱٦۸	۱۷۰	۱۰۵
۲	۲۱۸	۱۷۲	۱٤۸	۲۹٦	۱۲۸
۳	۱۰۹	۲۷٤	۲۷٦	۱٤۲	۱۳٤
٤	۲۹۰	۲۰۲	۱۵۳	۲۷۵	۲۱۰
۵	۱۳٦	۲٤۸	۲۱۰	۱۰۸	۱۹۱

مقادیر پارامترهای بودجه b و میانگین تقاضا در شرایط بحران نیز به ترتیب برابر با ۲۵۰۰ و ٤٦۵۵ منظور شده است. تقاضا در شرایط بحران می‌تواند حالت سناریویی داشته باشد، اما در این پژوهش به صورت ضریبی از مجموع تقاضاهای حالت عادی در نظر گرفته شده است.

۵-۱ رویکرد حل فرا ابتکاری

به منظور حل مساله پیشنهادی در ابعاد بزرگ نیز از روش NSGA-II استفاده می‌شود. این روش، یک رویکرد متداول برای حل مسائل با چند تابع هدف بر مبنای الگوریتم ژنتیک است [Beheshtinia and Aarabi, 2017]. این الگوریتم یک روش کارآمد جهت حل مسائل چند هدفه است، ولی در پیچیدگی محاسباتی و انتخاب نقاط غالب دارای نقاط ضعف است، به همین دلیل یک روش اصلاح شده به نام NSGA-II توسعه داده شد. این روش مجموع اعضای جمعیتی که توسط ذره P مغلوب شده و تعداد دفعاتی که ذره P توسط سایر ذرات مغلوب شده است را جهت یافتن ذرات نامغلوب مورد استفاده قرار می¬دهد. کلیات الگوریتم حل NSGA-II در مرجع [Srinivas and Deb, 1994] و [Sahelgozin and Alimohammadi, 2016] آمده است. در اینجا، به ذکر پارامترهای ورودی الگوریتم که در این مطالعه استفاده شده، و نیز ساختار کلی پیاده سازی آن به شرح ذیل پرداخته می‌شود. پارامترهای در نظر گرفته شده برای حل مدل پیشنهادی توسط الگوریتم NSGA-II به شرح زیر است:

- ✓ جمعیت اولیه: ۵۰
- ✓ عملگر جهش: ۰/٤
- ✓ عملگر تقاطع: ۰/۸
- ✓ حداکثر تکرار الگوریتم: ۲۰۰

همچنین، برای اجرای الگوریتم *NSGA-II*، گام‌های زیر اجرا می‌شوند:

۱. تولید یک جواب اولیه تصادفی به اندازه جمعیت اولیه (n_{pop})، و قرار دادن تعداد تکرار الگوریتم (K) برابر با ۱.

۲. مرتب کردن اعضای جمعیت بر مبنای مغلوب بودن و تقسیم‌بندی آن‌ها در جبهه‌ها. (هر چه شماره جبهه‌ها کمتر باشد، به آن معناست که ذراتی که در آن هستند تعداد بیشتری از اعضا را مغلوب می‌کند.)

۱،۲. S_p را به عنوان مجموعه اعضای جمعیتی که توسط ذره p مغلوب است در نظر بگیرید و آن را تهی قرار دهید. $S_p = \emptyset$

۲،۲. N_p را به عنوان تعداد دفعاتی که ذره p توسط سایر ذرات مغلوب می‌شود در نظر گرفته و مقدار آن را برابر صفر قرار دهید. $N_p = 0$

۳،۲. برای هر عضو از اعضای جمعیت $(n = 1, \dots, n_{pop})$ همانند q مراحل زیر را انجام دهید.

۱،۳،۲. اگر ذره p توانست ذره q را مغلوب کند، آنگاه q را به مجموعه S_p اضافه کنید.

۲،۳،۲ اگر ذره q توانست ذره p را مغلوب کند، آنگاه یک واحد به N_p اضافه کنید.

۳. اگر بعد از بررسی تمام ذرات $N_p = 0$ شود آنگاه می‌توان نتیجه گرفت که p توسط هیچ ذره دیگری مغلوب نشده است. بنابراین p به جبهه F_1 اضافه می‌شود.

٤. تمامی مراحل زیر را تا زمانی که تعداد ذره‌های موجود در جبهه i برابر صفر نیست ادامه دهید.

٤-۱. مجموعه ذراتی که در جبهه $i+1$ در نظر گرفته می‌شود را Q و آن را برابر صفر در نظر بگیرید. سپس برای هر ذره p که در مجموعه F_i است مراحل زیر را انجام دهید.

٤-۲. برای هر ذره مانند q در مجموعه S_p که در جبهه F_i قرار دارد مراحل زیر را طی کنید. (لازم به ذکر است که S_p مجموعه‌ای از ذرات است که توسط ذره p در مرحله قبل مغلوب شده است).

٤-۲-۱. یک واحد از N_q کم کنید. این کار نشان دهنده آن است که ذره q چند بار مغلوب شده است.

۲،۲،٤. اگر $N_q = 0$ آنگاه ذره q در جبهه F_{i+1} قرار می گیرد.

٤-۳. یک واحد به i اضافه کنید.

۵. پس از جبهه‌بندی ذرات بر مبنای میزان مغلوب کردن سایر ذرات، به منظور ایجاد نسل بعدی، تعدادی از آن‌ها انتخاب شوند.

۵-۱. اولویت رتبه: در این اولویت جواب‌هایی که دارای رتبه یا جبهه پایین‌تر هستند انتخاب می‌شوند، زیرا ذرات این جبهه‌ها می‌توانند بیشتر ذره‌ها را مغلوب کنند.

۵-۲ در بعضی از موارد ممکن است دو ذره‌ای که انتخاب شده‌اند در یک رتبه باشند. به عبارت دیگر، ممکن است هر دو در یک جبهه باشند در این صورت از معیاری به نام فاصله ازدحامی (CD) استفاده می‌شود که در ادامه توضیح داده خواهد شد.

۵-۲-۱ n_i را به عنوان تعداد ذره‌های موجود در جبهه F_i در نظر بگیرید.

۵-۲-۲ فاصله بین ذره‌ها در جبهه‌ها را d_i بنامید و فاصله همه ذرات با یکدیگر را برابر صفر قرار دهید.

۵-۲-۳ برای هر ذره همانند j در جبهه F_i هر یک از توابع هدف مسأله همانند m را در نظر بگیرید و مراحل زیر را انجام دهید:

۵-۲-۳-۱ در جبهه F_i تمامی ذرات را بر مبنای تابع هدف m مرتب کنید. به عبارت دیگر، ذرات موجود در جبهه F_i را بر مبنای توابع هدفشان به طور مجزا مرتب کنید.

۵-۲-۳-۲. بعد از مرتب کردن ذرات در جبهه F_i بر مبنای تابع هدف m، فاصله ازدحامی ذره اول و آخر را برابر بی‌نهایت قرار دهید. دلیل این امر آن است که در کنار ذرات، ذره دیگری وجود ندارد که آن را پوشش دهد.

۵-۲-٤. پس از محاسبه فاصله ازدحامی[٤]، آن ذره ای که فاصله ازدحامی بیشتری داشته باشد انتخاب می‌گردد.

٦. بعد از انتخاب ذرات در مرحله قبل، یک حوضچه به وجود می‌آید که جمعیت منتخب نامیده می‌شود؛ سپس به منظور ایجاد جمعیت فرزندان از عملگرهای ژنتیکی استفاده می‌شود.

۷. پس از تعیین جمعیت فرزندان حاصل از اپراتور های ژنتیکی، این جمعیت با جمعیت اصلی ادغام می‌شود. هر حوضچه به مقدار n ظرفیت دارد و تعدادی از ذرات که با یکدیگر ادغام شده‌اند، باید حذف شوند. به همین منظور برای رسیدن به ظرفیت n مراحل زیر را اجرا کنید.

۷-۱. ابتدا ذره‌ها را بر طبق روش بیان شده در مرحله ۲ جبهه-بندی کنید.

۷-۲. فاصله ازدحامی هر یک از ذره‌ها در جبهه‌ها را مشخص نمایید.

۷-۳. از جبهه F_1 شروع کنید و ذرات آن را بر طبق CD انتخاب کرده و به حوضچه جمعیت جدید $(K+1)$ بریزید. این مرحله را تا زمانی ادامه دهید تا ظرفیت حوضچه جمعیت جدید $(K+1)$ به n برسد.

۸. پس از ایجاد جمعیت$(K+1)$ به مرحله ۲ بروید و این مراحل را به اندازه تعیین شده تکرار کنید.

نحوه نمایش جواب و عملگرهای الگوریتم ژنتیک به کار گرفته شده در ادامه شرح داده شده است:

الف) نحوه نمایش جواب (کروموزم) در الگوریتم ژنتیک دوهدفه (*NSGA-II*):

نحوه نمایش کروموزم در الگوریتم های ژنتیک و یا الگوریتم های توسعه یافته بر این اساس (مثل *NSGA-II*) به عنوان یک موضوع مهم قلمداد می شود. در این پژوهش، ساختار کروموزوم متشکل از I سطر و $J+1$ ستون است. (لازم به ذکر است که I_1 سطر اول مربوط به بیمارستان‌های جدید و I_2 سطر بعد مربوط به بیمارستان‌های موجود می باشد). ارزش ژن در J ستون اول نشان‌دهنده میزان تقاضای تخصیص یافته از نقطه تقاضای jبه بیمارستان i ، و در ستون آخر نشان‌دهنده مقاوم‌سازی یا عدم مقاوم‌سازی بیمارستان i می باشد.

ماتریس نشان داده شده در شکل ۱، یک نمونه کروموزوم را نشان می‌دهد که برای مسئله ای با دو نقطه تقاضا و دو بیمارستان موجود و دو بیمارستان جدید می‌باشد. دو سطر اول مربوط به بیمارستان‌های جدید و سطرهای سوم و چهارم مربوط به بیمارستان‌های موجود می‌باشد. ستون‌های اول و دوم مربوط به نقاط تقاضا و ستون سوم مربوط به متغیر صفر و یک مقاوم‌سازی می‌باشد. واضح است که متغیرهای تخصیص و مکان‌یابی با توجه به مقادیر متغیر میزان تخصیص قابل تشخیص است، لذا کروموزم طراحی شده به شکل زیر می باشد:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 10 & 3 & 1 \\ 5 & 7 & 0 \\ 6 & 4 & 1 \end{bmatrix}$$

شکل ۱. ساختار یک کروموزوم نمونه در الگوریتم ژنتیک دوهدفه (NSGA II)

همانطور که در شکل فوق مشاهده می شود به عنوان مثال، در سطر چهارم و ستون سوم، عدد ۱ نشان‌دهنده این است که بیمارستان شماره ٤ مقاوم‌سازی می‌شود و عدد ٦ در ستون اول نشان‌دهنده تخصیص ٦ بیمار از نقطه تقاضای ۱ به بیمارستان ٤ می باشد.

در الگوریتم ژنتیک استفاده شده ابتدا با توجه به اندازه جمعیت، تعدادی کروموزوم به صورت تصادفی تولید می‌شود و میزان شایستگی هر یک از آن‌ها محاسبه می‌شود. سپس به صورت تصادفی و با توجه به احتمالات در نظر گرفته شده برای هر یک از عملگرهای مورد استفاده، کروموزوم‌ها (والدین) جهت اعمال

تقاطع یا جهش انتخاب شده و به این ترتیب با استفاده از عملگرهای مذکور جمعیت فرزندان تولید می‌شود.

ب) عملگر تقاطع

جهت انجام عملگر تقاطع، جفت کروموزوم‌ها به صورت تصادفی انتخاب شده و با استفاده از روش تقاطع دو نقطه ای *(Two Point Crossover)*، به تولید جمعیت فرزندان می انجامد. روش تقاطع دو نقطه ای به این صورت است که دو بیمارستان به تصادف انتخاب شده و مقادیر بین این دو در کروموزوم‌های والد با یکدیگر جابجا می شوند و به این ترتیب نسل جدید متولد می شوند.

$$* \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 10 & 3 & 1 \\ 5 & 7 & 0 \\ 6 & 4 & 1 \end{bmatrix} \qquad * \begin{bmatrix} 5 & 8 & 1 \\ 11 & 2 & 1 \\ 5 & 0 & 1 \\ 7 & 3 & 0 \end{bmatrix}$$

والد اول　　والد دوم

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 10 & 3 & 1 \\ 5 & 0 & 1 \\ 6 & 4 & 1 \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} 5 & 8 & 1 \\ 11 & 2 & 1 \\ 5 & 7 & 0 \\ 7 & 3 & 0 \end{bmatrix}$$

فرزند اول　　فرزند دوم

شکل ۲. نحوه کار عملگر تقاطع به عنوان نمونه

ج) عملگر جهش

جهت به‌کارگیری عملگر جهش از روش جهش تعویضی(*Swap*) استفاده شده است به این صورت که ابتدا یک کروموزوم به تصادف انتخاب شده و سپس دو بیمارستان به تصادف انتخاب و سطرهای مربوط به آن‌ها در کروموزوم جابجا می شوند. یک مثال در شکل زیر نشان داده شده است.

$$* \begin{bmatrix} 2 & 5 & 1 \\ 10 & 3 & 1 \\ 5 & 7 & 0 \\ 6 & 4 & 1 \end{bmatrix}$$

والد اول

$$\begin{bmatrix} 2 & 5 & 1 \\ 6 & 4 & 1 \\ 5 & 7 & 0 \\ 10 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

فرزند اول

شکل ۳. نحوه کار عملگر جهش به عنوان نمونه

جدول ٤ نتایج حاصل از حل مدل با الگوریتم‌های اپسیلون و NSGA-II 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 فراابتکاری NSGA-II کارایی دارد. همانطوریکه در جدول مذکور مشاهده می‌شود میانگین زمان حل الگوریتم NSGA-II پیشنهادی به اندازه ٪۱۹/۱۲ از میانگین زمان حل روش محدودیت اپسیلون می‌باشد که این موضوع به معنی کاهش ٪۸۰ این زمان حل است.

جدول ٤. مقایسه مقادیر هدف و زمان حل

محدودیت اپسیلون				NSGA-II				
زمان (ثانیه)	تعداد جوابهای پارتو	f_2	f_1	زمان (ثانیه)	تعداد جوابهای پارتو	f_2	f_1	(i,j)
٣/٤	٥	٣٧٢٣	١٦٨	٢٣/٥١	٤	٣٧٥٧	١٦٨	(٥و٥)
		٣٧٦٩	١٥١			٣٦٧٥	١٥٨	
		٣٨٣٥	١٤٢					
		٣٦٩٤	١٣٣			٣٦٩٤	١٤٥	
		٣٧٣١	١٢٤			٣٧٥٢	١٣٣	
		٤٠١٦	٢٢٨			٤١٦٤	٢٣٩	
		٤٢١٧	٢١٤			٤٢٩٧	٢٢٤	
٨/٩	٥	٤٣١٩	٢٠٢	٢٥/١٦	٤	٤٣٦٤	٢١٠	(٦و٨)
		٤٣٩٨	١٩٧					
		٤٤٥٢	١٨٢			٤٤٦٩	١٩٩	
		٦١٢٣	٢٦٥			٦٦٥٨	٢٧٦	
		٦٢٥١	٢٥٢			٦٧٤٥	٢٦١	
٦٢/٤	٥	٦٤٢٥	٢٤٤	٥٨/١٦	٥	٦٨٩٨	٢٥٣	(١٠و١٠)
		٦٥٧٤	٢٣٩			٦٩٨٠	٢٤٤	
		٦٨٩٤	٢٢٦			٧٠٤٩	٢٢٩	
		٧٩٥٨	١٧٧			٨٣٢٧	١٨٩	
١١٤/٣	٥	٨٠١٢	١٦١	٦٩/٥١	٤	٨٦٥٢	١٧٣	(١٥و١٠)
		٨٨٢١	١٥٠					
		٩١٢٤	١٤٢			٩٥٢٩	١٥٢	
		٩٣٧٩	١٢٦			١١٢٤٣	١٤٥	
٢٩٤/٩	٥	١٢٠٤١	٢٧٤	٩٧/١٤	٤	١٢١٥٢	٢٩٨	(١٥و١٥)
		١٢٤١٥	٢٦١			١٢٥٨١	٢٧٧	
		١٢٧٤٩	٢٥٣					
		١٣٠٥٦	٢٣٣			١٣٠١٤	٢٥٣	
		١٣٢٨٤	٢١٤			١٣٣٥١	٢٢٤	
		١٥٦٨٠	٣٤٥			١٥٧٢٢	٣٧٥	
		١٥٨٤٣	٣٢٧			١٥٩٣٩	٣٦١	
٨٢٤/٧	٥	١٦٠٠٩	٣٠٨	١٠٣/٦	٥	١٦٠٢٧	٣٤٢	(٢٠و٢٠)
		١٦١٦٨	٢٩٤			١٦١٠٨	٣١٤	
		١٦٢٨٧	٢٨٣			١٦٥١٦	٢٩٤	

				٤٦٢	٢٠١٩٤	٤٧١	٢١٠٥٢
				٤٥٠	٢١٢٠٨	٤٦٧	٢٢٤٥٦
١٢٨٢/٤	٥	١١٨/٤	٥	٤٣٧	٢٢٥٠٩	٤٣٣	٢٤٥٢٧ (٣٠و٢٠)
				٤٢١	٢٤٥٦١	٤١٩	٢٥١١٦
				٣٩٢	٢٥٩١٢	٤٠٨	٢٦٥١٩
٣٧٠,١٤		٧٠,٧٨					میانگین زمان حل

جدول ٥. نتایج مرجح حل مدل به ازای مقادیر مختلف بودجه

تعداد بیمارستان‌های مقاوم‌سازی شده	تعداد بیمارستان‌های مکان‌یابی شده	تقاضای تسهیل اورژانسی	حداکثر فاصله	*b*
١	١	٣٧٢٣	١٦٨	٢٥٠٠
٢	١	٣٢٤٦	١٥١	٣٠٠٠
٢	٢	٢٩٦٩	١٥١	٦٥٠٠
٢	٣	٢٧١٨	١٥١	١٥٠٠٠

جدول ٦. مقایسه بیشترین فاصله قبل و بعد از ازکارافتادگی با درنظر گرفتن ۳ نقطه بالقوه و ۵ نقطه تقاضا

بدون درنظر گرفتن مقاوم‌سازی	با درنظر گرفتن مقاوم‌سازی	***i*=٣ , *j*=٥**
٤٠٠٠	٤٠٠٠	**حداکثر فاصله قبل از حادثه**
١٠٠٠٠	٤٠٠٠	**حداکثر فاصله بعد از حادثه**

۵-۲ تحلیل حساسیت

به ازای مقادیر مختلف بودجه، مدل حل شده و نتایج آن در جدول ۵ آمده است. همانطور که از نتایج مندرج در جدول ۵ آشکار است، با افزایش بودجه فواصل کاهش یافته و تعداد بیمارستان‌های مقاوم شده بیشتر شده که بدیهی است فواصل بعد ازکارافتادگی را نیز تحت تاثیر قرار داده و کاهش می‌دهد. در جدول ٦ بیش‌ترین فاصله بیمارستان‌ها و نقاط تقاضا در دو حالت بدون درنظر گرفتن و با درنظر گرفتن مقاوم‌سازی آمده است که اهمیت درنظر گرفتن مقاوم‌سازی را نشان می‌دهد.

با داشتن مقادیر بودجه متفاوت، توابع هدف مسأله مقادیر متفاوتی خواهند داشت. در شکل ٤ تابع هدف اول که همان حداکثر فاصله تخصیص یافته است به ازای مقادیر مختلف بودجه مورد ارزیابی قرار گرفته است.

با افزایش بودجه کاهش بیشترین فاصله را شاهد خواهیم بود (شکل ٤) و تقاضای تخصیص یافته به تسهیل اورژانسی نیز همان طور که در شکل ۵ مشخص است کاهش می‌یابد. در واقع مشخص است که با افزایش بودجه می‌توان بیمارستان‌های بیشتری را احداث و مقاوم‌سازی نمود که در نتیجه فواصل و تقاضای منتقل شده به تسهیل اورژانسی کاهش می‌یابند.

٦. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نوآوری‌های پژوهش: در این مقاله در مدل ارائه شده نوآوری هایی وجود دارد. رویکرد حلی که در این مقاله پیش گرفته شده نیز خود نوآوری به شمار می آید. در ادامه این نوآوری‌ها مختصرا بیان می‌گردد.

مساله‌ی مورد بررسی، بطور همزمان شرایط بحران و عادی را مدنظر قرار داده و سعی بر آن شده است که مکان بیمارستان‌های جدید و مقاوم‌سازی بیمارستان‌های موجود به گونه‌ای تعیین گردد که با منابع محدود در دست و ظرفیت‌های عادی و اضافه‌ای که در زمان بحران قابل استفاده است، کمترین فاصله ها را داشته باشیم.

در مدل ارائه شده، ظرفیت بیمارستان‌ها مشخص و محدود است. این ظرفیت‌ها در زمان عادی و بحرانی مقادیر متفاوتی خواهند داشت. قابل ذکر است که با توجه به موضوع مورد بررسی، تسهیلات در نظر گرفته شده در واقع بیمارستان‌ها و مراکز درمانی و اورژانس هستند، در شرایط بحران ممکن است از فضاهایی با کاربری‌های مختلف به منظور درمان و بستری مصدومان استفاده شود، می‌توان این مکان‌ها را به عنوان مکان های بالقوه در نظر گرفت و با ظرفیت عادی صفر و ظرفیت‌های بحرانی مشخص وارد مدل نموده و از این طریق تقاضای بحرانی را که می‌توان این‌گونه پاسخ داد مشخص نمود.

در این مدل، امکان ازکارافتادگی بیمارستان‌ها دیده شده و همچنین تقاضا در زمان عادی و بحرانی بصورت مجزا براورد شده است. مدل ارائه شده، این انعطاف را دارد که تقاضای مربوط به یک نقطه تقاضا توسط یک یا بیش از یک بیمارستان براورده شود. نوآوری مهم این مدل در تصمیم‌گیری همزمان در مورد مکان‌یابی بیمارستان‌های جدید و مقاوم‌سازی بیمارستان‌های موجود است که می‌تواند مدیریت بحران را در زمینه تصمیمات استراتژیک یاری نماید. همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، بیمارستان‌هایی که جهت استقرار انتخاب شده‌اند مقاوم‌سازی شده و از بین بیمارستان‌های موجود نیز تعدادی جهت مقاوم-سازی انتخاب می‌شوند که به این طریق تقاضا در زمان بحران، که بیمارستان‌ها و ظرفیت‌ها نیز مختل شده، تا جای ممکن بی-پاسخ نمی‌ماند.

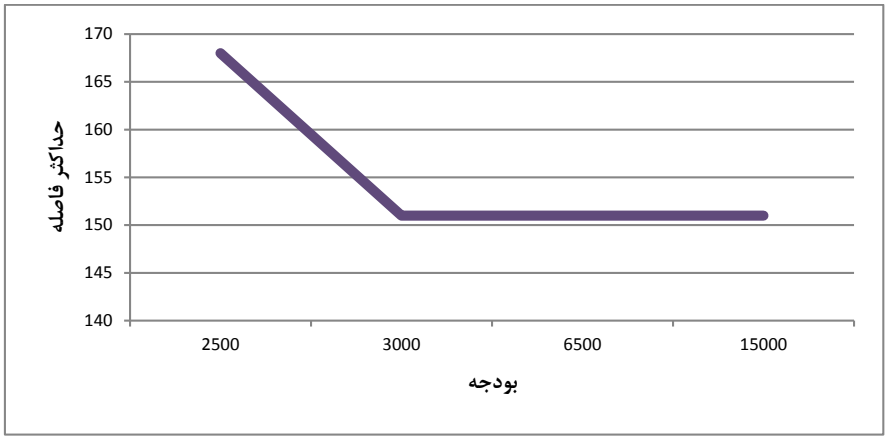
نتیجه‌گیری: با درنظر گرفتن تصمیمات مقاوم‌سازی بیمارستان‌های موجود و مکان‌یابی بیمارستان‌های جدید به صورت همزمان، فواصل بعد از ازکارافتادگی نسبت به زمانی که مکان‌یابی بدون درنظر گرفتن ازکارافتادگی و مقاوم‌سازی انجام شود کاهش می‌یابد و این امر می‌تواند گام مؤثری در مدیریت بحران باشد. ظرفیت بیمارستان‌ها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

با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف برای حالت بحران و تقاضا بعد از حادثه، می‌توان تصمیمات منطقی و مناسبی گرفت. همچنین مقایسه نتایج به ازای بودجه‌های مختلف می‌تواند در تصمیمات تخصیص بودجه موجب ایجاد نتایج بهتری شود.

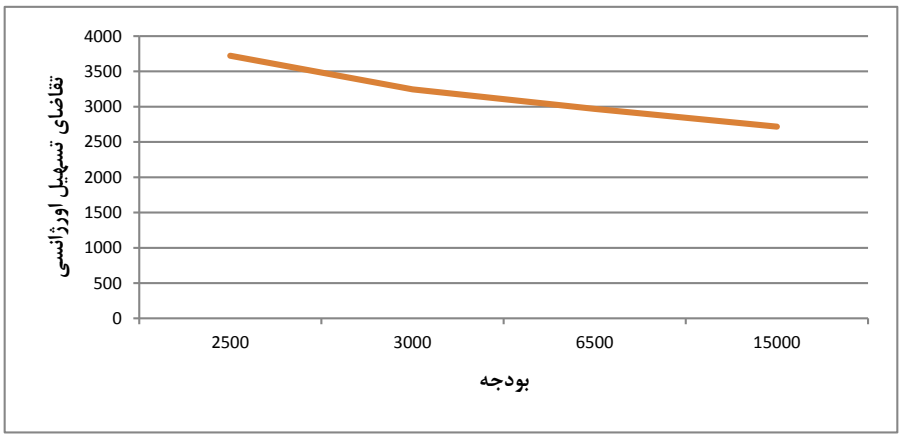
پیشنهادها: در این مقاله مقاوم‌سازی بصورت صفر و یک درنظر گرفته شده است که می‌تواند بصورت پیوسته درنظر گرفته شود. همچنین تخصیص نقاط تقاضا به بیمارستان‌ها بعد از ازکارافتادگی آنها در مدل دیده نشده است که می‌تواند مورد بررسی و استفاده قرار گیرد. تقاضا در شرایط بحرانی در مدل بصورت غیر قطعی در نظر گرفته شده است، تابع تقاضای آن را می‌توان با استفاده از روش‌های مختلف می‌توان براورد کرده و بعنوان ورودی مدل مورد استفاده قرار داد.

۷. پی‌نوشت‌ها

[1] R-interdiction median
[2] P-median
[3] Infeasible
[4] Crowded Distance



شکل ٤. بیشترین فاصله های موجود با مقادیر مختلف بودجه



شکل ٥. تقاضای ارضا شده توسط تسهیل اورژانسی به ازای مقادیر مختلف بودجه

٨. مراجع

-Aksen, D. and Aras, N. (2012) "A bi-level fixed charge location model for facilities under imminent attack", *Computers and Operations Research*, Vol. 39, No. 7, pp. 1364 –1381.

-Aliakbarian, N., Dehghanian, F. and Salari, M. (2015) "A bi-level programming model for protection of hierarchical facilities under imminent attacks" *Computers and Operations Research*, Vol. 64, No. 2015, pp. 210-224.

-Beheshtinia, M. A., and Aarabi, A. (2017) "A genetic algorithm for integration of vehicle routing problem and production scheduling in supply chain (Case Study: Medical Equipment Supply Chain), Journal of Industrial Engineering, Vol. 51, No. 2, pp. 147-160.

DOI: 10.22059/JIENG.2017.62209

-Beheshtinia, M.A. and Ghasemi, A. (2018). A multi-objective and integrated model for supply chain scheduling optimization in a multi-site manufacturing system, Engineering Optimization, doi.org/10.1080/0305215X.2017 .1400546, pp. 1-19.

-Beheshtinia, M.A., Ghasemi, A. and Farokhnia, M., (2017). Supply chain scheduling and routing in multi-site manufacturing system

-Hernandez, I., Emmanuel Ramirez-Marquez, J., Rainwater, C., Pohl, E., Medal, H. (2014) "Robust facility location: Hedging against failures". Reliability Engineering and System Safety, Vol. 123, No. 2014, pp. 73-80.

-Jokar, A. and Hosseini-Motlagh, S. M. (2015) Impact of capacity of mobile units on blood supply chain performance: Results from a robust analysis, International Journal of Hospital Research, Vol. 4, No. 3, pp. 101-105.

-Li, Q., Zeng, B. and Savachkin, A. (2013) "Reliable facility location design under disruptions", Computers and Operations Research, Vol. 40, No. 4, pp. 901-909.

-Masi, A., Santarsiero, G. and Chiauzzi, L. (2014) "Development of a seismic risk mitigation methodology for public buildings applied to the hospitals of Basilicata region (Southern Italy)", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 65, No. 2014, pp. 30-42.

-Medal, R., Pohl, A. and Rossetti, D. (2014) "A multi-objective integrated facility location-hardening model: Analyzing the pre- and post-disruption tradeoff", European Journal of Operational Research, Vol. 237, pp. 257-270.

-Mehr Agency (2017) "Hospital disruption in Kermanshah earthquake; Oct. 2017"; https://www.mehrnews.com/news/4142566.

-Mestre, A. M., Oliveira, M. D. and Barbosa-Póvoa, A. P. (2015) "Location–allocation approaches for hospital network planning under uncertainty", European Journal of Operational Research, Vol. 240, No. 3, pp. 791-806.

-Miniati, R., Capone, P. and Dietrich, H. (2014) "Decision support system for rapid seismic risk mitigation of hospital systems. Comparison between models and countries", International Journal of Disaster Risk Reduction, Vol. 9, pp. 12-25.

(case study: a drug manufacturing company), Journal of Modelling in Management, in press.

-Berman, O., Krass, D. and Menezes, M. (2013) "Location and reliability problems on a line: Impact of objectives and correlated failures on optimal location patterns", Omega, Vol. 41, No. 4, pp. 766-779.

-Boonme, Ch., Arimura, M. and Asada, T. (2017) "Facility location optimization model for emergency humanitarian logistics", International Journal of Disaster Risk Reduction, Vol. 24, No. 2017, pp.485-498.

-Cheraghi, S. and Hosseini-Motlagh, S. M. (2017). Optimal blood transportation in disaster relief considering facility disruption and route reliability under uncertainty, International Journal of Transportation Engineering Vol. 4, No. 3, pp. 225-254.

-Chen, A. Y. and Yu, T. (2016) "Network based temporary facility location for the Emergency Medical Services considering the disaster induced demand and the transportation infrastructure in disaster response", Transportation Research Part B, Vol. 91, pp.408-423.

-Erkat, J., Zamani, Sh. (2013). "Suppose the congestion problem locating treatment facilities in times of crisis", Tenth International Conference on Industrial Engineering, Vol. 10, pp. 126-135.

-Eskandari, M., Ehsan Seif, A. and Heshmati, V. (2011) "The readiness of hospitals to cope with earthquake", The Sixth International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, Vol. 6, pp. 12-21.

-Hatam Abadi, H. (2006) "Evaluation of pre-hospital medical response in Bam earthquake", The Third International Congress on Health, Medication and Crisis Management in Disaster, Tehran, The medical community mobilization, Vol. 2, pp.24-32.

-Sabouhi, F., Bozorgi Amiri, A., (2017) "Routing and scheduling of transportation equipment for distribution of relief, taking into account partial delivery and multiple warehouses", Journal of Transportation Engineering, Vol. 9, No. 1 (33), pp. 125-138.

-Sahelgozin, M.R., Alimohammadi, A., (2016) "Optimizing of the Metro transportation scheduling via NSGA-II in order to reduce the trip time and improve the economic and environmental performance", Journal of Transportation Engineering, Vol. 8, No. 1, pp. 29-51.

-Shishebori, D., Snyder, L.V. and Jabalameli, M.S. (2014). A reliable budget-constrained facility location/network design problem with unreliable facilities. Networks and Spatial Economics, Vol. 14, No. 3-4, pp. 549-580.

-Srinivas, N. and Deb, K. (1994) "Multi-objective optimization using non-dominated sorting in genetic algorithms", Evolutionary Computation, Vol. 2, No. 3, pp. 221-248.

-Nuti, C. and Vanzi, I. (1998) "Assessment of post-earthquake availability of hospital system and upgrading strategies", Earthquake Engineering, and Structural Dynamics, Vol. 27, No. 12, pp. 1403-1423.

-Ouyang, M. (2016) "Critical location identification and vulnerability analysis of interdependent infrastructure systems under spatially localized attacks", Reliability Engineering and System Safety, Vol. 154, pp.106-116.

-Paul, J. and Batta, R. (2008) "Models for Hospital Location and Capacity Allocation for an Area Prone to Natural Disasters", International journal of operational research, Vol. 3, No. 5, pp. 473-496.

-Poorahmad, A., Ashlagy, M., Ahar, H., Manouchehri, A. and Ramezani, M. (2014). The location hospitals using Fuzzy Logic combining AHP and TOPSIS environment ARCGIS. Geography and Environmental Planning Journal, Vol. 54, No. 2, pp. 24-36.

The Hospital Location-Hardening Problem with Constrained Sources and Predetermined Capacities in Presence of Disruption and Facilities Failure Conditions

S. Sarikhani, MSc. Grad., Department of Industrial Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

D. Shishebori (Corresponding author), Department of Industrial Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

E-mail: shishebori@yazd.ac.ir

Abstract

Today, the simultaneous reduction of location costs and transportation costs in the establishment of urban facilities is of critical importance. This becomes extremely sensitive when the area under consideration is in crisis situations and the inevitable transit of vehicles and inland transportation is difficult in those circumstances and may cause financial and irreparable damages.

In this study, an integrated hospital location hardening is proposed in presence of disruption conditions and facility failures. With respect to the predetermined budget, demands of different points, and some predicting of disruption conditions, the optimizing is done. According to the importance of time in proposing of hospital emergency services, one of the objective functions is minimizing of the maximum allocated distances. Another objective function is minimizing the number of demands, which are allocated to far points. Regarding to the bi-objective mathematical model, the ε-constraint and GAMS software are applied. According to the application of the proposed model for the large-scale problems and The NP-Hard structure of the problem, the NSGA-II is applied and evaluated. In this study, an integrated hospital location hardening is proposed in presence of disruption conditions and facility failures. With respect to the predetermined budget, demands of different points, and some predicting of disruption conditions, the optimizing is done. According to the importance of time in proposing of hospital emergency services, one of the objective functions is minimizing of the maximum allocated distances. Another objective function is minimizing the number of demands, which are allocated to far points.

According to the two-objective mathematical model, the ε-constraint method and the GAMS 24.1.2 software are used. Due to the possibility of using the model in the large dimensional applications as well as the NP-hardness of the model, the NSGA-II meta-algorithm is applied and the efficiency of the proposed approach is examined and evaluated.

Keywords: Hospital location hardening, hospital emergency services, the ε-constraint method, GAMS 24.1.2 software

سعیده ساریخانی، داود شیشه بری

سعیده ساریخانی خرّمی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۹۳ از دانشگاه یزد و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۹٦ از همان دانشگاه اخذ نمود. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان مکان‌یابی، زنجیره تامین، تحلیل پوششی داده‌ها و سایر زمینه‌های تحقیق در عملیات است.

داود شیشه بری، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۸٤ از دانشگاه یزد و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع در سال ۱۳۸٦ را از دانشگاه صنعتی اصفهان اخذ نمود. در سال ۱۳۹۲ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی صنایع از دانشگاه علم و صنعت ایران شد. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان طراحی سیستم های صنعتی، مکان یابی و تخصیص تسهیلات، و مباحث زنجیره تامین و لجستیک بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه یزد است.