

مدل سازی ریاضی استوار برای مسئله مکان یابی- مسیریابی- موجودی چندهدفه در شرایط وقوع بحران با در نظر گرفتن عدم قطعیت تقاضا و قابلیت اطمینان تسهیلات

علی اکبر عشقی: دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی صنایع، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران
رضا توکلی مقدم*: استاد، دانشکده مهندسی صنایع، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران، تهران،

Email: tavakoli@ut.ac.ir

سعید الله ابراهیم نژاد: دانشیار، گروه مهندسی صنایع، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج
وحید رضا قضاوتی: دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۶/۲۰

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۶/۲۹

چکیده

پاسخگویی سریع به نیازها و ارسال اقلام مورد نیاز به مناطق متأثر از بحران اولویت بسیار بالایی در زمان وقوع آن ها دارد. به علاوه برنامه ریزی با توجه به ذات غیرقطعی شدت بحران و تعداد مناطق آسیب دیده برای این مواقع ضروری است. در این پژوهش فازهای آمادگی و پاسخ در چرخه مدیریت بحران به کمک مدل های برنامه ریزی ریاضی چندهدفه تحت شرایط عدم قطعیت مدل سازی شده است. این رویکرد دارای دو گام اصلی است که در گام اول یعنی فاز آمادگی مکان بهینه مراکز توزیع امداد و همچنین مراکز درمانی، میزان موجودی کالاها و امدادی برای ذخیره سازی از تأمین کنندگان را تعیین کرده و در گام دوم یا فاز پاسخ میزان حمل کالاها و امدادی از نقاط تأمین به مراکز توزیع امداد و از مراکز توزیع به نقاط آسیب دیده و میزان حمل مصدومان از نقاط آسیب دیده به مراکز درمانی و بیمارستان ها را توسط آمبولانس ها و حمل هوایی تعیین می شود. همچنین پارامترهای اساسی آن مانند تقاضا و تعداد مصدومان با توجه به ماهیت مسئله به صورت غیرقطعی مدنظر قرار می گیرد. در نهایت نیز خرابی تسهیلات تأمین کننده و توزیع کننده در اثر وقوع بحران در نظر گرفته می شود که به طور مستقیم در ارائه خدمات آن ها تأثیرگذار است. جهت حل مدل ریاضی سه هدفه از الگوریتم های ژنتیک بر مبنای رتبه بندی نا مغلوب ها (NSGA-II) و گرگ خاکستری چندهدفه (MOGWO) استفاده می شود. با مقایسه نتایج الگوریتم های فرا ابتکاری با حل دقیق مشخص می شود که این الگوریتم ها در مدت زمان مناسب دارای عملکرد قابل قبولی هستند.

واژه های کلیدی: مدل ریاضی استوار، مکان یابی- مسیریابی- موجودی، قابلیت اطمینان، الگوریتم فرا ابتکاری چندهدفه، بحران

Robust Mathematical Modeling for a Multi-objective Location-Routing-Inventory Problem in Disaster under Demand Uncertainty and Facilities Reliability

Aliakbar Eshghi¹, Reza Tavakkoli-Moghaddam², Sadollah Ebrahimnejad³, Vahidreza Ghezavati⁴

Abstract

At the time of natural disasters occurrence, prompt responding and providing required items to affected areas is the most urgent priority. Moreover, given the stochastic nature of the crisis severity and the number of the affected areas, effective planning is a crucial task. In this study, two major steps in the disaster management cycle, namely preparation and response phases, are formulated using a multi-objective mathematical model under uncertainty. In the preparation phase, the optimum location of relief distributions, medical centers and inventories of relief goods to storage items received from suppliers are determined. Also, in the second step or response phase, the amount of relief goods transported from supply points to relief distribution centers and from these centers to affected areas as well as the number of injured people transferred to medical centers and hospitals through ambulances and aerial transportation are determined. Moreover, regarding the problem nature, its key parameters (e.g., demand and the number of injured people) are considered to be uncertain. Furthermore, given that the failure of facilities in both supplier and distributor sections can adversely affect their service provision, this issue is considered in the model. To efficiently solve the model, the non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II) and the multi-objective grey wolf optimizer (MOGWO) are used. Comparison of the results obtained from the proposed meta-heuristics with the exact solution method indicates that these algorithms can provide acceptable solutions in a reasonable amount of computational time.

Keywords: Robust mathematical model, Location-routing-inventory problem, Reliability, Multi-objective meta-heuristic algorithms, Disaster.

1-Department of Industrial Engineering, Islamic Azad University, South Tehran Branch, Tehran, Iran, E-mail: st.a.eshghi@azad.ac.ir

2-School of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, E-mail: tavakoli@ut.ac.ir

3-Department of Industrial Engineering, Islamic Azad University, Karaj Branch, Karaj, Iran, E-mail: ibrahimnejad@kia.ac.ir

4-School of Industrial Engineering, Islamic Azad University, South Tehran Branch, Tehran, Iran, E-mail: v.ghezavati@azad.ac.ir

۹۹

شماره بیستم

پاییز و زمستان

۱۴۰۰

دوفصلنامه

علمی و پژوهشی



بلایای طبیعی (مانند سیل، خشک‌سالی، زلزله، طوفان، قحطی و غیره) و فجایع انسانی (مانند جنگ، درگیری و بحران پناهندگان و غیره) در دهه‌های اخیر به‌طور فزاینده جوامع و ملت‌های سراسر جهان را در بر گرفته و پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که این روند ادامه خواهد داشت. تحقیقات دانشگاهی مدیریت عملیات فاجعه و لجستیک بشردوستانه کمابیش جدید است [۱]. عدم قطعیت در زمان، مکان و شدت فاجعه عملیات بشردوستانه در مرحله پیش از وقوع حادثه و شرایط بد زیرساخت‌های موجود در مرحله پس‌از آن را مختل می‌کند. غلبه بر مشکلات در طول این مرحله نیازمند طراحی شیوه‌های کارآمد عملیات بشردوستانه در راستای کاهش تلفات انسانی و اقتصادی است. لجستیک بحران شامل فرآیند برنامه‌ریزی، پیاده‌سازی و پایش جریان و ذخیره مؤثر و با هزینه مناسب کالا، مواد و همچنین اطلاعات مرتبط از نقطه ارسال تا لحظه رسیدن آن‌ها به دست مصرف‌کنندگان برای کاهش و التیام درد افراد حادثه‌دیده است. این عملیات دربرگیرنده دامنه‌ای از فعالیت‌ها همچون آمادگی، برنامه‌ریزی، تدارکات، حمل‌ونقل، انبارداری، ره‌گیری، ردیابی و ترخیص گمرکی است. در واقع فعالیت‌های اشاره شده در تعریف بالا همگی جزء فعالیت‌های اصلی در ۲ فاز آمادگی و پاسخ از چرخه مدیریت بحران هستند. میزان و حجم فعالیت‌های لجستیکی در این ۲ فاز به حدی است که نزدیک به ۸۰ درصد از فعالیت‌های لجستیکی در این ۲ فاز را شامل می‌شود [۲].

با توجه واقع شدن ایران بر روی کمربند زلزله، تعداد زیادی از شهرهای آن نیز در معرض خطر زلزله هستند [۳] و در این صورت اهمیت مسئله لجستیک بحران یا امداد در تمامی کشورها، به‌ویژه ایران بسیار چشمگیر است.

با توجه به مطالب ارائه شده در این مطالعه طراحی مدلی از برنامه‌ریزی بهینه بر مبنای کنترل و برنامه‌ریزی خدمات پس از وقوع بحران در قالب توسعه یک مدل مکان‌یابی-مسیریابی-موجودی مدنظر است؛ به طوری که بتوان تا جای ممکن بیشترین سطح پوشش شرایط و سوانح رخ داده در دنیای واقعی را پیش‌بینی و خدمات‌رسانی کرد. به همین دلیل در مسئله پیش رو موارد زیر به‌طور کامل مورد بررسی قرار می‌گیرد:

الف- توجه به تصمیمات اساسی در زمینه مدیریت منابع و برنامه‌ریزی امداد پس از وقوع فاجعه، به طوری که بتوان تمامی تصمیم‌های مورد نیاز در دنیای واقعی شامل تعیین سیاست‌های بهینه موجودی کالاهای اضطراری، تعداد و برنامه‌ریزی حمل‌ونقل وسایل نقلیه مورد نیاز شامل آمبولانس‌ها و بالگردها در صورت امکان و مکان‌یابی تسهیلات تأمین و توزیع با در نظر گرفتن احتمال شکست آن‌ها در ارائه خدمات و پیشینه‌سازی قابلیت اطمینان تأمین و توزیع را مورد بررسی و تحقیق قرار داد.

ب- هزینه‌های سیستم امداد رسانی و یا افزایش سطح سرویس در بسیاری از پژوهش‌ها ارائه شده است؛ اما تمرکز این تحقیق بر زمان خدمت‌دهی به مجروحان به دلیل مهم‌ترین عامل برای نجات افراد آسیب‌دیده در هنگام ایجاد بحران است. بنابراین در

این پژوهش به کمیته‌سازی زمان پاسخ‌دهی به‌عنوان اصلی‌ترین هدف آن پرداخته می‌شود و تصمیم‌های پس از آن، با توجه به این هدف اخذ می‌شود. از سوی دیگر، هزینه کل ارائه خدمات به‌عنوان مثال شامل به‌کارگیری تسهیلات مورد نیاز، هزینه‌های حمل‌ونقل و خدمات‌دهی، هزینه‌های جریمه عدم خدمات‌دهی و تلفات بالقوه هم به‌عنوان هدف دوم و کاربردی در مسئله مورد توجه قرار خواهد گرفت.

ج- از سوی دیگر اطلاعات دقیق از مسیرهای باز و مسدود شده و همچنین تعداد مجروحان از انواع آسیب‌دیدگی به علت وجود عدم قطعیت شدید در پارامتر تقاضا یا همان تعداد افراد آسیب‌دیده در شرایط بحران وجود ندارد. به همین دلیل از بهینه‌سازی استوار جهت فرموله کردن شرایط عدم قطعیت برای نزدیک‌تر شدن به شرایط واقعی عدم قطعیت در پارامتر تعداد مجروحان و حادثه دیدگان استفاده می‌شود.

د- همچنین در نظر گرفتن نیاز به انواع کالاهای ضروری (شامل دارو، خون، مواد غذایی و غیره) در شبکه نیز همواره در دنیای واقعی مطرح است که در پژوهش حاضر نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد.

ه- در نهایت، خرابی تسهیلات تأمین‌کننده و توزیع‌کننده در اثر وقوع بحران به دلیل تأثیر مستقیم آن در ارائه خدمات نیز در نظر گرفته می‌شود. در واقع، مراکز تأمین و توزیع همانند هر تسهیل آسیب‌پذیر در هنگام وقوع فاجعه نمی‌تواند همواره به‌صورت ۱۰۰ درصد پایا به فعالیت خود در فاز پس از وقوع بحران ادامه دهد. به همین دلیل خرابی‌های این تسهیلات در یک بازه زمانی خاص مدنظر است و هدف پیشینه‌سازی قابلیت اطمینان کل در ارائه و ارسال خدمات به‌عنوان تابع هدف سوم است.

در ادامه پژوهش (بخش دوم) به بررسی ادبیات موضوع، در بخش سوم به تعریف مسئله و مفروضات اصلی آن و در ادامه به معرفی مدل ریاضی قطعی و استوار پرداخته می‌شود. بخش چهارم به توسعه روش‌های حل پیشنهادی پژوهش و در نهایت در بخش پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی پژوهش مورد بررسی قرار می‌گیرد.

ادبیات موضوع

نخستین تحقیق در زمینه حمل‌ونقل اقلام امدادی به پژوهش‌های نات^۱ در سال ۱۹۸۷ بازمی‌گردد. نات با در اختیار داشتن منابع محدود به مدل‌سازی شرایطی می‌پردازد که در آن تعدادی از وسایل نقلیه متفاوت در انباری قرار دارند و هدف کمیته‌سازی تقاضاهای ازدست‌رفته است [۴]. بدیهی است زیرساخت‌های حمل‌ونقل برای تجهیزات امدادی در هنگام وقوع بحران غیرقابل اعتماد هستند. به همین دلیل بارباروسوگولو و همکاران^۲ به مدل‌سازی برنامه‌ریزی پرواز و عملیات امداد رسانی بالگردها می‌پردازند. مسئله با ۲ سطح تجزیه شده مورد توجه است که در سطح اول به تصمیم‌های تاکتیکی شامل مدیریت ناوگان، خلبان‌ها و تعیین تعداد تورهایی طی شده توسط هر بالگرد و در سطح دوم به اتخاذ تصمیمات عملیاتی در ارتباط با طراحی

مسیرها، بارگذاری و تخلیه بار، نجات و سوخت‌گیری هر بالگرد می‌پردازد [۵]. ازدامار و همکاران^۳ به بررسی برنامه‌ریزی لجستیکی در مواقع اضطراری جهت ارسال کالا به مراکز توزیع در نواحی آسیب‌دیده پرداخته‌اند. شبکه توسعه داده‌شده این تحقیق به مسئله حمل‌ونقل پویای وابسته به زمان و به‌صورت تکرارشونده به ارائه پاسخ در بازه‌های زمانی اراده شده در تحویل کمک‌ها می‌پردازد [۶]. دورنرو و همکاران^۴ به حداقل سازی تقاضای برآورده نشده در شرایط بحران با استفاده از تور پوششی پرداخته‌اند. در مدل ارائه شده از یک دیوی مرکزی استفاده شده و به مکان‌یابی مراکز پزشکی و مسیریابی یک وسیله نقلیه برای تأمین کالای مورد نیاز آن‌ها می‌پردازد. همچنین نقاط تقاضا، روستاهای کوچک با جمعیت کمابیش اندک و با فاصله کوتاه از یکدیگر در نظر گرفته شده است. این مدل توسط ۳ الگوریتم ابتکاری بر اساس فرضیات مسئله فروشنده دوره‌گرد حل و خروجی آن‌ها با هم مقایسه شده است [۷]. نولز و همکاران^۵ یک مدل دو هدفه برای رساندن دارو، غذا و تأمین پناهگاه به مناطق آسیب‌دیده ارائه کرده‌اند. مدل ارائه شده بر اساس مسئله پوشش به تعیین نحوه توزیع کالا به مناطق آسیب‌دیده می‌پردازد که الگوریتمی ژنتیک دارد و توسعه آن بر اساس جستجوی همسایگی برای حل مدل است. این الگوریتم با داده‌های واقعی مربوط به زلزله ایالت منبایی در اکوادور پیاده‌سازی و با روش محدودیت اسیلون مقایسه شده است [۸]. هانگ و همکاران^۶ مدل‌های مسیریابی و تخصیص منابع تأمین در کمک‌رسانی به افراد آسیب‌دیده در فجایع را بررسی کردند. آن‌ها ۳ عامل مهم در مسیریابی و تخصیص منابع در فجایع یعنی کارآمدی، سودمندی و بهره‌مندی را یکسان معرفی کردند و مدل ریاضی یکسانی با تابع هدف متفاوت را به منظور بررسی این ۳ معیار در نظر گرفتند [۹].

رت و گودجار^۷ یک مدل مسیریابی و مکان‌یابی درزمینه امداد رسانی در فجایع ارائه کردند. آن‌ها بیان کردند که باید انبارهای میانی به‌صورت موقت و سرپایی بنا شده تا مراحل امداد رسانی و تأمین نیاز افراد آسیب‌دیده با سرعت بیشتری صورت گیرد. آن‌ها مدل ۳ هدفه‌ای را به منظور کاهش هزینه‌های کوتاه‌مدت و میان‌مدت و افزایش میزان ارسال کالاهای بشردوستانه ارائه و اقدام به حل آن با روش محدودیت اسیلون کردند [۱۰]. چن و یو^۸ به بررسی مسئله مکان‌یابی تسهیل موقت برای خدمات اضطراری پزشکی با در نظر گرفتن در شرایط بحران و فاجعه با ملاحظه میزان تقاضا و حمل‌ونقل در پاسخگویی به بحران پرداختند. در این پژوهش زیرساخت‌های حمل‌ونقل با توجه به وابستگی شدید خدمات اضطراری پزشکی در نظر گرفته شده است [۱۱].

فونتم و همکاران^۹ مسائل مسیریابی اضطراری با استفاده از الگوریتمی ابتکاری مبتنی بر تجزیه را بررسی کردند. گروهی از کارکنان نجات‌دهنده در مسئله پیشنهادی آن‌ها وجود دارند که تأمین نیازهای ضروری مراکز جمعیتی بحران عملیات نجات را با استفاده از انبارهای نجات و حمل‌ونقل‌ها انجام می‌دهند. عملیات نجات باید قبل از آخرین فرصت‌ها انجام شود. هدف مسئله پیشینه‌سازی تحویل به‌موقع کمک‌ها و نیازهای ناجی

است. مسئله دارای عدم قطعیت در زمان سفر و زمان نهایی مقصد جهت دریافت عملیات نجات است. آن‌ها پس از مدل‌سازی مسئله، الگوریتم ابتکاری پیشنهادی خود را جهت مسائل با ابعاد کوچک مورد آزمون قرار دادند و سپس به حل آن‌ها با ابعاد واقعی پرداختند [۱۲]. زکایی و همکاران^{۱۰} یک مدل برنامه‌ریزی پویا برای طراحی شبکه امداد رسانی ۳ سطحی تحت شرایط عدم قطعیت ارائه کردند. هدف آن‌ها کمینه‌سازی هزینه‌های کل عملیاتی و افزایش رضایت مردم از طریق کاهش کمبود کالاهای ضروری بود [۱۳]. بونمی و همکاران^{۱۱} یک مدل بهینه‌سازی مکان‌یابی برای لجستیک اضطراری بشردوستانه را توسعه دادند و در مسئله خود به بررسی شرایط پیش و پس از بحران برای مکان‌یابی تسهیلاتی مانند پناهگاه‌ها، انبارها، مراکز پخش و پزشکی پرداختند. آن‌ها اقدام به حل چند مسئله موجود در ادبیات جهت بررسی کاربردی بودن مدل خود کردند [۱۴]. مانوینیوس و ایروهارا^{۱۲} یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه احتمالی برای اتخاذ تصمیم‌گیری‌های یکپارچه در زنجیره تأمین امداد در سطح آماده‌سازی برای پاسخگویی بحران ارائه کردند. آن‌ها نشان دادند که محدودیت‌های زمانی و در دسترس بودن وسایل نقلیه امدادی تأثیر بسیار عمده‌ای بر اهداف مسئله دارد [۱۵]. ربانی و همکاران^{۱۳} به توسعه یک مدل برنامه‌ریزی احتمالی استوار برای حل مسئله برنامه‌ریزی تخلیه بیمارستان تحت شرایط عدم قطعیت و با در نظر گرفتن افق برنامه‌ریزی پرداختند. هدف آن‌ها کمینه‌سازی زمان کل تخلیه و تعداد کل مصدومانی است که در هر دوره تخلیه نشده بودند. آن‌ها برای حل مسئله به توسعه ۲ الگوریتم فرا ابتکاری برای حل مسئله پیشنهادی خود پرداختند [۱۶]. رودریگز اسپیندولا و همکاران^{۱۴} یک سیستم آماده‌سازی بحران مبتنی بر ترکیب یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه و سیستم‌های اطلاعاتی جغرافیایی جهت تصمیم‌گیری‌های چند سطحی در وقوع بحران را معرفی کردند. همچنین سیستم پیشنهادی خود را برای وقوع سیل مکزیک در سال ۲۰۱۳ مورد بررسی قرار دادند که پس از حل آن مشخص شد افزایش هزینه‌های کل به دلیل بیش‌ازحد نیاز بودن تعداد سازمان‌های دولتی دخیل بوده است [۱۷].

وحدانی و همکاران^{۱۵} هم به توسعه یک مدل ریاضی دومرحله‌ای چندهدفه برای مسئله مکان‌یابی مسیریابی موجودی در طراحی شبکه لجستیک انسان دوستانه تحت شرایط عدم قطعیت پرداختند. هدف آن‌ها کمینه‌سازی هزینه کل، زمان سفر و افزایش قابلیت اطمینان مسیرهای امداد رسانی بود. آن‌ها با رویکرد بهینه‌سازی استوار در مسئله، شرایط عدم قطعیت را بررسی کردند [۱۸]. توانا و همکاران یک زنجیره تأمین بشردوستانه برای حل مسئله یکپارچه مکان‌یابی-موجودی-مسیریابی برای برنامه‌ریزی و مدیریت پیش و پس از فاجعه را طراحی کردند. آن‌ها از الگوریتم‌های فرا ابتکاری NSGA-II در ۲ نسخه مختلف را برای حل مسئله خود استفاده کردند [۲]. لیو و همکاران^{۱۶} یک مدل ریاضی بهینه‌سازی استوار برای برنامه‌ریزی لجستیک امداد با در نظر گرفتن تقاضا و زمان حمل‌ونقل غیرقطعی را توسعه دادند. آن‌ها به پیاده‌سازی مدل پیشنهادی خود برای مسئله مطالعه

موردی در یکی از شهرهای زلزله زده چین اقدام و سیاست‌های بهینه مدیریتی را با استفاده از تجزیه و تحلیل حساسیت ارائه دادند [۱۹]. به تازگی داوودی و گلی^{۱۷} یک مدل ریاضی براساس مفاهیم تورهای پوششی با استفاده از یک روش شناسی ترکیبی شامل الگوریتم تجزیه بندزو جستجوی همسایگی متغیر را توسعه دادند. آن‌ها به پیاده‌سازی روش پیشنهادی خود در یک مسئله مطالعه موردی در ایران طی این پژوهش پرداختند [۲۰].

تعریف مسئله

لجستیک امداد بلایا یکی از فعالیت‌های اصلی در بحث مدیریت بحران است. در این پژوهش فازهای آمادگی و پاسخ در چرخه مدیریت بحران به کمک مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه تحت شرایط عدم قطعیت مدل‌سازی شده است. این رویکرد دارای ۲ گام اصلی است که در گام اول یعنی فاز آمادگی مکان بهینه مراکز توزیع امداد و همچنین مراکز درمانی، میزان موجودی کالاهای امدادی برای ذخیره‌سازی از تأمین‌کنندگان را تعیین و در گام دوم یا فاز پاسخ، میزان حمل کالاهای امدادی از نقاط تأمین به مراکز توزیع امداد یا از مراکز توزیع به نقاط آسیب‌دیده و میزان حمل مصدومان از نقاط آسیب‌دیده به مراکز درمانی و بیمارستان‌ها را توسط آمبولانس‌ها تعیین می‌شود.

به‌طور کلی برنامه‌ریزی لجستیک در پاسخگویی به فاجعه دارای ۲ هدف کلی است. نخستین هدف حمل مصدومان از مناطق آسیب‌دیده به بیمارستان‌ها و مراکز درمانی و هدف دوم، توزیع کالاهای اضطراری مانند آب، غذا و چادرهای اسکان از انبارهای از پیش تعیین شده و تأمین‌کنندگان به مناطق آسیب‌دیده است. این اقدام‌ها با محدودیت‌های ظرفیت بیمارستان‌ها و مراکز درمانی، ظرفیت انبارها و تعداد کالاهای موجود در آن روبه‌رو هستند که باید با توجه به حجم تقاضای غیرقطعی مکان‌ها، مراکز بالقوه جهت اسکان اضطراری، تأمین کالاها و خدمات مورد نیاز در سیستم لجستیک بحران در نظر گرفته شوند.

همان‌طور که عنوان شد، حجم مجروحان یا تقاضا در سیستم برای مناطق آسیب‌دیده نیز دارای عدم قطعیت است که با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار مبتنی بر عدم قطعیت بازه‌ای در نظر گرفته می‌شود. هدف اصلی ما در برنامه‌ریزی لجستیک امداد کاهش زمان انتظار افراد برای دریافت کالاها و همچنین کاهش زمان انتظار افراد مصدوم برای ارائه خدمات درمان است. رسیدگی به مصدومان در اولویت اول و ارسال و توزیع کالاهای امدادی در اولویت دوم قرار دارد.

از سوی دیگر، مراکز تأمین و توزیع همانند هر تسهیل‌آسیب‌پذیر در هنگام وقوع فاجعه نمی‌تواند همواره به صورت ۱۰۰ درصد پایا به فعالیت خود در فاز پس از وقوع بحران ادامه دهند. زمان مورد انتظار تا وقوع شکست تأمین‌کننده i در یک دوره T_i از یک توزیع نمایی با میانگین λ_i پیروی می‌کند. در نتیجه، پایایی یا قابلیت اطمینان مرکز تأمین (R_i) ، در ارسال و توزیع محصولات به مراکز آسیب‌دیده در یک دوره از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$R_i = P(T_i > \tau) = e^{-\lambda_i \cdot \tau} \quad \forall i.$$

مراکز توزیع شبکه نیز ممکن است دچار اختلال و شکست در خدمات‌دهی شوند. به‌طور مشابه داریم:

$$R_j = P(T_j > \tau) = e^{-\lambda'_j \cdot \tau} \quad \forall j.$$

به‌طوری‌که λ'_j میانگین توزیع نمایی زمان انتظار تا وقوع شکست در مرکز توزیع j و T_j نیز زمان مدنظر تا وقوع شکست در مرکز توزیع j است. بنابراین در این پژوهش به تعیین محل انبارها، مراکز و تسهیلات درمانی، مدیریت و کنترل موجودی کالاهای اضطراری، برنامه‌ریزی حمل و نقل توسط آمبولانس‌ها تحت شرایط عدم قطعیت با در نظر گرفتن اهداف مرتبط با زمان و هزینه پرداخته می‌شود. مدل‌سازی شبکه با وجود پارامترهای غیرقطعی از طریق رویکرد بهینه‌سازی استوار انجام می‌گیرد.

از این رو به‌طور کلی اهداف مدل ریاضی ارائه شده برای برنامه‌ریزی لجستیک بحران پیشنهادی عبارت‌اند از:

۱. کمینه‌سازی هزینه‌های کل در فاز آمادگی و پاسخ؛
۲. کمینه‌سازی زمان پاسخگویی به مصدومان؛
۳. بیشینه‌سازی متوسط کالاهای ارسالی از سوی تأمین‌کنندگان و مراکز توزیع.

مدل‌سازی ریاضی

مفروض زیر را پیش از فرمول‌بندی مدل در این بخش بیان می‌شود که در مسئله مورد بررسی در نظر گرفته شده است:

- نقاط آسیب‌دیده، بیمارستان‌ها و نقاط تأمین و فواصل بین آن‌ها معلوم است؛
- نقاط منتخب مراکز درمانی، مراکز توزیع مشخص و فواصل بین تمام نقاط نیز معین است؛
- چند نوع کالا اضطراری در نظر گرفته می‌شود؛
- چند نوع مصدومیت با درجه اهمیت متفاوت وجود دارد.
- تعیین نوع مصدومیت‌ها و درجه اهمیت آن‌ها بر اساس عواملی نظیر شدت و بزرگی فاجعه، سیاست‌های واکنش و غیره است؛
- ظرفیت بیمارستان‌ها و مراکز درمانی موجود برای پذیرش انواع مختلف مصدومان و ظرفیت مراکز تأمین مشخص است؛
- بخشی از مراکز توزیع، مراکز درمانی، بیمارستان‌ها و تأمین‌کنندگان ممکن است در اثر فاجعه تخریب شوند و یا در اثر آسیب و تخریب جاده‌ها امکان استفاده از آن‌ها وجود نداشته باشد؛
- پارامتر تقاضا دارای عدم قطعیت است؛
- همه گره‌های مرتبط با تأسیس مراکز توزیع از پیش تعیین شده و مراکز درمانی منتخب هستند؛
- هر مرکز توزیع ممکن است توسط تأمین‌کنندگان و یا مراکز توزیع دیگر (پوشش پشتیبان) تأمین شود؛
- موجودی کالاهای اضطراری ممکن است در مراکز توزیع ذخیره شود و با کمبود هم مواجه شود؛
- آمبولانس‌ها در مراکز درمانی تأسیس شده و بیمارستان‌ها مستقر هستند؛

- بالگردها در ایستگاه‌های مخصوص به خود مستقر هستند؛
- هر آمبولانس و بالگرد هزینه به‌کارگیری مخصوص به خود را دارد.
- برنامه‌ریزی مسیریابی آمبولانس‌ها و بالگردها فقط در مناطق آسیب‌دیده انجام می‌شود؛
- بالگردها تنها می‌توانند سفر خود را از ایستگاه‌های مشخص خود شروع و پس از جمع‌آوری مصدومان از نقاط آسیب‌دیده آن‌ها را به بیمارستان‌ها منتقل کنند؛
- در ادامه نمادهای استفاده شده در فرمول‌بندی مکان‌یابی تسهیلات و زنجیره لجستیک امداد ارائه شده‌اند:

مجموعه‌ها و اندیس‌ها

h, s اندیس عمومی برای نمایش گره‌های شبکه

I مجموعه گره‌های تأمین‌کننده $i \in I$

J مجموعه گره‌های منتخب برای تأسیس مراکز توزیع $j \in J$

K مجموعه گره‌های نقاط آسیب‌دیده $k, k' \in K$

M مجموعه گره‌های منتخب احداث مراکز درمانی $m \in M$

N مجموعه گره‌های بیمارستان‌ها $n \in N$

T مجموعه آمبولانس‌ها $t \in T$

W مجموعه بالگردها $w \in W$

Q مجموعه ایستگاه بالگردها $q \in Q$

C مجموعه انواع کالاها $c \in C$

D مجموعه انواع مصدومیت‌ها $d \in D$

پارامترها

F_j هزینه ثابت تأسیس مرکز توزیع در گره j

λ_i پارامتر توزیع نمایی بیانگر نرخ شکست مرکز تأمین در گره i

λ'_j پارامتر توزیع نمایی بیانگر نرخ شکست مرکز توزیع در گره j

τ حداقل مدت زمان انتظار تا عدم وقوع شکست

CX_t هزینه به‌کارگیری آمبولانس t

CX'_w هزینه به‌کارگیری بالگرد w

g_m هزینه ثابت تأسیس مرکز درمانی در گره m

φ_{ic} هزینه تأمین هر واحد کالای نوع c از تأمین‌کننده i

هزینه حمل هر واحد کالای نوع c از تأمین‌کننده i

CA_{ijc}

به گره توزیع j

هزینه حمل هر واحد کالای نوع c از گره توزیع j به

CB_{cjk}

گره تقاضای k

هزینه حمل از گره s به گره h توسط آمبولانس t

CU_{hst}

به طوری که $h \in \{N, K\}, s \in \{K, N, M\}$

زمان سفر از گره s به گره h توسط آمبولانس t

TU_{hst}

به طوری که $h \in \{N, K\}, s \in \{K, N, M\}$

هزینه حمل از گره s به گره h توسط بالگرد w

CU'_{hsw}

به طوری که $h \in \{Q, K\}, s \in \{K, N, Q\}$

زمان سفر از گره s به گره h توسط بالگرد w

TU'_{hsw}

به طوری که $h \in \{Q, K\}, s \in \{K, N, Q\}$

زمان سفر از تأمین‌کننده i به گره توزیع j

TA_{ij}

زمان سفر از گره توزیع j به گره تقاضای k

TB_{jk}

هزینه رسیدگی و درمان مصدوم نوع d در مرکز درمانی m

CC_{dm}

هزینه رسیدگی و درمان مصدوم نوع d در بیمارستان n

CD_{dn}

پارامتر مرتبط با بیشترین تعداد مرکز توزیع قابل احداث

a

پارامتر مرتبط با بیشترین مرکز درمانی قابل احداث

b

هزینه نگهداری موجودی هر واحد کالای نوع c در مراکز توزیع

h_c

هزینه کمبود موجودی هر واحد کالای نوع c در مراکز توزیع

π_c

هزینه عدم رسیدگی به مصدوم نوع d

σ_d

جمعیت گره تقاضای k

pop_k

بیشینه زمان محرومیت به طوری که هیچ تلفات انسانی رخ ندهد.

T_{max}

ظرفیت مرکز توزیع j برای تأمین کالای نوع c

VC_{jc}

ظرفیت آمبولانس t برای حمل مصدوم نوع d

TC_{dt}

ظرفیت بالگرد w برای حمل مصدوم نوع d

TC'_{dw}

متغیر صفر و یک (هنگامی برابر با ۱ است که مسیر
بین h تا s توسط بالگرد w پیموده شود به طوری که
 $(h \in \{O, K\}, s \in \{K, N, O\})$
متغیر صفر و یک (هنگامی برابر با ۱ است که
آمبولانس t استفاده شود)
متغیر صفر و یک (هنگامی برابر با ۱ است که بالگرد
 w استفاده شود)

تابع هدف اول:

رابطه (۱)

$$\begin{aligned} \text{Min } TC = & \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{c \in C} \varphi_{ic} Xa_{ij} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{c \in C} CA_{ijc} Q_{ijc} + \\ & \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} \sum_{c \in C} CB_{cjk} Y_{jkc} + \sum_{j \in J} F_j ZJ_j + \sum_{m \in M} \vartheta_m HM_m + \\ & \sum_{j \in J} \sum_{c \in C} h_c I_{jc} + \sum_{j \in J} \sum_{c \in C} \pi_c b_{jc} + \sum_{h \in \{N, K\}} \sum_{s \in \{N, K, M\}} \sum_{t \in I} CU_{hst} AX_{hst} + \\ & \sum_{h \in \{Q, K\}} \sum_{s \in \{K, Q\}} \sum_{w \in W} CU'_{hsw} BX_{hsw} + \sum_{t \in I} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} \sum_{d \in D} CC_{dm} AM_{kmdt} + \\ & \sum_{w \in W} \sum_{t \in I} \sum_{n \in N} \sum_{k \in K} \sum_{d \in D} CD_{dn} (BN_{kndt} + BN'_{kndw}) + \sum_{d \in D} \sum_{k \in K} \sigma_d E_{kd} + \\ & \sum_{t \in I} CX_t U_t + \sum_{w \in W} CX'_w U'_w \end{aligned}$$

تابع هدف دوم:

رابطه (۲)

$$\begin{aligned} \text{Min } TT = & \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} TA_{ij} Xa_{ij} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} TB_{jk} Xb_{jk} + \\ & \sum_{h \in \{N, K\}} \sum_{s \in \{N, K\}} \sum_{t \in I} TU_{hst} AX_{hst} + \\ & \sum_{h \in \{Q, K\}} \sum_{s \in \{K, Q\}} \sum_{w \in W} TU'_{hsw} BX_{hsw} \end{aligned}$$

تابع هدف سوم:

رابطه (۳)

$$\begin{aligned} \text{Max } RT = & \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \sum_{c \in C} e^{-\lambda_i \cdot \tau} Q_{ijc} + \\ & \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} e^{-\lambda_j \cdot \tau} Y_{jkc} \end{aligned}$$

s.t

$$\sum_{i \in I} Xa_{ij} \geq ZJ_j \quad \forall j \in J, \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$\sum_{j \in J} Xb_{jk} \geq 1 \quad \forall k \in K, \quad \text{رابطه (۵)}$$

رابطه (۶)

$$Q_{ijc} \leq MM Xa_{ij} \quad \forall i \in I, j \in J, c \in C,$$

D_{kc} مقدار تقاضا برای کالای نوع c در گره تقاضای k
 SC_{ic} ظرفیت تأمین‌کننده i برای تأمین کالای نوع c
 ON_{kd} تعداد مصدومان نوع d در گره تقاضای k
 ϕC_{nd} ظرفیت بیمارستان n برای درمان مصدومان نوع d
 SS_{md} ظرفیت مرکز درمانی m تأسیس شده جهت درمان
مصدومان نوع d

M عدد بزرگ

متغیرهای تصمیم

Q_{ijc} مقدار کالای نوع c تأمین شده از تأمین‌کننده i
برای ذخیره در مرکز توزیع j
 Y_{jkc} مقدار کالای نوع c حمل شده از مرکز توزیع j به گره
آسیب دیده k
 I_{jc} مقدار کالای نوع c ذخیره شده در مرکز توزیع j در
انتهای دوره برنامه‌ریزی آمادگی
 b_{jc} مقدار کمبود کالای نوع c در مرکز توزیع j در انتهای
دوره برنامه‌ریزی آمادگی

AM_{kmdt} تعداد مصدوم نوع d منتقل شده از گره آسیب دیده
 k به مرکز درمانی m توسط آمبولانس t

BN_{kndt} تعداد مصدوم نوع d منتقل شده از گره آسیب دیده
 k به بیمارستان n توسط آمبولانس t

BN'_{kndw} تعداد مصدوم نوع d منتقل شده از گره آسیب دیده
 k به بیمارستان n توسط بالگرد w

E_{kd} تعداد مصدوم نوع d رسیدگی نشده در گره
آسیب دیده k

Xa_{ij} متغیر صفر و یک (هنگامی برابر با ۱ است که مرکز
توزیع گره i کالاهای مورد نیاز خود را از تأمین‌کننده i
دریافت کند)

Xb_{jk} متغیر صفر و یک (هنگامی برابر با ۱ است که گره
آسیب دیده k کالاهای مورد نیاز خود را از مرکز توزیع
در گره j دریافت کند)

ZJ_j متغیر صفر و یک (هنگامی برابر با ۱ است که مرکز
توزیع در گره j تأسیس شده باشد)

HM_m متغیر صفر و یک (هنگامی برابر با ۱ است که مرکز
درمانی در گره m تأسیس شده باشد)

AX_{hst} متغیر صفر و یک (هنگامی برابر با ۱ است که مسیر
بین h تا s توسط آمبولانس t پیموده شود
به طوری که $(h \in \{N, K\}, s \in \{K, N, M\})$

$$\sum_{n \in N} AX_{nkt} - \sum_{h \in \{N, M\}} AX_{kht} = 0 \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

$$\forall t \in T, k \in K,$$

$$\sum_{k \in K} AX_{kk't} - \sum_{k \in K} AX_{k'kt} = 0 \quad \text{رابطه (۲۳)}$$

$$\forall t \in T, k' \in \{M, N, K\},$$

$$\sum_{k \in K} AX_{knt} + \sum_{k \in K} AX_{kmt} \leq 1 \quad \text{رابطه (۲۴)}$$

$$\forall n \in N, m \in M, t \in T$$

$$\sum_{h \in \{N, K\}} \sum_{s \in \{M, K, N\}} AX_{hst} \leq MMU_t \quad \text{رابطه (۲۵)}$$

$$\forall t \in T,$$

$$\sum_{h \in \{Q, K\}} BX_{hhw} = 0 \quad \forall w \in W, \quad \text{رابطه (۲۶)}$$

$$\sum_{h \in \{K, Q\}} BX_{hsw} - \sum_{h \in \{K, N, Q\}} BX_{shw} = 0 \quad \forall s \in K, w \in W, \quad \text{رابطه (۲۷)}$$

$$\sum_{s \in K} BX_{hsw} - \sum_{n \in N} BX_{nhw} = 0 \quad \text{رابطه (۲۸)}$$

$$\forall s \in K, w \in W,$$

$$\sum_{n \in N} \sum_{k \in K} BN'_{kndw} \leq TC'_{dw} \quad \text{رابطه (۲۹)}$$

$$\forall d \in D, w \in W,$$

$$\sum_{h \in \{Q, K\}} \sum_{s \in \{Q, K, N\}} BX_{hsw} \leq MMU'_w \quad \text{رابطه (۳۰)}$$

$$\forall w \in W,$$

$$AM_{kmdt} \leq MM \cdot \sum_{\substack{h \in \{N, K\} \\ h \neq k}} AX_{hkt} \quad \text{رابطه (۳۱)}$$

$$\forall k \in K, m \in M, d \in D, t \in T,$$

$$BN_{kndt} \leq MM \cdot \sum_{\substack{h \in \{N, K\} \\ h \neq k}} AX_{hkt} \quad \text{رابطه (۲۳)}$$

$$\forall k \in K, n \in N, d \in D, t \in T,$$

$$Y_{jkc} \leq MM \cdot Xb_{jk} \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$\forall k \in K, j \in J, c \in C,$$

$$\sum_{j \in J} Q_{ijc} \leq SC_{ic} \quad \forall i \in I, c \in C, \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$\sum_{k \in K} Y_{jkc} \leq VC_{jc} \quad \forall j \in J, c \in C, \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$I_{jc} = \sum_{i \in I} Q_{ijc} + b_{jc} - \sum_{k \in K} D_{kc} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$\forall j \in J, c \in C,$$

$$\sum_{j \in J} ZJ_j \leq a \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$\sum_{m \in M} HM_m \leq b \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$Xb_{jk} \leq ZJ_j \quad \forall j \in J, k \in K \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

$$AM_{kmdt} \leq MM \cdot HM_m \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

$$\forall k \in K, m \in M, d \in D, t \in T,$$

$$TA_{ij} Xa_{ij} \leq T_{\max} \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

$$\forall i \in I, j \in J,$$

$$TB_{jk} Xb_{jk} \leq T_{\max} \quad \forall k \in K, j \in J, \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{m \in M} \left(AM_{kmdt} + \sum_{w \in W} \sum_{n \in N} (BN_{kndt} + BN'_{kndw}) \right) + E_{kd} = ON_{kd} \quad \forall k \in K, d \in D, \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

$$\sum_{n \in N} \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} (AM_{kmdt} + BN_{kndt}) \leq TC_{dt} \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

$$\forall d \in D, t \in T,$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{k \in K} AM_{kmdt} \leq SS_{md} \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

$$\forall m \in M, d \in D,$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{w \in W} \sum_{k \in K} (BN_{kndt} + BN'_{kndw}) \leq \phi C_{nd} \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

$$\forall n \in N, d \in D,$$

$$\sum_{h \in \{N, M, K\}} AX_{hht} = 0 \quad \forall t \in T, \quad \text{رابطه (۲۱)}$$



$$BN'_{kndw} \leq MM \cdot \sum_{\substack{h \in \{Q, K\} \\ h \neq k}} BX_{hkw} \quad \text{رابطه (۳۳)}$$

$$\forall k \in K, n \in N, d \in D, w \in W,$$

$$\sum_{n \in N} \sum_{t \in T} \sum_{q \in Q} \sum_{w \in W} (AX_{nkt} + BX_{qkw}) \geq 1 \quad \text{رابطه (۳۴)}$$

$$\forall k \in K,$$

$$Q_{ijc}, Y_{jkc}, I_{jc}, b_{jc} \geq 0;$$

$$AM_{kmdt}, BN_{kndt}, BN'_{kndw}, \quad \text{رابطه (۳۵)}$$

$$E_{kd} \in Z^+; Xa_{ij}, Xb_{jk}, ZJ_j,$$

$$HM_m, AX_{hst}, U_t, U'_w \in \{0, 1\};$$

$$\forall i \in I, j \in J, c \in C, k \in K,$$

$$d \in D, h, s \in \{K, N, M\}.$$

روابط (۲۱) تا (۲۵) مرتبط با روابط مسیریابی آمبولانس‌هاست به طوری که رابطه (۲۱) بیانگر آن است که هیچ آمبولانسی نمی‌تواند دور تشکیل دهد. روابط (۲۲) و (۲۳) بیانگر رابطه پیوستگی مسیر آمبولانس‌هاست. رابطه (۲۴) بیانگر آن است که در صورتی که آمبولانسی برای خدمات‌دهی انتخاب شود، در نهایت باید سفر خود را یا در مراکز درمانی و یا در بیمارستان‌ها به پایان برساند. رابطه (۲۵) بیانگر آن است که تا وقتی آمبولانسی جهت خدمات‌دهی انتخاب نشود، امکان استفاده از آن وجود ندارد. روابط (۲۶) تا (۲۸) مرتبط با روابط مسیریابی بالگردهاست. به طوری که رابطه (۲۶) بیانگر آن است که هیچ بالگردی نمی‌تواند دور تشکیل دهد. روابط (۲۷) و (۲۸) بیانگر روابط پیوستگی مسیر بالگردهاست. به طوری که هر بالگرد سفر خود را از ایستگاه‌های مشخص شده شروع می‌کند و در نهایت مصدومان را به بیمارستان‌ها منتقل کرده و به ایستگاه دوباره برمی‌گردد. رابطه (۲۹) نشان‌دهنده محدودیت ظرفیت بالگردهاست. رابطه (۳۰) بیانگر آن است که امکان استفاده از بالگرد جهت خدمات‌دهی تا هنگام انتخاب آن وجود ندارد. رابطه (۳۱) بیانگر ارتباط بین تعداد مصدومان منتقل شده به مراکز درمانی و لزوم سفر آمبولانس به منطقه تقاضای متناظر است. رابطه (۳۲) نیز ارتباط بین تعداد مصدومان منتقل شده به بیمارستان‌ها و لزوم سفر آمبولانس به منطقه تقاضای متناظر را ارائه می‌دهد. رابطه (۳۳) بیانگر ارتباط بین تعداد مصدومان منتقل شده به بیمارستان‌ها و لزوم سفر بالگردها به منطقه تقاضای متناظر است. رابطه (۳۴) بیانگر آن است که حداقل یک بالگرد یا آمبولانس باید به منطقه تقاضا خدمات‌دهی ارائه کند. رابطه (۳۵) هم نوع متغیرهای مسئله را نشان می‌دهد.

مدل‌سازی استوار

مدل برتسیماس و سیم [۲۱] برای مسئله بهینه‌سازی خطی در حالتی بیشتر تشریح می‌شود که تابع هدف کمینه‌سازی است و ضرایب عدم قطعیت هم در تابع هدف و هم در محدودیت‌ها وجود دارند؛ سپس مدل اصلی پژوهش جهت تطابق آن‌ها بررسی می‌شود. مسئله بهینه‌سازی زیر به صورت کلی مدنظر قرار می‌گیرد:

$$\text{Min } c^T x \quad \text{رابطه (۳۶)}$$

$$\text{s.t.: } Ax \leq b$$

$$l \leq x \leq u$$

بازه‌های عدم قطعیت به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\text{هرکدام از ضرایب محدودیت‌ها } a_{ij}, j \in N = \{1, 2, \dots, n\}$$

به صورت یک متغیر تصادفی مستقل با توزیع متقارن ولی ناشناخته

$$[a_{ij} - \hat{a}_{ij}, a_{ij} + \hat{a}_{ij}] \quad j \in N$$

مقدار می‌گیرد که \hat{a}_{ij} نشان‌دهنده انحراف از ضریب اسمی a_{ij} است.

هرکدام از ضرایب تابع هدف به صورت $c_j, j \in N$ در بازه]

$$[c_j - d_j, c_j + d_j]$$

ضریب اسمی c_j است. لازم به ذکر است که چون تابع هدف

کمینه‌سازی و هدف مدل‌های استوار حصول حداکثر تأسف^{۱۸}

رابطه (۱) بیانگر تابع هدف اول شامل کمینه‌سازی هزینه‌های کل در فاز آماده‌سازی و پاسخگویی است. رابطه (۲) هدف دوم مسئله شامل کمینه‌سازی زمان کل پاسخگویی در فاز پاسخگویی را ارائه می‌دهد. رابطه (۳) بیانگر تابع هدف سوم مسئله شامل بیشینه‌سازی متوسط کالای ارسالی از سوی مراکز تأمین و مراکز توزیع است. رابطه (۴) ارائه‌دهنده لزوم تخصیص هر مرکز توزیع تأسیس شده به یکی از مراکز تأمین است. رابطه (۵) بیانگر لزوم تخصیص هر یک از مراکز تقاضا به یکی از مراکز توزیع است. رابطه (۶) ارتباط بین متغیر تخصیص مراکز توزیع به مراکز تأمین و حجم کل کالای انتقال‌یافته بین این مراکز را نشان می‌دهد. رابطه (۷) نشان‌دهنده ارتباط بین متغیر تخصیص مراکز تقاضا به مراکز توزیع و حجم کل کالای انتقال‌یافته بین این مراکز است. روابط (۸) و (۹) به ترتیب بیانگر محدودیت ظرفیت مراکز تأمین و توزیع هر کالا هستند. رابطه (۱۰) میزان موجودی هر کالا را در مراکز توزیع محاسبه می‌کند. روابط (۱۱) و (۱۲) به ترتیب بیانگر لزوم رعایت بیشترین تعداد تأسیس مراکز توزیع و درمانی را نشان می‌دهد. رابطه (۱۳) نشان‌دهنده امکان تخصیص مرکز تقاضا به یک مرکز توزیع در صورت احداث آن است. رابطه (۱۴) هم نشان‌دهنده امکان انتقال مصدومان به یک مرکز درمانی در صورت احداث آن است. روابط (۱۵) و (۱۶) به ترتیب بیانگر لزوم رعایت بیشترین زمان سفر بین مراکز تأمین، توزیع و تقاضاست؛ به شرطی که هیچ تلفات انسانی رخ ندهد. رابطه (۱۷) رابطه تعادل بین تعداد مصدومان منتقل شده به بیمارستان و مراکز درمانی و تعداد مصدومان رسیدگی نشده با تعداد کل مصدومان را ارائه می‌دهد. رابطه (۱۸) بیانگر محدودیت ظرفیت هر آمبولانس برای انتقال هر نوع مصدوم است. رابطه (۱۹) و (۲۰) به ترتیب ارائه‌دهنده محدودیت ظرفیت مراکز درمانی و بیمارستان‌ها هستند.

رابطه (۳۸)

$$\beta_i(x^*, \Gamma_i) = \max_{\{s_i \cup \{t_i\} | s_i \subseteq J_i, |s_i| \leq |\Gamma_i|, t_i \in J_i \setminus s_i\}} \left\{ \sum_{j \in s_i} \hat{a}_{ij} |x_j^*| + (\Gamma_i - |\Gamma_i|) \hat{a}_{it_i} |x_{t_i}^*| \right\}$$

برابر است با مقدار بهینه تابع هدف مسئله زیر که خطی است.
رابطه (۳۹)

$$\beta_i(x^*, \Gamma_i) = \max \sum_{j \in J_i} \hat{a}_{ij} |x_j^*| z_{ij}$$

s. t.

$$\sum_{j \in J_i} z_{ij} \leq \Gamma_i$$

$$0 \leq z_{ij} \leq 1 \quad \forall i, j \in J_i$$

اعمال بهینه‌سازی استوار برتسیماس و سیم در مدل ریاضی

در مدل ریاضی پیشنهادی پژوهش، پارامترهای تعداد مصدومان نوع d در گره تقاضای k (ON_{kd}) و مقدار تقاضا برای کالای نوع c در گره تقاضای k (D_{kc}) از اصلی‌ترین پارامتر مسئله با ماهیت غیرقطعی است که در این پژوهش در یک بازه عدم قطعیت تعریف می‌شود. بدین صورت که در یک بازه عدم قطعیت برای این تعداد از انواع مصدومان در هر گره ($[ON_{kd} - \hat{ON}_{kd}, ON_{kd} + \hat{ON}_{kd}]$) و مقدار تقاضای انواع کالاها در گره‌های تقاضا ($[\bar{D}_{kc} - \hat{D}_{kc}, \bar{D}_{kc} + \hat{D}_{kc}]$) بر اساس رویکرد برتسیماس و سیم در نظر گرفته می‌شود. مطابق با فضای عدم قطعیت بازه‌ای هر یک از ON_{kd} های غیرقطعی در قالب یک فاصله متقارن، محدود و با مرکزیت ON_{kd} به شکل $ON_{kd} = \alpha \cdot \bar{ON}_{kd}$ است که ON_{kd} مقدار تخمینی پارامتر تعداد مصدومان، \hat{ON}_{kd} میزان نوسان پارامتر تعداد مصدومان و سطح عدم قطعیت است. به طور مشابه هم برای پارامتر D_{kc} در قالب یک فاصله متقارن، محدود و با مرکزیت \bar{D}_{kc} به شکل $\hat{D}_{kc} = \beta \cdot \bar{D}_{kc}$ است که \bar{D}_{kc} مقدار تخمینی پارامتر تقاضا، \hat{D}_{kc} میزان نوسان پارامتر تقاضا و $\beta > 0$ سطح عدم قطعیت است.

حال با توجه به مدل ریاضی ارائه شده، محدودیت‌های (۱۰) و (۱۷) به دلیل وجود پارامترهای غیرقطعی منجر به ایجاد عدم قطعیت شده و این محدودیت‌ها باید بر اساس مدل پیشنهادی برتسیماس و سیم استوار شوند. بنابراین تغییرات ایجاد شده حال مدل‌سازی مدل استوار پیشنهادی به صورت زیر ارائه می‌شود:

است، تنها یک طرف بازه مذکور مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ یعنی فرض می‌شود که c_j در بازه $[c_j, c_j + d_j]$ مقدار می‌گیرد. برای فرمول بندی همتای استوار مسئله Γ_i به صورت زیر تعریف می‌شود:

محدودیت Γ_i به صورت $b_i a_i^T x \leq \Gamma_i$ در نظر گرفته شده و J_i به صورت مجموعه ضرایب غیرقطعی در سطر i تعریف می‌شود. پارامتر Γ_i که برحسب لزوم عدد صحیح نیست برای هر سطر i تعریف می‌شود؛ به طوری که $\Gamma_i \in [0, |J_i|]$ در واقع نقش Γ_i ها در محدودیت‌ها تنظیم کردن میزان استواری^{۱۹} روش پیشنهادی در مقابل سطح محافظه‌کاری جواب است. برتسیماس و سیم نشان دادند که ممکن است تمامی ضرایب با هم با احتمال کمی دچار عدم قطعیت شوند. لذا فرض میشود بیشترین $[\Gamma_i]$ عدد از این ضرایب اجازه تغییر دارند و یک ضریب a_{ij} هم می‌تواند تا مقدار $\hat{a}_{ij} (\Gamma_i - |\Gamma_i|)$ تغییر کند. به عبارت دیگر فرض می‌شود فقط یک زیرمجموعه از ضرایب مجاز خواهند بود که در حل ما تأثیر ناخوشایند بگذارند. با این فرض تضمین می‌شود اگر در حالت واقعی همین اتفاق روی دهد، جواب بهینه استوار ما به طور قطعی موجه خواهد بود. همچنین با توجه به توزیع متقارن متغیرها حتی در صورت آنکه تعداد ضرایبی که تغییر می‌کنند از $[\Gamma_i]$ هم بیشتر شود، جواب بهینه با احتمال خیلی زیادی موجه خواهد ماند. لذا Γ_i سطح حفاظت^{۲۰} برای محدودیت ام اطلاق می‌شود.

پارامتر Γ_0 سطح استواری در تابع هدف را کنترل می‌کند. بنابراین مقدار جواب بهینه در حالت‌هایی یافت می‌شود که Γ_0 تا ضرایب تابع هدف تغییر می‌کند و بیشترین تأثیر را بر روی جواب می‌گذارد.

در حالت‌های کلی مقادیر بالاتر Γ_0 سطح محافظه‌کاری را در مقابل هزینه بیشتری که به ازای آن باید در تابع هدف پرداخت شود، بالا می‌برد. Γ_0 لزوماً باید عدد صحیح و سایر Γ_0 ها می‌توانند صحیح یا غیر صحیح باشند.

بر این اساس همتای استوار بهینه‌سازی خطی اسمی ذکر شده به صورت زیر به دست می‌آید [۲۱]:

رابطه (۳۷)

$$\text{Min } c^T x + \text{Max}_{\{s_i | s_i \subseteq J_i, |s_i| \leq \Gamma_i\}} \left\{ \sum_{j \in s_i} d_j |x_j| \right\}$$

s. t.

$$\sum_j a_{ij} x_j + \text{Max}_{\{s_i \cup \{t_i\} | s_i \subseteq J_i, |s_i| \leq |\Gamma_i|, t_i \in J_i \setminus s_i\}} \left\{ \sum_{j \in s_i} \hat{a}_{ij} |x_j| + l \leq x \leq u \right\}$$

$$\left\{ (\Gamma_i - |\Gamma_i|) \hat{a}_{it_i} |x_{t_i}| \right\} \leq b_i$$

در صورتی که بخواهیم مدل فوق را به صورت یک مدل بهینه‌سازی خطی درآید، نیاز به قضیه زیر است:

قضیه: به ازای بردار داده شده x^* ، تابع حفاظت محدودیت Γ_i ام که از رابطه زیر حاصل می‌شود:

i_1, j_1	i_1, j_2	i_1, j_3	...	i_1, j_j	i_1, j_{j+1}	i_1, j_{j+2}	i_1, j_{j+3}	...	i_1, j_J	i_1, j_{J+1}	...	i_1, j_J
j_1, k_1	j_1, k_2	j_1, k_3	...	j_1, k_K	j_2, k_1	j_2, k_2	j_2, k_3	...	j_2, k_K	j_3, k_1	...	j_3, k_K
j_1	j_2	j_3	j_4	j_5	j_6	j_7	j_8	...	...	j_{J-1}	j_J	
m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6	m_7	m_8	...	...	m_{M-1}	m_M	
t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	...	...	t_{T-1}	t_T	
w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6	w_7	w_8	...	...	w_{W-1}	w_W	
h_{1,S_1V_1}	h_{1,S_1V_2}	...	h_{1,S_1V_T}	...	h_{1,S_2V_1}	...	h_{1,S_2V_T}	...	...	h_{H,S_5V_1}	...	h_{H,S_5V_T}
h_{1,S_1t_1}	h_{1,S_1t_2}	...	h_{1,S_1t_T}	...	h_{1,S_2t_1}	...	h_{1,S_2t_T}	...	...	h_{H,S_5t_1}	...	h_{H,S_5t_T}

شکل ۱. نحوه نمایش جواب الگوریتم NSGA-II

۳. گرگ‌های دلتا (delta): پایین‌تر از گرگ‌های بتا و شامل گرگ‌های پیر، شکارچی‌ها و گرگ‌های مراقبت‌کننده از نوزادان.
۴. گرگ‌های امگا (omega): پایین‌ترین مرتبه در هرم سلسله‌مراتب و دارای کمترین حق نسبت به بقیه اعضای گروه. بعد از همه غذا می‌خورند و در فرآیند تصمیم‌گیری مشارکتی ندارند. فرآیند شکار گرگ‌های خاکستری شامل ۳ فاز اصلی است:
 ۱. مشاهده شکار، ردیابی و تعقیب آن (Tracking and ap-proaching)
 ۲. نزدیک شدن، احاطه کردن (حلقه زدن) به دور شکار و همراه کردن آن تا زمانی که از حرکت بازماند (Pursing and en-circling)
 ۳. حمله به شکار (attacking).

بهینه‌سازی با استفاده از گرگ‌های بتا، آلفا و دلتا انجام می‌شود. یک گرگ به عنوان آلفا هدایت‌کننده اصلی الگوریتم فرض می‌شود و یک گرگ بتا و دلتا نیز مشارکت دارند و بقیه گرگ‌ها به عنوان دنبال‌کننده آن‌ها محسوب می‌شوند. در نتیجه، الگوریتم گرگ خاکستری شامل پارامترهای α ، β ، δ و ω است. برای مدل کردن رفتار شکار گرگ‌ها به صورت ریاضی از روابط زیر استفاده می‌شود:

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_P(t) - \vec{X}(t)| \quad \text{رابطه (۴۴)}$$

$$\vec{X}(t+1) = X_P(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad \text{رابطه (۴۵)}$$

که t نشان‌دهنده تکرار جریان، A و C ضرایب بردار، \vec{X}_P بردار جایگاه شکار و X بردار جایگاه گرگ‌های خاکستری است. بردارهای A و C از طریق معادلات زیر به دست می‌آیند:

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad \text{رابطه (۴۶)}$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \quad \text{رابطه (۴۷)}$$

درایه‌های \vec{a} به صورت خطی از ۲ تا صفر کاهش می‌یابند و r_1 و r_2 بردارهای تصادفی در بازه $[0, 1]$ هستند.

در نهایت، پروژه شکار و تغییر جایگاه‌های گرگ‌ها برای رسیدن به شکار در نقطه بهینه به طریق زیر مدل‌سازی می‌شود.

مقدار یک را به خود می‌گیرد. سطر ششم ماتریس هم دارای W ستون است و اگر بالگرد w استفاده شود، w امین درایه از این سطر مقدار یک را به خود می‌گیرد. سطر هفتم ماتریس H^*S^*V ستون دارد و درایه H^*S^*V از این سطر زمانی برابر با یک است که مسیر بین h تا S توسط بالگرد w پیموده شود. به طور مشابه، سطر هشتم ماتریس H^*S^*T ستون دارد و درایه H^*S^*T از این سطر زمانی برابر با یک است که مسیر بین h تا S توسط آمبولانس t پیموده شود. لازم به ذکر است، برای عملگر تقاطع در الگوریتم ژنتیک از عملگر تقاطع ۲ نقطه‌ای و برای عملگر جهش از عملگر جهش یک نقطه‌ای استفاده شده است.

الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری (GWO)

الگوریتم گرگ خاکستری GWO یا Grey Wolf Optimizer الگوریتمی فرا ابتکاری الهام گرفته از طبیعت است که بر اساس ساختار سلسله‌مراتبی و رفتار اجتماعی گرگ‌ها در زمان شکار است. الگوریتم GWO مبتنی بر جمعیت و دارای فرآیندی ساده در تنظیمات است و قابلیت راحت تعمیم به مسائل با ابعاد بزرگ را داراست. در پیاده‌سازی این پروژه ۴ نوع از گرگ‌های خاکستری مانند آلفا، بتا، امگا برای شبیه‌سازی سلسله‌مراتب رهبری استفاده شده است که با ۳ گام اصلی شکار شامل جستجو برای طعمه، محاصره و حمله به طعمه اجرا می‌شود. نتایج شبیه‌سازی مقایسه شده با الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) نیز عملکرد بهتر الگوریتم GWO را نشان می‌دهد. ساختار سلسله‌مراتبی و رفتار اجتماعی گرگ‌های خاکستری به صورت زیر است:

گرگ‌های خاکستری در رأس زنجیره غذایی هستند و زندگی اجتماعی دارند. تعداد متوسط گرگ‌های هر گله بین ۵ تا ۱۲ رأس است. در هر گله ۴ رتبه اصلی وجود دارد:

۱. گرگ‌های رهبر، گروه آلفا (alpha) نامیده می‌شوند که می‌توانند مذکر یا مؤنث باشند. این گرگ‌ها بر گله مسلط هستند و مواردی مانند محل استراحت یا نحوه شکار را مدیریت می‌کنند؛ اما علاوه بر رفتار مسلط گرگ‌های آلفا، نوعی ساختار دموکراتیک هم در گروه دیده می‌شود.

۲. گرگ‌های بتا (beta): کمک به گرگ‌های آلفا در فرآیند تصمیم‌گیری و همچنین مستعد انتخاب شدن به جای آن‌ها.

$$\vec{D}_\delta = |\vec{C}_\delta \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X}|, \quad \vec{D}_\beta = |\vec{C}_\beta \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X}|, \quad (48) \text{ رابطه}$$

$$\vec{D}_\alpha = |\vec{C}_\alpha \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X}|,$$

$$\vec{X}_\delta = \vec{X}_\delta - \vec{A}_\delta \cdot (\vec{D}_\delta) \quad \vec{X}_\beta = \vec{X}_\beta - \vec{A}_\beta \cdot (\vec{D}_\beta), \quad (49) \text{ رابطه}$$

$$\vec{X}_\alpha = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_\alpha \cdot (\vec{D}_\alpha),$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_\alpha + \vec{X}_\beta + \vec{X}_\delta}{3} \quad (50) \text{ رابطه}$$

به طور خلاصه، فرآیند جستجو با ایجاد یک جمعیت تصادفی در الگوریتم GWO (پاسخ های منتخب) آغاز می شود. گرگ های آلفا، بتا و دلتا احتمال شکار در طول دوره تکرار را برآورد می کنند. هر جواب پیشنهادی فاصله خود را با طعمه به روز می کند. پارامتر "a" از ۲ به صفر کاهش می یابد تا روند شناسایی را تقویت کند و به طعمه حمله کند. وقتی $|A| > 1$ ، جواب های نامزد شده واگرا می شوند و زمانی که $|A| < 1$ جواب ها همگرا می شوند.

جهت تشکیل مرز پارتوی الگوریتم MOGWO آرشیوی از پاسخ ها تشکیل می شود. این آرشیو عهده دار نگهداری پاسخ های پارتوی نامغلوب است. در واقع، آرشیو یک واحد ذخیره سازی ساده است که می تواند پاسخ های پارتو را ذخیره سازی و یا تعویض کند. بنابراین آرشیو همواره تعدادی مشخصی از پاسخ های پارتو را نگهداری می کند و در مواقع لزوم آن ها را با جواب های بهتر

جایگزین می کند. دقت شود که هر آرشیو ظرفیت مشخصی داشته و مجاز به نگهداری از تعداد مشخصی از پاسخ های پارتو است. در طول اجرای الگوریتم جواب های نامغلوب تولید شده با پاسخ های موجود در آرشیو مقایسه می شوند. در این صورت یکی از حالت های زیر اتفاق می افتد:

- پاسخ جدید توسط حداقل یکی از اعضای آرشیو مغلوب می شود. در این حالت جواب جدید اجازه ورود به آرشیو را نخواهد یافت.
 - جواب جدید حداقل یکی از اعضای آرشیو را مغلوب می کند. در این صورت پاسخ (های) مغلوب شده از آرشیو حذف شده و جواب جدید به آرشیو افزوده می شود.
 - اگر جواب جدید و جواب های موجود در آرشیو هیچ کدام موفق به غلبه بر دیگری نشوند، جواب جدید وارد آرشیو می شود.
 - اگر ظرفیت آرشیو تکمیل باشد، فضای جواب تمامی جواب ها دوباره بررسی شده و جواب با بیشترین فاصله ازدحامی حذف می شود. این کار باعث می شود گوناگونی جواب های جبهه پارتوی نهایی افزایش یابد.
- شبه کد الگوریتم گرگ خاکستری چندهدفه در شکل ۲ ارائه شده است [۲۳].

```

Initialize the grey wolf population Xi (i = 1, 2, ..., n)
Initialize a, A, and C
Calculate the objective values for each search agent
Find the non-dominated solutions and initialize the archive with them
Xα=Select Leader (archive)
Exclude alpha from the archive temporarily to avoid selecting the same leader
Xβ=Select Leader (archive)
Exclude beta from the archive temporarily to avoid selecting the same leader
Xδ=Select Leader (archive)
Add back alpha and beta to the archive
t=1;
while(t < Max number of iterations)
  for each search agent
    Update the position of the current search agent by equations (48)-(50)
  end for
  Update a, A, and C
  Calculate the objective values of all search agents
  Find the non-dominated solutions
  Update the archive with respect to the obtained non-dominated solutions
  If the archive is full
    Run the grid mechanism to omit one of the current archive members
    Add the new solution to the archive
  end if
  If any of the new added solutions to the archive is located outside the hypercube
    Update the grids to cover the new solution(s)
  end if
  Xα=Select Leader (archive)
  Exclude alpha from the archive temporarily to avoid selecting the same leader
  Xβ=Select Leader (archive)
  Exclude beta from the archive temporarily to avoid selecting the same leader
  Xδ=Select Leader (archive)
  Add back alpha and beta to the archive
  t=t+1
end while
return archive
    
```

شکل ۲. شبه کد الگوریتم گرگ خاکستری چندهدفه

نتایج محاسباتی

پس از معرفی روش‌های حل مورد استفاده در تحقیق، در این بخش برای تجزیه و تحلیل کارایی مدل ریاضی ارائه شده و روش‌های حل توسعه داده شده، چندین نمونه در ابعاد مختلف به صورت تصادفی ایجاد می‌شود که اطلاعات هر نمونه در جدول ۱. تشریح می‌شود. به این منظور مسائل نمونه در ابعاد کوچک ($P1$)، ابعاد متوسط ($P2$ و $P3$)، ابعاد بزرگ ($P4$) در فضای دوبعدی تولید می‌شود.

نرم افزار GAMS نسخه ۲۴/۱ برای حل از روش حل دقیق محدودیت اپسیلون و از نرم افزار MATLAB نسخه ۱۶/۰ جهت کد کردن الگوریتم استفاده می‌شود. ابتدا مسائل برای تعیین نقاط پارتو بر اساس هر یک از توابع هدف به صورت جداگانه حل می‌شوند. لازم به ذکر است که تمامی ران‌های مسائل در نرم افزار GAMS با در نظر گرفتن محدودیت زمانی ۳۶۰۰ ثانیه انجام می‌گیرد. در واقع پس از اجرای محدودیت ۳۶۰۰ ثانیه بهترین جواب حاصل گزارش می‌شود که ممکن است بهینه کلی یا بهینه محلی باشد. لازم به ذکر است که مسئله $P4$ در روش محدودیت اپسیلون، جوابی به ازای این محدودیت زمانی ارائه نمی‌کند. مسئله $P4$ تنها با الگوریتم‌های فرا ابتکاری قابل حل است. ستون اول در جدول ۲. بیانگر رده نمونه‌های تصادفی ایجاد شده، ستون دوم شامل تعداد گره‌های تأمین‌کننده در شبکه

گراف، ستون سوم تعداد گره‌های نامزد برای تأسیس مراکز توزیع، ستون چهارم تعداد گره‌های نقاط آسیب دیده، ستون پنجم تعداد گره‌های نامزد احداث مراکز درمانی، ستون ششم تعداد بیمارستان‌ها، ستون هفتم تعداد آمبولانس‌ها، ستون هشتم تعداد بالگردها، ستون نهم تعداد ایستگاه بالگردها، ستون دهم تعداد انواع کالاها و ستون یازدهم تعداد انواع مصدومیت‌هاست.

جدول ۲. نمونه‌های تصادفی ایجاد شده

مسئله	I	J	K	M	N	T	W	Q	C	D
$P1$	۵	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۲	۲
$P2$	۹	۳	۲	۲	۲	۲	۱	۱	۴	۳
$P3$	۱۳	۵	۳	۲	۳	۳	۲	۲	۶	۵
$P4$	۵۰	۱۰	۶	۵	۵	۵	۳	۲	۱۰	۱۰

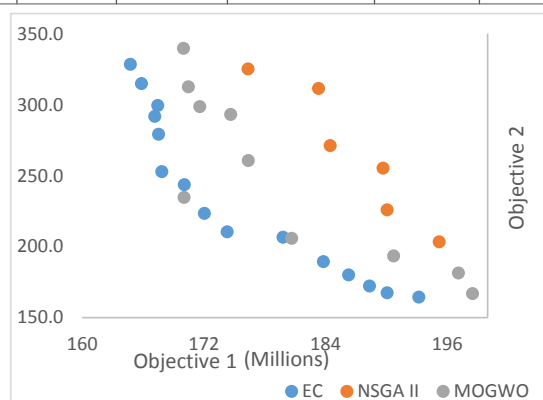
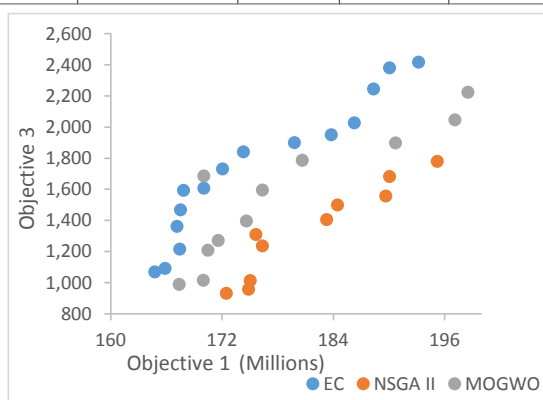
به عنوان نمونه، مسئله نمونه شماره ۱ توسط الگوریتم اپسیلون محدودیت، $NSGA-II$ و $MOGWO$ پیشنهادی حل شده و جواب‌های پارتوی یافت شده آن‌ها به عنوان نماینده‌ای از مسائل کوچک در جدول ۳. گزارش شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، الگوریتم $NSGA-II$ موفق به یافتن ۱۲ جواب پارتو برای مسئله شماره ۱ شده است. در حالی که الگوریتم $MOGWO$ ، ۱۱ جواب پارتو برای این مسئله به دست آورده است. در شکل‌های

جدول ۱. مقادیر پارامترها

پارامترها	مقدار	پارامترها	مقدار
F_j	uniform(1000,2000)	CU_{hst}	uniform(2,3)
λ_i	uniform(0.01,0.02)	TU_{hst}	uniform(10,100)
λ'_j	uniform(0.01,0.02)	CU'_{hsw}	uniform(10,100)
τ	720	TU'_{hsw}	uniform(5,22)
CX_t	uniform(10,20)	TA_{ij}	uniform(10,50)
CX'_w	uniform(400,600)	TB_{jk}	uniform(10,50)
g_m	uniform(3000,4000)	CC_{dm}	uniform(5,22)
φ_{ic}	uniform(2,4)	CD_{dn}	uniform(2,3)
CA_{ijc}	uniform(1,2)	a	6
CB_{ejk}	uniform(1,2)	b	5
h_c	uniform(2,4)	pop_k	round(uniform(20,50))
π_c	uniform(7,12)	T_{max}	480
σ_d	uniform(11,22)	VC_{jc}	uniform(500,700)
h_c	uniform(2,4)	TC_{dt}	round(uniform(2,5))
TC'_{dw}	round(uniform(20,25))	ON_{kd}	round(uniform(12,50))
D_{kc}	uniform(11,23)	ϕC_{nd}	uniform(2,4)
SC_{ic}	uniform(1000,8100)	SS_{md}	round(uniform(150,200))
Γ_{kc}^1	uniform(0.5,0.8)	MM	100000000
		Γ_{kd}^2	uniform(0.5,0.8)

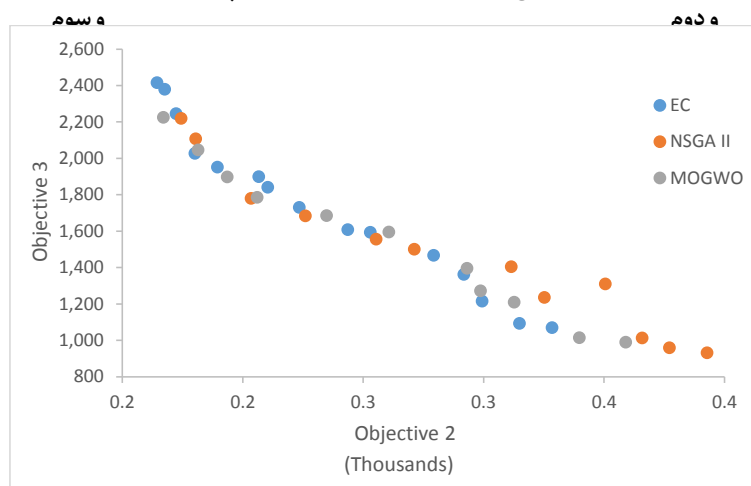
جدول ۳. جواب بهینه پارتو حاصل از حل نمونه شماره ۱

رده نمونه	جواب بهینه پارتو الگوریتم EC			جواب بهینه پارتو الگوریتم NSGA-II			جواب بهینه پارتو الگوریتم MOGWO		
	هدف اول	هدف دوم	هدف سوم	هدف اول	هدف دوم	هدف سوم	هدف اول	هدف دوم	هدف سوم
۱	۱۹۳,۲۰۸,۶۸۴	۱۶۴	۲,۴۱۶	۲۱۶۰,۸۹۱۸۱	۱۷۴	۲۲۲۰	۱۹۸۵۰,۳۱۲۴	۱۶۷	۲۲۲۵
۲	۱۹۰,۰۸۰,۳۳۵	۱۶۷	۲,۳۸۰	۲۰۶۶۰,۶۹۲۵	۱۸۰	۲۱۰۷	۱۹۷۱۱۶۱۲۱	۱۸۱	۲۰۴۶
۳	۱۸۸,۳۴۶,۸۳۷	۱۷۲	۲,۲۴۵	۱۹۵۲۲۳۸۰۴	۲۰۳	۱۷۸۰	۱۹۰۷۰,۶۲۳۹	۱۹۳	۱۸۹۸
۴	۱۸۶,۲۶۲,۴۳۸	۱۸۰	۲,۰۲۸	۱۹۰۰,۷۴۱۷۵	۲۲۶	۱۶۸۳	۱۸۰,۶۵۳۲۳۵	۲۰۶	۱۷۸۶
۵	۱۸۳,۷۸۷,۰۸۵	۱۸۹	۱,۹۵۱	۱۸۹۶۶۸۸۵۱	۲۵۵	۱۵۵۷	۱۷۰۰,۳۴۹۲۷	۲۳۵	۱۶۸۵
۶	۱۷۹,۸۰۳,۶۲۲	۲۰۶	۱,۸۹۹	۱۸۴۴۵۵۰,۳۷	۲۷۱	۱۵۰۰	۱۷۶۳۶۴۶۷۳	۲۶۱	۱۵۹۵
۷	۱۷۴,۲۹۵,۰۵۸	۲۱۰	۱,۸۴۱	۱۸۳۲۹۲۴۲۸	۳۱۱	۱۴۰۵	۱۷۴۶۲۹۲۹۷	۲۹۳	۱۳۹۷
۸	۱۷۲,۰۴۸,۱۳۱	۲۲۳	۱,۷۳۱	۱۷۶۳۵۶۹۱۳	۳۲۵	۱۲۳۶	۱۷۱۵۷۹۹۶۵	۲۹۹	۱۲۷۲
۹	۱۷۰,۰۵۰,۶۳۳	۲۴۳	۱,۶۰۸	۱۷۵۶۵۸۳۱۷	۳۵۱	۱۳۱۰	۱۷۰,۴۶۸۷۵۶	۳۱۳	۱۲۰۹
۱۰	۱۶۷,۸۴۴,۱۴۰	۲۵۲	۱,۵۹۴	۱۷۵۰,۴۹۳۲۱	۳۶۶	۱۰۱۳	۱۶۹۹۷۷۲۱۰	۳۴۰	۱۰۱۵
۱۱	۱۶۷,۵۲۴,۹۳۱	۲۷۹	۱,۴۶۸	۱۷۴۸۵۹۵۰۲	۳۷۷	۹۵۹	۱۶۷۳۶۵۹۵۴	۳۵۹	۹۹۰
۱۲	۱۶۷,۱۵۱,۷۰۵	۲۹۱	۱,۳۶۲	۱۷۲۴۶۴۹۴۳	۳۹۳	۹۳۲	-	-	-
۱۳	۱۶۷,۴۲۴,۰۹۷	۲۹۹	۱,۲۱۵	-	-	-	-	-	-
۱۴	۱۶۵,۸۴۴,۰۶۵	۳۱۴	۱,۰۹۳	-	-	-	-	-	-
۱۵	۱۶۴,۷۴۲,۳۵۳	۳۲۸	۱,۰۷۱	-	-	-	-	-	-



شکل ۴. مرز پارتو حاصل از حل مسئله اول برای توابع هدف اول

شکل ۳. مرز پارتو حاصل از حل مسئله اول برای توابع هدف اول



شکل ۵. مرز پارتو حاصل از حل مسئله اول برای توابع هدف دوم و سوم

۳ تا ۵ نیز نقاط پارتو به دست آمده توسط الگوریتم برای مسئله شماره ۱ به عنوان مثالی از ابعاد کوچک تشریح می شود. با توجه به شکل های ۳ تا ۵، مشاهده می شود که الگوریتم های NSGA-II و MOGWO تا حد زیادی مشابه روش دقیق عمل

می‌کنند؛ اما برای آنکه دقیق تشخیص اینکه الگوریتم‌های فرا ابتکاری پیشنهادی تا چه حد نزدیک به روش دقیق عمل می‌کنند و کدام یک عملکرد بهتری دارند، باید از شاخص‌های مربوط به الگوریتم‌های چندهدفه استفاده کرد. در این پژوهش جهت مقایسه کارایی الگوریتم‌ها از ۴ شاخص پراکندگی (DM)، فاصله از نقطه ایده‌آل (MID)، فاصله (SM) و تعداد جواب‌های پارتو (NPS) به کار رفته است.

کارایی الگوریتم‌های فرا ابتکاری NSGA-II و MOGWO

در این بخش نتایج حل عددی دقیق مسائل با نتایج الگوریتم‌های NSGA-II و MOGWO مقایسه و اعتبارسنجی الگوریتم‌ها بررسی می‌شود. در واقع، نتایج الگوریتم‌های NSGA-II و MOGWO در مسائل با ابعاد کوچک و متوسط با نتایج حل دقیق توسط حل‌کننده CPLEX نرم‌افزار GAMS مقایسه می‌شوند. سپس از آنجا که حل دقیق مدل در ابعاد بزرگ امکان‌پذیر نیست، مسئله با ابعاد بزرگ توسط الگوریتم‌های فرا ابتکاری حل می‌شود. همان‌طور که ذکر شد، از شاخص‌های مربوط به الگوریتم‌های چندهدفه برای اعتبارسنجی دقیق‌تر الگوریتم پیشنهادی و میزان توان آن‌ها در شناسایی مرز بهینه پارتو استفاده شده است. برای این منظور، ۴ شاخص فاصله از جواب ایده‌آل^{۲۲} (MID)، پراکندگی^{۲۳} (DM)، فاصله^{۲۴} (SM) و تعداد جواب‌های پارتو^{۲۵} (NPS) را محاسبه کرده و عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی با توجه به مقادیر منتج از محاسبه این ۴ شاخص بررسی می‌شود. هر چه شاخص DM بیشتر، شاخص MID کمتر، شاخص SM کمتر و شاخص NPS بیشتر باشد، الگوریتم عملکرد بهتری دارد. مقادیر محاسبه شده برای مرزهای حاصل از ۲ الگوریتم برای مسائل چهارگانه مطابق با جدول ۴ است. مطابق با این جدول، مشاهده می‌شود که الگوریتم‌های فرا ابتکاری استفاده شده در این تحقیق بسیار نزدیک به الگوریتم دقیق عمل کرده و نمودارهای عملکردی آن‌ها بسیار نزدیک به هم هستند؛ بنابراین کارایی بسیار مناسبی در یافتن جواب‌های نزدیک به بهینه دارند. در نتیجه با توجه به عملکرد مطلوب این الگوریتم‌ها، می‌توان به صورتی مناسب از آن‌ها در حل مسائلی استفاده کرد که روش محدودیت اپسیلون در ابعاد بزرگ قادر به حلشان نیست.

به طور جزئی‌تر مشاهده می‌شود که الگوریتم MOGWO در معیار گوناگونی، عملکردی بسیار مناسب‌تر نسبت به الگوریتم

NSGA-II دارد. این بدان معنی است که الگوریتم MOGWO قادر به تولید پاسخ‌های پارتویی با دامنه گسترده‌تری از جواب‌های ممکن هستند. بنابراین به‌طور کلی می‌توان گفت که الگوریتم MOGWO عملکرد مناسب‌تری در این شاخص از خود به جای گذاشته است.

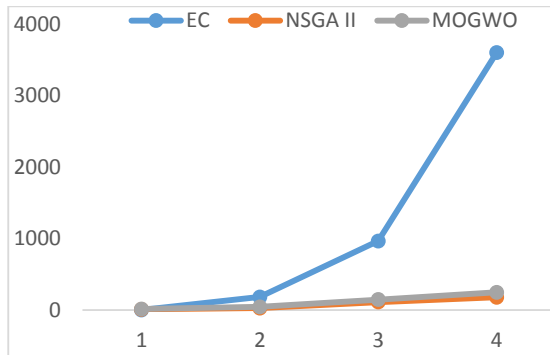
الگوریتم MOGWO در معیار فاصله از نقطه ایده‌آل نیز کارایی بهتری از خود نشان می‌دهد. یعنی فاصله از جواب ایده‌آل در این الگوریتم کمتر از سایر الگوریتم‌هاست. برخلاف شاخص گوناگونی، استثنائی در شاخص فاصله از نقطه ایده‌آل وجود نداشته و الگوریتم MOGWO به‌طور قطع بهتر عمل کرده است. همچنین عملکرد این الگوریتم در معیار فاصله بغایت مناسب‌تر بوده، جواب‌های نزدیک‌تری نسبت به هم تولید کرده و می‌توان گفت مرز یکنواخت‌تری نسبت به الگوریتم NSGA-II دارد. ضمن اینکه الگوریتم MOGWO همواره موفق به یافتن تعداد بیشتری جواب‌های پارتو شده است.

جهت مقایسه کلی الگوریتم‌ها از روش مجموع میانگین وزن‌دار (MOSAW) استفاده می‌شود. ابتدا تمامی مقادیر حاصل از شاخص‌ها، نرمالیزه می‌شوند؛ سپس میانگین شاخص‌ها برای هر الگوریتم در هر مسئله را محاسبه کرده (با وزن یکسان) و به عنوان عملکرد آن الگوریتم در مسئله هدف، مدنظر قرار می‌گیرند. این مقایسه‌ها در شکل ۶ ارائه شده است. با توجه به این شکل واضح است که الگوریتم‌های NSGA-II و MOGWO تا حدود زیادی نزدیک به روش بهینه عمل می‌کنند. اما برای حل مسائل در ابعاد بالا (مسئله ۴) از آنجایی که روش اپسیلون محدودیت از حل دقیق مسائل عاجز مانده است، از الگوریتم‌های فرا ابتکاری پیشنهادی در این پژوهش استفاده می‌شود. جهت تشخیص الگوریتمی با عملکرد بهتر در ابعاد بالا، مقادیر شاخص‌های حاصل را در شکل ۶ مورد بررسی قرار می‌گیرند و مشخص می‌شود که به‌طور کلی الگوریتم MOGWO عملکرد بسیار بهتری در ابعاد بالا دارد.

شکل ۷ نیز زمان حل رده‌های مختلف مسئله را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل با افزایش ابعاد مسئله زمان حل دقیق به طور چشمگیری افزایش یافته تا جایی که در مسئله نمونه شماره ۴، روش اپسیلون قادر به حل دقیق مسئله در محدودیت زمانی در نظر گرفته نیست. اما الگوریتم‌های فرا ابتکاری در زمان بسیار کوتاه‌تری قادر به حل آن هستند. به‌هر حال همان‌طور که مشاهده می‌شود الگوریتم NSGA-II به زمان کمتری جهت یافتن مرز

جدول ۴. مقادیر متوسط شاخص‌های به دست آمده برای سه الگوریتم

NPS			SM			MID			DM			شاخص
MOGWO	NSGA-II	EC	MOGWO	NSGA-II	EC	MOGWO	NSGA-II	EC	MOGWO	NSGA-II	مسئله / روش EC	
۱۱	۱۲	-	۰/۹۸	۱/۱۳	۰/۹۲	۰/۸۷	۰/۹۱	۰/۸۱	۱/۲۱	۱/۱۳	۱/۲۵	۱
۳۲	۲۵	-	۱/۱۴	۱/۳۹	۱/۰۷	۱/۲۴	۱/۲۹	۱/۲۱	۱/۱۲	۱/۰۴	۱/۱۶	۲
۵۱	۴۸	-	۰/۶۷	۰/۶۹	۰/۶۱	۰/۹۴	۱/۱۱	۰/۹	۰/۷۱	۰/۸۴	۰/۹۵	۳
۸۹	۷۱	-	۲/۴۵	۲/۶۱	-	۱/۴۷	۱/۶۱	-	۱/۲۲	۱/۱۹	-	۴

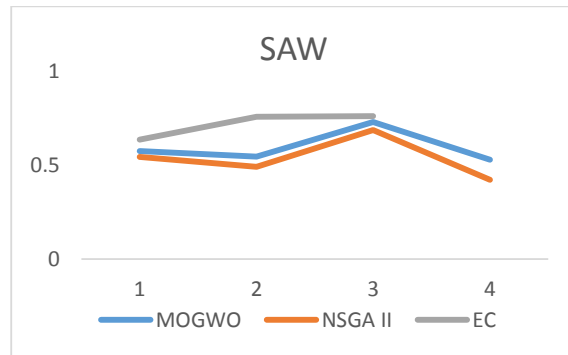


شکل ۷. زمان حل روش‌های حل پیشنهادی

جهت یافتن جواب‌های نزدیک به بهینه دارند. از این رو با توجه به این عملکرد مناسب می‌توان از آن‌ها به شکلی مطلوب در حل مسائلی استفاده کرد که روش محدودیت اپسیلون در ابعاد بزرگ قادر به حل آن‌ها نیست. جهت پیشنهادهای آتی می‌توان مواردی همچون در نظرگیری مسئله به صورت دوره‌ای، افزودن تابع هدف عدالت و ارائه برنامه زمان‌بندی جهت انجام عملیات امدادی، در نظر داشتن مدل در حالت پویا و یا استفاده از انواع دیگر عدم قطعیت شامل احتمالی، سناریویی، چند دوره‌ای کردن زمان امداد رسانی و همچنین احتمال خرابی مسیر و قابلیت اطمینان مسیر را بررسی و مطالعه کرد.

پی‌نوشت

- Knott
- Barbarosoglu et al.
- Özdamar et al.
- Doerner et al.
- Nolz et al.
- Huang et al.
- Rath and Gutjahr
- Chen and Yu
- Fontem et al.
- Zokaee et al.
- Boonmee et al.
- Manopiniwes and Irohara
- Rabbani et al.
- Rodríguez-Espíndola et al.
- Vahdani et al.
- Liu et al.
- Davoodi and Goli
- Maximum Regret
- Robustness
- Protection Level
- Pareto Front
- Mean Ideal Distance
- Diversification Metric
- Spacing Metric
- Number of Pareto Solutions



شکل ۶. مقایسه کلی عملکرد روش‌های EC، NSGA-II و MOGWO

پارتو نیاز دارد و می‌توان آن را به عنوان برتری‌های این الگوریتم نسبت به MOGWO دانست.

نتیجه‌گیری

بلایای طبیعی (مانند سیل، خشک‌سالی، زلزله، طوفان و قحطی و غیره) و فجایع انسانی (مانند جنگ، درگیری و بحران پناهندگان ...) در دهه‌های اخیر به طور فزاینده‌ای جوامع و ملت‌ها را در سراسر جهان در برگرفته و پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که این روند ادامه خواهد یافت. بنابراین مسئله لجستیک بحران یا امداد اهمیت بیشتری در تمامی کشورها، به خصوص ایران دارد. از این رو در این مطالعه به طراحی یک مدل برنامه‌ریزی بهینه بر مبنای کنترل و برنامه‌ریزی خدمات پس از وقوع بحران در قالب توسعه یک مدل مکان‌یابی-مسیریابی-موجودی پرداخته شد؛ به طوری که در صورت امکان بتوان در دنیای واقعی شرایط را پیش‌بینی و با بیشترین سطح پوشش به خدمت‌رسانی در سوانح پرداخت. در این پژوهش به کمینه‌سازی زمان پاسخ‌دهی به عنوان اصلی‌ترین هدف تحقیق پرداخته شد. از سوی دیگر، هزینه کل ارائه خدمات به عنوان مثال شامل به‌کارگیری تسهیلات مورد نیاز، هزینه‌های حمل‌ونقل و خدمات‌دهی، هزینه‌های جریمه عدم خدمات‌دهی و تلفات بالقوه هم به عنوان هدف دوم و کاربردی در مسئله مورد توجه قرار گرفت. در نهایت نیز خرابی تسهیلات تأمین‌کننده و توزیع‌کننده در اثر وقوع بحران که به طور مستقیم در ارائه خدمات آن‌ها تأثیرگذار است را تحت عنوان قابلیت اطمینان به عنوان تابع هدف سوم در نظر گرفته می‌شود. همچنین برای نزدیک‌تر شدن به شرایط واقعی عدم قطعیت در پارامتر تعداد مجروحان و حادثه دیدگان با گوناگونی آسیب و همچنین میزان تنوع کالای مورد نیاز آن‌ها از بهینه‌سازی استوار جهت فرموله کردن شرایط عدم قطعیت استفاده شد. جهت حل مدل ریاضی الگوریتم‌های فرا ابتکاری ژنتیک بر مبنای رتبه‌بندی نا مغلوب‌ها (NSGA-II) و گرگ خاکستری چندهدفه (MOGW) مورد استفاده قرار گرفت و نتایج این الگوریتم‌ها با روش دقیق محدودیت اپسیلون (EC) مقایسه شد. با توجه به نتایج مشاهده شد که الگوریتم‌های فرا ابتکاری استفاده شده در این تحقیق بسیار نزدیک به الگوریتم دقیق عمل کرده و نمودارهای عملکردی آن‌ها بسیار به هم نزدیک هستند. بنابراین کارایی بسیار مناسبی

15. Manopiniwes, W., & Irohara, T. (2017). Stochastic optimisation model for integrated decisions on relief supply chains: preparedness for disaster response. *International Journal of Production Research*, 55(4), 979-996.
16. Rabbani, M., Zhalechian, M., & Farshbaf-Geranmayeh, A. (2018). A robust possibilistic programming approach to multiperiod hospital evacuation planning problem under uncertainty. *International Transactions in Operational Research*, 25(1), 157-189.
17. Rodríguez-Espíndola, O., Albores, P., & Brewster, C. (2018). Disaster preparedness in humanitarian logistics: A collaborative approach for resource management in floods. *European Journal of Operational Research*, 264(3), 978-993
18. Vahdani, B., Veysmoradi, D., Noori, F., & Mansour, F. (2018). Two-stage multi-objective location-routing-inventory model for humanitarian logistics network design under uncertainty. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 27, 290-306.
19. Liu, Y., Lei, H., Zhang, D., & Wu, Z. (2018). Robust optimization for relief logistics planning under uncertainties in demand and transportation time. *Applied Mathematical Modelling*, 55, 262-280.
20. Davoodi, S. M. R., & Goli, A. (2019). An integrated disaster relief model based on covering tour using hybrid Benders decomposition and variable neighborhood search: Application in the Iranian context. *Computers & Industrial Engineering*, 130, 370-380.
21. Bertsimas, D., & Sim, M. (2004). The price of robustness. *Operations research*, 52(1), 35-53.
22. Mavrotas, G. (2009). Effective implementation of the ϵ -constraint method in multi-objective mathematical programming problems. *Applied mathematics and computation*, 213(2), 455-465.
23. Mirjalili, S., Saremi, S., Mirjalili, S. M., & Coelho, L. D. S. (2016). Multi-objective grey wolf optimizer: a novel algorithm for multi-criterion optimization. *Expert Systems with Applications*, 47, 106-119.
1. Halskau, O. (2014). Offshore Helicopter Routing in a Hub and Spoke Fashion: Minimizing Expected Number of Fatalities. *Procedia Computer Science*, 31, 1124-1132.
2. Tavana, M., Abtahi, A. R., Di Caprio, D., Hashemi, R., & Yousefi-Zenouz, R. (2018). An integrated location-inventory-routing humanitarian supply chain network with pre-and post-disaster management considerations. *Socio-Economic Planning Sciences*, 64, 21-37.
3. Nikoo, N., Babaei, M., & Mohaymany, A. S. (2018). Emergency transportation network design problem: Identification and evaluation of disaster response routes. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 27, 7-20.
4. Knott, R., (1987), The logistics of bulk relief supplies, *Disasters*, 11, 113-115.
5. Barbarosoglu, G., Özdamar, L., and Cevik, A., (2002), An interactive approach for hierarchical analysis of helicopter logistics in disaster relief operations, *European Journal of Operational Research*, 140, 118-133.
6. Özdamar, L., Ekinci, E., Küçükyazici, B., (2004), Emergency logistics planning in natural disasters, *Annals of Operations Research*, 129, 217-245.
7. Doerner, K., Focke, A., Gutjahr, W.J., (2007), Multicriteria tour planning for mobile healthcare facilities in a developing country, *European Journal of Operational Research*, 179, 1078-1096.
8. Nolz, P.C., Doerner, K.F., Gutjahr, W.J., Hartl, R.F., (2010), A bi-objective metaheuristic for disaster relief operation planning, *Advances in multi-objective nature inspired computing*, 272, 167-187.
9. Huang, M., Smilowitz, K., Balcik, B., (2012), Models for relief routing: Equity, efficiency and efficacy, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48, 2-18.
10. Rath, S., & Gutjahr, W.J., (2014), A math-heuristic for the warehouse location-routing problem in disaster relief, *Computers & Operations Research*, 42, 25-39.
11. Chen, A. Y., & Yu, T. Y. (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: Methodological*, 91, 408-423.
12. Fontem, B., Melouk, S. H., Keskin, B. B., & Bajwa, N. (2016). A decomposition-based heuristic for stochastic emergency routing problems. *Expert Systems with Applications*, 59, 47-59.
13. Zokaei, S., Bozorgi-Amiri, A., & Sadjadi, S. J. (2016). A robust optimization model for humanitarian relief chain design under uncertainty. *Applied Mathematical Modelling*, 40(17), 7996-8016.
14. Boonmee, C., Arimura, M., & Asada, T. (2017). Facility location optimization model for emergency humani-