

Designing a Bi-objective Post-Disaster Relief Logistics Model Considering Cost and Time of Utilizing Helicopters and Chance-constraint Programming

Seyran Ghadimi^{id}

seyranghadimi@gmail.com

Ph.D. Student, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Alzahra University, Tehran, Iran.

Mehdi Seifbarghy^{id}

m.seifbarghy@alzahra.ac.ir

Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Alzahra University, Tehran, Iran.

Received: Jul. 14, 2024; Revised: Sep. 18, 2024; Accepted: Nov. 18, 2024; Published Online: Dec. 02, 2024.

Extended Abstract

Introduction: Disaster management is very important in the post-disaster phase in order to minimize damages. Relief logistics has the ability to quickly transfer relief forces and needed materials to the affected areas, as well as rescue the injured. During natural disasters such as earthquakes, physical infrastructure such as roads and bridges are often destroyed, and as a result, access to affected areas becomes very difficult and often impossible. For this reason, helicopters are the most suitable vehicle to help the injured. In this regard, another issue that is important is the difference between helicopters in terms of service time. Obviously, the shorter the service time, the higher the costs. Therefore, there should be a balance between the two objectives of time and cost.

Methods: In this article, considering the conditions after a catastrophic earthquake in a mountainous region, a mathematical model for the logistics of post-disaster relief is proposed in order to plan how to send helicopters to the affected areas and rescue and transport the affected people to some temporary facilities. There is also the issue of the uncertainty of the affected population and the demand for rescue personnel, which must be managed somehow. In this regard, first a mathematical model is proposed in a deterministic state, and then using the chance-constraint programming method and considering the uncertainty of the two mentioned parameters in a stochastic manner, the model is converted to a deterministic model. Also, two methods of LP-metric and epsilon constraints are used to solve the two-objective model in terms of time and cost.

Results and discussions: One of the important findings of this research is the definition of the decision variables of the mathematical model. One of the important research decision variables is the capacity considered to prepare and deploy relief personnel in each temporary facility. This designed capacity must be smaller or equal to a maximum possible value for technical reasons, and on the other hand, operationally, the number of people dispatched by all helicopters from a temporary facility during different trips must be smaller or equal to this designed capacity. Similar constraints will exist for the capacity designed to treat the affected population in any temporary

facility. In other words, this desired capacity must be smaller or equal to a maximum value and greater than or equal to the population of injured people transferred to this facility by different helicopters and in different trips. Also, two important constraints of this research are compliance with the maximum flight hours of each helicopter as well as guaranteeing a level of service to cover the affected population, which is possible with the help of the mentioned decision variables. Among the other findings of the research, it can be mentioned how to model the problem by considering the conflict between the cost and service time of helicopters, which has been done in the form of a two-objective model. Also, considering that the two exogenous parameters of relief force demand and the population of the affected areas have uncertainty, assuming a normal distribution with a certain mean and standard deviation, the constraints related to them have finally become definite.

Conclusions: The proposed model is solved utilizing the epsilon constraint approach as well as the LP-metric method for the Tabriz fault case study. As a pilot, 13 affected areas were considered, assuming the existence of 3 places for the construction of temporary facilities and 5 types of helicopters. The results showed that with the increase in the demand for the relief force and the affected areas, the amount of cost and service time increases, which shows the logical performance of the developed model.

Key words: Relief logistics; Helicopter; Chance-constraint programming; Bi-objective model; Epsilon constraint.



طراحی مدل دو هدفه لجستیک امداد پس از وقوع بحران با در نظر گرفتن هزینه و زمان بهره‌گیری از بالگرد و برنامه‌ریزی محدودیت-شانس

سیران قدیمی^{ID}

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه الزهراء، تهران، ایران.

مهدی سیف‌برقی^{ID}

m.seifbarghy@alzahra.ac.ir

دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه الزهراء، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۲۴، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۶/۲۸، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۸، تاریخ اولین انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۱۲.

چکیده گسترده

مقدمه و اهداف: مدیریت بحران در فاز پس از وقوع بحران جهت کاهش حداکثری خسارات از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. لجستیک امداد قابلیت انتقال سریع نیروهای امدادی و مواد مورد نیاز به مناطق آسیب‌دیده و نیز نجات آسیب‌دیدگان را دارد. در هنگام وقوع بلاای طبیعی مانند زلزله، زیرساخت‌های فیزیکی مانند جاده‌ها و پل‌ها اغلب تخریب می‌شوند و در نتیجه، دسترسی به مناطق آسیب‌دیده بسیار دشوار و در اغلب موارد غیرممکن می‌شود. به همین دلیل، بالگردها مناسب‌ترین وسیله نقلیه برای کمک به آسیب‌دیدگان هستند. در این خصوص مسئله دیگری که مهم است تفاوت بین بالگردها از نظر زمان سرویس دهی می‌باشد که بدیهی است هر چه زمان سرویس کوتاهتر باشد، هزینه‌های آن بیشتر خواهد بود. لذا باید از طریق ابزار مشخصی توازن بین دو هدف زمان و هزینه به وجود آید.

روش‌ها: در این مقاله، با در نظر گرفتن شرایط پس از وقوع یک زلزله فاجعه بار در یک منطقه کوهستانی، یک مدل ریاضی برای لجستیک امداد پس از فاجعه پیشنهاد می‌شود تا نحوه امداد رسانی و برنامه‌ریزی جهت اعزام بالگردها به مناطق آسیب‌دیده و نجات و انتقال افراد آسیب‌دیده به تسهیلات موقت سرویس دهی به ایشان را پوشش دهد. همچنین موضوع وجود عدم قطعیت جمعیت آسیب‌دیده و تقاضا برای پرسنل امداد و نجات نیز وجود دارد که باید به نحوی مدیریت شود. در این رابطه ابتدا یک مدل ریاضی در حالت قطعی پیشنهاد می‌شود و سپس با استفاده از روش برنامه‌ریزی محدودیت-شانس و در نظر گرفتن عدم قطعیت دو پارامتر مورد اشاره به صورت احتمالی، مدل احتمالی مورد نظر مجدداً به قطعی تبدیل می‌شود. همچنین از دو روش معیار جامع و محدودیت اِپسیلون برای حل مدل دو هدفه بر حسب زمان و هزینه استفاده می‌شود.

یافته‌ها: از یافته‌های مهم این تحقیق می‌توان به نوع تعریف متغیرهای تصمیم مدل ریاضی اشاره کرد. یکی از متغیرهای تصمیم مهم تحقیق، ظرفیت در نظر گرفته شده برای آماده شدن و اعزام پرسنل امدادی در هر تسهیل موقت است. این ظرفیت طراحی شده قاعدتاً باید از یک حداکثر مقدار ممکن به دلایل فنی کوچکتر یا مساوی باشد و از طرفی نیز به طور عملیاتی تعداد افراد اعزام شده توسط کلیه بالگردها از یک تسهیل موقت طی سفرهای مختلف، باید از این ظرفیت طراحی شده کوچکتر یا مساوی باشد. مشابه این محدودیتها برای ظرفیت طراحی شده برای درمان جمعیت آسیب‌دیده هر در تسهیل موقت وجود خواهد داشت. به عبارت دیگر این ظرفیت مورد نظر باید از یک مقدار حداکثری

کوچکتر یا مساوی و از جمعیت آسیب دیدگان انتقال یافته به این تسهیل توسط بالگردهای مختلف و در سفرهای مختلف بزرگتر یا مساوی باشد. همچنین دو محدودیت مهم این تحقیق نیز رعایت حداکثر ساعات پروازی هر بالگرد و همچنین تضمین یک سطح خدمت برای پوشش جمعیت آسیب دیده می باشد که به کمک کتیرهای تصمیم مورد اشاره تعریف آنها ممکن شده است. از یافته های دیگر تحقیق به نحوه مدلسازی مسئله با در نظر گرفتن تضاد بین هزینه و زمان سرویس دهی بالگردها می توان اشاره کرد که در قالب یک مدل دو هدفه صورت گرفته است. همچنین با توجه به اینکه در خصوص دو پارامتر برون زای تقاضای نیروی امدادی و جمعیت مناطق آسیب دیده دارای عدم قطعیت می باشند، با فرض برخورداری از توزیع نرمال با میانگین و انحراف استاندارد مشخص، محدودیتهای مرتبط با آنها نهایتاً به حالت قطعی تبدیل شده است.

نتیجه گیری: مدل پیشنهادی با رویکرد محدودیت اسیلون و همچنین روش معیار جامع توسعه یافته برای مطالعه موردی گسل تبریز حل شده است. به صورت پایلوت ۱۳ منطقه آسیب دیده، با فرض وجود ۳ مکان برای احداث تسهیل موقت و ۵ نوع بالگرد در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که با افزایش تقاضا برای نیروی امداد و مناطق آسیب دیده، میزان هزینه و زمان سرویس دهی افزایش می یابد که نشان دهنده عملکرد منطقی مدل توسعه داده شده می باشد.

کلید واژه ها: لجستیک امداد؛ بالگرد؛ برنامه ریزی محدودیت شانس؛ مدل دو هدفه؛ روش اسیلون محدودیت.



۱. مقدمه

بی شک مهمترین موضوع در هنگام وقوع بحران، مسأله کنترل و مدیریت بحران است که لجستیک امداد بحران یکی از مهمترین فعالیتها می باشد [۷]. این فعالیت، شامل آمادگی قبل از وقوع بحران، پاسخ دهی بلافاصله بعد از وقوع و همچنین حمایت جامعه بعد از آن بحران می باشد. وقوع این بلای طبیعی و بحران ایجاد شده ناشی از آن، نشان دهنده اهمیت برنامه ریزی دقیق برای مقابله با پیامدهای ناشی از آن است و چنانچه این مسأله مورد توجه قرار نگیرد فاجعه دیگری در دل فاجعه اصلی رخ می دهد. مدیریت بحران یک فرایند پیوسته می باشد که داشتن طرح های اضطراری جامع و ارزیابی پیوسته و بهبود آن از ضرورت بالایی برخوردار است.

زلزله نوع خاصی از بلای طبیعی است که می تواند فجایع عظیمی را ایجاد کند. به عنوان مثال، در ایران بزرگ ترین زمین لرزه از نظر زمان وقوع، در سال ۱۳۶۹ شمسی در منجیل رخ داد. زمین لرزه ای که در چندین استان حس و حتی در تهران هم کشته برجای گذاشت. این زمین لرزه ۷.۳ ریشتر قدرت داشت و یک دقیقه به طول انجامید. این زمین لرزه که یکی از پر قدرت ترین و پرتلفات ترین زمین لرزه های کشور بود ۳۵ هزار کشته بر جای گذاشت و حجم خرابی ها به قدری بود که بیش از یک ماه آوار برداری به طوا انجامید. همچنین، زلزله بم که در سال ۸۲ به وقوع پیوست با قدرت ۶.۶ ریشتر بم در شرق استان کرمان را لرزاند. این زمین لرزه که تنها ۱۲ ثانیه طول کشید، بزرگ ترین شهر خشتی کشور و جهان را به لرزه درآورد و با خاک یکسان کرد. بطوریکه بعد از گذشت چند ماه کار آوار برداری به پایان رسید. در زلزله بم که یکی از پرتلفات ترین زلزله تاریخ ایران بود ۵۰ هزار ایرانی جان خود را از دست دادند. در سطح بین المللی نیز می توان به زمین لرزه بزرگ سیچوان اشاره کرد که در سال ۲۰۰۸ با بزرگی ۸ ریشتر در استان سیچوان چین رخ داد، رنج عظیمی را بر ساکنان محلی تحمیل کرد. بیش از ۸۸،۶۷۰ نفر کشته یا مفقود و ۳۷۴،۰۰۰ نفر مجروح شدند. این زلزله خسارت مالی هنگفتی به بار آورد که بیش از ۲۰ میلیارد دلار تخمین زده می شود. اگرچه بیشتر زمین لرزه های جهانی در نزدیک مرزهای صفحات تکتونیکی رخ می دهند ولی هنوز هیچ روش قابل اعتمادی برای پیش بینی دقیق زمان، مکان یا بزرگی زلزله وجود ندارد. بنابراین، یک رویکرد مؤثر مورد نیاز است تا یک کمپین امدادی بلافاصله پس از وقوع زلزله راه اندازی شده، بطوریکه تعداد جراحات و مرگ و میرها و همچنین هزینه ها را به حداقل برساند [۷]. از این رو تحقیق و بررسی در ارتباط با این موضوع از اهمیت بالایی برخوردار است. به عنوان مثال، در مؤسسه بین المللی پیش بینی نظری زلزله و ژئوفیزیکی ریاضی^۱ تحت نظر آکادمی علوم روسیه عمده تلاش ها بر روی برآورد نظری و مدلسازی رخداد و زلزله و توسعه الگوریتم های موفق برای پیش بینی کوتاه مدت و میان مدت زلزله انجام می شود. همچنین برنامه ریزی و مدیریت بحران در زمان وقوع زلزله، جزو مهمی از فرایند تاب آوری برای مدیریت آثار زلزله، افزایش ظرفیت تاب آوری و کاهش آسیب پذیری است.

به طور کلی دو نوع از اقداماتی که در پاسخ گویی به وقوع زلزله مهم به نظر می رسند عبارتند از: ۱- عملیات مربوط به انتقال افراد آسیب دیده و اقدامات لجستیکی مربوط به توزیع کالاهای امدادی، که عملیات تخلیه با هدف خارج سازی مصدومان از زیر آوار و انتقال آن ها رخ می دهد. ۲- اقدامات لجستیکی کالاها جهت بر آورده سازی نیازهای افراد آسیب دیده از فاجعه می باشد. برنامه ریزی درست و مناسب این اقدامات، با توجه به محدودیت منابع و امکانات، تأثیر بسزایی در کاهش خسارات جانی و مالی و افزایش کارایی و اثر بخشی دارد [۹].

تحویل پرسنل امدادی (مانند پرسنل بهداشت و امدادگر) به مناطق آسیب دیده^۲ و تخلیه جمعیت آسیب دیده (کسانی که نیاز به کمک فوری پزشکی دارند) از مناطق حادثه دیده پس زلزله، حیاتی است. با این حال، طراحی و اجرای چنین تدارکات امدادی چالش برانگیز است، به ویژه زمانی که منطقه کمک رسانی کوهستانی می باشد و معمولاً زیرساخت های حمل و نقل (جاده ها، پل ها، و خطوط راه آهن) آسیب جدی دیده است. علاوه بر این، بازسازی سریع جاده های آسیب دیده کاری دشوار است. بنابراین نمی توان از وسایل حمل و نقل مرسوم مانند کامیون و قطار استفاده کرد. در عوض، بالگردها کاربردی ترین وسیله حمل و نقل در مناطق کوهستانی در

¹ International Institute of Theoretical Earthquake Prediction and Mathematical Geophysics

² Affected Areas (AA)

"دوره امداد طلایی" هستند (دوره ای که معمولاً به عنوان ۷۲ ساعت اول پس از فاجعه تعریف می‌شود). این دوره برای ارائه امداد بسیار مهم است. در مجموع ۹۹ بالگرد از انواع مختلف برای مأموریت‌های نجات در طول کمپین امداد رسانی زلزله سیچوان استفاده شدند. علاوه بر چالش انتخاب وسیله حمل و نقل مناسب، جمع‌آوری اطلاعات واقعی و در زمان واقعی از مناطق آسیب‌دیده نیز به دلیل اختلال در منابع برق، آسیب به تجهیزات ارتباطی و مخابراتی در منطقه مشکل است. با این حال، در لجستیک امداد پس از فاجعه، یک تصمیم گیرنده باید با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مختلف، همچون سطوح تقاضا در مناطق آسیب‌دیده و زمان حمل و نقل در منطقه فاجعه، هم تصمیمات تاکتیکی (مثلاً مکان تسهیلات موقت^۳، مجموع تجهیزات امدادی و استقرار وسایل حمل و نقل) و هم تصمیمات عملیاتی (یعنی برنامه‌های ارتباط و حمل و نقل بین مناطق آسیب‌دیده و تسهیلات موقت) را لحاظ کند [۱۵].

در این مقاله، با در نظر گرفتن شرایط محیطی خاص در طول امداد رسانی پس از وقوع یک زلزله فاجعه بار در یک منطقه کوهستانی در شمال غرب ایران، یک مدل تصادفی برای لجستیک امداد پس از فاجعه پیشنهاد می‌شود تا نحوه امداد رسانی و برنامه‌ریزی جهت انتقال بالگرد و نیروهای امدادی مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به عدم قطعیت در زمان حمل و نقل، برنامه‌های حمل و نقل در منطقه آسیب‌دیده ایجاد می‌شود. مدل ریاضی پیشنهادی با رویکرد محدودیت اپسیلون و همچنین روش معیار جامع توسعه یافته و با استفاده از نرم افزار گمز برای مطالعه موردی شهرستان تبریز در شمال غرب ایران حل شده است. از جمله نوآوری‌های تحقیق می‌توان به دو هدفه بودن آن اشاره کرد. هدف اول: مینیمم کردن هزینه‌های استخدام پرسنل امدادی و هزینه‌های ثابت و عملیاتی بالگرد و هدف دوم: مینیمم کردن زمان رفت و برگشت بالگردهای امدادی می‌باشد. این تحقیق می‌تواند به مدیران کمک کند تا برنامه‌ریزی بهتری برای کمک به مناطق آسیب‌دیده پس از فاجعه داشته باشند و با سرویس دهی درست به مسدومان از مقدار هزینه‌ها نیز بکاهند.

سؤالات مورد بررسی و اهداف مورد انتظار از مسئله به صورت زیر است:

سؤالات تحقیق:

- ✓ نحوه امداد رسانی و برنامه‌ریزی از نظر تعداد بالگرد و تعداد سفرهای مورد نیاز جهت انتقال بالگرد به مناطق آسیب‌دیده چگونه باشد؟
- ✓ نحوه امداد رسانی و برنامه‌ریزی از نظر تعداد بالگرد و تعداد سفرهای مورد نیاز جهت انتقال نیروهای امدادی به چه طریقی باشد؟
- ✓ روش مناسب برای مواجهه با عدم قطعیت در رابطه با تقاضای پرسنل امدادی و جمعیت مناطق آسیب دیده، کدام است؟

اهداف تحقیق:

- ✓ کمینه نمودن هزینه‌های استخدام پرسنل امدادی
- ✓ کمینه نمودن هزینه‌های ثابت و عملیاتی بالگرد
- ✓ کمینه نمودن زمان رفت و برگشت بالگردهای امدادی

ادامه مقاله به شرح زیر تدوین شده است. در بخش ۲ پیشینه پژوهش مورد بررسی قرار می‌گیرد. بخش سوم مدل ریاضی توسعه داده شده و مفروضات آن برای طراحی سیستم لجستیک امداد پس از فاجعه ارائه می‌گردد. در بخش چهارم، روش حل تشریح شده است. تحلیل حساسیت در بخش ۵ گزارش شده است. و در نهایت در بخش ۶ این پژوهش، نتیجه‌گیری و کارهای آتی ارائه می‌گردد.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

در این قسمت به مرور ادبیات تحقیق در دو بخش امداد رسانی به وسیله بالگرد و امداد رسانی با دیگر وسایل نقلیه پرداخته می‌شود:

امداد رسانی با دیگر وسایل نقلیه

³ Temporary Facilities (TF)

رضایی کلچ و همکاران^۴ (۲۰۲۱)، مدلی برای مسیریابی اتوبوس حامل خون در شرایط بحران و با در نظر گرفتن گروه‌های خونی مختلف پیشنهاد می‌شود و نتایج به‌دست‌آمده از حل مدل نشان می‌دهد که بدون در نظر گرفتن بالگرد، تقاضا در دوره بحرانی پس از بحران تأمین نمی‌شود. مدل مذکور دو هدف را دنبال می‌کند: حداکثر کردن خون جمع‌آوری شده توسط دستگاه‌های خونی و به حداقل رساندن زمان رسیدن اتوبوس‌های گیرنده خون و یک بالگرد به منطقه آسیب‌دیده، پس از مصرف خون جمع‌آوری شده است [۲۲]. خورسی و همکاران^۵ (۲۰۲۰)، تصمیمات عملیاتی لجستیک امداد در توزیع منابع به مناطق آسیب دیده را در نظر گرفته‌اند که شامل برنامه‌ریزی، مسیریابی و تصمیمات تخصیص می‌باشد. یک مدل برنامه‌نویسی اعداد صحیح مختلط چند دوره‌ای برای ارزیابی و رسیدگی به این ویژگی‌ها معرفی شده است. این مدل، با در دسترس قرار گرفتن اطلاعات بیشتر، امکان تنظیم برنامه‌ها را فراهم می‌کند. سه هدف کارایی، اثربخشی و برابری به طور مشترک در نظر گرفته شده است [۱۳]. در یک پژوهش، گنجاندن فرصت‌های جابجایی مواد در زنجیره امداد بشردوستانه را بررسی کرده و تأثیر پارامترهای مختلف را بر به حداقل رساندن میانگین مسافت طی شده برای هر کالا در حین خدمت به ذینفعان بررسی می‌کنند. مدل‌های ریاضی توسعه‌یافته درباره مکان‌ها و تعداد تأسیسات امدادی، مقدار اقلام امدادی برای نگهداری در آن تأسیسات، و مقدار انتقال مواد بین تأسیسات تصمیم می‌گیرند. آسیب پذیری جاده‌ها و امکانات نااهنگ ظرفیتی نیز در نظر گرفته شده است [۴].

بزرگی و همکاران^۶ (۲۰۱۲)، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط را برای به حداقل رساندن مجموع هزینه‌های مورد انتظار کل (شامل هزینه مکان، تدارکات، حمل و نقل، نگه داشتن، و کمبود) و واریانس هزینه کل پیشنهاد دادند. این مدل به طور همزمان به تعیین محل مراکز توزیع امداد و تخصیص مناطق آسیب‌دیده به مراکز توزیع امداد می‌پردازد [۴]. در پژوهشی دیگر، برنامه‌ریزی مکان‌یابی و تخصیص انبارها در عملیات تخلیه را مورد بررسی قرار گرفت. به حداقل رساندن هزینه‌های اجتماعی، هزینه‌های مرگ‌ومیر و هزینه‌های نگهداری موجودی انبارها از اهداف اصلی این مقاله می‌باشد. تعیین ظرفیت هر مرکز و در نظر گرفتن خرابی تسهیلات از جمله نوآوری‌های مقاله آن‌ها است و مدل پیشنهادی برای دو مطالعه موردی تحت شرایط طوفان و زلزله مورد آزمایش قرار گرفته است [۱۸]. در یک مطالعه، یک مسأله حمل‌ونقل - مکان‌یابی سه هدفه در پاسخ به فاجعه ارائه شد. مسأله حمل‌ونقل با توزیع کمک‌ها از مراکز توزیع کمک‌های بشردوستانه به نقاط تقاضا سروکار دارد. سه هدف در نظر گرفته شده در این مقاله عبارتند از: ۱- کمینه ساختن زمان رسیدن کالاهای امدادی مورد نیاز به مناطق آسیب‌دیده. ۲- کمینه ساختن تعداد امداد رسان‌های مورد نیاز برای تأسیس یک مرکز توزیع. ۳- کمینه ساختن تقاضای برآورده نشده. برای حل مدل از روش محدودیت افسیلون استفاده شده است [۲]. ویس‌مرادی و همکاران^۷ (۲۰۱۸)، برای تخصیص امداد پس از زلزله، یک مدل مکان‌یابی - مسیریابی باز غیرخطی عدد صحیح مختلط در شرایط عدم قطعیت پیشنهاد کردند. این مدل شامل چندین هدف متناقض از جمله: مینیمم کردن هزینه‌های توزیع امداد، مینیمم کردن حداکثر زمان سفر مسیر وسیله نقلیه و ماکزیمم کردن حداقل قابلیت اطمینان مسیر می‌باشد. برای حل مدل، راه حل ترکیبی پهنه‌سازی استوار و برنامه‌ریزی چند هدفه فازی استفاده شده و کارایی و اثر بخشی مدل و رویکرد حل در یک مطالعه موردی زمین لرزه در آذربایجان شرقی مورد استفاده قرار گرفته است [۲۶].

یک مدل تصادفی چند هدفه مکان‌یابی - تخصیص - مسیریابی مبتنی بر سناریو برای یک مسئله تدارکات امداد بشردوستانه واقعی ارائه شد که بر روی هر دو وضعیت قبل و بعد از فاجعه در حضور عدم قطعیت متمرکز شده است. ۱- به حداقل رساندن مقدار مورد انتظار کل هزینه (۲) به حداقل رساندن حداکثر تعداد تقاضاهای برآورده نشده و (۳) به حداقل رساندن احتمال کل تخلیه ناموفق در مسیرها اهداف مسئله هستند. برای مقابله با عدم قطعیت تقاضا، از یک رویکرد شبیه‌سازی استفاده می‌شود. مدل پیشنهادی این دو فاز را به طور همزمان ادغام می‌کند. سپس تصمیمات راهبردی و عملیاتی (قبل از فاجعه و پس از فاجعه)، عادلانه بودن تخلیه مناطق،

⁴ Rezaei Kallaj

⁵ Khorsi

⁶ Bozorgi Amiri

⁷ Veysmoradi

توزیع اقلام امدادی شامل کالاها و امدادگران، تخلیه قربانیان نیز به طور همزمان در این مقاله در نظر گرفته شده است. مدل ارائه شده با استفاده از روش محدودیت اپسیلون برای مسائل در مقیاس کوچک و متوسط و با استفاده از سه الگوریتم فراابتکاری برای مسائل در مقیاس بزرگ حل می‌شود. نتایج تجربی نشان می‌دهد که این مدل می‌تواند برای مکان‌یابی پناهگاه‌ها و مراکز توزیع امداد، تعیین مسیرهای مناسب و تخصیص منابع در شرایط وقوع بحران استفاده شود [۴]. پرائیت پولکرنگ و همکاران^۸ (۲۰۲۱)، یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه برای تعیین محل تخصیص پناهگاه در پاسخ به تدارکات امداد بشردوستانه پیشنهاد می‌شود. سه تابع هدف برای بهبود کارایی و اثربخشی فرموله شده است. هدف اول به حداقل رساندن کل هزینه‌ها از جمله هزینه‌های ثابت برای احداث پناهگاه‌ها، هزینه‌های حمل‌ونقل و هزینه‌های خدمات است. هدف دوم، به حداقل رساندن کل زمان برای تخلیه قربانیان از تمام مناطق آسیب‌دیده و انتقال به پناهگاه‌های اختصاص داده شده است. هدف سوم، به حداقل رساندن تعداد پناهگاه‌های مورد نیاز برای ارائه خدمات کامل به قربانیان است. برای حل مدل پیشنهادی از روش محدودیت اپسیلون و برنامه‌ریزی هدف (GP) استفاده شده است. کاربرد مدل پیشنهادی از طریق مطالعه موردی سیل در تایلند تأیید می‌شود. میزان کارایی پارتو به دست آمده از حل مدل پیشنهادی با طرح‌های محل تخصیص پناهگاه فعلی که توسط بخش دولتی تعیین شده است، مقایسه می‌شود. مقایسه‌ها نشان می‌دهد که نتایج به دست آمده از حل مدل پیشنهادی بهتر از طرح‌های مکان‌یابی-تخصیص پناهگاه فعلی است [۲۰].

یک مدل ریاضی فازی چند هدفه برای تدارکات امداد بشردوستانه توسعه داده شد. این مطالعه یک مسئله مکان‌یابی تسهیلات یکپارچه، مسئله موجودی و مسئله توزیع را در لجستیک امداد بشردوستانه با در نظر گرفتن عدم قطعیت ذاتی پارامترهای ورودی ارائه می‌کند. مدل پیشنهادی بر به حداقل رساندن زمان پاسخ‌گویی و هزینه تمرکز دارد. برای حل مدل بهینه‌سازی چند هدفه پیشنهادی با پارامترهای فازی، یک مدل کمکی معادل و یک رویکرد محدودیت اپسیلون در این مطالعه اتخاذ شده است. یک مطالعه موردی در استان پیچیت، تایلند، در هنگام وقوع سیل، برای اعتبارسنجی مدل پیشنهادی استفاده شده است. در نهایت، نتایجی پیشنهاد و مورد بحث قرار می‌گیرند که نشان‌دهنده چندین جایگزین برای تصمیم‌گیرندگان است [۵]. بزرگی امیری و همکاران^۹ (۲۰۱۲)، یک مدل ریاضی چند هدفه برای مسئله طراحی زنجیره امداد تحت شرایط عدم قطعیت برای مناطق زلزله زده پیشنهاد شده است که پارامترهای تقاضا و زمان سفر غیرقطعی در نظر گرفته شده است. هدف از این مدل حداقل کردن مجموع تعداد افراد آسیب‌دیده است که به بیمارستان منتقل نشده‌اند، مجموع تعداد افراد بی‌خانمانی که از منطقه حادثه دیده تخلیه نشده‌اند و همچنین حداقل کردن مجموع تقاضای برآورده نشده کالاها امدادی است [۴].

یک مدل برنامه‌ریزی استوار دو مرحله‌ای ریسک‌گریز برای طراحی شبکه امداد چند محصولی ارائه شده است. مجموعه تصمیمات مکان‌یابی تسهیلات خدمت‌دهنده و مدیریت موجودی اقلام امدادی به صورت یکپارچه اتخاذ شده است. ظرفیت تسهیلات خدمت‌دهنده، تقاضای دریافت اقلام امدادی و ظرفیت مسیرهای ارتباطی تحت تأثیر بروز اختلال همراه با عدم قطعیت می‌باشد [۱۱]. در پژوهشی دیگر مکان‌های بهینه‌ای به عنوان مراکز درمان موقت تعیین شده و نحوه تخصیص بهینه سلسله مراتبی مصدومان، تعیین ظرفیت بهینه مراکز پذیرش، تعیین نقاط پشتیبان برای مراکز درمان موقت در یک مدل ریاضی مختلط عدد صحیح آورده شده است که کاهش ازدحام مصدومان و کاهش هزینه و زمان درمان را موجب می‌شود [۱۶].

از آنجاییکه، تجهیزات پزشکی در جوامع آسیب‌دیده از تقاضای بالایی برخوردار است، یک مدل بهینه‌سازی ریاضی برای ساخت یک سیستم امداد اضطراری چند دوره‌ای ارائه شده است که هزینه‌های کلی مورد انتظار سیستم را به حداقل می‌رساند. در این مدل، مکان تخصیص و توزیع و همچنین جریان تجهیزات پزشکی و افراد آسیب‌دیده در نظر گرفته می‌شود و عدم قطعیت پارامترهای مدل بررسی می‌شود که برای مقابله با این عدم قطعیت‌ها از یک رویکرد بهینه‌سازی استوار استفاده می‌شود. مطالعه موردی بر استان فارس انجام شده است [۲۸]. کامیابیان و همکاران (۲۰۲۴) پژوهشی انجام دادند که با تمرکز بر عملیات لجستیک امدادی در هنگام وقوع

⁸ Praneetpholkrang

⁹ Bozorgi Amiri

بلایای طبیعی، براساس نوع فاجعه طبقه‌بندی شده، و به طور کامل هر طبقه را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند [۱۲]. ونگ و همکاران^{۱۰} (۲۰۲۴) یک مدل دو سطحی استوار چندهدفه که شامل عدم قطعیت در زمان حمل و نقل، هزینه حمل و نقل و تقاضا است توسعه دادند به نحوی که در آن یک تصمیم گیرنده در سطح بالا بر روی مسئله تخصیص و تصمیم گیرنده دیگر در سطح پایین تمرکز می‌کند. ایشان یک مطالعه موردی در مورد زلزله در کشور ایران برای بررسی عملکرد مدل پیشنهادی خود ارائه نمودند [۲۷].

امدادرسانی به وسیله بالگرد

خاویر و همکاران^{۱۱} (۲۰۲۰)، روشی پیشنهاد کردند که هدف آن بهینه‌سازی استفاده از بالگردها در عملیات واکنش به وقوع بلایای طبیعی کوچک و متوسط است. روش پیشنهادی به دنبال حداقل کردن کل زمان عملیات در حمل‌ونقل منابع هوایی در طول تحویل آخرین مایل است. این روش بر روی یک سناریوی واقعی پس از وقوع فاجعه، با در نظر گرفتن ویژگی‌های عملیات واکنش به سیل، در سال ۲۰۱۱، در منطقه کوهستانی ایالتی در برزیل، اعمال شد. نتایج نشان می‌دهد که روش توسعه‌یافته به‌عنوان ابزاری برای کمک به فرآیند تصمیم‌گیری با استفاده از بالگرد برای تحویل آخرین مایل در زنجیره تأمین بشردوستانه است [۲۹].

ریتا و همکاران^{۱۲} (۲۰۱۸)، برنامه‌های پهپاد را در توزیع آخرین مایل در تدارکات بشردوستانه در نظر گرفتند و یک مدل بهینه‌سازی برای تحویل بسته‌های متعدد اقلام امدادی سبک وزن (واکسن، قرص‌های تصفیه آب و ...) از طریق هواپیماهای بدون سرنشین به تعداد معینی از مکان‌های دورافتاده در یک منطقه مستعد فاجعه ارائه کردند. هدف این مدل به حداقل رساندن کل مسافت طی شده (یا زمان/هزینه) پهپاد است به طوری که، محدودیت بار و انرژی در حین نصب ایستگاه‌های شارژ مجدد است تا فاصله عملیاتی پهپاد را افزایش دهد [۲۰]. کاریک و گولد^{۱۳} (۲۰۰۸)، یک مسئله مسیریابی وسیله نقلیه پویا برای تدارکات امدادی در بلایای طبیعی مانند زلزله یا طوفان معرفی کردند، که در آن تصمیمات ذاتی در این مسئله به صورت سلسله مراتبی به دو مشکل فرعی تجزیه می‌شوند. جایی که تصمیمات تاکتیکی در سطح بالا و تصمیمات مسیریابی و بارگذاری عملیات در سطح پایه گرفته می‌شود [۸].

یک چارچوب شبیه‌سازی عمومی برای ارزیابی لجستیک بشردوستانه را ارائه می‌دهند. در این مسئله از روش‌های مختلفی برای برنامه‌ریزی و کنترل وسایل نقلیه در مناطق آسیب‌دیده استفاده می‌شود. هدف مسئله این است که نشان دهد، چگونه فناوری‌های نوظهور به ویژه وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین (پهپاد)، می‌توانند به لجستیک بشردوستانه کمک کنند [۲۵]. ریکاردو و همکاران^{۱۴} (۲۰۱۴)، تجزیه و تحلیلی از فرآیندهای لجستیک اتخاذ شده در پاسخ به بلایای طبیعی بزرگ که در دهه گذشته رخ داده‌اند را ارائه می‌کنند. هدف این مطالعه درک محیط و شرایطی است که این عملیات‌های بشردوستانه در آن رخ داده است، محدودیت‌هایی که با آن مواجه شده و رویکردهای اتخاذ شده برای اطمینان از ارائه امداد به قربانیان بلایای طبیعی است [۲۳]. عبدالقادر و همکاران^{۱۵} (۲۰۱۶)، به توانایی استفاده از شبکه‌های موردی برای پشتیبانی ارتباط بین مجموعه‌ای از بالگردها می‌پردازند. یک مدل ساختار شبکه‌ای ساده شده ارائه و یک الگوریتم مسیریابی کارآمد پیشنهاد شده است [۶].

کیم و همکاران^{۱۶} (۲۰۲۲)، یک مرور ادبیات سیستماتیک برای درک روندهای پژوهش، شناسایی حوزه پیشرفت‌ها و توصیه جهت تحقیقات آینده در لجستیک امداد بشردوستانه انجام داده است [۱۴]. خاویر و همکاران^{۱۷} (۲۰۱۹)، یک مدل ریاضی برای بهینه‌سازی

¹⁰ Wang

¹¹ Xavier

¹² Rabta

¹³ Caric & Gold

¹⁴ Ricardo

¹⁵ Abdelgader

¹⁶ Kim

¹⁷ Xavier

استفاده از بالگردها در عملیات واکنش به بلایای بزرگ، به حداقل رساندن زمان عملیات و در نظر گرفتن منابع متعدد و وسایل نقلیه چندگانه پیشنهاد شده است [۳۱]. پتی و برسفورد^{۱۸} (۲۰۰۵)، تحقیقات اخیری را ارائه می‌کند که با در نظر گرفتن مدل‌های پاسخ موجود، اعم از نظامی و غیرنظامی، و نتایج حاصل از تحقیقات میدانی که تا حدی تحت حمایت موسسه خبره لجستیک و حمل‌ونقل انجام شده است، یک مدل تصفیه‌شده برای الزامات لجستیک در شرایط اضطراری پیشنهاد می‌کند [۱۹].

یک سیستم برنامه‌ریزی کارآمد را برای هماهنگی عملیات بالگرد، هنگام امداد رسانی در بلایا پیشنهاد می‌شود. این سیستم می‌تواند به عنوان یک ابزار شبیه‌سازی برای آمادگی بهتر در برابر فاجعه استفاده شود و به تولید طرح‌هایی با داده‌های تخمینی کمک کند. این سیستم مربوط به عملیات بالگرد است و شامل توزیع آخرین مایل برای مراقبت‌های پزشکی پس از فاجعه و تخلیه مجروحان می‌شود. تحویل اقلامی مانند دارو، واکسن، خون و ... هدف این سیستم به حداقل رساندن کل زمان مأموریت مورد نیاز برای تکمیل وظیفه حمل‌ونقل است [۱۷]. خاویر و همکاران^{۱۹} (۲۰۲۱)، یک مدل ریاضی رسمی برای کمک به برنامه‌ریزی حمل‌ونقل هوایی، با استفاده از بالگرد، برای بلایای بزرگ مقیاس، با در نظر گرفتن سیستم‌های سپرده‌گذاری چندگانه، وسایل نقلیه چندگانه و محصولات متعدد پیشنهاد می‌کنند [۳۰].

یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح دو سطحی سه هدفه فازی را برای به حداقل رساندن تقاضای برآورده نشده، خطرات محیطی بالقوه، هزینه‌های اضطراری و به حداکثر رساندن رضایت بازماندگان در سطح پایین سلسله مراتب تصمیم فرموله می‌شود. در فرآیند امداد رسانی از ۳ روش زمینی، هوایی و دریایی استفاده شده است. یک مطالعه موردی با استفاده از داده‌های زلزله ونچوان برای ارزیابی مدل پیشنهادی ارائه شده است. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که روش معیار جهانی ترکیبی یک استراتژی بهینه را برای مسائل پیچیده در یک زمان محاسباتی معقول حل می‌کند [۷]. ساعتچی و همکاران^{۲۰} (۲۰۲۱)، یک شبکه امدادی چند منظوره چند هدفه پیشرو و پسرو ارائه دادند که موقعیت بیمارستان‌ها، انبارهای محلی و مراکز ترکیبی را در نظر می‌گیرد. در مرحله پس از فاجعه، مسیریابی کالاهای امدادی باید در مسیر پیشرو در نظر گرفته شود. در مسیر پسرو، خودروها و بالگردها که می‌توانند مصدومان را پس از تحویل کالا جابه‌جا کنند، مجروحان را به بیمارستان‌ها و مراکز هیبریدی می‌برند. با توجه به درجه سختی، یک الگوریتم (NSGA-II) با الگوریتم‌های (SA) و جستجوی همسایگی متغیر (VNS) برای حل مسائل ارائه شده پیشنهاد شد. نتایج به دست آمده از این الگوریتم ترکیبی با نتایج حاصل از NSGA-II و چند هدفه SA-VNS مقایسه شد و مشخص شد که الگوریتم ترکیبی پیشنهادی از دو الگوریتم فوق‌تر بهتر عمل می‌کند [۲۴].

لیو و همکاران^{۲۱} (۲۰۱۸)، یک مدل تصادفی برای لجستیک امداد پس از فاجعه پیشنهاد می‌کنند تا برنامه‌ریزی استقرار اولیه بالگرد را هدایت کند و با توجه به عدم قطعیت در تقاضا و زمان حمل و نقل، برنامه‌های حمل و نقل را در منطقه آسیب‌دیده ایجاد کند. سپس یک رویکرد بهینه‌سازی استوار را برای مقابله با این عدم قطعیت‌ها معرفی می‌کند و همتای استوار مدل تصادفی پیشنهادی را استنتاج می‌کند و یک مثال عددی از زلزله بزرگ سیچوان چین را ارائه داده است [۱۵].

لذا با مطالعه مرور ادبیات، نوآوری‌های تحقیق به شرح زیر می‌باشد: ما از مدل یاجی لیو و همکاران برای توسعه مدل خود استفاده می‌کنیم به این صورت که یک مدل دو هدفه را به منظور (۱) مینیمم کردن هزینه‌های استخدام پرسنل امدادی و هزینه‌های ثابت و عملیاتی بالگرد و (۲) مینیمم کردن زمان رفت و برگشت بالگرد در جهت مدیریت فعالیت‌های انتقال پرسنل امدادی از محل تسهیلات موقت به مناطق آسیب‌دیده و همچنین تخلیه این مناطق از افراد آسیب‌دیده پیشنهاد می‌کنیم. محدودیت سطح خدمت به مدل اضافه کردیم. (۳) از روش محدودیت اپسیلون و معیار خالص برای حل مدل استفاده کردیم. (۴) تحلیل حساسیت مدل نسبت به پارامترهای مختلف بررسی شده است. نتایج این تحلیل می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان کمک کند تا مقادیر مربوطه را با دقت بیشتری شناسایی کنند.

¹⁸ Pettit & Beresford

¹⁹ Xavier

²⁰ Saatchi

²¹ Liu

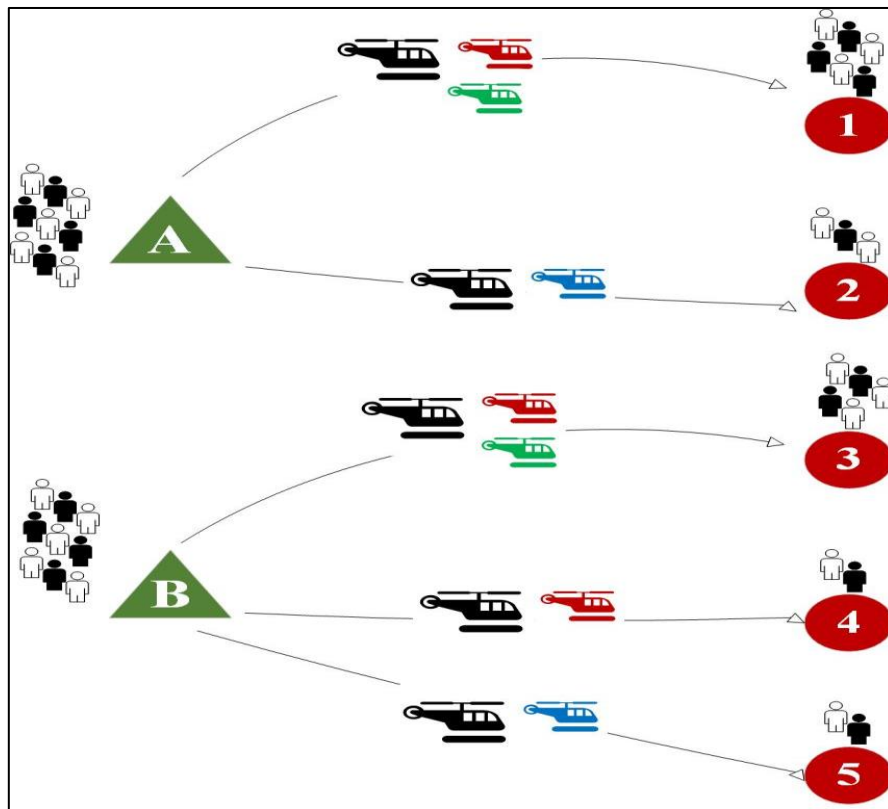
جدول ۱: دسته‌بندی مقالات موجود در زمینه امداد رسانی به وسیله بالگرد

مطالعه موردی	نوع بالگرد		روش حل	تعداد اهداف پارامترها			سال	نویسنده
	با سرنشین	بدون سرنشین		دارای عدم قطعیت	چند هدفه	یک هدفه		
ندارد	دارد	*	دقیق	*	*	*	۲۰۲۱	کا او و همکاران
*	*	*	NSGA-II SA	*	*	*	۲۰۲۱	ساعتچی و همکاران
	سیل	*	دقیق	*	*	*	۲۰۲۰	خاویز و همکاران
*	*	*	دقیق	*	*	*	۲۰۱۹	خاویز و همکاران
*	*	*	دقیق	*	*	*	۲۰۱۸	ریات و همکاران
	زلزله	*	دقیق-Robust	*	*	*	۲۰۱۸	لیو و همکاران
*	*	*	streamlined routing algorithm	*	*	*	۲۰۱۶	عبدقادر و همکاران
	زلزله	*	دقیق	*	*	*	۲۰۱۱	ازدمیر
	زلزله	*	دقیق-Robust	*	*	*	۲۰۲۳	زرین پور
	زلزله	*	دقیق-Robust	*	*	*	۲۰۲۴	وانگ
*	زلزله	*	دقیق- برنامه ریزی محدودیت-شانس	*	*	*	۲۰۲۴	این تحقیق

۳. فرموله کردن مسئله/ روش شناسی پژوهش

بیان مسئله. در این مقاله تعدادی تسهیلات موقت و تعدادی مناطق آسیب‌دیده آمده است. امداد رسانی به مناطق آسیب‌دیده از طریق تسهیلات موقت به وسیله بالگرد که اجاره گرفته می‌شود و هزینه ثابت و عملیاتی دارد، انجام می‌گیرد. بالگردها انواع مختلفی دارند که مخصوص به حمل پرسنل امدادی به مناطق آسیب‌دیده هستند. در راه برگشت آسیب‌دیده‌ها را به محل تسهیلات موقت انتقال می‌دهد. لازم به ذکر است که، تصمیم‌گیری در ارتباط با انتخاب و اجاره کردن بالگردهای نوع m در ابتدای دوره و فقط یک بار گرفته می‌شود. همچنین، ظرفیت هر بالگرد مشخص بوده و در هر پرواز تعداد مشخصی از پرسنل امداد و یا جمعیت آسیب‌دیده را با خود حمل می‌کند. پس از وقوع یک زلزله ویرانگر، تسهیلات موقت باید ترجیحاً به عنوان انبارهای توزیع در مرز منطقه فاجعه ایجاد شوند. یعنی این تسهیلات موقت به عنوان ایستگاه‌های انتقال موقت استفاده خواهند شد. حداکثر مجموع پرسنل امدادی و همچنین حداکثر ظرفیت تسهیلات پزشکی شامل تخت و امکانات پزشکی جهت درمان در هر تسهیل موقت مقداری ثابت است.

مطالعه موردی بر روی گسل تبریز واقع در شمال غربی ایران انجام شده است. از آنجاییکه با جان انسان سرکار داریم و این مهم از اهمیت بالایی برخوردار است، لذا در این پژوهش کمبود پرسنل منتقل شده از محل تسهیلات موقت به مراکز آسیب دیده امکان پذیر نمی‌باشد. شکل ۱ نمایی شماتیک از مسئله و نحوه کمک‌رسانی می‌باشد.



شکل ۱- انتقال نیروهای امدادی از تسهیلات موقت به مناطق آسیب‌دیده

فرضیات مسئله

- ✓ مجموعه تمامی پرسنل امدادی در ابتدا به این ایستگاه‌ها منتقل می‌شوند و سپس در میان مناطق آسیب‌دیده توزیع می‌شوند. به طور مشابه، جمعیت آسیب‌دیده از مناطق آسیب‌دیده به این تسهیلات موقت منتقل می‌شوند.
- ✓ حمل و نقل پرسنل امدادی و جمعیت آسیب‌دیده بین هر تسهیل موقت و منطقه آسیب‌دیده به دلیل شرایط خاص زمین پس از فاجعه در مناطق کوهستانی، صرفاً توسط بالگرد انجام می‌شود.
- ✓ ظرفیت بالگرد محدود و برای حمل نیروهای امدادی و افراد آسیب‌دیده مشخص است.
- ✓ مکان‌های بالقوه تسهیلات موقت و ظرفیت مجروحین موجود در آن‌ها، مشخص و ثابت است.
- ✓ زمان رفت و برگشت بین تسهیل موقت و منطقه آسیب‌دیده یکسان در نظر گرفته شده است.

نمادها و پارامترهای استفاده شده در مدل

۱- اندیس‌ها و مجموعه‌ها

در این مدل، سه اندیس و مجموعه به شرح ذیل تعریف شده است:

$i \in I$ مجموعه تسهیلات موقت

$j \in J$ مجموعه مناطق آسیب‌دیده

مجموعه انواع بالگردها $m \in M$

۲- پارامترهای استفاده شده در مدل به شرح ذیل می‌باشد:

d_j^R	سطح تقاضا برای پرسنل امدادی در منطقه آسیب‌دیده j
d_j^C	جمعیت آسیب‌دیده در منطقه آسیب‌دیده j
u_i^R	حداکثر مجموع پرسنل امدادی موجود در تسهیل موقت i
u_i^C	حداکثر ظرفیت تسهیلات پزشکی جهت سرویس‌دهی به افراد آسیب‌دیده در تسهیل موقت i
a_m	تعداد کل بالگردهای موجود نوع m
θ_m^R	ظرفیت بالگرد مدل m برای پرسنل امدادی (نفر/هلیکوپتر در هر سفر)
θ_m^C	ظرفیت بالگرد مدل m برای جمعیت آسیب‌دیده
t_{ijm}	میانگین زمان پرواز بین تسهیل موقت i و منطقه آسیب‌دیده j با بالگرد نوع m (ساعت)
C_i^R	هزینه استقرار هر واحد پرسنل امدادی در تسهیل موقت i
C_i^C	هزینه استقرار هر نفر آسیب‌دیده در تسهیل موقت i
C_m^F	هزینه ثابت اجاره یک فروند بالگرد نوع m در واحد زمان
C_m^O	هزینه عملیاتی یک فروند بالگرد نوع m در واحد زمان (ساعت)

۳- متغیرهای تصمیم به صورت ذیل بیان می‌شوند:

X_i^R	ظرفیت در نظر گرفته شده برای آماده شدن و اعزام پرسنل امدادی در تسهیل موقت i
X_i^C	ظرفیت طراحی شده برای درمان جمعیت آسیب‌دیده در تسهیل موقت i
W_{ijm}^R	تعداد پرسنل امدادی منتقل شده با بالگرد نوع m بین تسهیل موقت i و منطقه آسیب‌دیده j
W_{ijm}^C	تعداد جمعیت آسیب‌دیده منتقل شده با بالگرد نوع m بین تسهیل موقت i و منطقه آسیب‌دیده j
Y_{im}	تعداد بالگرد نوع m تخصیص یافته به تسهیل موقت i
N_{ijm}^F	تعداد سفرهای رفت از تسهیل موقت i به منطقه آسیب‌دیده j با بالگرد مدل m
N_{ijm}^B	تعداد سفرهای برگشت از منطقه آسیب‌دیده j به تسهیل موقت i با بالگرد مدل m

مدل ریاضی. مدل ریاضی مسئله یک مدل دو هدفه با هدف مینیمم کردن هزینه‌های استخدام پرسنل امدادی و هزینه‌های

ثابت و عملیاتی بالگرد و همچنین مینیمم کردن زمان سفر (رفت و برگشت) بالگردها در جهت افزایش سطح خدمت می‌باشد. که

بصورت ذیل ارائه می‌شود:

$$\text{Min } Z_1 = \sum_{i \in I} (C_i^R X_i^R + C_i^C X_i^C) + \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} C_m^F Y_{im} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} C_m^O t_{ijm} (N_{ijm}^F + N_{ijm}^B) \quad (1) \text{ رابطه}$$

$$\text{Min } Z_2 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} t_{ijm} (N_{ijm}^F + N_{ijm}^B) \quad (2) \text{ رابطه}$$

s.t

$$X_i^R \leq u_i^R \quad \forall i \quad (3) \text{ رابطه}$$

$$X_i^C \leq u_i^C \quad \forall i \quad (4) \text{ رابطه}$$

$$\sum_{i \in I} Y_{im} \leq a_m \quad \forall m \quad (5) \text{ رابطه}$$

$$\begin{aligned} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} W_{ijm}^R &\leq X_i^R && \forall i && \text{رابطه (۶)} \\ \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} W_{ijm}^C &\leq X_i^C && \forall i && \text{رابطه (۷)} \\ W_{ijm}^R &\leq \theta_m^R N_{ijm}^F && \forall i, m, j && \text{رابطه (۸)} \\ W_{ijm}^C &\leq \theta_m^C N_{ijm}^B && \forall i, m, j && \text{رابطه (۹)} \\ \sum_{j \in J} t_{ijm} (N_{ijm}^F + N_{ijm}^B) &\leq \delta_m Y_{im} && \forall i, m && \text{رابطه (۱۰)} \\ \sum_{j \in J} N_{ijm}^F - \sum_{j \in J} N_{ijm}^B &\leq Y_{im} && \forall i, m && \text{رابطه (۱۱)} \\ \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} \frac{W_{ijm}^R}{d_j} &\geq \alpha && \forall j && \text{رابطه (۱۲)} \\ \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} \frac{W_{ijm}^C}{d_j} &\geq \alpha && \forall j && \text{رابطه (۱۳)} \\ X_i^R, X_i^C, W_{ijm}^R, W_{ijm}^C, N_{ijm}^F, N_{ijm}^B, Y_{im} &\geq 0 \text{ and integer} && && \text{رابطه (۱۴)} \end{aligned}$$

تابع هدف (۱) هزینه کل، هزینه استخدام پرسنل امدادی، هزینه اجاره بالگرد و هزینه حمل و نقل را به حداقل می‌رساند. تابع هدف (۲) زمان رفت و برگشت بالگرد را در جهت افزایش سطح خدمت، مینیمم می‌کند. محدودیت‌های (۳) و (۴) حداکثر ظرفیت پرسنل امدادی و جمعیت آسیب‌دیده را به ترتیب نشان می‌دهد. محدودیت‌های (۵) حداکثر تعداد هر نوع بالگرد است که می‌توان به همه تسهیلات موقت اختصاص داد. محدودیت‌های (۶) و (۷) به ترتیب مربوط به تعداد پرسنل امدادی خارج شده از هر تسهیلات موقت و تعداد جمعیت آسیب‌دیده وارد شده به هر تسهیل موقت را نشان می‌دهد. محدودیت‌های (۸) و (۹) رابطه بین تعداد پرسنل امدادی انتقال یافته از هر تسهیل موقت به منطقه آسیب‌دیده توسط هر مدل بالگرد و تعداد جمعیت آسیب‌دیده انتقال یافته از هر منطقه آسیب‌دیده به هر تسهیل موقت توسط هر مدل بالگرد را نشان می‌دهد. محدودیت‌های (۱۰) تضمین می‌کند که مدت زمان پرواز هر مدل بالگرد از مدت زمان کل آن تجاوز نمی‌کند. محدودیت‌های (۱۱) معادله جریان ورودی و خروجی هر نوع بالگردی را برای هر تسهیل موقت نشان می‌دهد. بطوری که نباید تعداد بالگرد ورودی به آن TF از مقدار بالگرد خروجی از آن بیشتر باشد. محدودیت‌های (۱۲) و (۱۳) به ترتیب سطح خدمت را برای پرسنل امدادی و جمعیت آسیب‌دیده نشان می‌دهد. در نهایت، محدودیت‌های (۱۴) همه متغیرها را تعریف می‌کند.

روش برنامه‌ریزی محدودیت-شانس^{۲۲}

فرض می‌گردد که دو پارامتر برون زای مدل یعنی سطح تقاضا برای پرسنل امدادی و جمعیت مناطق آسیب دیده که d_j^C و d_j^R نشان داده می‌شوند از توزیع نرمال پیروی کنند. یعنی دارای یک میانگین نسبتاً مشخص و البته انحراف استاندارد معلومی باشند. این فرض بر اساس حوادث مشابه قبلی در هر منطقه چندان دور از ذهن نیست. از روش برنامه‌ریزی محدودیت-شانس استفاده می‌شود که یک روش مناسب و نسبتاً ساده برای برنامه‌ریزی تصادفی است. در برنامه‌ریزی محدودیت-شانس احتمالی کوچک برای نقض هر محدودیت در نظر گرفته می‌شود و به عبارت دیگر یک سطح حفاظت برای هر محدودیت تعریف می‌گردد.

با اعمال برنامه‌ریزی محدودیت-شانس، محدودیت (۱۲) و (۱۳) به صورت زیر تغییر کرده و به محدودیت‌های (۱۵) و (۱۶) تبدیل خواهد شد. مراحل رسیدن به محدودیت‌های مورد اشاره نیز ارائه شده است. در این محدودیت‌ها μ_j^R ، δ_j^R و μ_j^C ، δ_j^C به ترتیب مقدار میانگین و انحراف استاندارد تقاضا برای پرسنل امدادی و جمعیت آسیب‌دیده می‌باشند. لازم به ذکر است که مقدار β یا سطح اطمینان برابر با ۰.۹۵ در نظر گرفته شده است که در نتیجه مقدار k_β برابر با ۱.۶۴۵ خواهد شد.

$$\begin{aligned} \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} \frac{W_{ijm}^R}{d_j^R} &\geq \alpha && \forall j \\ \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} W_{ijm}^R &\geq \alpha d_j^R && \forall j \end{aligned}$$

$$d_j^R \sim N[\mu_j^R, \sigma_j^R]$$

$$\frac{1}{\alpha} \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} W_{ijm}^R \geq \mu_j^R + k_\beta \sigma_j^R \quad \forall j \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

همچنین:

$$\sum_{i \in I} \sum_{m \in M} \frac{W_{ijm}^C}{d_j^C} \geq \alpha \quad \forall j$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{m \in M} W_{ijm}^C \geq \alpha d_j^C \quad \forall j$$

$$d_j^C \sim N[\mu_j^C, \sigma_j^C]$$

$$\frac{1}{\alpha} \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} W_{ijm}^C \geq \mu_j^C + k_\beta \sigma_j^C \quad \forall j \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

روش محدودیت اپسیلون^{۲۳} و معیار جامع^{۲۴}

➤ روش محدودیت اپسیلون

در این پژوهش از روش محدودیت اپسیلون برای تبدیل مسئله چند هدفه به یک مدل تک هدفه استفاده شده است. برخلاف بسیاری از تکنیک‌های متداول مانند روش‌های وزنی که نیاز به تخصیص وزن به توابع هدف دارند؛ روش محدودیت اپسیلون از رایج‌ترین و کارآمدترین رویکردهای چند هدفه است که به وزن اهداف نیازی ندارد. به عبارت دیگر روش محدودیت اپسیلون نیاز به هم‌مقیاس کردن توابع هدف به یک مقیاس مشترک را برطرف می‌کند. مدل چندهدفه زیر را در نظر بگیرید [۱۰]:

$$\text{Min}_{x \in X} \left\{ \begin{array}{l} F(x) = \\ (F_1(x), F_2(x), \dots, F_k(x)) \end{array} \right\} \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

در رابطه (۱۷)، x ، F_x و X به ترتیب برداری از متغیرهای تصمیم، برداری از k تابع هدف و فضای شدنی حل هستند. روش محدودیت اپسیلون بر اساس یکی از توابع هدف بهینه می‌شود و مابقی توابع هدف با در نظر گرفتن کران‌های بالا در محدودیت‌ها به صورت زیر قرار می‌گیرند.

$$\text{Min}_{x \in X} F_p(x)$$

$$F_i(x) \leq \varepsilon_i \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, k\} / \{p\} \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

در رابطه (۱۸)، $F_p(x)$ تابع هدف اصلی است که حداقل می‌شود و توابع هدف دیگر به صورت محدودیت در نظر گرفته می‌شوند. کران محدودیت‌ها با ε_i نشان داده شده است. با تغییر مقادیر ε_i می‌توان مجموعه‌ای از جواب‌ها را به دست آورد. مراحل روش اپسیلون به صورت زیر است:

۱- یکی از توابع هدف به عنوان تابع هدف اصلی در نظر گرفته می‌شود.

۲- بازه‌ی بهترین و بدترین تابع هدف فرعی مشخص می‌شود:

$$[f_i^{best}, f_i^{worst}]$$

$$r_i = f_i^{worst} - f_i^{best} \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, k\} / \{p\} \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

بازه بین دو مقدار بهینه توابع فرعی، به تعداد از قبل مشخص شده‌ای (q_i) تقسیم شده و بر اساس رابطه‌ی (۲۰) مقادیر مختلف برای پارامتر اپسیلون به دست می‌آید.

$$\varepsilon_i^k = f_i^{best} - \frac{r_i}{q_i} \times k \quad k = 1, 2, \dots, q_i \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

²³ Epsilon-constraint

²⁴ LP-metric

هر بار با در نظر گرفتن هر یک از مقادیر پارامتر اپسیلون مسئله با تابع هدف اصلی حل می‌شود. یکی از اشکالات روش محدودیت اپسیلون این است که ممکن است جواب‌های ناکارآمد تولید کند. نسخه‌های متفاوتی از روش محدودیت اپسیلون برای کارا تر شدن جواب‌ها ارائه شده است. در این مقاله برای رفع این مشکل روش محدودیت اپسیلون توسعه یافته پیشنهاد شده است که در این روش پیشنهادی تغییر محدودیت‌های تابع هدف به صورت محدودیت‌های مساوی با بکارگیری از مقادیر مناسب متغیرهای کمبود و مازاد ارائه شده است و تابع هدف اصلی بوسیله مجموع مقادیر کمبود یا مازاد تکمیل می‌شود [۱۹].

➤ روش معیار جامع

یک مدل تصمیم‌گیری چندهدفه، برداری از متغیرهای تصمیم، توابع هدف و محدودیت‌ها را شامل می‌شود و هدف تصمیم‌گیرنده، ماکزیمم کردن یا مینیمم کردن توابع هدف می‌باشد. از آنجایی که این مسائل به ندرت حل منحصر به فردی دارند، تصمیم‌گیرنده جوابی را از میان مجموعه جواب‌های کارا انتخاب می‌کند.

این روش مجموع توان انحرافات نسبی اهداف را از مقدار بهینه‌شان حداقل کرده و توابع هدف چندگانه را به صورت یک هدف ترکیب می‌نماید. روش LP متریک به دو دلیل مورد توجه قرار گرفت: ۱- به اطلاعات کمتری از DM نیاز دارد. ۲- استفاده از آن در عمل ساده است.

روش LP متریک به منظور سنجش نزدیکی یک راه حل، از ایده‌آل مورد استفاده قرار می‌گیرد. این سنجش از انحراف به صورت زیر خواهد بود، پس برای مینیمم Z داریم:

$$\min z = \sum_{i=1}^n W_i \left(\frac{z_i^* - z_i}{z_i^*} \right)^p \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

اهمیت (وزن) هدف i ام می‌باشد. برای از بین بردن مشکل تفاوت مقیاس‌های اهداف، میزان انحراف جواب ایده‌آل هدف i ام را بر Z_i^* تقسیم می‌کنیم. مشخص کننده درجه تأکید بر انحرافات است به گونه‌ای که هر چه این ارزش بزرگ‌تر باشد تأکید بیشتری بر بزرگترین انحراف خواهد بود. تابع هدف کلی روش LP متریک نیز به منظور حداقل کردن انحرافات از ایده‌آل باید **کمینه** گردد. در این روش توابع هدف را به طور جداگانه از طریق نرم افزار GAMS با در نظر گرفتن تمامی محدودیت‌های مسئله، بهینه نموده و جواب‌های بهینه به دست آمده از هر تابع هدف را به عنوان Z_i^* در نظر می‌گیریم. حال سعی می‌کنیم تابع انحرافات حاصل از دو تابع فوق را کمینه نماییم. بنابراین روش LP متریک این گونه تعریف می‌شود:

$$\min z = \sum_{i=1}^n W_i \left(\frac{z_i^* - z_i}{z_i^*} \right)^p$$

$$g_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq b_j \quad j = 1, 2, \dots, m$$

$$z_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

$$X_i \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, k$$

$$z_i: \text{ free in sign} \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

مقدار بهینه تابع هدف i ام (مستقل از بقیه توابع هدف: با در نظرگیری محدودیت‌ها) است. به ازای p های متفاوت مسئله را حل کرده و جواب‌های مؤثر را به دست می‌آوریم.

۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

در ادامه به تشریح مطالعه موردی و تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش می‌پردازیم.

مطالعه موردی. آذربایجان شرقی و به‌ویژه کلانشهر تبریز یکی از مناطق زلزله‌خیز ایران به حساب می‌آید. استانی که یک‌بار در ۲۱ مرداد سال ۱۳۹۱ به شدت لرزید و این اواخر نیز در آبان سال ۹۸ زمین لرزه را تجربه کرد. این گسل همواره جای نگرانی داشته زیرا یک چهارم جمعیت تبریز حاشیه‌نشین هستند و در بافت فرسوده سکونت دارند. گسل‌های مهمی این استان را احاطه کرده که تقریباً در مرزهای استان قرار دارند؛ از جمله گسل تبریز در غرب، گسل ارس در شمال و گسل میانه - اردبیل در جنوب شرق از مهم‌ترین آن‌ها هستند. همچنین در داخل استان نیز گسل‌های مهم دیگری وجود دارند که از جمله مهم‌ترین آن‌ها گسل شمال و

جنوب میشو، گسل‌های شمال و جنوب بزقوش، گسل ارسباران و نیز گسل جنوب اهر هستند که گسل تبریز به حکایت تاریخ، لرزه‌خیزترین گسل در استان است.

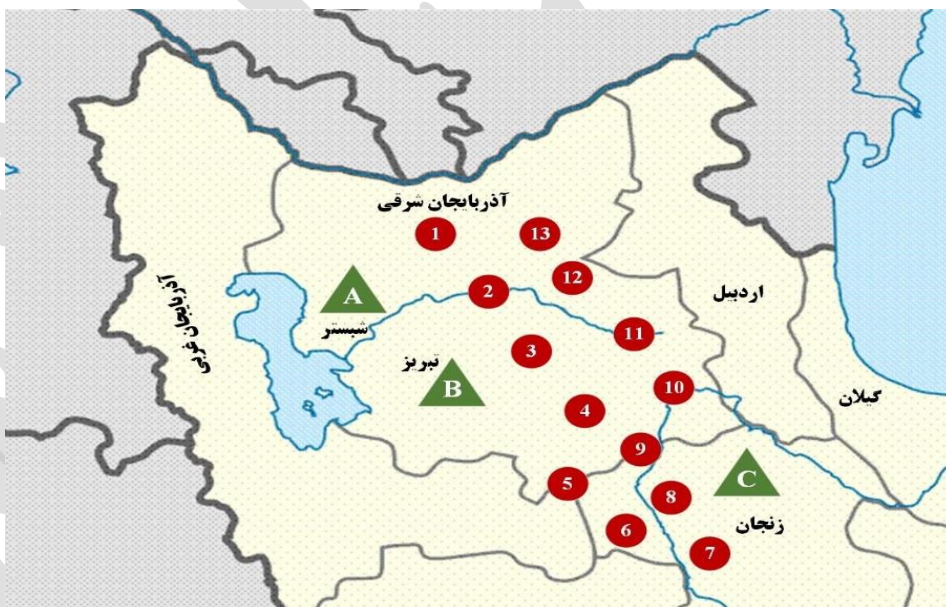
گسل تبریز یکی از گسل‌های قدیمی و از ساختارهای خطی ایران است که با درازای ۱۰۰ کیلومتر از کوه‌های میشو (در غرب) تا بستان آباد (در شرق) قابل ردیابی است. بهترین اثر این گسل در شمال تبریز دیده می‌شود و به همین دلیل گسل تبریز نام‌گذاری شده‌است. روند عمومی آن شمال ۱۱۵ درجه شرقی و شیب آن قائم است. از صوفیان به سمت غرب، این گسل پس از گذشتن از شهرستان خوی به سمت ماکو و سپس به کوه‌های آرات در ترکیه می‌رسد. ادامه جنوب‌شرقی آن کوه‌های سلطانیه در جنوب‌شرقی زنجان است. شکل ۲ نقشه تمام گسل‌های موجود در کشور ایران را نشان می‌دهد که از میان این‌ها گسل تبریز واقع در شمال غرب ایران که در شکل ۳ نشان داده شده است، مورد مطالعه این پژوهش قرار گرفته است.



شکل ۲- گسل‌های موجود در ایران



شکل ۳- گسل تبریز واقع در شمال غرب ایران



شکل ۴- محل قرارگیری تسهیلات موقت و مناطق آسیب‌دیده

در این پژوهش ۱۳ منطقه آسیب‌دیده و به تناسب آن ۳ محل تسهیلات موقت در نظر گرفته شده است که در شکل ۴ نشان داده شده است. ما برنامه‌ای از مدل پیشنهادی خود را براساس روش محدودیت اپسیلون و روش معیار جامع با استفاده از داده‌های برگرفته از مقاله لیو و همکاران^{۲۵} (۲۰۱۸) و همچنین داده‌هایی را که برگرفته از جمعیت شهرهای مشخص بر روی گسل تبریز، براساس سرشماری سال ۱۳۹۵ و مسافت و فاصله شهرها است، تجزیه و تحلیل می‌کنیم. مدل با استفاده از نرم‌افزار گمز حل شده و به جواب رسیده است.

جدول ۲: مقدار عددی تقاضای مناطق آسیب‌دیده

AA5	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳
μ_j^R	۲۲۰	۲۷۷	۷۹۲	۶۶۰	۷۶	۱۶۸	۲۶۹	۱۸۰	۷۶	۳۰۹	۲۶۳	۶۷	۴۵
μ_j^C	۴۴۱	۵۵۵	۱،۵۸۵	۱،۳۲۱	۱۵۳	۳۳۶	۵۳۹	۳۵۹	۱۵۳	۶۱۹	۵۲۶	۱۳۴	۸۹
δ_j^R	۲۲	۲۷	۷۹	۶۶	۷	۱۶	۲۶	۱۸	۷	۳۰	۲۶	۶	۴
δ_j^C	۴۴	۵۵	۱۵۸	۱۳۲	۱۵	۳۳	۵۳	۳۵	۱۵	۶۱	۵۲	۱۳	۸

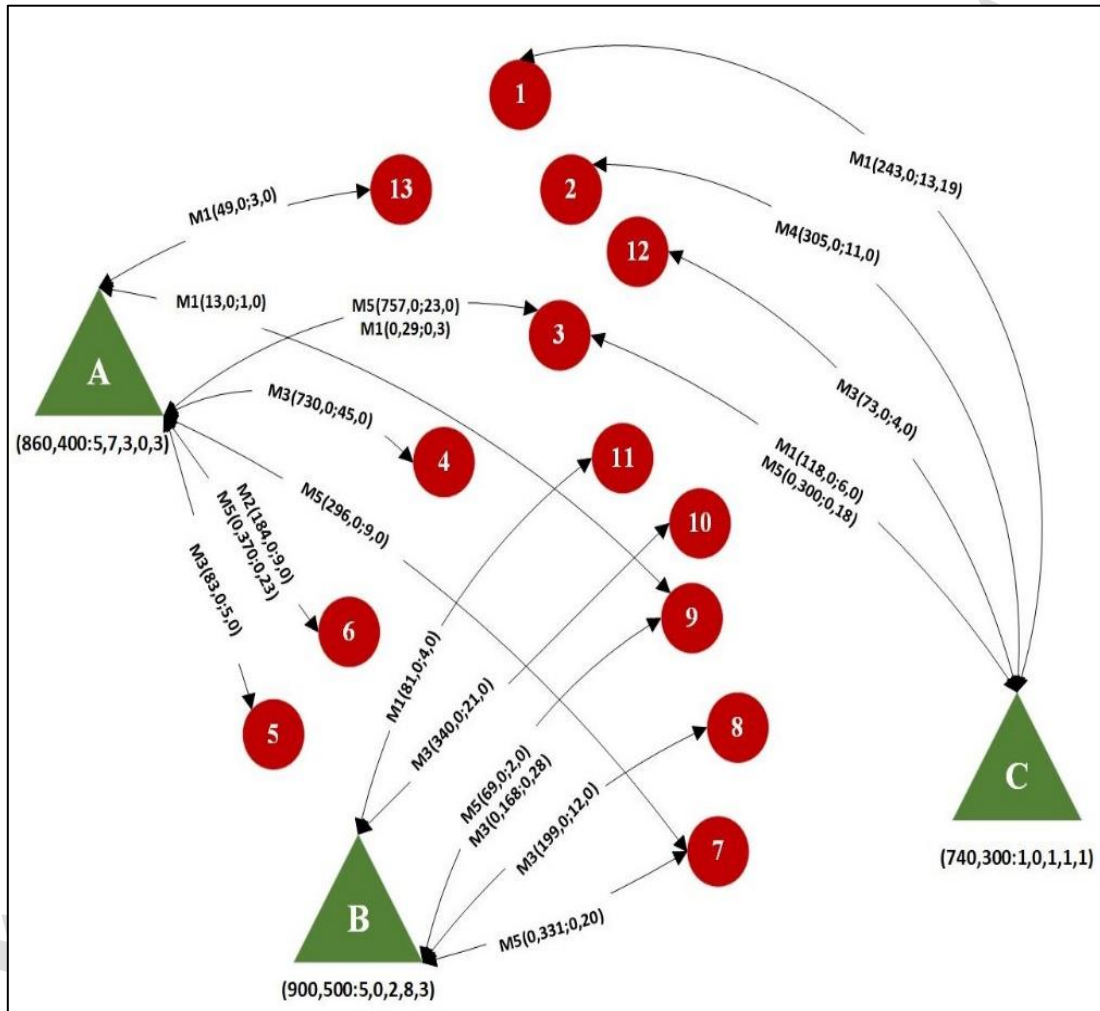
جدول ۳: پارامترهای مربوط به تسهیلات موقت

TF3	TF2	TF1	TFs
۹۰۰	۷۲۰	۸۶۰	$(\text{unit})u_i^R$
۵۰۰	۳۰۰	۴۰۰	$(\text{unit})u_i^C$
۱،۲۳	۱،۲۳	۱،۱۲	$(10^3\$/\text{unit})c_j^R$
۰،۵۵	۰،۵۵	۰،۵	$(10^3\$/\text{unit})c_j^C$

جدول ۴: پارامترهای مربوط به بالگردها

M_5	M_4	M_3	M_2	M_1	پارامترها
۶	۸	۵	۷	۱۰	a_m
۳۲	۲۸	۱۶	۲۰	۱۸	θ_m^R
۱۶	۹	۶	۱۵	۸	θ_m^C
۱۵	۱۵	۱۰	۱۲	۱۲	$(10^3\$/\text{unit})c_m^F$
۰،۵	۰،۶	۰،۴	۰،۴	۰،۵	$(10^3\$/\text{unit})c_m^O$

در شکل ۵ مثلث‌ها تسهیلات موقت هستند و ۷ عدد داخل پرانتز به ترتیب: تعداد پرسنل امداد موجود در هر تسهیل، ظرفیت موجود برای جمعیت آسیب‌دیده در هر تسهیل، و تعداد بالگردها از ۵ نوع مختلف در هر تسهیل می‌باشد (X_i^R, X_i^C, Y_{im}) . دایره‌ها، مناطق آسیب‌دیده هستند. مقدار اعداد روی فلش‌ها که تسهیلات موقت و مناطق آسیب‌دیده را به هم وصل می‌کند نشان دهنده میزان پرسنل امدادی و جمعیت آسیب‌دیده منتقل شده و همچنین تعداد سفرهای رفت و برگشت بالگردها است $(W_{ijm}^R, W_{ijm}^C, N_{ijm}^F, N_{ijm}^B)$.



شکل ۵: نتایج حل براساس داده‌های عددی

تحلیل حساسیت.

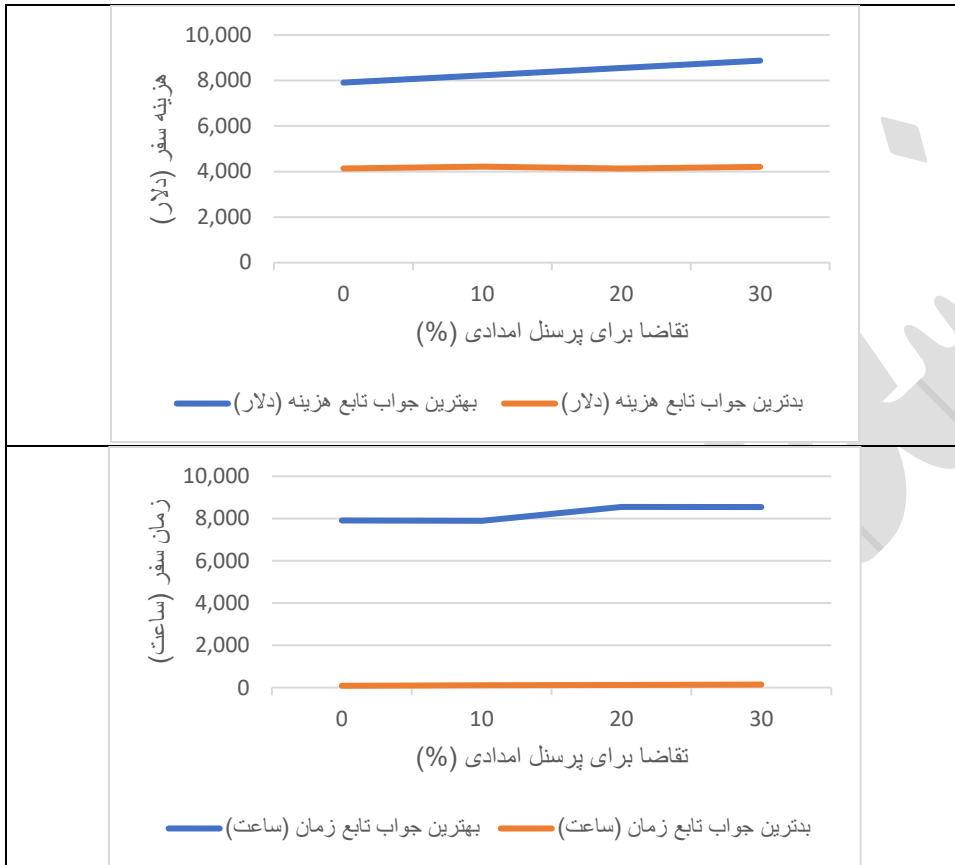
جدول ۴ و جدول ۵ به ترتیب، نتایج حل مطالعه موردی بدست آمده با دو روش محدودیت اپسیلون و معیار جامع را نشان می‌دهد. شکل ۶ مقدار هزینه و زمان مرتبط با تغییرات تقاضا برای پرسنل امدادی بر حسب درصد نسبت به مقدار فعلی نشان می‌دهد. نمودار موجود بیانگر آن است که کاهش درصد تقاضای پرسنل امدادی موجب کاهش تابع زمان و همچنین کاهش تابع هزینه می‌گردد. طبق این شکل کاهش میزان تقاضای پرسنل امدادی تا ۳۰ درصد منجر به کاهش بهترین جواب تابع هدف تا ۷۹۰۹۰۴۳۱ شده است. همچنین، شکل ۷، مقدار هزینه و زمان مرتبط با تغییرات تقاضا برای جمعیت آسیب دیده بر حسب درصد نسبت به مقدار فعلی نشان می‌دهد. با توجه به نمودار مشخص است که کاهش جمعیت آسیب‌دیده موجب کاهش تابع زمان و تا حدودی کاهش تابع هزینه می‌گردد.

جدول ۵: جواب بدست آمده مطالعه موردی با روش محدودیت اپسیلون

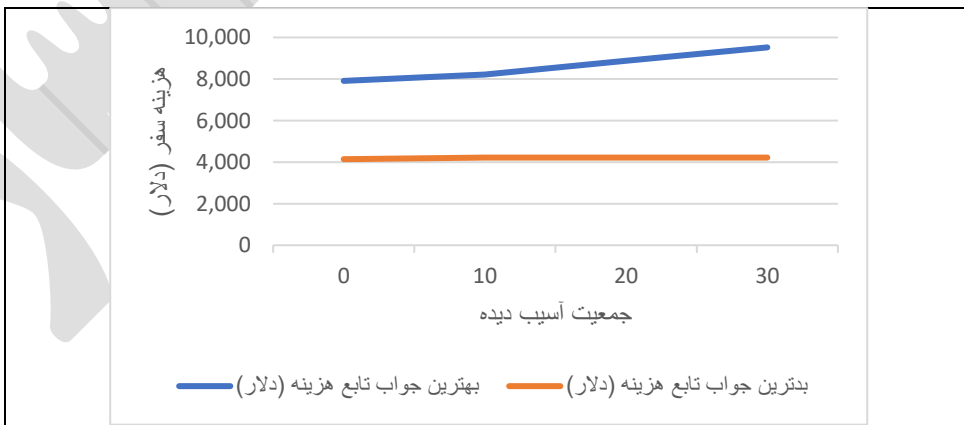
بهترین جواب تابع هزینه (دلار)	بهترین جواب تابع زمان (ساعت)
۷۹۰۹۰۴۳۱	۷۹۰۹۰۴۳۱
بدترین جواب تابع هزینه (دلار)	بدترین جواب تابع زمان (ساعت)
۴۱۴۰۰۴۸۱	۸۴۰۸۱۱

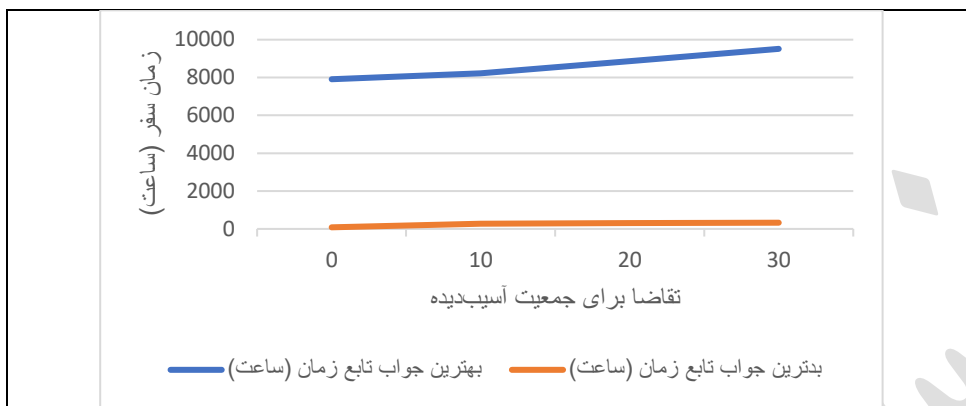
جدول ۶- جواب بدست آمده مطالعه موردی با روش معیار جامع

جواب تابع زمان (ساعت)	جواب تابع هزینه (دلار)
۷۵۷۶۰۶۵۲	۷۹۰۹۰۴۳۱



شکل ۶: هزینه و زمان مرتبط با تغییرات تقاضا برای پرسنل امدادی بر حسب درصد نسبت به مقدار فعلی





شکل ۷: هزینه و زمان مرتبط با تغییرات تقاضا برای جمعیت آسیب دیده بر حسب درصد نسبت به مقدار فعلی

پایگاه استنادی

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این تحقیق، یک مدل دو هدفه با اهداف کمینه کردن هزینه‌ها شامل هزینه‌های استخدام پرسنل امدادی و هزینه‌های ثابت و عملیاتی بالگرد و همچنین کمینه کردن زمان رفت و برگشت بالگردها در راستای افزایش سطح خدمت، برای امداد و نجات حوادث انسانی توسعه داده شد. در این مدل دو پارامتر جمعیت آسیب دیده و تقاضا برای پرسنل امدادی توأم با عدم قطعیت و برخورد از توزیع نرمال فرض شد. مدل مربوطه ابتدا با استفاده از روش برنامه‌ریزی محدودیت شانس از حالت قطعی به احتمالی تبدیل گردید و سپس با استفاده از روش محدودیت اپسیلون و روش معیار جامع برای مسئله‌ای با ۳ تسهیلات موقت، ۱۳ منطقه آسیب‌دیده و ۵ نوع بالگرد متفاوت حل گردید. در این مسئله گسل تبریز واقع در شمال غربی ایران به عنوان مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج عددی آن تحلیل گردید. نتایج مثال عددی که برای بررسی کاربرد مدل پیشنهادی در نظر گرفته شد، نشان داد که این مدل می‌تواند برای کمک به تصمیم‌گیرندگان در تعیین حداکثر مجموع پرسنل امدادی مورد نیاز در تسهیلات موقت، و همچنین تعداد بهینه تسهیلات موقت جهت خدمت به جمعیت آسیب‌دیده، استفاده شود. مهمترین محدودیت این تحقیق عدم دسترسی کامل به برخی از داده‌های مسئله و در نظر گرفتن مکان تسهیلات موقت کاندید به صورت تقریبی روی نقشه و بر اساس میزان نزدیکی آنها به گسل‌های موجود می‌باشد.

از آنجایی که هر تحقیقی جای بحث و بررسی و پیشنهادات بعدی دارد لذا موارد زیر جهت پیشنهادات آتی برای پژوهشگران مطرح می‌گردد:

- مدلسازی عدم قطعیت‌های مسأله با استفاده از رویکرد استوار
- حل مسئله در ابعاد بزرگ با استفاده از روشهای ابتکاری
- استفاده از سایر روشهای حل و تحلیل مسائل چند هدفه

تعارض منافع. برای ارائه مطالب و نگارش این مقاله هیچ‌گونه کمک مالی از هیچ فرد، نهاد و سازمانی دریافت نشده است و نتایج و دستاوردهای این مقاله به نفع یا ضرر سازمان یا فردی خاص نخواهد بود. حضور نویسندگان در این پژوهش به عنوان شاهدهی بی‌طرف ولی متخصص بوده است و نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافی ندارند.

منابع

1. Abdelgader, A. M. S., Wu, L., & Nasr, M. M. M. (2016). A simplified mobile Ad hoc network structure for helicopter communication. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2016 (3), 1-15.
2. Abounacer, R., Rekik, M., & Renaud, J. (2014). An exact solution approach for multi-objective location-transportation problem for disaster response. *Computers and Operations Research*, 41(1), 83-93.
3. Baskaya, S., Ertem, M. A., & Duran, S. (2017). Pre-positioning of relief items in humanitarian logistics considering lateral transshipment opportunities. *Socio-Economic Planning Sciences*, 57, 50-60.
4. Bozorgi Amiri, A., Mansouri, S., Peshwai, M. (2012). Designing a multi-objective supply chain network to respond to an earthquake under uncertainty. *Journal of Industrial Management Perspective*, 25, 9-36 (In Persian).
5. Boonmee, C., & Kasemset, C. (2020). The multi-objective fuzzy mathematical programming model for humanitarian relief logistics. *Industrial Engineering and Management Systems*, 19(1), 197-210.
6. Bozorgi-Amiri, A., Jabalameli, M. S., Alinaghian, M., & Heydari, M. (2012). A modified particle swarm optimization for disaster relief logistics under uncertain environment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 60(1), 357-371.
7. Cao, C., Liu, Y., Tang, O., & Gao, X. (2021). A fuzzy bi-level optimization model for multi-period post-disaster relief distribution in sustainable humanitarian supply chains. *International Journal of Production Economics*, 235, 108081.

8. Caric, T., & Gold, H. (2008). Vehicle routing problem. *In-Tech publication, Croatia, ISBN:9789537619091*.
9. Ghasemi, P., Goodarzian, F., & Abraham, A. (2022). *A new humanitarian relief logistic network for multi-objective optimization under stochastic programming*, 52, 13729-13762.
10. Ghasemi, P., Khalili-Damghani, K., Hafezolkotob, A., & Raissi, S. (2019). Uncertain multi-objective multi-commodity multi-period multi-vehicle location-allocation model for earthquake evacuation planning. *Applied Mathematics and Computation*, 350, 105–132.
11. Hasani, A. (2021). Relief Network Design Problem: A Distributionally Robust Optimization Approach. *Journal of Industrial Management Perspective*, 11(4), 85–119 (In Persian).
12. Kamyabniya, A., Sauré, A., Salman, F. S., Bénichou, N., & Patrick, J. (2024). Optimization models for disaster response operations: a literature review. *OR Spectrum*, 46(3), 737–783.
13. Khorsi, M., Chaharsoghi, S. K., Bozorgi-Amiri, A., & Kashan, A. H. (2020). A Multi-Objective Multi-Period Model for Humanitarian Relief Logistics with Split Delivery and Multiple Uses of Vehicles. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 29(3), 360–378.
14. Kim, J. J., Jang, H., & Roh, S. (2022). A systematic literature review on humanitarian logistics using network analysis and topic modeling. *Asian Journal of Shipping and Logistics*, 38(4), 263–278.
15. 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.
16. Mousavi, S., Sajadi, M., Alemtabriz, A., & Najafi, E. (2021). Designing a Hierarchical Network of Temporary Urban Medical Centers in a Disaster through a Hybrid Approach of Mathematical Model-Simulation. *Journal of Industrial Management Perspective*, 42, 99-124 (In Persian).
17. Ozdamar, L. (2011). Planning helicopter logistics in disaster relief. *OR Spectrum*, 33(3), 655–672.
18. Paul, J. A., & Hariharan, G. (2012). Location-allocation planning of stockpiles for effective disaster mitigation. *Annals of Operations Research*, 196(1), 469–490.
19. Pettit, S. J., & Beresford, A. K. C. (2005). Emergency relief logistics: an evaluation of military, non-military and composite response models. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 8(4), 313–331.
20. Praneetpholkrang, P., Huynh, V. N., & Kanjanawattana, S. (2021). A multi-objective optimization model for shelter location-allocation in response to humanitarian relief logistics. *Asian Journal of Shipping and Logistics*, 37(2), 149–156.
21. Rabta, B., Wankmüller, C., & Reiner, G. (2018). A drone fleet model for last-mile distribution in disaster relief operations. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 28, 107–112.
22. Rezaei Kallaj, M., Abolghasemian, M., Moradi Pirbalouti, S., Sabk Ara, M., & Pourghader Chobar, A. (2021). Vehicle Routing Problem in Relief Supply under a Crisis Condition considering Blood Types. *Mathematical Problems in Engineering*, 7217182, 1-10.
23. Ricardo, S., Da Costa, A., Albergaria, R., Bandeira, M., Carlos, L., Mello, B. B., Barcellos, V., & Campos, G. (2014). Humanitarian supply chain: an analysis of response operations to natural disasters. *EJTIR Issue*, 14(3), 290–310.
24. Saatchi, H. M., Khamseh, A. A., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2021). Solving a new bi-objective model for relief logistics in a humanitarian supply chain using bi-objective meta-heuristic algorithms. *Scientia Iranica*, 28(5 E), 2948–2971.
25. Steenbergen, R. Van, & Mes, M. (2020). A Simulation Framework for Uav-Aided Humanitarian Logistics. *Proceedings - Winter Simulation Conference, 2020-December*, 1372–1383.
26. Veysmoradi, D., Vahdani, B., Farhadi Sartangi, M., & Mousavi, S. M. (2018). Multi-objective open location-routing model for relief distribution networks with split delivery and multi-mode transportation under uncertainty. *Scientia Iranica*, 25(6), 3635–3653.
27. Wang, Q., Liu, Y., & Pei, H. (2024). Modelling a bi-level multi-objective post-disaster humanitarian relief logistics network design problem under uncertainty. *Engineering Optimization*, 56(8), 1220–1254.

28. Zarrinpoor, N., Aray, Z., & Sheikholeslami, M. (2023). A robust-stochastic optimization approach for designing relief logistics operations under network disruption. *International Journal of Supply and Operations Management*, 10(3), 271–294.
29. Xavier, I. R., Bandeira, R. A. M., Bandeira, A. P. F., Campos, V. B. G., & Silva, L. O. (2020). Planning the use of helicopters in distribution of supplies in response operations of natural disasters. *Transportation Research Procedia*, 47, 633–640.
30. Xavier, I. R., de Mello Bandeira, R. A., de Oliveira Silva, L., de Paula Fontainhas Bandeira, A., Campos, V. B. G., & Leobons, C. M. (2021). Planning the use of helicopters in the last mile distribution process in catastrophes. *Brazilian Institute for Information in Science and Technology*, 28 (4), e5053.
31. Xavier, I. R., Mello Bandeira, R. A. De, Oliveira Silva, L. De, Fontainhas Bandeira, A. D. P., & Gouvêa Campos, V. B. (2019). Employing helicopters in the modelling of last mile distribution system in large-scale disasters. *Transportation Research Procedia*, 37, 306–313.