Ind. Manag. Persp. 2024, 14(4), 142-164; doi: 10.48308/JIMP.14.4.142

Industrial Management Perspective

Journal hompage: https://jimp.sbu.ac.ir/?lang=en

Original Article

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

Seyran Ghadimi*
Mehdi Seifbarghy**

Extended Abstract

Introduction: Disaster management in the post-disaster phase is crucial for minimizing damages. Relief logistics enable the rapid deployment of relief personnel and necessary materials to affected areas and the rescue of victims. During natural disasters like earthquakes, physical infrastructures such as roads and bridges are often destroyed, making access to affected areas extremely difficult or even impossible. For this reason, helicopters are the most suitable means of transport to assist the injured. In this context, another critical issue is the difference in service times between helicopters. Naturally, shorter service times result in higher costs. Therefore, it is essential to strike a balance between the dual objectives of time and cost.

Methods: This paper proposes a mathematical model for post-disaster relief logistics following a catastrophic earthquake in a mountainous region. The model aims to plan the deployment of helicopters to affected areas and manage the rescue and transportation of injured individuals to temporary facilities. The issue of uncertainty regarding the affected population and the demand for rescue personnel is also addressed. Initially, a deterministic mathematical model is proposed. Subsequently, the model is adapted using the chance-constraint programming method to incorporate the stochastic nature of the aforementioned parameters, converting them into deterministic constraints. Additionally, two approaches, the LP-metric method and the epsilon constraint method, are employed to solve the bi-objective model concerning time and cost.

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

* Ph.D. Student, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Alzahra University, Tehran, Iran.
** Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Alzahra University, Tehran, Iran.
Corresponding Author: m.seifbarghy@alzahra.ac.ir

Ind. Manag. Persp. 2024, 14(4), 142-164; doi: 10.48308/JIMP.14.4.142

Industrial Management Perspective

Journal hompage: https://jimp.sbu.ac.ir/?lang=en

Original Article

Results and discussions: A key finding of this research is the formulation of decision variables in the mathematical model. One critical decision variable is the capacity allocated for preparing and dispatching relief personnel at each temporary facility. This designed capacity must not exceed a maximum allowable value due to technical constraints and, operationally, must also accommodate the total number of personnel deployed by all helicopters from the facility across multiple trips. Similar constraints apply to the capacity for treating injured individuals at each temporary facility. Specifically, this capacity must not exceed a predefined maximum and must also meet or exceed the population of injured individuals transported to the facility by various helicopters over multiple trips. Two additional important constraints addressed in this research include adherence to the maximum flight hours of each helicopter and ensuring a minimum level of service to cover the affected population. These constraints are made feasible through the defined decision variables. Another significant finding pertains to the modeling of the trade-off between helicopter service costs and times, represented as a bi-objective model. Moreover, given the uncertainty of the two exogenous parameters—relief force demand and the population of affected areas—these parameters are assumed to follow a normal distribution with specific means and standard deviations, and their associated constraints are ultimately converted into deterministic forms.

Conclusions: The proposed model is solved using the epsilon constraint method and the LP-metric method for a case study involving the Tabriz fault. In a pilot scenario, 13 affected areas were considered, with 3 potential locations for establishing temporary facilities and 5 types of helicopters. The results indicate that increased demand for relief personnel and affected areas leads to higher costs and longer service times, demonstrating the logical functionality of the developed model.

Key words: Relief logistics; Helicopter; Chance-Constraint Programming; Bi-objective Model; Epsilon Constraint.

How to Cite: Ghadimi, Seyran; Seifbarghy, Mehdi (2024). Designing a Bi-objective Post-Disaster Relief Logistics Model Considering Cost and Time of Utilizing Helicopters and Chance-constraint Programming. *Ind. Manag. Persp.*, 14(4), 142-164 *(In Persian)*.

Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

چشم‌انداز مدیریت صنعتی، ۱۴۰۳، دوره ۱۴، شماره ۴، صص ۱۴۲–۱۶۴، doi: 10.48308/JIMP.14.4.142

چشم‌انداز مدیریت صنعتی

Journal hompage: https://jimp.sbu.ac.ir/?lang=en

نوع مقاله: پژوهشی

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

سیران قدیمی

مهدی سیف‌برقی

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 بلایای 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 می شود. 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 می باشد که بدیهی است هر چه زمان سرویس کوتاهتر باشد، هزینه های آن بیشتر خواهد بود. لذا باید از طریق ابزار مشخصی توازنی 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 امدادرسانی و برنامه‌ریزی جهت اعزام بالگردها به مناطق آسیب دیده و نجات و انتقال افراد آسیب‌دیده به تسهیلات موقت سرویس دهی به ایشان را پوشش دهد. همچنین موضوع وجود عدم قطعیت جمعیت آسیب دیده 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 می شود و سپس با استفاده از روش برنامه ریزی محدودیت-شانس و در نظر گرفتن عدم قطعیت دو پارامتر مورد اشاره به صورت احتمالی، مدل احتمالی مورد نظر مجددا به قطعی تبدیل می شود. همچنین از دو روش معیارجامع و محدودیت اپسیلون برای حل مدل دو هدفه بر حسب زمان و هزینه استفاده می شود.

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

** دانشجوی دکتری، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران.

نویسنده مسئول: m.seifbarghy@alzahra.ac.ir

* استاد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران.

چشم‌انداز مدیریت صنعتی، ۱۴۰۳، دوره ۱۴، شماره ۴، صص ۱۴۲–۱۶۴، doi: 10.48308/JIMP.14.4.142

چشم‌انداز مدیریت صنعتی

Journal hompage: https://jimp.sbu.ac.ir/?lang=en

نوع مقاله: پژوهشی

یافته‌ها: از یافته های مهم این تحقیق می توان 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 قاعدتا 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 کتغیرهای 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 نهایتا به حالت قطعی تبدیل شده است.

نتیجه‌گیری: مدل پیشنهادی با رویکرد محدودیت اپسیلون و همچنین روش معیار جامع توسعه یافته برای مطالعه موردی گسل تبریز حل شده است. به صورت پایلوت ۱۳ منطقه آسیب‌دیده، 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 واژه‌ها: لجستیک امداد؛ بالگرد؛ برنامه ریزی محدودیت شانسی؛ مدل دو هدفه؛ روش اپسیلون محدودیت.

استناددهی: قدیمی، سیران؛ سیف‌برقی، مهدی (۱۴۰۳). طراحی مدل دو هدفه لجستیک امداد پس از وقوع بحران با در نظر گرفتن هزینه و زمان بهره‌گیری از بالگرد وبرنامه‌ریزی محدودیت–شانس. چشم‌انداز مدیریت صنعتی، ۱۴(۴)، ۱۴۲–۱۶۴.

Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

۱. مقدمه

بی شک مهمترین موضوع در هنگام وقوع بحران، مسأله کنترل و مدیریت بحران است که لجستیک امداد بحران یکی از مهمترین فعالیت‌ها در این زمینه می‌باشد [۷]. این فعالیت، شامل آمادگی قبل از وقوع بحران، پاسخ‌دهی بلافاصله بعد از وقوع و همچنین حمایت جامعه بعد از آن بحران می‌باشد. وقوع این بلای طبیعی و بحران ایجاد شده ناشی از آن، نشان‌دهنده اهمیت برنامه‌ریزی دقیق برای مقابله با پیامدهای ناشی از آن است و چنانچه این مسأله مورد توجه قرار نگیرد، فاجعه دیگری در دل فاجعه اصلی رخ می‌دهد. مدیریت بحران یک فرایند پیوسته می‌باشد که داشتن طرح‌های اضطراری جامع و ارزیابی پیوسته و بهبود آن از ضرورت بالایی برخوردار است.

زلزله نوع خاصی از بلای طبیعی است که می‌تواند فجایع عظیمی را ایجاد کند. به عنوان مثال، در ایران بزرگ‌ترین زمین‌لرزه از نظر زمان وقوع، در سال ۱۳۶۹ شمسی در منجیل رخ داد. زمین‌لرزه‌ای که در چندین استان حس و حتی در تهران هم کشته برجای گذاشت. این زمین‌لرزه ۷.۳ ریشتر قدرت داشت و یک دقیقه به طول انجامید. این زمین‌لرزه که یکی از پرقدرت‌ترین و پرتلفات‌ترین زمین‌لرزه‌های کشور بود ۳۵ هزار کشته بر جای گذاشت و حجم خرابی‌ها به‌قدری بود که بیش‌از یک ماه آواربرداری به طول انجامید. همچنین، زلزله بم که در سال ۸۲ به وقوع پیوست، با قدرت ۶.۶ ریشتر بم در شرق استان کرمان را لرزاند. این زمین‌لرزه که تنها ۱۲ ثانیه طول کشید، بزرگ‌ترین شهر خشتی کشور و جهان را به لرزه درآورد و با خاک یکسان کرد؛ بطوریکه بعد از گذشت چند ماه کار آواربرداری به پایان رسید. در زلزله بم که یکی از پرتلفات‌ترین زلزله تاریخ ایران بود ۵۰ هزار ایرانی جان خود را از دست دادند. در سطح بین‌المللی نیز می‌توان 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 می‌شود. اگرچه بیشتر زمین لرزه‌های جهانی در نزدیک مرزهای صفحات تکتونیکی رخ می‌دهند، ولی هنوز هیچ روش قابل اعتمادی برای پیش‌بینی 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 هزینه‌ها 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 بین‌المللی پیش‌بینی نظری زلزله و ژئوفیزیکی ریاضی[1] تحت نظر آکادمی علوم روسیه، عمده تلاش‌ها بر روی برآورد نظری و مدلسازی رخداد و زلزله و توسعه الگوریتم‌های موفق برای پیش‌بینی کوتاه‌مدت و میان‌مدت زلزله انجام می‌شود. همچنین برنامه‌ریزی و مدیریت بحران در زمان وقوع زلزله، جزو مهمی از فرآیند تاب‌آوری برای مدیریت آثار زلزله، افزایش ظرفیت تاب‌آوری و کاهش آسیب‌پذیری است.

به طور کلی، دو نوع از اقداماتی که در پاسخ‌گویی به وقوع زلزله مهم به نظر می‌رسند، عبارتند از: ۱- عملیات مربوط به انتقال افراد آسیب‌دیده و اقدامات لجستیکی مربوط به توزیع کالاهای امدادی، که عملیات تخلیه با هدف خارج‌سازی مصدومان از زیر آوار و انتقال آن‌ها رخ می‌دهد. ۲- اقدامات لجستیکی کالاها جهت بر آورده‌سازی نیازهای افراد آسیب‌دیده از فاجعه می‌باشد. برنامه‌ریزی 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 آسیب‌دیده[2] و تخلیه جمعیت آسیب‌دیده (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 کمک‌رسانی کوهستانی می‌باشد و معمولا زیرساخت‌های حمل و نقل (جاده‌ها، پل‌ها، و خطوط راه آهن) آسیب جدی دیده است. علاوه بر این، بازسازی سریع جاده‌های آسیب‌دیده کاری دشوار است. بنابراین نمی‌توان از وسایل حمل و نقل مرسوم مانند کامیون و قطار استفاده کرد. در عوض، بالگردها کاربردی‌ترین وسیله حمل و نقل در مناطق کوهستانی در "دوره امداد طلایی" هستند (دوره‌ای که معمولا 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 ماموریت‌های نجات در طول کمپین امدادرسانی 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

1. International Institute of Theoretical Earthquake Prediction and Mathematical Geophysics
2. Affected Areas (AA)

و مخابراتی در منطقه مشکل است. با این حال، در لجستیک امداد پس از فاجعه، یک تصمیم‌گیرنده باید با در نظر گرفتن عدم‌قطعیت‌های مختلف، همچون سطوح تقاضا در مناطق آسیب‌دیده و زمان حمل و نقل در منطقه فاجعه، هم تصمیمات تاکتیکی (مثلا مکان تسهیلات موقت[1]، 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 امدادرسانی پس از وقوع یک زلزله فاجعه‌بار در یک منطقه کوهستانی در شمال غرب ایران، یک مدل تصادفی برای لجستیک امداد پس از فاجعه پیشنهاد می‌شود تا نحوه امدادرسانی و برنامه‌ریزی جهت انتقال بالگرد و نیروهای امدادی مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به عدم‌قطعیت در زمان حمل‌ونقل، برنامه‌های حمل‌ونقل در منطقه آسیب‌دیده ایجاد می‌شود. مدل ریاضی پیشنهادی با رویکرد محدودیت اپسیلون و همچنین روش معیار جامع توسعه یافته و با استفاده از نرم‌افزار 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 سرویس‌دهی درست به مسدومان از مقدار هزینه‌ها نیز بکاهند.

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

سؤالات تحقیق:

- ✓ نحوه امدادرسانی و برنامه‌ریزی از نظر تعداد بالگرد و تعداد سفرهای مورد نیاز جهت انتقال بالگرد به مناطق آسیب‌دیده چگونه باشد؟
- ✓ نحوه امدادرسانی 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 و تحلیل حساسیت گزارش شده است. در نهایت در بخش پنجم این پژوهش، نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای کارهای آتی ارائه می‌گردد.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

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

امدادرسانی با دیگر وسایل نقلیه

در پژوهش رضایی کلج و همکاران[2] (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 جمع‌آوری‌شده 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

1. Temporary Facilities (TF)
2. Rezaei Kallaj

و همکاران[1] (۲۰۲۰)، تصمیمات عملیاتی لجستیک امداد در توزیع منابع به مناطق آسیب‌دیده را در نظر گرفته‌اند که شامل برنامه‌ریزی، مسیریابی و تصمیمات تخصیص می‌باشد. در این پژوهش، یک مدل برنامه‌نویسی اعداد صحیح مختلط چند دوره‌ای برای ارزیابی و رسیدگی به این ویژگی‌ها معرفی شده است. این مدل، با در دسترس قرار دادن اطلاعات بیشتر، امکان تنظیم برنامه‌ها را فراهم می‌کند. سه هدف کارایی، اثربخشی و برابری به طور مشترک در نظر گرفته شده است [۱۳]. پژوهش دیگری، 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 می‌کند. 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. همچنین در این مدل، آسیب‌پذیری جاده‌ها و امکانات ناهمگن ظرفیتی نیز در نظر گرفته شده است [۳].

بزرگی امیری و همکاران[2] (۲۰۱۲)، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط را برای به‌حداقل 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 [۶]. در پژوهشی دیگر، برنامه‌ریزی مکان‌یابی و تخصیص انبارها در عملیات تخلیه مورد بررسی قرار گرفته است. 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 دیگر، یک مسأله حمل‌ونقل–مکان‌یابی سه هدفه در پاسخ به فاجعه ارائه شده است. مسأله حمل‌ونقل با توزیع کمک‌ها از مراکز توزیع کمک‌های بشردوستانه به نقاط تقاضا سروکار دارد. سه هدف در نظر گرفته‌شده در این مقاله عبارتند از: ۱– کمینه ساختن زمان رسیدن کالاهای امدادی مورد نیاز به مناطق آسیب‌دیده. ۲– کمینه ساختن تعداد امدادرسان‌های مورد نیاز برای تأسیس یک مرکز توزیع. ۳– کمینه ساختن تقاضای برآورده‌نشده. برای حل مدل از روش محدودیت اپسیلون استفاده شده‌است [۲]. ویس‌مرادی و همکاران[3] (۲۰۱۸)، برای تخصیص امداد پس از زلزله، یک مدل مکان‌یابی–مسیریابی باز غیرخطی عدد صحیح مختلط در شرایط عدم‌قطعیت 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، راه‌حل ترکیبی بهینه‌سازی استوار و برنامه‌ریزی چند هدفه فازی استفاده شده و کارایی و اثر بخشی مدل و رویکرد حل در یک مطالعه موردی زمین‌لرزه در آذربایجان شرقی مورد استفاده قرارگرفته‌است [۲۶].

در مطالعه دیگری، 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 عدم‌قطعیت 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 بودند و برای مقابله با عدم‌قطعیت تقاضا، از یک رویکرد شبیه‌سازی استفاده شد. مدل پیشنهادی این دو فاز را به طور همزمان ادغام کرد. سپس تصمیمات راهبردی و عملیاتی (قبل از فاجعه و پس از فاجعه)، عادلانه بودن تخلیه مناطق، 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 شد. نتایج تجربی نشان داد که این مدل می‌تواند برای مکان‌یابی پناهگاه‌ها و مراکز توزیع امداد، تعیین مسیرهای مناسب و تخصیص منابع در شرایط وقوع بحران استفاده شود [۴]. پرانیت‌پولکرنگ و همکاران[4] (۲۰۲۱)، یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه برای تعیین محل تخصیص پناهگاه در پاسخ به تدارکات امداد بشردوستانه پیشنهاد داده و سه تابع هدف برای بهبود کارایی و اثربخشی فرموله کردند. هدف

1. Khorsi
2. Bozorgi Amiri
3. Veysmoradi
4. Praneetpholkrang

اول، به حداقل رساندن کل هزینه‌ها از جمله هزینه‌های ثابت برای احداث پناهگاه‌ها، هزینه‌های حمل‌ونقل و هزینه‌های خدمات بود. هدف دوم، به حداقل رساندن کل زمان برای تخلیه قربانیان از تمام مناطق آسیب‌دیده و انتقال به پناهگاه‌ها بود و هدف سوم، به حداقل رساندن تعداد پناهگاه‌های مورد نیاز برای ارائه خدمات کامل به قربانیان بود. برای حل مدل پیشنهادی از روش محدودیت اپسیلون و برنامه‌ریزی هدف (GP) استفاده شد. کاربرد مدل پیشنهادی از طریق مطالعه موردی سیل در تایلند تأیید شده و میزان کارایی پارتو به‌دست‌آمده از حل مدل پیشنهادی با طرح‌های محل تخصیص پناهگاه فعلی توسط بخش دولتی، مقایسه گردیده است. مقایسه‌ها نشان داد که نتایج به‌دست‌آمده از حل مدل پیشنهادی بهتر از طرح‌های مکان‌یابی–تخصیص پناهگاه قبلی است [۲۰].

در مطالعه دیگری، 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 عدم‌قطعیت 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 شده‌است. یک مطالعه موردی در استان پیچیت تایلند، در هنگام وقوع سیل، برای اعتبارسنجی مدل پیشنهادی استفاده شده است. در نهایت، نتایج که نشان‌دهنده چندین جایگزین برای تصمیم‌گیرندگان بوده است [۵]. بزرگی امیری و همکاران[1] (۲۰۱۷)، مدلی ریاضی چندهدفه برای طراحی زنجیره امداد در شرایط عدم‌قطعیت در مناطق زلزله‌زده ارائه کردند. در این مدل، پارامترهای تقاضا و زمان سفر به‌صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده است. اهداف اصلی این مدل شامل حداقل‌سازی تعداد افراد آسیب‌دیده‌ای است که به بیمارستان منتقل نشده‌اند، کاهش تعداد افراد بی‌خانمانی که از منطقه حادثه‌دیده تخلیه نشده‌اند، و همچنین حداقل‌سازی تقاضای برآورده نشده کالاهای امدادی است [۴].

در مطالعه‌ای دیگر، مدلی برنامه‌ریزی استوار دو مرحله‌ای با رویکرد ریسک‌گریز برای طراحی شبکه امداد چندمحصولی ارائه شده است. در این مدل، تصمیم‌گیری‌های مربوط به مکان‌یابی تسهیلات خدمت‌دهنده و مدیریت موجودی اقلام امدادی به‌صورت یکپارچه انجام شده است. ظرفیت تسهیلات خدمت‌دهنده، تقاضای اقلام امدادی، و ظرفیت مسیرهای ارتباطی تحت تأثیر اختلالات و عدم‌قطعیت‌های ناشی از آن قرار دارند [۱۱]. در پژوهشی دیگر، مکان‌های بهینه‌ای برای مراکز درمان موقت تعیین شده است و تخصیص بهینه سلسله‌مراتبی مصدومان، ظرفیت بهینه مراکز پذیرش، و نقاط پشتیبان این مراکز در یک مدل ریاضی مختلط عدد صحیح مشخص شده‌اند. این مدل به کاهش ازدحام مصدومان و همچنین کاهش هزینه‌ها و زمان درمان منجر می‌شود [۱۶].

در پژوهشی دیگر، با توجه به تقاضای بالای تجهیزات پزشکی در جوامع آسیب‌دیده، یک مدل ریاضی بهینه‌سازی برای طراحی یک سیستم امداد اضطراری چند دوره‌ای ارائه شده است که هدف آن حداقل‌سازی هزینه‌های کلی مورد انتظار سیستم است. این مدل مکان‌یابی، تخصیص، توزیع، و جریان تجهیزات پزشکی و افراد آسیب‌دیده را در نظر گرفته و عدم قطعیت پارامترهای مدل را مورد بررسی قرار داده است. برای مدیریت این عدم قطعیت‌ها، از رویکرد بهینه‌سازی استوار استفاده شده است. این مدل در یک مطالعه موردی در استان فارس پیاده‌سازی شده است. [۲۸]. کامیابیان و همکاران (۲۰۲۴) پژوهشی را با تمرکز بر عملیات لجستیک امدادی در هنگام وقوع بلایای طبیعی انجام دادند. در این مطالعه، بلایا براساس نوع فاجعه طبقه‌بندی شده و هر طبقه به‌طور کامل مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفته است [۱۲]. ونگ و همکاران[2] (۲۰۲۴) نیز یک مدل دوسطحی استوار چندهدفه را توسعه دادند که عدم قطعیت در زمان حمل‌ونقل، هزینه حمل‌ونقل، و تقاضا را در نظر می‌گیرد. در این مدل، تصمیم‌گیرنده سطح بالا بر مسئله تخصیص تمرکز دارد و تصمیم‌گیرنده سطح پایین بر مدیریت مسائل مربوط به حمل‌ونقل. آن‌ها عملکرد مدل پیشنهادی خود را از طریق یک مطالعه موردی درباره زلزله در کشور ایران بررسی کردند [۲۷].

1. Bozorgi Amiri
2. Wang

امدادرسانی به وسیله بالگرد

خاویر و همکاران[1] (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].

ربتا و همکاران[2] (۲۰۱۸)، به بررسی استفاده از پهپادها در توزیع آخرین مایل در تدارکات بشردوستانه پرداختند. آن‌ها یک مدل بهینه‌سازی برای تحویل بسته‌های متعدد اقلام امدادی سبک‌وزن مانند واکسن‌ها و قرص‌های تصفیه آب به مکان‌های دورافتاده در مناطق مستعد فاجعه ارائه کردند. هدف این مدل، حداقل‌سازی کل مسافت طی‌شده (یا زمان/هزینه) پهپادها است. در این راستا، محدودیت‌های مربوط به ظرفیت بار و انرژی پهپادها در نظر گرفته شده و ایستگاه‌های شارژ مجدد برای افزایش برد عملیاتی پهپادها طراحی شده است. [۲۱]. کاریک و گولد[3] (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].

در یک مطالعه و بر اساس رویکرد شبیه سازی، از روش‌های مختلفی برای برنامه‌ریزی و کنترل وسایل نقلیه در مناطق آسیب‌دیده استفاده شده است. هدف مطالعه این است که بررسی کند چگونه فناوری‌های نوظهور به ویژه وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین (پهپاد)، می‌توانند به لجستیک بشردوستانه کمک کنند [۲۵]. ریکاردو و همکاران[4] (۲۰۱۴)، تجزیه و تحلیلی از فرآیندهای لجستیک اتخاذ شده در پاسخ به بلایای طبیعی بزرگ دهه گذشته 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[5] (۲۰۱۶)، به توانایی استفاده از شبکه‌های موردی برای پشتیبانی ارتباط بین مجموعه‌ای از بالگردها می‌پردازند. در این مطالعه، یک مدل ساختار شبکه‌ای ساده شده ارائه و یک الگوریتم مسیریابی کارآمد پیشنهاد شده است [۱].

کیم و همکاران[6] (۲۰۲۲)، یک مرور ادبیات سیستماتیک برای درک روندهای پژوهش، شناسایی حوزه پیشرفت‌ها و توصیه جهت تحقیقات آینده در لجستیک امداد بشردوستانه انجام داده‌اند [۱۴]. خاویر و همکاران[7] (۲۰۱۹)، یک مدل ریاضی برای بهینه‌سازی 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 داده‌اند [۳۱]. پتی و برسفورد[8] (۲۰۰۵)، تحقیقات اخیری را ارائه می‌کنند 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].

در مطالعه‌ای دیگر، یک سیستم برنامه‌ریزی کارآمد برای هماهنگی عملیات بالگردها در زمان وقوع حوادث طبیعی 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 (۲۰۲۱)، یک مدل ریاضی رسمی برای کمک به برنامه‌ریزی حمل‌ونقل هوایی، با استفاده

1. Xavier
2. Rabta
3. Caric & Gold
4. Ricardo
5. Abdelgader
6. Kim
7. Xavier
8. Pettit & Beresford

از بالگرد، برای بلایای بزرگ مقیاس، با در نظر گرفتن سیستم‌های سپرده‌گذاری چندگانه، وسایل نقلیه چندگانه و محصولات متعدد پیشنهاد می‌کنند [۳۰].

در تحقیقی دیگر، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح دو سطحی سه هدفه فازی برای به حداقل رساندن تقاضای برآورده نشده امداد رسانی، خطرات محیطی بالقوه، هزینه‌های اضطراری و به حداکثر رساندن رضایت بازماندگان ارائه می‌شود. در فرآیند امدادرسانی 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 می دهد که روش معیار جهانی ترکیبی یک استراتژی بهینه را برای مسائل پیچیده در یک زمان محاسباتی معقول حل می‌کند [۷]. ساعتچی و همکاران[1] (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 می توانند مصدومان را پس از تحویل کالا جابه جا 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 شده است. نتایج به دست آمده از این الگوریتم ترکیبی با نتایج حاصل از NSGA-II و چند هدفه SA-VNS مقایسه و مشخص شد که الگوریتم ترکیبی پیشنهادی از دو الگوریتم فوق بهتر عمل می‌کند [۲۴].

لیو و همکاران[2] (۲۰۱۸)، یک مدل تصادفی برای لجستیک امداد پس از فاجعه پیشنهاد می‌کنند تا برنامه‌ریزی استقرار اولیه بالگرد را هدایت کند و با توجه به عدم‌قطعیت 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 عدم‌قطعیت‌ها معرفی می‌کند و همتای استوار مدل تصادفی پیشنهادی را استنتاج می‌کند و همچنین یک مثال عددی از زلزله بزرگ سیچوان چین را ارائه می‌دهد [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. همچنین محدودیت سطح خدمت را به مدل اضافه می‌کنیم. (۳) از روش محدودیت اپسیلون و معیار خالص برای حل مدل استفاده می‌کنیم. (۴) تحلیل حساسیت مدل نسبت به پارامترهای مختلف بررسی می‌شود. نتایج این تحلیل می‌تواند به تصمیم گیرندگان کمک کند تا مقادیر مربوطه را با دقت بیشتری شناسایی کنند. همچنین دسته‌بندی مطالعات موجود در زمینه امدادرسانی به وسیله بالگرد مطابق جدول ۱ می باشد.

جدول ۱. دسته‌بندی مقالات موجود در زمینه امدادرسانی به وسیله بالگرد

نویسنده	سال	تعداد اهداف		پارامترها		روش حل	نوع بالگرد		مطالعه‌موردی	
		یک‌هدفه	چندهدفه	قطعی	دارای عدم‌قطعیت		باسرنشین	بدون‌سرنشین	دارد	ندارد
کا او و همکاران	۲۰۲۱		*		*	دقیق	*		زلزله	
ساعتچی و همکاران	۲۰۲۱		*		*	NSGA-II SA	*			*
خاویر و همکاران	۲۰۲۰	*		*		دقیق	*		سیل	
خاویر و همکاران	۲۰۱۹	*		*		دقیق	*			*
ربات و همکاران	۲۰۱۸	*		*		دقیق		*		*
لیو و همکاران	۲۰۱۸	*			*	دقیقRobust-	*		زلزله	

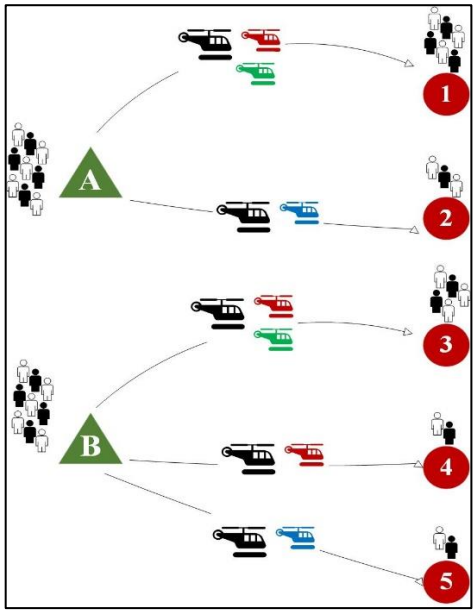
1. Saatchi
2. Liu

نویسنده	سال	تعداد اهداف		پارامترها		روش حل	نوع بالگرد		مطالعه‌موردی	
		یک‌هدفه	چندهدفه	قطعی	دارای عدم‌قطعیت		باسرنشین	بدون‌سرنشین	دارد	ندارد
عبداقادر و همکاران	۲۰۱۶		*	*		streamlined routing algorithm	*			*
ازدمیر	۲۰۱۱	*		*		دقیق	*		زلزله	
زرین پور	۲۰۲۳	*			*	دقیقRobust-	*		زلزله	
وانگ	۲۰۲۴		*		*	دقیقRobust-	*		زلزله	
این تحقیق	۲۰۲۴		*		*	دقیق- برنامه ریزی محدودیت-شانس	*		زلزله	*

۳. روش‌شناسی 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 و 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 می شود. 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 را نمایش می‌دهد.



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

$m \in M$ مجموعه انواع بالگردها

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:

$$Min\ Z_1 = \sum_{i\epsilon I}(C_i^R X_i^R + C_i^C X_i^C) + \sum_{i\epsilon I}\sum_{m\epsilon M} C_m^F Y_{im} + \sum_{i\epsilon I}\sum_{j\epsilon J}\sum_{m\epsilon M} C_m^O t_{ijm}(N_{ijm}^F + N_{ijm}^B) \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$Min\ Z_2 = \sum_{i\epsilon I}\sum_{j\epsilon J}\sum_{m\epsilon M} t_{ijm}(N_{ijm}^F + N_{ijm}^B) \quad \text{رابطه (۲)}$$

s.t

$X_i^R \le u_i^R$	$\forall\ i$	رابطه (۳)
$X_i^C \le u_i^C$	$\forall\ i$	رابطه (۴)
$\sum_{i\epsilon I} Y_{im} \le a_m$	$\forall\ m$	رابطه (۵)
$\sum_{j\epsilon J}\sum_{m\epsilon M} W_{ijm}^R \le X_i^R$	$\forall\ i$	رابطه (۶)
$\sum_{j\epsilon J}\sum_{m\epsilon M} W_{ijm}^C \le X_i^C$	$\forall\ i$	رابطه (۷)
$W_{ijm}^R \le \theta_m^R N_{ijm}^F$	$\forall$ i,m,j	رابطه (۸)
$W_{ijm}^C \le \theta_m^C N_{ijm}^B$	$\forall$ i,m,j	رابطه (۹)
$\sum_{j\epsilon J} t_{ijm}(N_{ijm}^F + N_{ijm}^B) \le \delta_m Y_{im}$	$\forall$ i,m	رابطه (۱۰)
$\sum_{j\epsilon J} N_{ijm}^F - \sum_{j\epsilon J} N_{ijm}^B \le Y_{im}$	$\forall$ i,m	رابطه (۱۱)
$\sum_{i\epsilon I}\sum_{m\epsilon M} \frac{W_{ijm}^R}{d_j^R} \ge \alpha$	$\forall$ j	رابطه (۱۲)
$\sum_{i\epsilon I}\sum_{m\epsilon M} \frac{W_{ijm}^C}{d_j^C} \ge \alpha$	$\forall$ j	رابطه (۱۳)
$X_i^R, X_i^C, W_{ijm}^R, W_{ijm}^C, N_{ijm}^F, N_{ijm}^B, Y_{im} \ge 0$ and integer		رابطه (۱۴)

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. محدودیت (۵) حداکثر تعداد هر نوع بالگرد است که می توان به همه تسهیلات موقت اختصاص داد. محدودیت‌های (۶) و (۷) به ترتیب مربوط 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. محدودیت (۱۰) تضمین می‌کند که مدت زمان پرواز هر مدل بالگرد از مدت زمان کل آن تجاوز نمی‌کند. محدودیت (۱۱) معادله جریان ورودی و خروجی هر نوع بالگردی را برای هر تسهیل موقت نشان می‌دهدY 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، محدودیت (۱۴) همه متغیرها را تعریف می‌کند.

روش برنامه‌ریزی محدودیت-شانس[1]

فرض می‌گردد که دو پارامتر برون‌زای مدل یعنی سطح تقاضا برای پرسنل امدادی و جمعیت مناطق آسیب‌دیده که d_j^R و d_j^C نشان داده می‌شوند از توزیع نرمال پیروی کنند. یعنی دارای یک میانگین نسبتا مشخص و البته انحراف استاندارد معلومی باشند. این فرض بر

1. Chance-constrained programming

اساس حوادث مشابه قبلی در هر منطقه چندان دور از ذهن نیست. از روش برنامه‌ریزی محدودیت–شانس استفاده می‌شود که یک روش مناسب و نسبتا ساده برای برنامه‌ریزی تصادفی است. در برنامه‌ریزی محدودیت–شانس احتمالی کوچک برای نقض هر محدودیت در نظر گرفته می شود و به عبارت دیگر یک سطح حفاظت برای هر محدودیت تعریف می گردد.

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.

$$\sum_{i\epsilon I}\sum_{m\epsilon M}\frac{W_{ijm}^R}{d_j^R}\geq \alpha \qquad \forall j$$
$$\sum_{i\epsilon I}\sum_{m\epsilon M}W_{ijm}^R\geq \alpha\, d_j^R \qquad \forall j$$
$$d_j^R\sim N[\mu_j^R\ ,\ \sigma_j^R]$$
$$\frac{1}{\alpha}\sum_{i\epsilon I}\sum_{m\epsilon M}W_{ijm}^R\geq \mu_j^R+\ k_\beta\,\sigma_j^R \qquad \forall j$$

رابطه (۱۵)

همچنین:

$$\sum_{i\epsilon I}\sum_{m\epsilon M}\frac{W_{ijm}^C}{d_j^C}\geq \alpha \qquad \forall j$$
$$\sum_{i\epsilon I}\sum_{m\epsilon M}W_{ijm}^C\geq \alpha\, d_j^C \qquad \forall j$$
$$d_j^C\sim N[\mu_j^C\ ,\ \sigma_j^C]$$
$$\frac{1}{\alpha}\sum_{i\epsilon I}\sum_{m\epsilon M}W_{ijm}^C\geq \mu_j^C+\ k_\beta\,\sigma_j^C \qquad \forall j$$

رابطه (۱۶)

روش محدودیت اپسیلون[1] و معیار جامع[2]

➢ روش محدودیت اپسیلون

در این پژوهش از روش محدودیت اپسیلون برای تبدیل مسئله چند هدفه به یک مدل تک‌هدفه 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] :

$$Min_{x\in X}\left\{\begin{matrix}F(x)=\\(F_1(x)\ ,F_2(x)\ ,\dots,F_k(x))\end{matrix}\right\}$$

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.

$$Min_{x\in\chi}\ F_p(x)$$
$$F_i(x)\leq\varepsilon_i \qquad \forall i\in\ \{1,2,\dots,k\}/\{p\}$$

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.

1. Epsilon-constraint
2. LP-metric

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

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

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

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

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 کاراتر شدن جواب‌ها ارائه شده است. در این مقاله برای رفع این مشکل روش محدودیت اپسیلون توسعه یافته پیشنهاد شده‌است که در این روش پیشنهادی تغییر محدودیت‌های تابع هدف به صورت محدودیت‌های مساوی با بکارگیری از مقادیرمناسب متغیرهای کمبود و مازاد ارائه شده‌است 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 تصمیم گیرنده، 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:

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

در رابطه فوق W_i نشان‌دهنده وزن یا میزان اهمیت هدف i ام می‌باشد. برای از بین بردن مشکل تفاوت مقیاس‌های اهداف، میزان انحراف جواب ایده‌آل هدف i ام بر مقدار بهینه آن تقسیم شده است. همچنین پارامتر p معرف درجه تأکید بر انحرافات است به‌گونه‌ایی که هر چه این مقدار بزرگ‌تر باشد، مدل وزن بیشتری به بزرگترین انحراف نسبی می دهد. 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:

$$\min z = \sum_{i=1}^{n} W_i \left(\frac{z_i^* - z_i}{z_i^*}\right)^p$$
$$g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \le b_i \qquad \text{j = 1,2, ..., m}$$
$$z_i = f_i(X_1, X_2, \dots, X_n)$$
$$X_i \ge 0 \qquad i = 1, 2, \dots, k$$

رابطه (۲۱) z_i: free in sign

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

۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

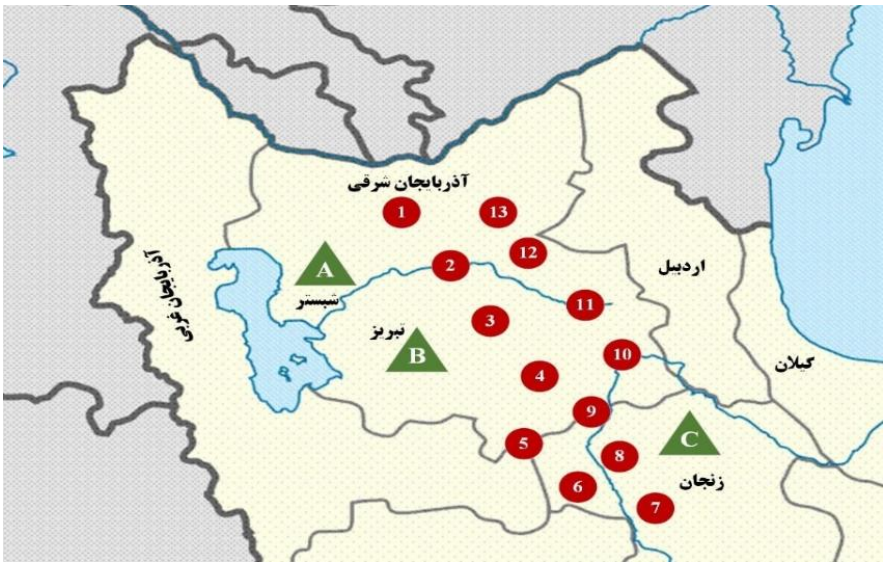
در ادامه، به تشریح مطالعه موردی و تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش می‌پردازیم.

مطالعه موردی. آذربایجان‌شرقی 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 تقریبا 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 از گسل‌های قدیمی و از ساختارهای خطی ایران است که با درازای ۱۰۰ کیلومتر از کوه‌های میشو (در غرب) تا بستان‌آباد (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 آرارات 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. پارامترهای مدل در جداول ۲ الی ۴ ارائه شده است، به نحوی که مقدار عددی تقاضای مناطق آسیب دیده در جدول ۲، پارامترهای مربوط به تسهیلات موقت در جدول ۳ و پارامترهای مربوط به بالگردها در جدول ۴ ارائه 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[1] (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

AAs	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

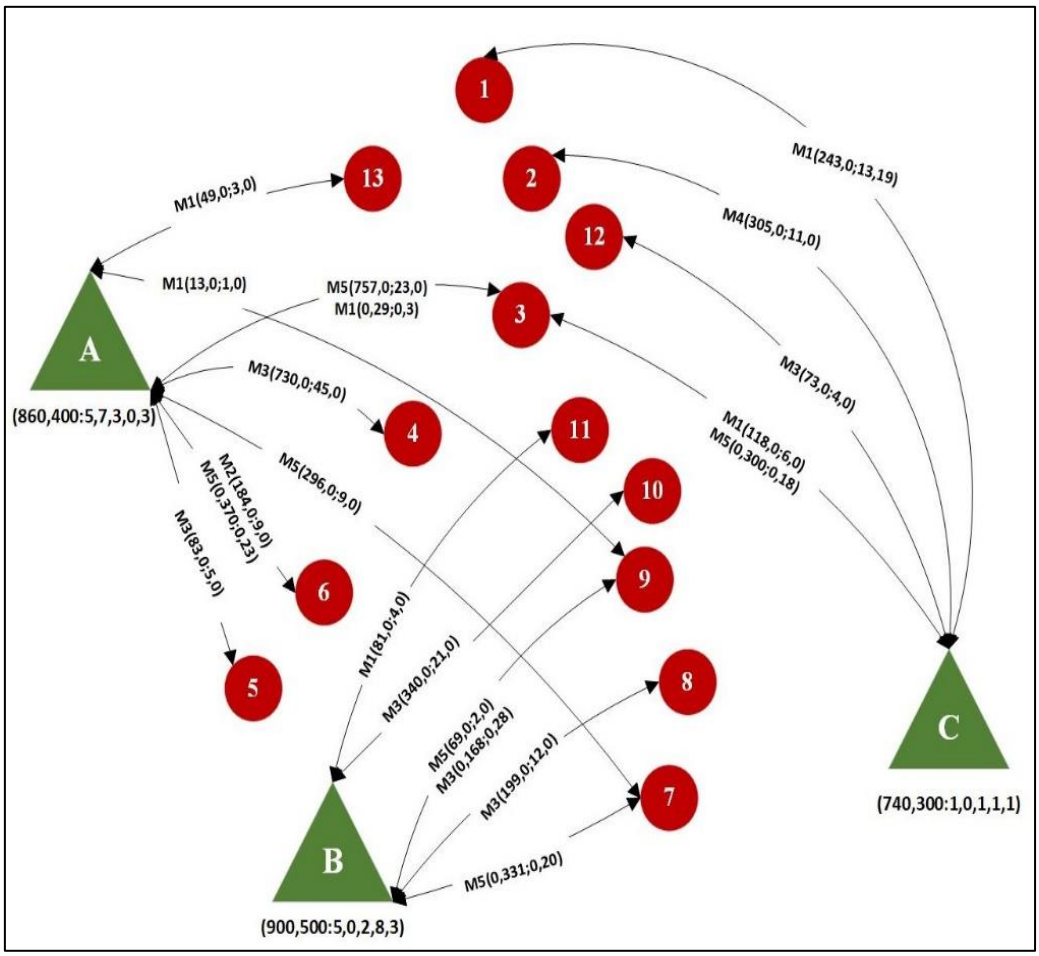
TFs	TF1	TF2	TF3
$(\text{unit})u_i^R$	۸۶۰	۷۲۰	۹۰۰
$(\text{unit})u_i^C$	۴۰۰	۳۰۰	۵۰۰
$(10^3\$/\text{ unit})c_j^R$	۱.۱۲	۱.۲۳	۱.۲۳
$(10^3\$/\text{ unit})c_j^C$	۰.۵	۰.۵۵	۰.۵۵

جدول ۴. پارامترهای مربوط به بالگردها

پارامترها	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5
a_m	۱۰	۷	۵	۸	۶
θ_m^R	۱۸	۲۰	۱۶	۲۸	۳۲
θ_m^C	۸	۱۵	۶	۹	۱۶
$(10^3\$/\text{ unit})c_m^F$	۱۲	۱۲	۱۰	۱۵	۱۵
$(10^3\$/\text{ unit})c_m^O$	۰.۵	۰.۴	۰.۴	۰.۶	۰.۵

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 نشان‌دهنده میزان پرسنل امدادی و جمعیت آسیب‌دیده منتقل شده و همچنین تعداد سفرهای رفت و برگشت بالگردها است $(W_{ijm}^R, W_{ijm}^C, N_{ijm}^F, N_{ijm}^B)$.

1. Liu



شکل ۵. نتایج حل براساس داده‌های عددی

تحلیل حساسیت

جدول ۵ و ۶ به ترتیب، نتایج حل مطالعه موردی بدست آمده با دو روش محدودیت اپسیلون و معیار جامع را نشان می‌دهد.

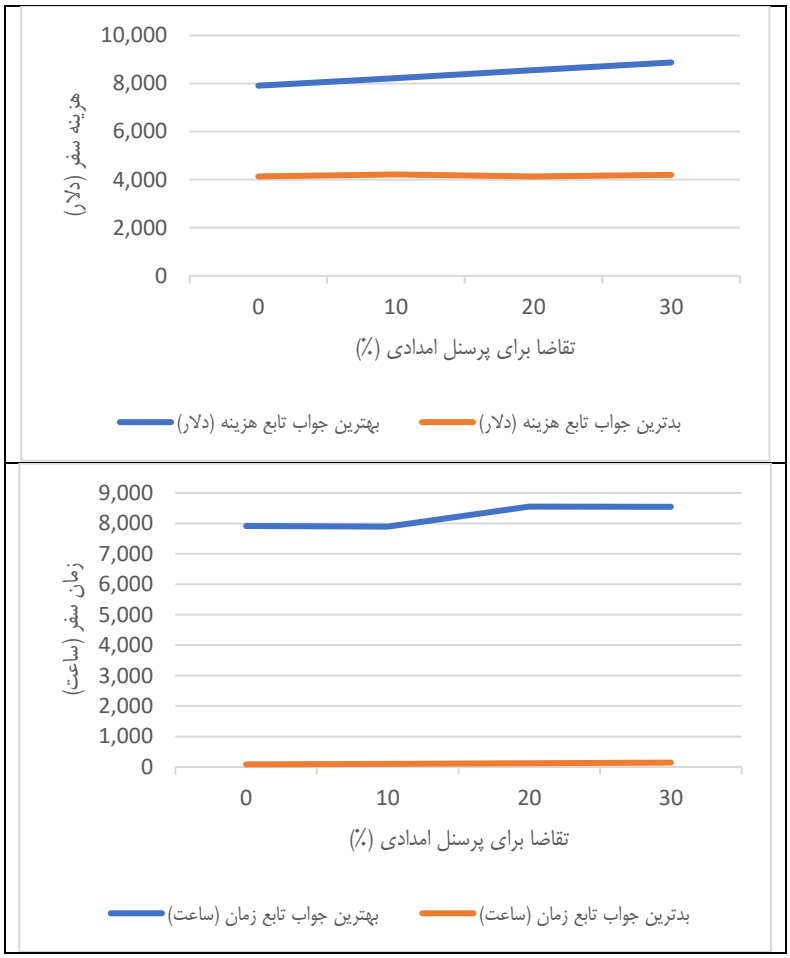
شکل ۶، مقدار هزینه و زمان مرتبط با تغییرات تقاضا برای پرسنل امدادی بر حسب درصد نسبت به مقدار فعلی نشان می‌دهد. نمودار موجود بیانگر آن است که کاهش درصد تقاضای پرسنل امدادی موجب کاهش تابع زمان و همچنین کاهش تابع هزینه می‌گردد. طبق این شکل، کاهش میزان تقاضای پرسنل امدادی تا ۳۰ درصد منجر به کاهش بهترین جواب تابع هدف تا ۷۹۰۹.۴۳۱ شده است. همچنین، شکل ۷، مقدار هزینه و زمان مرتبط با تغییرات تقاضا برای جمعیت آسیب‌دیده بر حسب درصد نسبت به مقدار فعلی نشان می‌دهد. با توجه به نمودار مشخص است که کاهش جمعیت آسیب‌دیده موجب کاهش تابع زمان و تاحدودی کاهش تابع هزینه می‌گردد.

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

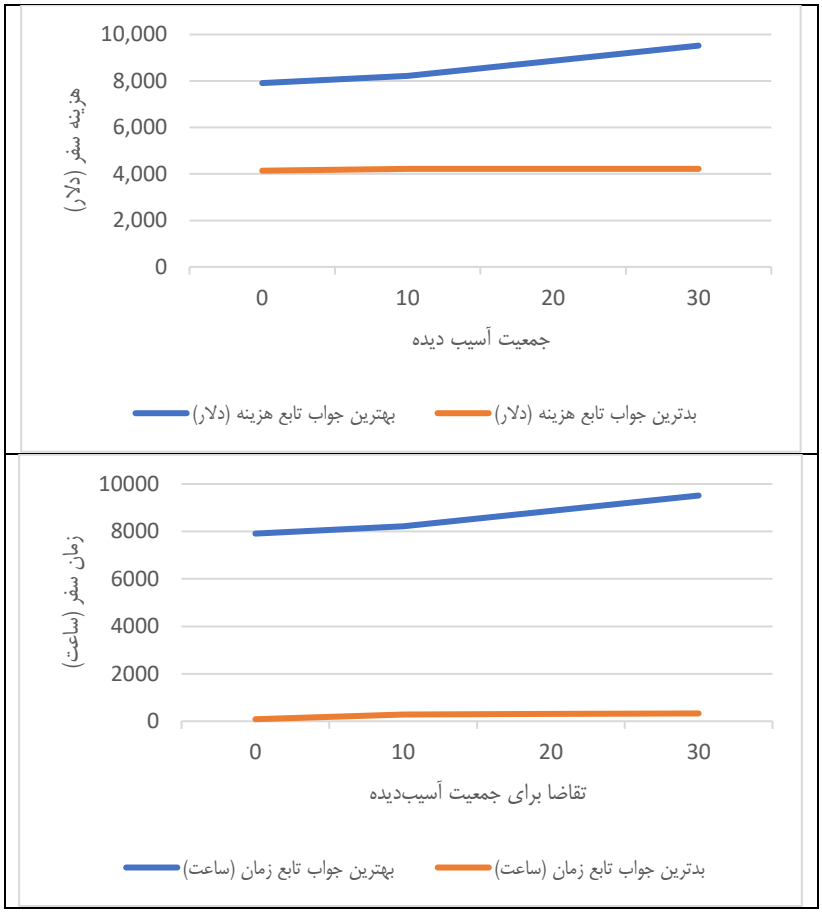
بهترین جواب تابع هزینه (دلار)	بهترین جواب تابع زمان (ساعت)
۷۹۰۹.۴۳۱	۷۹۰۹.۴۳۱
بدترین جواب تابع هزینه (دلار)	**بدترین جواب تابع زمان (ساعت)**
۴۱۴۰.۴۸۱	۸۴.۸۱۱

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

جواب تابع زمان (ساعت)	جواب تابع هزینه (دلار)
۷۵۷۶.۶۵۲	۷۹۰۹.۴۳۱



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

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 آسیب‌دیده و تقاضا برای پرسنل امدادی توام با عدم‌قطعیت و برخوردار 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 تسهیل 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 عدم‌قطعیت‌های 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 شاهدی بی‌طرف ولی متخصص بوده است و نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافعی 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 transhipment opportunities. *Socio-Economic Planning Sciences*, *57, 50–60.*
4. Bozurgi Amiri, A. Mansouri, S. Peshvaee, M. (201۷). Multi-objective relief chain network design for earthquake response under uncertainties. *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., Chaharsooghi, 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.*