

## Multi-objective Modeling for Cost Management in Optimal Allocation of Relief Supplies in Crisis Conditions

Somayeh Khoshnami<sup>1</sup>, Elmira Mashayekhi<sup>2</sup>\*

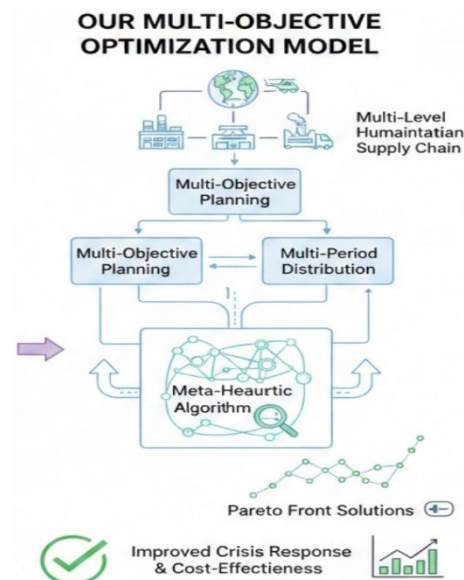
<sup>1</sup> Ph.D. Student, Department of Industrial Management, Qa. C., Islamic Azad University, Qazvin, Iran

<sup>2</sup> Assistant professor, Department of Industrial Management, Qa. C., Islamic Azad University, Qazvin, Iran

### HIGHLIGHTS

- Development of a multi-objective mathematical model under uncertainty for optimal allocation of relief resources
- Use of advanced meta-heuristic method to solve multi-level and multi-period model
- Model design with the aim of ensuring fair distribution of livelihood packages
- Model's ability to reduce costs and improve rapid response in local disasters

### GRAPHICAL ABSTRACT



### ARTICLE INFO

#### Article history:

Article Type: Research paper

Received: 11 September 2025

Revised: 13 November 2025

Accepted: 24 November 2025

Available online: 25 November 2025

\*Correspondence:

[mashayekhi\\_elmira@iaau.ac.ir](mailto:mashayekhi_elmira@iaau.ac.ir)

#### How to cite this article:

Khoshnami, S., & Mashayekhi, E. (2026). Multi-objective modeling for cost management in optimal allocation of relief supplies in crisis conditions. *System Engineering and Productivity*, 6 (2), 369-400.

#### Keywords:

Cost Management

Relief Distribution

Crisis Conditions

Epsilon Constraint

Multi-objective Modeling

### ABSTRACT

This study examines multi-objective modeling for cost management in the optimal allocation of relief goods in crisis situations, focusing on the importance of time and resources in emergencies. The main goal is to develop a mathematical model for optimization that enables more effective and efficient allocation of relief goods by incorporating uncertainty in decision-making, reducing costs, and improving crisis response. The article presents a multi-objective, multi-period mathematical programming model for fair distribution of relief items and develops a multi-objective, multi-level humanitarian supply chain for equitable distribution of livelihood packages to counter crises. Additionally, a metaheuristic method is developed to solve the model for large-scale problems, and Pareto solutions are evaluated. The research examines four dimensions of humanitarian logistics indicators: access and transportation costs, unmet demand rate per period, the distance between the demand fill rate and the ideal satisfaction rate over the entire period, and environmental risks. The model is designed for allocating essential materials (water, food, medicine, equipment, clothing, and blankets) from multiple relief centers to various affected areas to ensure fair behavior and better alignment with real conditions. Results show that increasing epsilon up to a certain value causes negligible changes in objective function values, but beyond that, it leads to significant changes; the feasible region and improvement vector for objective functions are determined for epsilon values between 50 and 900, with optimal epsilon values for the first to fourth objective functions being 500, 150, 600, and 150 and 600, respectively. The proposed model is suitable for sudden large-scale local natural disasters (not national) occurring in urban areas with a certain resident population and cannot be directly used for storms or other low-impact, dispersed disasters. Ultimately, this research helps improve relief processes, reduce associated costs, and leads to saving human lives and mitigating crisis damages.

## 1. Introduction

Crisis management and optimal allocation of relief goods in crises is one of the fundamental challenges in the field of management. In situations such as earthquakes, floods or other unexpected events, there is a need for a rapid and effective response to human needs. In this regard, optimal allocation of resources and relief goods can have a significant impact on reducing damage and improving the situation of the affected (Mamashli et al., 2021). In crisis situations, such as natural disasters or humanitarian crises, optimal allocation of relief goods to affected areas is one of the main challenges in the humanitarian supply chain (Jahangiri et al., 2023; Temiz et al., 2025).

In this research, we will look for the following points: distribution services, casualty collection services and transportation to hospitals and hospital centers, health centers and relief centers through the conditions experienced by individuals and also using the fastest transportation route, which is often used for transportation in the medical sector, to mobile relief centers by vehicle and then to the hospital by helicopter. In locating warehouses, only one point should be considered, which is the distribution of population density in different rural and urban areas, and the route before entering these areas will not be of much importance. Considering these factors, the mathematical programming model should be designed in a way that facilitates the optimization of the allocation of relief goods with the aim of reducing costs and increasing efficiency in responding to crises. This model can help humanitarian organizations to manage their resources more effectively and respond to the needs of the affected. Therefore, the most important objectives of the article are as follows:

- Reducing supply chain costs, including transportation and emergency costs of distributing goods during a crisis
- Choosing the right distribution location at the optimal time
- Reducing the risks and environmental impacts resulting from the destruction of places during a crisis

## 2. Methodology

In this study, a mathematical modeling-based framework for the distribution and allocation of relief items in crisis situations is presented. The proposed model consists of two planning levels. The main elements for distribution include relief distribution centers (RDCs), emergency demand points (EDPs), and specific affected areas (ASAs). They are established to store aid received from external suppliers such as companies. In general, RDCs are located in non-affected areas, far from the disaster site, and are under the control of decision-makers in crisis command centers.

EDPs (layer two), usually located in affected areas, receive aid from RDCs and dispatch items based on relief requests. Each EDP can be divided into three types of ASAs: search-and-rescue areas (SRAs), temporary treatment areas (TTAs), and temporary settlement areas with minor or no damage (TSA). In particular, ASAs (layer 3) represent a cluster of different types of survivors in SRA, TTA, and TSA. These survivors evaluate the post-disaster relief distribution strategies developed by decision-making agents. Different types of ASAs are considered as different emergency tasks. Specifically, decision-making agents with higher authority determine the amounts of aid transferred to the EDP for each period and focus on reducing the rate of unmet demand, potential environmental risks, and emergency costs in all periods at the top of the decision hierarchy. At the lower level of the decision-making hierarchy, decision-making agents with lower authority focus on reducing the suffering of survivors by optimizing the amounts of aid distributed to the ASA for all periods to support survivors.

## 3. Results and Discussion

Given that the epsilon constraint method has been introduced to solve a mathematical problem, the value of the objective functions has been calculated for different values of epsilon. The deterministic state of this model has been solved using GAMS software and CPLEX tool. In this table, different values of epsilon are defined and the objective functions have been solved with them. As is clear from the table, the values of the objective function do not show a significant change with increasing epsilon up to a certain value, but from a certain point onwards, the increase in the epsilon value shows a significant increase in the values of the objective functions. These changes in the objective functions have shown different slopes. Based on the results obtained, for testing different values of epsilon, the feasible region and the vector of improvement of the objective functions have been created.

## 4. Conclusions

In this paper, a mathematical programming model for the distribution of relief items is presented based on the design of a multi-objective, multi-period model for fair distribution. Therefore, this paper aims to achieve the objectives of providing an optimization model for the distribution of livelihood packages in critical situations to deal with the crisis. For this purpose, a multi-objective and multi-level humanitarian supply chain is developed for the fair distribution of livelihood packages to deal with the crisis. Since research on the allocation of emergency materials usually considers one to two indicators, this paper examines four dimensions of humanitarian logistics indicators, which are: access and transportation costs, unmet demand rate in each

period and the gap between the demand filling rate and the ideal demand satisfaction rate in the entire period, and environmental risks. In addition, instead of using single-affected-area-single-relief distribution networks or single-period or two-period distribution modes, this paper builds a model for allocating essential materials including water, food, medicine, equipment, and clothing and blankets from multiple relief centers to different affected areas, which is able to have a fair behavior in distributing items among the areas. Because, in this case, the planning for the affected areas is more consistent with the real situation. The model proposed in this paper is suitable for large-scale local (not national) sudden natural disasters that occur in urban areas (with a certain number of resident populations). Compared with earthquakes that are focused on, it cannot be directly applied to hurricanes or other low-impact and scattered disasters. Finally, a sensitivity analysis on the epsilon value is performed to find the local optimal solution for the objective functions. Finally, by applying the epsilon value, different values of the objective functions are evaluated to determine the non-dominated solutions. First, the solutions are determined by comparing the first and second objective functions. In this case, 15 non-dominated solutions for the problem are created. Also, the solutions are determined by comparing the first and third objective functions. In this case, 19 non-dominated solutions for the problem are created. In addition, the solutions are shown in comparison with the first and fourth objective functions. The quality of the solutions provided in the case of comparing the first and fourth objective functions is considered to be more appropriate than all cases. For further research, it is suggested that a prioritization for each of the considered items be considered using multi-criteria decision making to prioritize the items and apply it to the mathematical model. In addition, the use of data envelopment analysis models to calculate the efficiency score and rank the supply chain performance during the planning period can play a desirable role in the development of various decisions.

### Funding

This research received no external funding.

### Author contributions

**Somayeh Khoshnami:** Conceptual research model, Literature review and theoretical background, Data analysis, Statistical analysis draft, Drafting the manuscript, Preliminary review of the report, Research methodology development, Text revision; **Elmira Mashayekhi:** Drafting the manuscript, Preliminary review of the report, Research methodology development, Supervision, Text revision.

### Conflicts of interest

There are no conflicts of interest associated with this research.

### Acknowledgments

We are grateful to all colleagues who provided insights and expertise that greatly assisted this research. We also thank the anonymous reviewers for their valuable suggestions to improve the paper.

### References

- Jahangiri, S., Abolghasemian, M., Ghasemi, P., & Chobar, A. P. (2023). Simulation-based optimisation: analysis of the emergency department resources under COVID-19 conditions. *International journal of industrial and systems engineering*, 43(1), 1-19. <https://doi.org/10.1504/IJISE.2023.128399>
- Mamashli, Z., Bozorgi-Amiri, A., Dadashpour, I., Nayeri, S., & Heydari, J. (2021). A heuristic-based multi-choice goal programming for the stochastic sustainable-resilient routing-allocation problem in relief logistics. *Neural Computing and Applications*, 1-27. <https://doi.org/10.1007/s00521-021-06074-8>
- Temiz, S., Kazanç, H. C., Soysal, M., & Çimen, M. (2025). A probabilistic bi-objective model for a humanitarian location-routing problem under uncertain demand and road closure. *International Transactions in Operational Research*, 32(2), 590-625. <https://doi.org/10.1111/itor.13475>

## مدل‌سازی چندهدفه برای مدیریت هزینه در تخصیص بهینه کالاهای امدادی در شرایط بحرانی

سمیه خوش‌نامی<sup>۱</sup>، المیرا مشایخی<sup>۲\*</sup> 

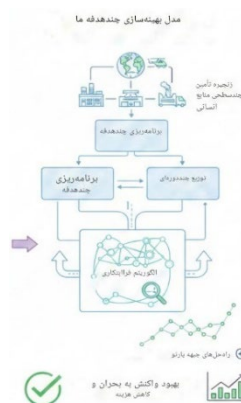
<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، گروه مدیریت صنعتی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

### برجسته‌ها

- توسعه مدل ریاضی چندهدفه تحت عدم قطعیت برای تخصیص بهینه منابع امدادی
- استفاده از روش فراابتکاری پیشرفته برای حل مدل چندسطحی و چنددوره‌ای
- طراحی مدل با هدف تضمین توزیع منصفانه بسته‌های معیشتی
- توانایی مدل در کاهش هزینه‌ها و بهبود پاسخگویی سریع در بلایای محلی

### چکیده گرافیکی



### مشخصات مقاله

#### تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۰

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۲۲

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۳

ارائه برخط: ۱۴۰۴/۰۹/۰۴

\* نویسنده مسئول:

[mashayekhi\\_elmira@iaiu.ac.ir](mailto:mashayekhi_elmira@iaiu.ac.ir)

#### کلیدواژه‌ها:

مدیریت هزینه  
توزیع امدادی  
شرایط بحرانی  
اپسیلون محدودیت  
مدل‌سازی چندهدفه

### چکیده

این تحقیق به بررسی مدل‌سازی چندهدفه برای مدیریت هزینه در تخصیص بهینه کالاهای امدادی در شرایط بحرانی می‌پردازد، با تمرکز بر اهمیت زمان و منابع در مواقع اضطراری. هدف اصلی، توسعه مدل ریاضی برای بهینه‌سازی تخصیص مؤثر کالاها با اعمال عدم قطعیت، کاهش هزینه‌ها و بهبود پاسخگویی به بحران‌هاست. مقاله یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه و چنددوره‌ای برای توزیع منصفانه اقلام امداد رسانی ارائه می‌دهد و یک زنجیره تأمین بشردوستانه چندهدفه و چندسطحی برای توزیع عادلانه بسته‌های معیشتی توسعه یافته است. علاوه بر این، روش فراابتکاری برای حل مدل در ابعاد بزرگ و ارزیابی راه‌حل‌های پارتویی انجام شده است. تحقیق چهار شاخص لجستیک بشردوستانه را بررسی می‌کند: هزینه دسترسی و حمل‌ونقل، نرخ تقاضای برآورده نشده در هر دوره، فاصله بین نرخ پر کردن تقاضا و رضایت ایده‌آل در کل دوره، و خطرات زیست‌محیطی. مدل برای تخصیص مواد ضروری (آب، غذا، دارو، تجهیزات، پوشاک و پتو) از مراکز امداد رسانی چندگانه به مناطق آسیب‌دیده مختلف طراحی شده تا رفتار منصفانه‌ای داشته باشد و با وضعیت واقعی سازگارتر باشد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش اپسیلون تا مقدار مشخصی تغییرات کمی در توابع هدف ایجاد می‌کند، اما پس از آن تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای رخ می‌دهد؛ ناحیه شدنی و بردار بهبوددهنده برای اپسیلون بین ۵۰ تا ۹۰۰ تعیین شده و مقادیر بهینه اپسیلون برای توابع هدف اول تا چهارم به ترتیب ۵۰۰، ۱۵۰، ۶۰۰، و ۱۵۰ و ۶۰۰ است. مدل برای بلایای طبیعی ناگهانی محلی در مقیاس بزرگ در مناطق شهری مناسب است و مستقیماً برای طوفان‌ها یا بلایای پراکنده قابل استفاده نیست. در نهایت، این تحقیق به بهبود فرآیندهای امداد رسانی، کاهش هزینه‌ها و نجات جان انسان‌ها کمک می‌کند.

## ۱- مقدمه

مدیریت بحران و تخصیص بهینه کالاهای امدادی در شرایط بحرانی، یکی از چالش‌های اساسی در حوزه مدیریت است. در مواقعی نظیر زلزله، سیل یا سایر حوادث غیرمترقبه، نیاز به پاسخ سریع و مؤثر به نیازهای انسانی احساس می‌شود. در این راستا، تخصیص بهینه منابع و کالاهای امدادی می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی در کاهش آسیب‌ها و بهبود وضعیت آسیب‌دیدگان داشته باشد (Kashanian Monfared et al., 2025). در شرایط بحرانی، مانند بلایای طبیعی یا بحران‌های انسانی، تخصیص بهینه کالاهای امدادی به مناطق آسیب‌دیده یکی از چالش‌های اصلی در زنجیره‌تأمین بشردوستانه است (Jahangiri et al., 2023). آمارهای اخیر نشان می‌دهد که بلایای طبیعی بیشتر اتفاق می‌افتد و منجر به خسارات اجتماعی قابل‌توجهی می‌شود. در سال ۲۰۱۶، بلایای طبیعی بیش از ۴۱۱ میلیون نفر را تحت تأثیر قرار داد و باعث مرگ بیش از ۷۶۲۸ نفر در ۱۰۲ کشور شد. خسارت اقتصادی به‌تنهایی ۹۷ میلیارد دلار برآورد شده است. از سال ۲۰۰۵، هر ساله بیش از ۳۰۰ فاجعه به سیاره ما رخ می‌دهد که حدود ۷۵۰۰۰ نفر را می‌کشد و بیش از ۱۷۰ میلیون نفر دیگر را تحت تأثیر قرار می‌دهد. با افزایش نرخ بلایا، اهمیت واکنش اضطراری افزایش می‌یابد (Narimani et al., 2023؛ Ozbay et al., 2023). برخی از سازمان‌های امدادی اخیراً پیش‌موقعیت استراتژیک را برای بهبود ظرفیت‌های خود برای ارائه کمک‌های کافی در یک بازه زمانی نسبتاً کوتاه و با بسیج بهبودیافته اجرا کرده‌اند. هدف اساسی از ایجاد یک انبار اضطراری، پشتیبانی از عملیات نجات جان در چند روز اول پس از وقوع یک فاجعه ناگهانی از طریق تحویل فوری اقلام امدادی ضروری است. سرعت تحویل در زنجیره امداد زمانی مهم است که فشار زمان اغلب صرفاً مسئله پول نیست، بلکه تفاوت بین زندگی و مرگ است. بسیاری از سازمان‌های امدادی اخیراً یک مدل استراتژیک از پیش تعیین‌شده برای انجام کارهای گسترده برای تقویت آمادگی و ظرفیت لجستیکی خود ایجاد کرده‌اند (Temiz et al., 2025).

هنگامی که یک فاجعه رخ می‌دهد، سازمان‌های بشردوستانه می‌توانند منابع امدادی را از سه منبع اصلی تهیه کنند: تأمین‌کنندگان محلی، تأمین‌کنندگان جهانی،

و مراکز توزیع (ذخایر از پیش تعیین‌شده). در زمان وقوع فاجعه، تدارکات ابتدا سعی می‌کنند از منابع محلی تدارکات را تهیه کنند و اگر سازمان امداد دارای یک انبار متمرکز باشد، تدارکات موجود در آن انبارها را بررسی می‌کند (Ghahremani-Nahr et al., 2025). ارزیابی اولیه معمولاً در ۲۴ ساعت اول بحران برای برآورد منابع موردنیاز برای برآوردن نیازهای امدادی برای جمعیت آسیب‌دیده انجام می‌شود. درخواست اولیه برای کمک‌های نقدی و کمک‌های مالی اغلب ظرف ۳۶ ساعت پس از شروع فاجعه انجام می‌شود. هر چیزی که نمی‌تواند به‌صورت محلی یا از یک انبار متمرکز خریداری شود، از تأمین‌کنندگان جهانی از طریق یک فرآیند مناقصه رقابتی تهیه می‌شود. آژانس‌های امداد معمولاً روابط قوی با تأمین‌کنندگان اقلامی که اغلب در بلایای طبیعی موردنیاز هستند ایجاد می‌کنند و معمولاً قراردادهای خرید بلندمدت با این شرکت‌ها دارند (Peng et al., 2022). یکی از دلایل پیش‌خرید لوازم این است که می‌توان آن‌ها را با قیمت مناسب خریداری کرد. هنگامی که یک فاجعه رخ می‌دهد، تقاضا برای عرضه به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد، و تأمین‌کنندگان اغلب قیمت‌های خود را در پاسخ به آن افزایش می‌دهند. این در حالی است که مراکز توزیع بسته به عملیات راهبردی خود تا حد امکان نزدیک به اورژانس قرار دارند (Shao-hong et al., 2022). اگرچه مزایای بیشتری در بهره‌برداری از تأسیسات از پیش تعیین‌شده وجود دارد، برای اطمینان از جریان روان تدارکات امدادی، چندین چالش نیز وجود دارد که باید بر آن‌ها غلبه کرد. اولاً، برخی از مشکلات در ایجاد یک طرح پیش‌موقعیت‌یابی مؤثر شامل عدم اطمینان در مورد اینکه آیا بلایای طبیعی رخ خواهند داد یا خیر، و در صورت وقوع، در کجا و به چه اندازه است. در نتیجه، پیروی از یک سیاست پیش‌فرض می‌تواند پرهزینه باشد، و تنها تعداد انگشت‌شماری از سازمان‌های امدادی وجود دارند که می‌توانند هزینه‌های فعالیت مراکز توزیع بین‌المللی را پشتیبانی کنند (Aghajani et al., 2020؛ Mansoori et al., 2020).

با توجه به موارد ارائه‌شده باید این نکته را در نظر داشت که شرایط در هر کشور، بر اساس موقعیت جغرافیایی، سیاسی، اجتماعی ممکن است متفاوت بوده و از همه این موارد مهم‌تر امکانات و ارتباطات با دیگر سازمان‌های

زمان بحران: یکی از اهداف اساسی در این تحقیق، کاهش هزینه‌های مرتبط با زنجیره تأمین است. با بهره‌گیری از مدل چندهدفه پیشنهادی، امکان تحلیل و بهینه‌سازی هزینه‌های حمل‌ونقل و توزیع فراهم شده است.

- انتخاب مکان توزیع مناسب در زمان بهینه: انتخاب مکان‌های مناسب برای توزیع کالاهای امدادی از اهمیت ویژه‌ای در این تحقیق برخوردار است. مدل چندهدفه پیشنهادی می‌تواند به شناسایی مکان‌های بهینه برای توزیع کمک کند، به گونه‌ای که زمان و هزینه‌ها به حداقل رسیده و کالاها به سرعت به دست نیازمندان برسد.
- کاهش خطرات و تأثیرات زیست‌محیطی ناشی از تخریب اماکن در زمان وقوع بحران: با استفاده از مدل چندهدفه پیشنهادی، می‌توان به تحلیل و ارزیابی تأثیرات زیست‌محیطی ناشی از توزیع کالاها پرداخت و راهکارهایی برای کاهش این تأثیرات ارائه داد. این رویکرد به شناسایی و کاهش خطرات زیست‌محیطی ناشی از تخریب اماکن در زمان بحران کمک می‌کند و به حفظ محیط‌زیست در شرایط بحرانی می‌انجامد.

باقیمانده مقاله به صورتی که مشخص شده سازمان‌دهی شده است. در بخش دوم، یک پیشینه تحقیق برای شناسایی شکاف تحقیق، در بخش سوم، چارچوب مدلسازی تحقیق، در بخش چهارم، یافته‌های به دست آمده از مدل پیشنهادی، و در بخش پنجم یک نتیجه‌گیری کلی به همراه پیشنهادهای آتی ارائه شده است.

## ۲- تحقیقات پیشین

تعیین محل و تخصیص تسهیلات امدادی یکی از مسائل کلیدی در مدیریت بحران و زنجیره تأمین بشردوستانه است که توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است (Boonmee et al., 2017). مطالعات پیشین عمدتاً از مدل‌های بهینه‌سازی تک‌هدفه یا چندهدفه برای افزایش کارایی و اثربخشی عملیات امدادسانی استفاده

کمک‌رسان جهانی می‌باشد. مدیریت بحران در زمان وقوع بحران‌ها در موارد خاص مانند سیل رخ داده در استان‌های گلستان و خوزستان در سال ۱۳۹۷ و نیز زلزله کرمانشاه در سال ۱۳۹۷ نشان داد که در زمینه مدیریت بحران، نیاز به کمک گرفتن بیشتر از دانش و فناوری می‌باشد. در این راستا برای جلوگیری از رخداد موارد مشاهده شده، و تبعیض‌های رخ داده شده در برخی مناطق این استان‌ها، باید مراکز توزیع به صورتی علمی و به‌دوراز هرگونه عجله و شتاب‌زدگی ناشی از هیجان مدیریت انتخاب گردد. بدین منظور در این پژوهش به دنبال این نکته خواهیم بود خدمات توزیع اقلام، خدمات جمع‌آوری مصدومان و انتقال به بیمارستان‌ها و مراکز بیمارستانی، مراکز استقرار مراکز بهداشتی و امداد رسان از طریق شرایط تجربه شده برای افراد و نیز با استفاده از سریع‌ترین راه انتقال که اغلب برای انتقال در بخش پزشکی، تا مراکز امداد سیار از وسیله نقلیه و در ادامه تا بیمارستان از بالگرد استفاده می‌شود و در مکان‌یابی انبارها نیز باید تنها یک نکته را در نظر داشت که آن هم توزیع چگالی افراد در مناطق روستایی و شهری مختلف می‌باشد، و مسیر قبل از ورود به این مناطق اهمیت چندانی نخواهد داشت؛ زیرا معمولاً مسیرهای اصلی قابل استفاده برای ماشین‌های سنگین در مناطق شهری، یک یا دو مورد بیشتر نبوده و مجبور به استفاده از همین مسیرها خواهیم بود. حال مشاهده می‌شود که در نظر گرفتن این موارد در پژوهش‌های پیشین به صورت مناسبی دیده نشده است و این سؤال در ذهن ایجاد می‌شود که آیا این موارد را می‌توان با استفاده از مدلسازی ریاضی به گونه‌ای به نتیجه رساند که با هزینه کمتر، تقاضای ازدست‌رفته کمتر، خطرات زیست‌محیطی و کسب رضایت بازماندگان نتیجه بهتری را نیز به دست آورد؟ با توجه به این عوامل، مدل برنامه‌ریزی ریاضی باید به گونه‌ای طراحی شود که بهینه‌سازی تخصیص کالاهای امدادی را با هدف کاهش هزینه‌ها و افزایش کارایی در پاسخ به بحران‌ها تسهیل کند. این مدل می‌تواند به سازمان‌های بشردوستانه کمک کند تا منابع خود را به‌طور مؤثرتری مدیریت کرده و به نیازهای آسیب‌دیدگان پاسخ دهند؛ بنابراین، مهم‌ترین اهداف مقاله به شرح در نظر گرفته شده است:

- کاهش هزینه‌های زنجیره تأمین، شامل حمل‌ونقل و هزینه‌های اضطراری توزیع کالا در

نقلیه برای خون‌رسانی در شرایط زلزله را به‌صورت چندهدفه مدل‌سازی کردند. در حوزه تصمیم‌گیری و مکان‌یابی، ونگ و همکاران (Wang et al., 2021) و کائو و همکاران (Cao et al., 2021) مدل‌های برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط چندهدفه را برای کاهش هزینه و افزایش رضایت بازماندگان توسعه دادند. همچنین، شائوونگ و همکاران (Shao-Hong et al., 2022) با استفاده از الگوریتم نزدیک‌ترین همسایه معکوس، به بهبود مکان‌یابی ایستگاه‌های انتقال پرداختند و پنگ و همکاران (Peng et al., 2022) با طراحی الگوریتم ازدحام ذرات گسسته چندهدفه، بهینه‌سازی تخصیص مراکز منابع اضطراری را انجام دادند. در مطالعات جدیدتر، نریمانی و همکاران (Narimani et al., 2023) مدلی سه‌هدفه برای توزیع عادلانه اقلام امدادی در زنجیره‌تأمین چندسطحی ارائه کردند و قهرمانی‌نهر و همکاران (Ghahremani-Nahr et al. 2024) با لحاظ هزینه‌های محرومیت در چارچوب فازی-احتمالی استوار، به بهینه‌سازی تخصیص منابع پرداختند. درنهایت، تمیز و همکاران (Temiz et al., 2025) مدلی دوهدفه احتمالی برای کاهش هزینه و زمان سفر ارائه کردند و با الگوریتم خوشه‌بندی، کارایی مدل را در مسائل بزرگ‌مقیاس نشان دادند. تورچی‌ایشیک و همکاران در سال ۲۰۲۵ میلادی (Tureci-Isik et al., 2025) یک برنامه تصادفی دومرحله‌ای با در نظر گرفتن عدم‌قطعیت در اختلال شبکه را توسعه داده‌اند. برای حل آن نیز یک روش ابتکاری مبتنی بر جستجوی همسایگی متغیر را برای یافتن کارآمد راه‌حل‌های با کیفیت بالا پیشنهاد کرده‌اند. در جدول ۱، مقالات مربوطه بر اساس نوع مدل، سطح زنجیره‌تأمین، نوع تابع هدف، روش حل و نوع بلا طبقه‌بندی شده‌اند. تحقیقات پیشین مانند (Temiz et al., 2025)؛ (Wang et al., 2021) و (Cao et al., 2021) در حوزه توزیع کالاهای امدادی و مدیریت بحران عمدتاً بر روی کاهش هزینه‌های زنجیره تمرکز داشته‌اند. این رویکردها به‌طور جداگانه و بدون توجه به تعاملات پیچیده میان ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی انجام شده‌اند. به‌ویژه در شرایط بحرانی، نیاز به یک رویکرد جامع و یکپارچه که بتواند این ابعاد را هم‌زمان در نظر بگیرد، احساس می‌شود. مطالعات گذشته به‌ندرت به جنبه‌های انسانی و اخلاقی مانند عدالت در توزیع، سرعت واکنش و رضایت

کرده‌اند (Eghbal et al., 2025؛ Gholsh Sheikh et al., 2025)؛ اما اغلب بر یک جنبه خاص مانند مکان‌یابی، حمل‌ونقل یا رضایت تصمیم‌گیرندگان تمرکز داشته‌اند (Roh et al., 2018). در مرور ادبیات، مدل‌ها از نظر سطح زنجیره‌تأمین، تابع هدف، نوع تسهیلات و روش حل طبقه‌بندی شده‌اند. بسیاری از پژوهش‌ها از روش‌های کلاسیک مانند برنامه‌ریزی آرمانی یا تابع هدف وزن‌دار برای حل مسائل چندهدفه استفاده کرده‌اند (Ozbay et al., 2019؛ Kanoun et al., 2010)؛ این رویکردها به دلیل اتکا به قضاوت ذهنی تصمیم‌گیرندگان در تعیین اهمیت معیارها، در حوزه لجستیک بشردوستانه که شرایط بحرانی و عدم‌قطعیت بالاست، با محدودیت‌هایی روبه‌رو هستند. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی برای رفع این محدودیت‌ها انجام شده است (Boonmee et al., 2017). با بررسی مسائل قبل و بعد از فاجعه، چارچوبی جامع برای مکان‌یابی تسهیلات مختلف بشردوستانه ارائه دادند. ماهارجان و هاناوکا (Maharjan & Hanaoka, 2019) و آقاجانی و همکاران (Aghajani et al., 2020) مدل‌های چندهدفه تحت عدم‌قطعیت را توسعه دادند که به ترتیب از روش اپسیلون محدودیت و اپسیلون محدودیت وزن‌دار برای کاهش هزینه و افزایش پوشش تقاضا بهره بردند. ماقفیروه و همکاران (Maghfiroh et al., 2020) توزیع چندوجهی منابع را با هدف کاهش زمان و هزینه حمل‌ونقل بررسی کردند، درحالی‌که منصوری و همکاران (Mansoori et al., 2020) مدلی برای حداقل‌سازی تلفات انسانی و تقاضای برآورده نشده در شرایط نامطمئن ارائه دادند. در ادامه، صوحی و همکاران (Sabouhi et al., 2020) یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای را برای مکان‌یابی و زمان‌بندی ارائه کردند. ماماشلی و همکاران (Mamashli et al., 2021) با رویکرد سناریومحور، پایداری و تاب‌آوری را در مدل چندهدفه خود لحاظ کردند. جهانگیری و همکاران (Jahangiri et al., 2021) از روش ترکیبی بهترین-بدترین و تاپسیس برای ارزیابی عناصر زنجیره‌تأمین بشردوستانه بیمارستان‌ها استفاده کردند. رضائی کلج و همکاران (Rezaei Kallaj et al., 2021). مسئله مسیریابی وسایل

بازماندگان پرداخته‌اند. این کمبود نشان‌دهنده یک شکاف مهم در ادبیات موجود است که پژوهش حاضر سعی در پر کردن آن دارد.

جدول ۱. طبقه‌بندی مطالعات

Table 1. Classification of studies

محققان/منبع	مدل	سطوح زنجیره تأمین	تابع هدف		روش حل	نوع بلا	پارامتر عدم قطعیت
			سوددهی	غیرسوددهی			
Temiz et al., 2025	مکان‌یابی		هزینه کل	زمان کل سفر	الگوریتم خوشه‌بندی	سیل	-
Ghahremani-Nahr et al. 2024	مکان‌یابی	چندسطحی	-	تخصیص منابع تأخیر در پاسخ به بلا یا	اپسیلون محدودیت	زلزله	هزینه
Narimani et al., 2023	مکان‌یابی	دوسطحی	-	توزیع اقلام منصفانه	اپسیلون محدودیت	زلزله	تقاضا
Shao-Hong et al., 2022	مکان‌یابی	-	-	مکان‌یابی انتقال کالا	نزدیک‌ترین همسایگی	-	-
Peng et al., 2022	مکان‌یابی	-	-	مکان‌یابی اضطراری	PSO	-	-
Rezaei Kallaj et al., 2021	چندهدفه	چندگانه	-	ماکزیمم جمع‌آوری شده حداقل جمع‌آوری خون	CPLEX	زلزله	-
Wang et al., 2021	چندهدفه	چندگانه	حداقل هزینه	حداقل رساندن زمان	PSO-VNS	زلزله	هزینه زمانی
Cao et al., 2021	چندهدفه	چندگانه	هزینه‌های اضطراری	حداقل کردن تقاضای برآورده نشده حداقل کردن اثرات زیست‌محیطی	ابتکاری	زلزله	تقاضای برآورده نشده
Mansoori et al., 2020	چندهدفه	چندگانه	-	حداقل رساندن تعداد کل قربانیان حداقل رساندن تقاضاهای پوشش داده نشده	چپیشف وزن دار شده	-	زمان سفر و تقاضا
Ozbay et al., 2019	تک‌هدفه	چندگانه	-	حداقل تعداد پناهگاه	روش دقیق	زلزله	-
تحقیق (۲۰۲۵)	حاضر	چندهدفه	هزینه کل به همراه هزینه‌های حمل و نقل	تخصیص کالا کنترل آلاینده‌های زیست‌محیطی تقاضای برآورده نشده	روش دقیق و فراابتکاری	زلزله	میزان تقاضا

علاوه بر این، بسیاری از مدل‌های موجود تصمیمات مکان‌یابی را به صورت ایستا بررسی کرده‌اند و فاکتور زمان را مانند تحقیقات (Temiz et al., 2025؛ Ghahremani-Nahr et al., 2024) نادیده گرفته‌اند. در شرایط اضطراری، زمان به عنوان یک عامل حیاتی در کارآمدی تصمیم‌گیری‌ها شناخته می‌شود. این در حالی است که در بحران‌ها، تأخیر در توزیع کالاهای

علاوه بر این، بسیاری از مدل‌های موجود تصمیمات مکان‌یابی را به صورت ایستا بررسی کرده‌اند و فاکتور زمان را مانند تحقیقات (Temiz et al., 2025؛ Ghahremani-Nahr et al., 2024) نادیده گرفته‌اند. در شرایط اضطراری، زمان به عنوان یک عامل حیاتی در کارآمدی تصمیم‌گیری‌ها شناخته می‌شود. این در حالی است که در بحران‌ها، تأخیر در توزیع کالاهای

خاص تحت تأثیر بحران<sup>۳</sup> (ASA) هستند. بر اساس شکل ۱، RDCها (لایه ۱) به منظور ذخیره کمک‌های دریافتی از تأمین‌کنندگان خارجی مانند شرکت‌ها ایجاد شده‌اند. به‌طور کلی، RDCهای مستقر در مناطق غیر آسیب‌دیده، از محل فاجعه دور هستند و تحت کنترل عوامل تصمیم‌گیری در مراکز فرماندهی بحران قرار دارند.

EDPها (لایه دوم) که معمولاً در مناطق آسیب‌دیده واقع شده‌اند، از RDCها کمک دریافت کرده و اقلام را بر اساس درخواست امداد ارسال می‌کنند. هر EDP می‌تواند به سه نوع ASA تقسیم شود: مناطق جستجو-نجات<sup>۴</sup> (SRA)، مناطق درمان موقت<sup>۵</sup> (TTA) و مناطق اسکان موقت با صدمات جزئی یا بدون آسیب<sup>۶</sup> (TSA). به‌ویژه، ASA تا (لایه سوم) نمایانگر خوشه‌ای از انواع مختلف بازماندگان در SRA، TTA و TSA هستند. این بازماندگان استراتژی‌های توزیع امداد پس از فاجعه را که توسط عوامل تصمیم‌گیری توسعه یافته، ارزیابی می‌کنند. انواع مختلف ASAها به‌عنوان وظایف اضطراری مختلف در نظر گرفته می‌شوند.

علاوه بر این، تعداد RDCها و مکان‌های آنها نیز مورد توجه قرار گرفته است. چنین اطلاعاتی می‌تواند در برنامه‌ریزی استراتژیک مدیریت بلایا از پیش تعیین شود. در عین حال، تعداد EDPها و ASAهای تحت کنترل مسئولین محلی و مکان آنها با استفاده از فناوری‌های پیشرفته برای تسهیل تجزیه و تحلیل شناسایی شده است. توضیحات فوق همچنین نشان می‌دهد که ذینفعان، از جمله عوامل تصمیم‌گیری و بازماندگان، دارای روابط سلسله‌مراتبی هستند. روابط سلسله‌مراتبی به ساختاری اشاره دارد که در آن افراد یا گروه‌ها بر اساس سطح اختیارات و مسئولیت‌هایشان در یک ترتیب مشخص قرار می‌گیرند. در متن ارائه شده، این روابط به‌وضوح در فرآیند تصمیم‌گیری در مدیریت بلایا و توزیع امداد پس از فاجعه مشاهده می‌شود. در این ساختار، عوامل تصمیم‌گیری با اختیارات بالاتر، مانند مدیران و مسئولین کلان، وظیفه تعیین مقادیر کمک‌های انتقال یافته به مراکز توزیع (EDP) را دارند و بر روی مسائل کلان‌تری مانند کاهش نرخ تقاضای برآورده نشده و خطرات زیست‌محیطی تمرکز

امدادی می‌تواند عواقب جدی و غیرقابل جبرانی داشته باشد. بنابراین، نیاز به مدل‌های پویاتر و چندهدفه‌تر که بتوانند تغییرات زمان را در دوره‌های مختلف در نظر بگیرند، احساس می‌شود. همچنین، بسیاری از تحقیقات پیشین بر پایداری زیرساخت‌ها فرض کرده‌اند، در حالی که واقعیت‌های بحران نشان می‌دهد که زیرساخت‌های حمل‌ونقل ممکن است به شدت آسیب ببینند. این واقعیت نیازمند مدل‌هایی است که بتوانند به‌طور مؤثر با محدودیت‌های لجستیکی و تخریب زیرساخت‌ها مواجه شوند. علاوه بر این، تمرکز بر حداقل‌سازی هزینه‌های مستقیم اقتصادی در تحقیقات گذشته، هزینه‌های غیرمستقیم ناشی از تأخیر، ناهماهنگی و خسارات انسانی را نادیده گرفته است. این نادیده‌گیری می‌تواند منجر به تصمیمات ناکارآمد و غیر مؤثر در مدیریت بحران شود. در نهایت، فقدان مطالعاتی که بتوانند به‌صورت هم‌زمان به بهینه‌سازی هزینه‌ها، افزایش سرعت واکنش، ارتقای عدالت توزیع و کاهش اثرات زیست‌محیطی بپردازند، یک شکاف مهم در ادبیات موجود به شمار می‌رود. پژوهش حاضر با هدف پر کردن این خلأ، به طراحی یک مدل ریاضی چندهدفه پرداخته است که فرآیند امداد رسانی و تخصیص کالاهای امدادی را به‌صورت یکپارچه مدیریت می‌کند. این رویکرد جامع می‌تواند به بهبود کیفیت خدمات امداد رسانی، عدالت توزیع و پایداری زیست‌محیطی کمک کند و چارچوبی کارآمد برای تصمیم‌گیری در شرایط بحرانی فراهم آورد. در مقایسه با مطالعات گذشته، این تحقیق نه تنها به ابعاد اقتصادی بلکه به ابعاد اجتماعی و زیست‌محیطی نیز توجه دارد و سعی در ایجاد یک مدل جامع و کارآمد دارد که می‌تواند به بهبود فرآیند امداد رسانی کمک کند.

### ۳- روش تحقیق

در این تحقیق، یک چارچوب مبتنی بر مدل‌سازی ریاضی برای توزیع و تخصیص اقلام امدادی در شرایط بحرانی ارائه می‌شود. مدل پیشنهادی شامل دو سطح برنامه‌ریزی است. عناصر اصلی برای توزیع شامل مراکز توزیع اقلام امدادی<sup>۱</sup> (RDC)، نقاط تقاضای اورژانسی<sup>۲</sup> (EDP) و مناطق

<sup>۳</sup> Affected Specific Areas (ASA)

<sup>۴</sup> Search Rescue Areas (SRA)

<sup>۵</sup> Temporary Treatment Areas (TTA)

<sup>۶</sup> Temporary Settlement Areas (TSA)

<sup>۱</sup> Relief Distribution Centers (RDC)

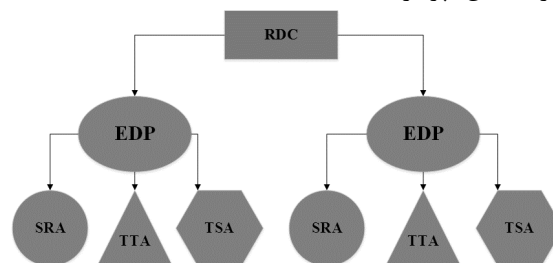
<sup>۲</sup> Emergency Demand Points (EDP)

- **فرض چهارم:** دوره‌های زمانی مختلفی برای برنامه‌ریزی در نظر گرفته شده که هرروز معادل ۲۴ ساعت فرض شده است.
- **فرض پنجم:** پنجره زمانی برای اقلام امدادی در نظر گرفته شده است.
- **فرض ششم:** امدادی رسانی کامل در ASAها و RDCها مدیریت و توزیع می‌شوند و از بلاای ثانویه بعد از وقوع بحران چشم‌پوشی می‌شود.
- **فرض هفتم:** امداد رسانی به هر EDP و ASA بر اساس تقاضای موردنیاز از طریق چند منبع انجام می‌پذیرد.
- **فرض هشتم:** مد حمل‌ونقل از طریق زمین، هوا و خطوط ریلی انجام می‌پذیرد و کمبودی در هنگام استفاده از آنها وجود ندارد.
- **فرض نهم:** ظرفیت مراکز توزیع و وسایل نقلیه محدود است و باید در مدل لحاظ شود تا از افزایش هزینه‌ها جلوگیری شود.
- **فرض دهم:** هزینه‌های حمل‌ونقل به ازای هر واحد محصول مشخص و ثابت است و به فاصله بین مراکز توزیع و نقاط تقاضا بستگی دارد.
- **فرض یازدهم:** زمان لازم برای تأمین محصولات از مراکز توزیع به نقاط تقاضا مشخص است و باید در مدل لحاظ شود تا به تأخیر در تأمین نیازها منجر نشود.
- **فرض دوازدهم:** شرایط بحران ممکن است باعث عدم قطعیت در تقاضا، هزینه‌ها و زمان تأمین شود؛ بنابراین، مدل باید به این عدم قطعیت‌ها پاسخ دهد.

نمادهای مدل ریاضی به شرح زیر هستند:

- $S$ : مجموعه دوره‌های امداد رسانی  $\{1,2,3\}$
- $I$ : مجموعه آمین مرکز توزیع اقلام امدادی  $i \in I$
- $J$ : مجموعه آمین نقطه با تقاضای اورژانسی  $j \in J$
- $K$ : مجموعه آمین منطقه خاص که تحت تأثیر بحران قرار گرفته است  $k \in K$
- $M$ : مجموعه آمین مد حمل‌ونقل که از طریق زمین، هوا و خطوط ریلی است پس  $m \in \{1,2,3\}$

می‌کنند. در عوض، در سطح پایین‌تر سلسله‌مراتب، عوامل تصمیم‌گیری با اختیارات کمتر، مانند کارمندان محلی یا داوطلبان، بر روی بهینه‌سازی مقادیر کمک‌های توزیع شده به بازماندگان (ASA) تمرکز دارند تا به کاهش درد و رنج آنها کمک کنند. این روابط سلسله‌مراتبی به‌وضوح نشان‌دهنده تقسیم وظایف و مسئولیت‌ها در فرآیند تصمیم‌گیری است و به بهبود کارایی و اثرگذاری در مدیریت بلاای و توزیع امداد کمک می‌کند. به‌طور خاص، عوامل تصمیم‌گیری با اختیارات بالاتر، مقادیر کمک‌های انتقال‌یافته به EDP را برای هر دوره تعیین کرده و بر کاهش نرخ تقاضای برآورده نشده، خطرات زیست‌محیطی بالقوه و هزینه‌های اضطراری در تمامی دوره‌ها در سطح بالای سلسله‌مراتب تصمیم‌گیری تمرکز می‌کنند. در سطح پایین‌تر سلسله‌مراتب تصمیم‌گیری، عوامل تصمیم‌گیری با اختیارات کمتر بر کاهش درد و رنج بازماندگان با بهینه‌سازی مقادیر کمک‌های توزیع شده به ASA برای تمامی دوره‌ها تمرکز دارند تا به حمایت از بازماندگان بپردازند.



شکل ۱. سازوکار کلی زنجیره تأمین بشردوستانه.

Figure 1. General mechanism of the humanitarian supply chain.

### ۳-۱- مفروضات، نمادگذاری پارامترها و

#### متغیرهای مدل ریاضی

مفروضات مدل ریاضی به شرح زیر هستند:

- **فرض اول:** امداد رسانی از مراکز امدادی مختلف به مراکز آسیب‌دیده گوناگون انجام می‌پذیرد.
- **فرض دوم:** امداد رسانی با نسبت عادلانه‌ای از موارد امدادی مشابه همراه است. بدین ترتیب فرض می‌کنیم که به هر بازمانده، یک قلم کالای امدادی تعلق می‌گیرد.
- **فرض سوم:** اقلام امدادی مختلفی برای امداد رسانی وجود دارد.

- $L$ : مجموعه تمام مناطق آسیب‌دیده  $l \in L$
- $P$ : مجموعه تمام مراکز امدادرسانی  $p \in P$
- $T$ : کل دوره زمانی  $t \in T$
- $Q$ : مجموعه انواع مختلف اقلام ضروری  $q \in Q$
- پارامترهای مدل ریاضی به شرح زیر هستند:
- $s_{pqt}$ : مقدار عرضه برای مواد ضروری  $q$  در مراکز امدادی  $p$  در دوره  $t$
- $d_{lqt}$ : تقاضا برای مواد ضروری  $q$  در سایت آسیب‌دیده  $l$  در دوره  $t$
- $c_{plt}$ : هزینه دسترسی مراکز امدادی  $p$  به سایت آسیب‌دیده  $l$  در دوره  $t$
- $c_{plqt}$ : هزینه انتقال واحد اقلام ضروری تخصیص شده  $q$  از سایت امدادی  $p$  به سایت آسیب‌دیده  $l$  در دوره  $t$
- $G_p$ : ارزش مواد ضروری  $q$  تخصیص داده‌شده از مرکز امدادی  $p$
- $w$ : ضریب تخصیص منصفانه اقلام
- $\beta_1$ : ضریب وزنی تابع هدف اول
- $\beta_2$ : ضریب وزنی تابع هدف دوم.
- $\beta_3$ : ضریب وزنی تابع هدف سوم.
- $[l_q; u_q]$ : پنجره زمانی تحویل اقلام ضروری  $q$
- $t_{ijms}$ : میانگین زمان صرف شد برای تحویل هر هزار کیت امدادی با استفاده از مد  $m$  از  $RDC_i$  به  $EDP_j$  در دوره  $s$
- $t_{jkms}$ : میانگین زمان صرف شد برای تحویل هر هزار کیت امدادی با استفاده از مد  $m$  از  $EDP_j$  به  $ASA_k$  در دوره  $s$
- $A_{1ijm}$ : انتشار گاز کربن در هر ساعت صرف شده برای تحویل هر هزار کیت امدادی با استفاده از مد  $m$  از  $RDC_i$  به  $EDP_j$
- $A_{2jkm}$ : انتشار گاز کربن در هر ساعت صرف شده برای تحویل هر هزار کیت امدادی با استفاده از مد  $m$  از  $EDP_j$  به  $ASA_k$
- $a_{1ijm}$ : هزینه تحویل هر هزار کیت امدادی با استفاده از مد  $m$  از  $RDC_i$  به  $EDP_j$
- $a_{2jkm}$ : هزینه تحویل هر هزار کیت امدادی با استفاده از مد  $m$  از  $EDP_j$  به  $ASA_k$
- $Q_{is}$ : مقادیر موجودی اقلام امدادی در  $RDC_i$  در دوره  $s$
- $D_{js}$ : مقادیر انتظاری اقلام امدادی در  $EDP_j$  در دوره  $s$
- $D_{ks}$ : مقادیر انتظاری اقلام امدادی در  $ASA_k$  در دوره  $s$
- $w_{js}$ : اوزان  $EDP_j$  که بر اساس سطح آسیب بازماندگان در دوره  $s$  تعیین می‌شود
- $w_{ks}$ : اوزان  $ASA_k$  که بر اساس شدت آسیب بازماندگان در دوره  $s$  تعیین می‌شود
- $\eta_{js}$ : سطح امدادی رسانی به بازماندگان واقع در  $EDP_j$  در دوره  $s$
- $\eta_{ks}$ : سطح امدادی رسانی به بازماندگان واقع در  $ASA_k$  در دوره  $s$
- $\gamma_{\omega}$ : ضریب خطر ضایعات بلایا در هر هزار واحد بر محیط‌زیست در  $ASA_k$
- $\theta$ : ضریب خطر انتشار کربن به ازای هر کیلوگرم در محیط‌زیست
- متغیرهای مدل ریاضی به شرح زیر هستند:
- $x_{ijms}$ : مقادیر واقعی امدادرسانی ارائه‌شده با استفاده از مد حمل‌ونقل  $m$  از  $RDC_i$  به  $EDP_j$  در دوره  $s$ ، (برنامه‌ریزی سطح بالا زنجیره). این متغیر یک متغیر پیوسته مثبت است.
- $y_{jkms}$ : مقادیر واقعی امدادرسانی ارائه‌شده با استفاده از مد حمل‌ونقل  $m$  از  $EDP_j$  به  $ASA_k$  در دوره  $s$ ، (برنامه‌ریزی سطح پایین زنجیره). این متغیر یک متغیر پیوسته مثبت است.
- $d_{plqt}$ : مرکز امدادی  $p$  مقدار اقلام ضروری  $q$  را به منطقه آسیب‌دیده  $l$  در دوره  $t$  اختصاص می‌دهد.
- $u_{lqt}$ : تقاضای برآورده نشده برای اقلام ضروری  $q$  در منطقه آسیب‌دیده  $l$  در طول دوره  $t$
- $Q_{plt}$ : مقدار کل مواد تحویل داده‌شده از مرکز امدادی  $p$  به منطقه آسیب‌دیده  $l$  در دوره  $t$
- $r_{lqt}$ : نرخ رضایت تقاضا برای اقلام ضروری  $q$  در منطقه آسیب‌دیده  $l$  در طول دوره  $t$
- $\widehat{u}_{lqt}$ : نرخ رضایت ایده‌آل تقاضا برای اقلام ضروری  $q$  در منطقه آسیب‌دیده  $l$  در طول دوره  $t$

$$\sum_{p \in P} d_{plqt} \leq s_{pqt} + \sum_1^{t-1} (s_{pqt} - \sum_{q \in Q; t \in T} d_{plqt}) \quad \forall l \in L; q \in Q; t \in T \quad (9)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{l \in L} d_{plqt} = \left( \sum_{p \in P} s_{pqt} + \sum_1^{t+1} s_{pqt} \right) \cdot \sum_{q \in Q} d_{plqt} \quad \forall q \in Q \quad (10)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{l \in L} d_{plqt} = \left( \sum_{l \in L} D_{lqt} + \sum_1^{t-1} D_{lqt} \right) \cdot \sum_{p \in P} d_{plqt} \quad \forall q \in Q \quad (11)$$

$$\sum_{q \in Q} d_{plqt} \leq Q_{plt} \quad \forall p \in P; l \in L; t \in T \quad (12)$$

$$l_q \leq Q_{plt} \leq u_q \quad \forall p \in P; l \in L; q \in Q; t \in T \quad (13)$$

$$\sum_{q \in Q} d_{plqt} \leq Q_{plt} \quad \forall p \in P; l \in L; t \in T \quad (14)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{m \in M} x_{ijm} = Q_{is} \quad \forall i \in I; s \in S \quad (15)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{m \in M} x_{ijms} \geq \eta_{js} D_{js} \quad j \in J; s \in S \quad (16)$$

$$v_{plt} = \{0,1\}; d_{plqt} \geq 0; y_{jkm} \geq 0; x_{ijm} \geq 0 \quad (17)$$

معادله (۱) کل نرخ تقاضای برآورده نشده وزنی RDCها و ASAها را برای همه دوره‌ها به حداقل می‌رساند. معادله (۲) کل خطرات زیست‌محیطی بالقوه ناشی از انتشار کربن مربوط به حمل‌ونقل، زباله‌ها یا زباله‌های بلایای طبیعی را برای همه دوره‌ها به حداقل برساند. معادله (۳) هزینه‌های تخصیص و امدادسانی در طول زنجیره را کاهش می‌دهد. این هزینه شامل دو بخش است. بخش اول، کل هزینه‌های اضطراری برای همه دوره‌ها را حداقل می‌کند. بخش دوم هزینه حمل‌ونقل که از هزینه حمل ثابت و واحد تشکیل شده است را حداقل می‌نماید. معادله (۴) تابع هدف مسئله را به‌عنوان به حداکثر رساندن رضایت کل بازماندگان<sup>۱</sup> (SPS) برای همه دوره‌ها در کل سیستم تصمیم‌گیری واکنش به بلایا را توصیف می‌کند. این مفهوم

- $\tilde{u}_{lqt}$ : نرخ تقاضای برآورده نشده برای اقلام ضروری  $q$  در منطقه آسیب‌دیده  $l$  در طول دوره  $t$
- $v_{plt}$ : متغیر باینری اگر مرکز امدادی  $p$  اقلام را به منطقه آسیب‌دیده اختصاص دهد برابر با یک در غیر این صورت صفر است.

توابع هدف و محدودیت‌ها به صورت معادلات (۱) تا (۱۷) است:

$$\min \left( \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} \sum_{s \in S} w_{js} x_{ijms} / D_{js} \right) + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} \sum_{s \in S} w_{ks} y_{jkms} / D_{ks} \quad (1)$$

$$\min \left( \sum_{s \in S} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} A_{1ijm} t_{ijms} x_{ijms} \right) + \left( \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} \theta A_{2jkm} t_{jkms} y_{jkms} \right) + \left( \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} \gamma_{\omega} y_{jkms} \right) \quad (2)$$

$$\min \left( \sum_{s \in S} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} a_{1ijm} x_{ijms} \right) + \left( \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} a_{2jkm} y_{jkms} \right) + \sum_{p \in P} \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} c_{plt} \cdot v_{plt} + \sum_{p \in P} \sum_{l \in L} \sum_{q \in Q} \sum_{t \in T} c_{plqt} \cdot d_{plqt} \quad (3)$$

$$\max \left( \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} w_{ks} y_{jkms} / D_{ks} t_{jkms} \right) \quad (4)$$

$$\text{s. t} \quad \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} y_{jkms} = \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} x_{ijms} \quad (5)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{m \in M} y_{jkms} \leq D_{ks} \quad (6)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{m \in M} y_{jkms} \geq \eta_{js} D_{ks} \quad \forall k \in K; s \in S \quad (7)$$

$$\sum_{p \in P} d_{plqt} \leq D_{lqt} + \sum_1^{t-1} (D_{lqt} - \sum_{q \in Q; t \in T} d_{plqt}) \quad \forall l \in L; q \in Q; t \in T \quad (8)$$

<sup>1</sup> Survivors Perceived Satisfaction (SPS)

### ۳-۲- رویکرد عدم قطعیت مدل

تصمیمات اصلی در این حالت از مسئله، برآورد تقاضاها و تعیین زمان شروع آن‌ها است. به‌منظور مقابله با این چالش، در این تحقیق عدم قطعیت تقاضا با استفاده از رویکرد برآورد استواری در مدل لحاظ شده است. رویکرد استوار به‌جای اتکا به یک مقدار میانگین یا احتمالی، محدوده‌ای از مقادیر ممکن برای تقاضا را در نظر می‌گیرد تا مدل در برابر تغییرات و نوسانات داده‌ها حساس نباشد. در این حالت، تصمیم‌گیرنده به‌جای بهینه‌سازی برای یک سناریوی خاص، راه‌حلی پیدا می‌کند که در بدترین شرایط نیز عملکرد قابل‌قبول و باثباتی داشته باشد. به‌عبارت‌دیگر، برآورد استوار تلاش می‌کند تا بین دو هدف اصلی — بهینگی و پایداری تصمیمات — تعادل برقرار نماید. این روش به تصمیم‌گیرنده اجازه می‌دهد تا در مواجهه با داده‌های نامطمئن، از جمله تغییرات در تقاضا، تصمیماتی بگیرد که ضمن حفظ کارایی اقتصادی، ریسک کمبود منابع یا ناتوانی در پاسخ‌گویی به نیاز واقعی را به حداقل برساند.

در این تحقیق، مقدار تقاضا به‌صورت یک پارامتر نادقیق اما محدود شده در بازه‌ای مشخص در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب، مدل ریاضی قادر خواهد بود با در نظر گرفتن انحراف‌های محتمل از مقدار اسمی تقاضا، پاسخ‌هایی ارائه دهد که در برابر سناریوهای مختلف (اعم از تقاضای بیش از انتظار یا کمتر از پیش‌بینی) همچنان پایدار و قابل‌اعتماد باشند. این امر موجب می‌شود مدل پیشنهادی نه‌تنها از نظر تئوریک معتبر، بلکه از دیدگاه کاربردی نیز برای تصمیم‌گیری در شرایط واقعی بحران‌ها و بلايا قابل‌اتکا و مقاوم باشد. رویکرد اتخاذ شده بر اساس پیشنهاد رضایی کلج و همکاران در سال ۲۰۲۱ (Rezaei kallaj et al., 2021) انجام شده است؛ بنابراین، متغیر باینری  $Z_i$  و متغیر  $\gamma_{it}$  را برای هر تقاضا در نظر می‌گیریم. به ازای  $1 \leq c \leq C$  مقدار  $Z_i$  در صورتی که تقاضا برآورده شود برابر با یک و در غیر این صورت، برابر با صفر خواهد بود. به ازای  $1 \leq t \leq T$  و  $1 \leq i \leq I$  مقدار  $\gamma_{it}$  برابر یک است، اگر تقاضای مربوط به مجموعه هر یک از اقلام  $i$  در دوره  $t$  برآورده شود. در غیر این صورت مقدار آن برابر با صفر خواهد بود. از آنجایی که هر

به این معناست که در شرایط بحرانی و پس از وقوع یک فاجعه، تصمیم‌گیرندگان باید اقداماتی را اتخاذ کنند که بیشترین رضایت را برای افرادی که تحت تأثیر قرار گرفته‌اند، فراهم کند. محدودیت (۵) تعادل تقاضای کمک برای هر EDP را در هر دوره اندازه‌گیری می‌کند و نشان می‌دهد که امداد دریافتی و توزیع شده برای هر EDP در هر دوره برابر است. محدودیت‌های (۶) و (۷) به ترتیب عرضه ناکافی و اصل منصفانه بودن را برحسب هر ASA در هر دوره مشخص می‌کنند. معادله (۸) محدودیت تقاضا است که هدف آن این است که مقدار واقعی مواد تخصیص یافته به هر منطقه آسیب‌دیده در هر دوره کمتر از تقاضا در هر دوره و تقاضای برآورده نشده در دوره قبل، یعنی مجموع تقاضای جدید باشد. معادله (۹) محدودیت عرضه است که می‌تواند تضمین دهد که مقدار مواد تخصیص یافته به مراکز امدادی در هر دوره از مقدار مواد قابل تخصیص تجاوز نمی‌کند. در صورت وجود مواد تخصیص نشده باقیمانده، می‌توان آن‌ها را در دوره بعدی تخصیص داد. معادله (۱۰ و ۱۱) میزان عرضه و تقاضا از مراکز امدادی را مشخص می‌کند. معادله (۱۱) مقدار تقاضا موجود و عرضه موجود و عرضه دوره بعد از مراکز امدادی را مشخص می‌کند. معادله (۱۲) به این اشاره دارد که اگر یک مرکز امدادی تصمیم بگیرد که مواد را در یک مکان آسیب‌دیده در یک دوره معین توزیع کند، هزینه‌های حمل‌ونقل مربوطه باید پرداخت شود، یعنی محدودیت‌های ظرفیت حمل‌ونقل برقرار است. معادله (۱۳) بیشترین و کمترین مقدار کل مواد تحویل داده شده را تضمین می‌کند. محدودیت (۱۴) تضمین می‌کند که مجموع امدادهای حمل شده واقعی با موجودی برای هر RDC در هر دوره برابری می‌کند که نشان می‌دهد تمام کمک‌های موجود در هر دوره به EDPها تحویل داده می‌شود. محدودیت (۱۵) موارد عرضه تقاضای برآورده نشده را فرموله می‌کند و نشان می‌دهد که همه تقاضاها برای EDPها نمی‌توانند به طور کامل در هر دوره برآورده شوند. محدودیت (۱۶) نشان می‌دهد که همه بازماندگان واقع در هر EDP می‌توانند در هر دوره اقلام امدادی دریافت کنند و اصل منصفانه بودن را اندازه‌گیری می‌کند. محدودیت (۱۷) نوع متغیرهای مدل را مشخص می‌کند.

نشان داده شده است. معادله (۲۲) همتای استوار معادله (۲۱) است؛ بنابراین، معادله (۲۲) را به جای معادله (۲۱) در مسئله وارد می‌کنیم.  $w_{it}$  ضریب مصرف اقلام امدادی است که لازم است تهیه شود (واحد اندازه‌گیری آن درصد می‌باشد).

$$\sum_{i=1}^I w_{it} N_{it} \geq S_t, \quad 1 \leq i \leq I; 1 \leq t \leq T; i \quad (21)$$

$$= 1, \dots, I; t = 1, \dots, T$$

$$\sum_{i=1}^I w_{it} N_{it} \geq \hat{S}_t - \hat{S}_t, \quad 1 \leq i \leq I; 1 \leq t \quad (22)$$

$$\leq T; i = 1, \dots, I; t$$

$$= 1, \dots, T$$

### ۳-۳- روش حل مسئله

برای حل مدل پیشنهادی از روش اپسیلون محدودیت استفاده شده است. در روش اپسیلون محدودیت از بین توابع هدف مختلف، یکی انتخاب و سایر توابع هدف با در نظر گرفتن یک کران بالا به محدودیت تبدیل می‌شوند و مسئله به یک مدل برنامه‌ریزی خطی تک‌هدفه تبدیل می‌شود و به طریقه معمول برنامه‌ریزی خطی حل می‌شود. مزیت اصلی این روش نسبت به سایر روش‌ها بهینه‌سازی چندهدفه کاربرد آن برای فضاهای حل غیر محدب است زیرا روش‌هایی از قبیل ترکیب وزنی اهداف در فضای نامحدب کارایی خود را از دست می‌دهند. زمان محاسباتی یک الگوریتم از ویژگی‌های مهم هر الگوریتم جهت ارزیابی آن است از آنجایی که یکی از ضعف‌های اساسی الگوریتم‌های مبتنی بر جستجوی دقیق از جمله روش اپسیلون محدودیت بالا بودن زمان محاسباتی آن‌هاست، بدیهی است که به‌کارگیری الگوریتم فراابتکاری موجب کاهش شدید زمان محاسباتی خواهد شد. یکی از نسخه‌های اصلاح‌شده روش اپسیلون محدودیت، چارچوبی است که پیروز و خرم (Pirouz & Khorram, 2022) ارائه دادند و ابوالقاسمیان و همکاران (Abolghasemian et al., 2020) استفاده از آن را به دلیل داشتن دو مزیت عمده توصیه کرده‌اند. یکی از مزایای این روش کاهش فضای جستجو برای یافتن نقاط غیر غالب است. یکی دیگر از مزایای این روش زمان اجرا کمتر آن در مقایسه با روش اصلی است. طبق این روش ابتدا مسئله بهینه‌سازی تک‌هدفه برای هر هدف را حل می‌کنیم.

تقاضا فقط می‌تواند در افق برنامه‌ریزی  $H$  یک بار اتفاق بیفتد؛ بنابراین، داریم:

$$Z_i = \sum_{t=1}^T y_{it}, \quad 1 \leq i \leq I; 1 \leq t \leq T; i \quad (18)$$

$$= 1, \dots, I; t = 1, \dots, T$$

معادله (۱۸)، این اجازه را می‌دهد که متغیر  $Z_i$  مانند یک متغیر پیوسته عمل کند. چون در معادله (۱۸) متغیرهای مستقل یا صفر هستند یا یک، در صورت محاسبه حاصل جمع آن‌ها با یکدیگر، یک مقدار بزرگ‌تر یا مساوی صفر به دست می‌آید. حال اگر یک تقاضا در دوره  $k$  برآورده شود، ما می‌توانیم  $y_{ik}$  را از طریق متغیر پیوسته (۱۹) محاسبه کنیم. با جمع متغیر باینری و تعریف متغیر پیوسته جایگزین قادر خواهیم بود تا فضای جستجو را از حالت گسسته و ترکیبی به یک فضای پیوسته کاهش داد. با این کار مسئله اصطلاحاً قابل‌حل‌تر<sup>۱</sup> می‌شود و روش‌های حل پیوسته برنامه‌ریزی خطی قادر خواهند بود تا برآوردی مناسب از جواب بهینه بدهند. این کار نوعی آسایش است که معمولاً در حل مدل‌های برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح برای تسریع همگرایی بهینه‌سازی انجام می‌شود.

$$y_{ik} = \sum_{t=1}^k y_{it}, \quad 1 \leq i \leq I; 1 \leq t \leq T; i \quad (19)$$

$$= 1, \dots, I; t = 1, \dots, T$$

به‌منظور برآورد تقاضا نیاز به تهیه اقلام امدادی به کمک‌های مردمی نیز است. برای این منظور متغیر  $N_{it}$  را به‌عنوان کمک‌های امدادی در طول دوره  $t$  برای تقاضای  $i$  به شمار می‌آوریم. اگر تقاضا در طول دوره برآورده نشود، مقدار آن برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. کل مقدار تقاضا نباید از مقدار تقاضای بالقوه تجاوز کند. چون در صورت تجاوز با مازاد اقلام روبرو می‌شویم که به دلیل محدودیت ظرفیت ممکن است فضای کافی برای نگهداری وجود نداشته باشد.

$$y_{it} N_{it} \leq N_{it}^U, \quad 1 \leq i \leq I; 1 \leq t \leq T; i \quad (20)$$

$$= 1, \dots, I; t = 1, \dots, T$$

بعلاوه، عرضه (انتقال) میزان اقلام امدادی تحویل گرفته‌شده بر اساس هر یک از تقاضاهای برآورده شده در هر دوره معین از طریق کل اقلام انجام می‌شود. این محدودیت به‌صورت یک معادله غیر استوار در رابطه (۲۱)

<sup>۱</sup> Tractable

این الگوریتم قلمداد نمود. عملکرد الگوریتم NSGA-II مطابق با شبه کد زیر است.

- شروع.
- گام ۱. تولید جمعیت اولیه
- شروع حلقه تا زمانی که شرط پایان برقرار نشده است.
- گام ۲. ارزیابی میزان برازندگی تعدادی از افراد جمعیت
- گام ۳. انتخاب جفت‌هایی از برازنده‌ترین افراد برای تولیدمثل
- گام ۴. ایجاد فرزندان جدید با استفاده از عملگر ترکیب
- گام ۵. اعمال تغییرات ژنتیکی بر روی فرزندان با استفاده از عملگر جهش
- گام ۶. جایگزین کردن تعدادی از افراد کم بازده در جمعیت فعلی با فرزندان جدید
- پایان حلقه
- پایان.

در شکل ۲، فرآیند اجرایی الگوریتم فراابتکاری NSGA-II نشان داده شده است.

سپس طول گام را تعیین می‌کنیم. سپس مجموعه نقاط مناسب را تولید می‌کنیم و در نهایت بهینه‌سازی تک‌هدفه را حل کرده و مرز پارتو را تخمین می‌زنیم.

در این روش همواره به بهینه‌سازی یکی از اهداف می‌پردازیم به شرطی که بالاترین حد قابل قبول را برای سایر اهداف در غالب محدودیت‌ها تعریف کنیم. برای یک مسئله دو هدفه نمایش ریاضی طبق معادله (۲۳) را خواهیم داشت:

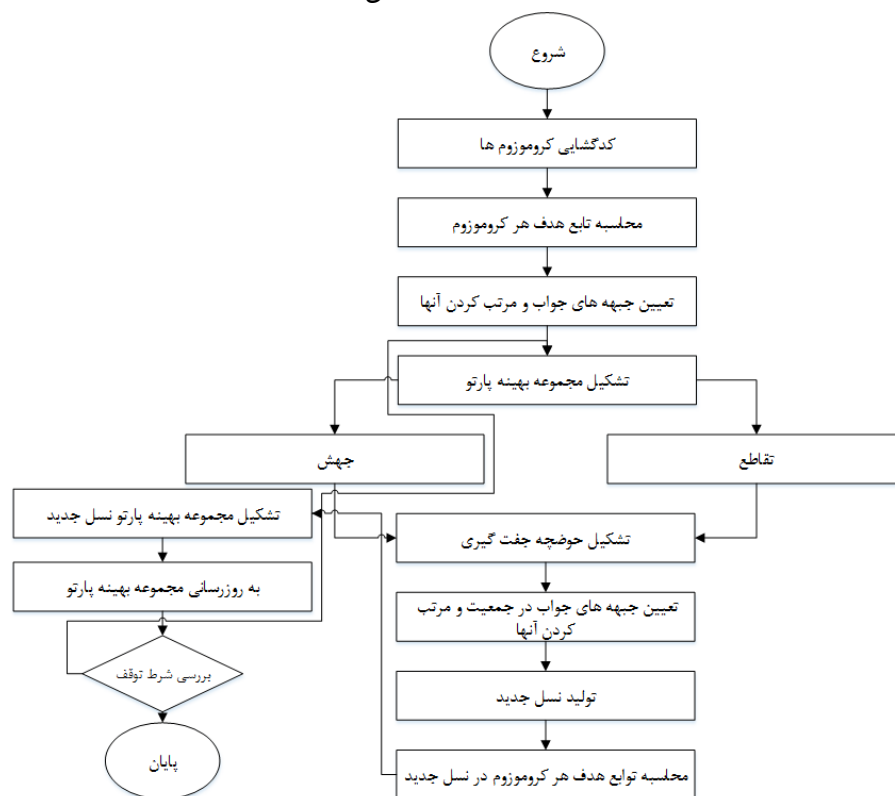
$$\min f_1(x) \quad (23)$$

s. t

$$f_2(x) \leq \varepsilon_2$$

$$x \in S$$

با تغییر مقادیر سمت راست محدودیت‌های جدید  $\varepsilon_4$ ، لبه پارتوی مسئله به دست خواهد آمد. علاوه بر روش قطعی، در این مقاله برای حل مدل از الگوریتم فراابتکاری NSGA-II استفاده شده است. از جمله نقاط مثبت این الگوریتم این است که برخلاف برخی الگوریتم‌های دیگر که فضای جواب مسئله را فقط در یک جهت جستجو می‌کنند، به‌طور هم‌زمان در چندین جهت به جستجوی جواب می‌پردازد. عدم نیاز الگوریتم ژنتیک به پیوستگی و تحذب تابع هدف را نیز می‌توان از دیگر ویژگی‌های مثبت



شکل ۲. فلوچارت الگوریتم NSGA-II.

Figure 2. Flowchart of the NSGA-II algorithm.

#### ۴- یافته‌های تحقیق

این بخش شامل دو زیربخش است. زیربخش اول به نتایج حل مدل توزیع اقلام امدادی در شرایط بحران اختصاص دارد تا نشان دهیم مدل پیشنهادی، قابلیت پیاده‌سازی در دنیای واقعی را دارد؛ بنابراین، اعتبار مدل پیشنهادی مستلزم دستیابی به نتایج معتبر از این زیربخش است. زیربخش دوم نیز به حل مسئله چندهدفه، چنددوره‌ای و چندمحصولی توزیع اقلام امدادی در یک مطالعه موردی در شهر تهران می‌پردازد. علاوه بر این، نتایج تحلیل حساسیت بر روی برخی پارامترهای هر یک از مدل‌ها به‌طور جداگانه ارائه شده است تا حساسیت تابع هدف نسبت به آن‌ها ارزیابی شود.

#### ۴-۱- نتایج کاربردی مدل توزیع اقلام امدادی برای بررسی اعتبار مدل

در این بخش، نتایج محاسباتی مدل پیشنهادی ارائه شده است. برای اجرای مدل از نرم‌افزار GAMS استفاده شده است. بر اساس جدول ۲، پنج نمونه عددی برای حل مسئله در نظر گرفته شده و پارامترهای مدل بر پایه این نمونه‌ها تنظیم شده‌اند.

با توجه به اینکه در این تحقیق، دیدگاه تصمیم‌گیری از طریق مدل‌سازی ریاضی برای زنجیره‌تأمین در نظر گرفته شده است، تمام نتایج در حالت‌های مختلف تصمیم‌گیری برای مرحله پاسخ به بحران، در جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج محاسباتی نشان می‌دهد که طرح زنجیره‌تأمین پیشنهادی می‌تواند طرح توزیع بهینه امداد پس از فاجعه را برای همه موارد، در زمانی معقول (حدود ۳۰ ثانیه) به دست آورد؛ بنابراین، اثربخشی و امکان‌سنجی مدل و روش‌ها تأیید می‌شود. ثانیاً، مقایسه نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که مدل برنامه‌ریزی پیشنهادی به‌طور قابل‌توجهی، نرخ کل تقاضای برآورده نشده (از طریق تابع  $F_1$ )، کل خطرات بالقوه زیست‌محیطی (از طریق تابع  $F_2$ ) و کل هزینه‌های اضطراری (از طریق تابع  $F_3$ ) را کاهش می‌دهد. همچنین، کل رضایت بازماندگان (از طریق تابع  $F_4$ ) بیشینه می‌شود. نتایج اجرای مدل در جدول ۳ نشان داده شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، افزایش مقدار موجودی‌ها تأثیرات مطلوبی بر دستیابی به پایداری اجتماعی در توزیع امداد دارد که این

امر از طریق افزایش میزان رضایت (از طریق تابع  $f$ ) محقق می‌شود؛ درحالی‌که این افزایش، تأثیرات نامطلوبی بر عملکرد پایداری زیست‌محیطی و اقتصادی (از طریق توابع  $F_2$ ) تحمیل می‌کند. با این وجود، با افزایش تقاضای کمک، نرخ کل تقاضای برآورده نشده، کل خطرات زیست‌محیطی بالقوه و کل هزینه‌های اضطراری به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. برای تأیید نتایج فوق، مقادیر  $X_{ijms}$  و  $Y_{jkms}$  در جدول ۴ نشان داده شده است.

#### ۴-۲- نتایج کاربردی مدل چندهدفه، چنددوره‌ای و چندمحصولی توزیع اقلام امدادی

در این بخش، نتایج محاسباتی مدل پیشنهادی ارائه شده است. برای اجرای مدل از نرم‌افزار GAMS استفاده شده است. در این تحقیق، مسئله تخصیص چهار نوع از اقلام کالای ضروری (شامل آب، غذا، دارو و تجهیزات، پوشاک و پتو) به هفت محله آسیب‌دیده در منطقه ۱ تهران بررسی شده که این محلات از طریق دو پایگاه ویژه پشتیبانی و یک پایگاه چندمنظوره متعلق به مدیریت بحران (واقع در محله‌های سوهانک و بابایی) پشتیبانی می‌شوند. این مکان‌ها بر اساس الزامات مدیریت بحران استان تهران تعیین و انتخاب شده‌اند. هزینه حمل‌ونقل و مواد قابل‌عرضه از هر یک از مراکز نجات به مناطق آسیب‌دیده، در جدول‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. همچنین، هزینه‌های ثابت و متغیر از هر مرکز امدادسانی به محله‌های آسیب‌دیده در جدول ۷ ارائه شده است. داده‌های مندرج در جدول‌های ۵ تا ۷ از اسناد و اطلاعات منتشرشده در بروشورهای سازمان مدیریت بحران استخراج شده است.

جدول ۵ هزینه حمل‌ونقل بین مراکز امدادی و مناطق آسیب‌دیده را نمایش می‌دهد. این داده‌ها مبنای محاسبه تابع هدف مدل بهینه‌سازی در بخش تخصیص منابع هستند، به‌طوری‌که هدف، حداقل‌سازی مجموع هزینه‌های جابه‌جایی اقلام امدادی است. داده‌های جدول ۵ امکان بررسی و مقایسه هزینه‌های انتقال کالاها را برای تصمیم‌گیری در زمینه تخصیص بهینه منابع و مسیرهای حمل‌ونقل در مدل‌های مکان‌یابی-مسیریابی یا تخصیص امدادی فراهم می‌کنند. جدول ۶ میزان عرضه مواد و اقلام امدادی در مراکز مختلف را نشان می‌دهد. این داده‌ها

می‌دهد. هزینه‌های ثابت شامل مخارج اولیه فعال‌سازی مسیر یا آماده‌سازی ناوگان حمل‌ونقل است، درحالی‌که هزینه‌های متغیر به مقدار کالای ارسالی وابسته‌اند. این اطلاعات به‌عنوان داده‌های ورودی مدل بهینه‌سازی برای محاسبه هزینه کل توزیع کالا در شرایط اضطراری مورد استفاده قرار می‌گیرند.

بیانگر ظرفیت موجود هر مرکز برای تأمین نیاز مناطق آسیب‌دیده است و به‌عنوان ورودی در مدل بهینه‌سازی تخصیص منابع به کار گرفته می‌شود. هدف آن است که توزیع اقلام به‌گونه‌ای انجام گیرد که ضمن برآورده کردن نیاز مناطق، از محدودیت‌های عرضه در هر مرکز تجاوز نکند. جدول ۷ هزینه‌های ثابت و متغیر ارسال کالاهای ضروری از مراکز امدادی به مناطق آسیب‌دیده را نشان

جدول ۲. تنظیم پارامترهای مدل

Table 2. Model parameter settings

شماره	$Q_{is}$	$D_{js}$	$\eta_{js}$	$\eta_{ks}$	$a_{1ijm}$	$a_{2jkm}$	$A_{1ijm}$	$A_{2jkm}$	$t_{ijms}$	$t_{jkms}$	$\gamma_k$
۱	۶۰	۱۱۰	۰/۳	۰/۳	۲	۲	۱/۵	۱/۵	۲/۵	۲/۵	۰/۴
۲	۷۰	۱۱۰	۰/۳	۰/۳	۲	۲	۱/۵	۱/۵	۲/۵	۲/۵	۰/۶
۳	۶۵	۱۱۰	۰/۳	۰/۳	۲	۲	۱/۵	۱/۵	۲/۵	۲/۵	۰/۶
۴	۶۰	۱۱۵	۰/۳	۰/۳	۲	۲	۱/۵	۱/۵	۲/۵	۲/۵	۰/۶
۵	۶۰	۸۰	۰/۳	۰/۳	۲	۲	۱/۵	۱/۵	۲/۵	۲/۵	۰/۶

جدول ۳. نتایج محاسباتی تحت حالات مختلف تصمیم‌گیری

Table 3. Computational results under different decision-making scenarios

نمونه	اهداف	دوره		
		$S_1$	$S_2$	$S_3$
اول	$F_1$	۲/۲۵	۱/۵	۰/۸۹
	$F_2$	۵۵۷	۴۸۲	۷۰۸
	$F_3$	۴۰۹	۵۶۲	۶۲۵
	$F_4$	۳/۵	۱/۸	۰/۷۸
دوم	$F_1$	۱/۳	۰/۷۹	۰/۶۳
	$F_2$	۴۷۱	۳۵۸	۶۳۲
	$F_3$	۳۹۹	۵۷۶	۶۸۷
	$F_4$	۴/۲	۲/۵۸	۰/۴۸
سوم	$F_1$	۳/۱۲	۱/۲۵	۰/۶۲
	$F_2$	۵۷۸	۳۹۵	۷۱۰
	$F_3$	۶۴۷	۵۴۲	۶۵۰
	$F_4$	۰/۴۸	۰/۶۷	۰/۷۸
چهارم	$F_1$	۰/۵۸	۰/۷۴	۰/۳۶
	$F_2$	۵۵۷	۴۸۲	۷۰۸
	$F_3$	۷۷۴	۶۹۸	۴۷۸
	$F_4$	۰/۴۴	۰/۶۵	۰/۱۴
پنجم	$F_1$	۱/۱۲	۴/۲۵	۰/۷۹
	$F_2$	۴۴۶	۵۴۸	۶۲۸
	$F_3$	۴۹۵	۲۷۸	۵۸۹
	$F_4$	۰/۷۴	۰/۶۳	۰/۴۷

## جدول ۴. مقدار بهینه متغیرهای تصمیم مدل

Table 4. Optimal value of model decision variables

$F_5$	$F_4$	$F_3$	$F_2$	$F_1$	$y_{jkm}$			$x_{ijm}$			شماره نمونه
					$m_3$	$m_2$	$m_1$	$m_3$	$m_2$	$m_3$	
۵۳۲	۰/۷۸۱	۵۸۲/۳	۰/۳۵۱	۶۰	۱۴۷۹	۱۴۷۸	۱۵۰۶	۲۴۰۶	۱۲۵۰	$m_1$	اول
۵۵۴	۰/۶۶۴	۵۹۰/۳	۱/۵۴۹	۷۰	۲۰۰۶	۱۶۳۹	۱۷۵۲	۲۶۵۰	۱۳۵۶	۱۵۰۰	دوم
۵۶۱	۰/۷۴۸	۶۱۳	۰/۴۹۳	۶۵	۲۱۴۷	۱۲۵۸	۱۸۹۶	۲۵۵۰	۱۱۵۲	۱۶۴۵	سوم
۵۳۲	۰/۸۵۶	۵۸۲/۳	۰/۳۵۱	۶۰	۲۳۱۴	۱۱۶۴	۱۶۴۷	۲۴۷۸	۱۱۸۹	۱۷۸۹	چهارم
۵۷۹	۰/۵۶۹	۵۴۰/۶۶۶	۰/۴۲۴	۶۰	۲۵۶۹	۱۴۷۹	۱۵۶۳	۲۶۱۸	۱۲۳۶	۱۶۷۸	پنجم

## جدول ۵. هزینه حمل و نقل از مراکز امدادی به مناطق آسیب دیده

Table 5. Transportation costs from relief centers to affected areas

مراکز امدادی	محل	دوره			
		اول	دوم	سوم	چهارم
پایگاه ویژه پشتیبانی مدیریت بحران	جمال آباد	۷۰۰	۷۰۰	۱۶۰	۶۰
	دارآباد	۶۰۰	۶۳۰	۱۴۰	۵۰
	امیدوار	۲۰۰	۵۶۰	۱۲۰	۸۰۰
	کامرانیه	۹۰۰	۴۹۰	۱۰۰	۷۲۰
	آقایی	۱۰۰	۴۲۰	۹۰۰	۶۴۰
	اقدسیه	۸۰۰	۳۵۰	۸۱۰	۵۶۰
	پاسداران	۳۰۰	۶۰۰	۷۲۰	۴۸۰
پایگاه چندمنظوره پشتیبانی	جمال آباد	۶۰۰	۵۴۰	۶۳۰	۴۰۰
	دارآباد	۹۰۰	۴۸۰	۵۴۰	۳۰۰
	امیدوار	۴۰۰	۴۲۰	۴۵۰	۲۷۰
	کامرانیه	۱۲۰۰	۳۶۰	۹۰	۲۴۰
	آقایی	۳۰۰	۵۴۰	۸۰	۲۱۰
	اقدسی	۷۰۰	۴۵۰	۷۰	۱۸۰
	پاسداران	۳۰۰	۹۰	۶۰	۱۵۰

## جدول ۶. نیاز عرضه مواد در مراکز امدادی (در هزار)

Table 6. Material supply needs in relief centers (in thousands)

مرکز امدادی	اقلام امدادی	دوره			
		اول	دوم	سوم	چهارم
پایگاه ویژه پشتیبانی مدیریت بحران	آب	۱/۸	۲/۴	۲/۲	۳/۳
	غذا	۳	۳/۳	۳/۴	۸
	دارو و تجهیزات پزشکی	۴/۸	۳/۴	۲/۸	۵/۸
	پوشاک و پتو	۹۵۶۳	۲۳۸۰	۳۴۴۰	۴۸۷۰
پایگاه چندمنظوره پشتیبانی	آب	۷	۲	۶/۳	۱۰/۸
	غذا	۴/۵	۴	۳/۶	۱۰/۸
	دارو و تجهیزات پزشکی	۲/۹	۳/۲	۴/۵	۷/۵
	پوشاک و پتو	۱۹۵۲	۳۰۱۰	۴۲۴۰	۶۲۶۰

جدول ۷. هزینه ثابت و متغیر ارسال کالای ضروری از مراکز امدادی به مناطق آسیب‌دیده

Table 7. Fixed and variable costs of sending essential goods from relief centers to affected areas

مرکز امدادی	نواحی منتخب منطقه ۱ تهران					
	جمال آباد	دارآباد	امیدوار	کامرانیه	آقایی	اقدسیه پاسداران
پایگاه ویژه پشتیبانی	[۶۰۰]	[۳۰۰]	[۱۰۰]	[۵۰]	[۴۰۰]	[۳۰۰]
پایگاه چندمنظوره پشتیبانی	[۴۵۰]	[۴۵۰]	[۲۰۰]	[۱۵۰]	[۳۵۰]	[۱۵۰]

جدول ۸. تخصیص اقلام از مراکز امدادی به مناطق آسیب‌دیده

Table 8. Allocation of items from relief centers to affected areas

دوره	مرکز امدادی	نواحی منتخب منطقه ۱ تهران					
		جمال آباد	دارآباد	امیدوار	کامرانیه	آقایی	اقدسیه پاسداران
اول	پایگاه ویژه پشتیبانی	۰	۱	۱	۰	۱	۱
	پایگاه چندمنظوره پشتیبانی	۱	۱	۰	۱	۱	۰
دوم	پایگاه ویژه پشتیبانی	۱	۱	۰	۱	۰	۱
	پایگاه چندمنظوره پشتیبانی	۱	۰	۱	۱	۱	۰
سوم	پایگاه ویژه پشتیبانی	۰	۰	۱	۱	۱	۰
	پایگاه چندمنظوره پشتیبانی	۱	۱	۰	۰	۰	۱
چهارم	پایگاه ویژه پشتیبانی	۰	۱	۰	۱	۱	۱
	پایگاه چندمنظوره پشتیبانی	۱	۰	۱	۰	۱	۰
پنجم	پایگاه ویژه پشتیبانی	۱	۱	۰	۱	۰	۱
	پایگاه چندمنظوره پشتیبانی	۱	۰	۱	۱	۱	۰

است و بخشی از تقاضا باید توسط پایگاه دیگر تأمین شود. در جدول ۹ مشخص شده است که از هر یک از مراکز امدادی چه اقلامی در هر دوره به مناطق ارسال می‌شود. علاوه بر این، مسئله بر اساس دو سناریو برای تحقق نوآوری توزیع منصفانه اقلام میان بازماندگان تعریف شده است. این دو سناریو حالتی را تعریف می‌کنند که اگر زلزله‌ای به قدرت ۴ تا ۵ ریشتر رخ دهد یا اگر زلزله‌ای به قدرت ۶ تا ۷ ریشتر رخ دهد، چه اقلامی میان بازماندگان در هر ناحیه توزیع شود. با این رویکرد، اطمینان حاصل می‌شود که در زمان وقوع زلزله، اقلام متناسب با شدت آن توزیع شوند. در جدول ۱۰، مقدار تخصیص هر قلم به هر ناحیه در هر سناریو نشان داده شده است. جدول ۱۰ در صورتی که اقلام امدادی در هر سناریو به ناحیه آسیب‌دیده تخصیص یابد، مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد.

با اجرای مدل، مقدار بهینه متغیر تخصیص اقلام امدادی از مراکز امدادی به مناطق آسیب‌دیده مشخص می‌شود. بر اساس آن، می‌توان دریافت که هر ناحیه از کدام مرکز امدادی اقلام ضروری را دریافت می‌کند. در جدول ۸، مقدار متغیر تخصیص اقلام امدادی  $v_{plt}$  از مرکز امدادی  $P$  به منطقه آسیب‌دیده و نتایج آن نشان داده شده است. با توجه به ادبیات موجود، چهار نوع کالای ضروری در هنگام وقوع زلزله شامل آب، غذا، دارو و تجهیزات پزشکی، پوشاک و پتو بر اساس استاندارد اتریش (Wang et al., 2021) در نظر گرفته شده است. بر اساس جدول ۸، نحوه تخصیص دریافت امداد رسانی به هر یک از نواحی از مراکز امدادی مشخص شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، همه نواحی اقلام امدادی را دریافت می‌کنند. برخی از نواحی از هر دو مرکز امدادی اقلام ضروری را دریافت می‌کنند که این امر به دلیل عدم توانایی یک پایگاه امدادی در برآورده کردن کامل تقاضا

## ۴-۳- حل فراابتکاری مدل ریاضی

در این بخش از تحقیق، ابتدا به تنظیمات مربوط به پارامترهای الگوریتم NSGA-II پرداخته شده و سپس مقایسه‌ای بین نتایج حل قطعی و فراابتکاری ارائه می‌شود. به این منظور، در ابتدا به نتایج محاسباتی حاصل از حل روش فراابتکاری NSGA-II پرداخته می‌شود. ابتدا برای حل آن، لازم است با استفاده از یک طرح آزمایش، تعدادی سناریو طراحی شود. به منظور طراحی آزمایش‌ها در الگوریتم NSGA-II، از روش تاگوچی استفاده شده است. جدول ۹. توزیع انواع اقلام امدادی به هر یک از نواحی

Table 9. Distribution of types of relief items to each region

نواحی آسیب‌دیده	اقلام امدادی	دوره			
		اول	دوم	سوم	چهارم
جمال‌آباد	آب	۲/۱	۶/۹	۶/۹	۳/۷
	غذا	۱۰	۳۴	۳۴	۲۱
	دارو و تجهیزات پزشکی	۶۹۰	۱۱۸۰	۱۹۶۰	۱۱۸۰
	پوشاک و پتو	۷۱۰	۴۱۵۰	۱۹۶۰	۱۱۸۰
دارآباد	آب	۳/۷	۲/۱	۶۹۰	۱۰
	غذا	۲۱	۱۰	۳/۷	۱۲
	دارو و تجهیزات پزشکی	۱۱۸۰	۴۱۱۰	۲۲	۳۴۷۰
	پوشاک و پتو	۱۱۸۰	۳۴۷۰	۱۱۲۰	۳۴۵۰
امیدوار	آب	۱۴/۷	۲/۱	۲/۹	۳/۷
	غذا	۷۲	۱۰	۲۰۳	۶۱
	دارو و تجهیزات پزشکی	۴۱۱۰	۳۴۵۰	۱۲/۵	۱۹۹۰
	پوشاک و پتو	۴۰۹۰	۴۱۵۰	۷۴۰	۱۹۸۰
کامرانیه	آب	۶/۹	۱۲/۵	۶۹۰	۱۰
	غذا	۳۴	۶۱	۳/۷	۱۲
	دارو و تجهیزات پزشکی	۱۹۶۰	۱۱۸۰	۲۲	۳۴۷۰
	پوشاک و پتو	۱۹۶۰	۱۱۸۰	۱۱۲۰	۳۴۵۰
آقایی	آب	۱۲/۵	۶۹۰	۱۲/۵	۶۹۰
	غذا	۶۱	۳/۷	۶۱	۳/۷
	دارو و تجهیزات پزشکی	۳۴۲۰	۴۰۹۰	۱۱۸۰	۲۲
	پوشاک و پتو	۳۴۵۰	۴۱۱۰	۱۱۸۰	۱۱۲۰
اقدسیه	آب	۲/۹	۱۲/۵	۱۴/۷	۲/۱
	غذا	۲/۳	۶۱	۷۲	۱۰
	دارو و تجهیزات پزشکی	۱۲/۵	۱۹۹۰	۴۱۱۰	۳۴۵۰
	پوشاک و پتو	۷۴۰	۱۹۸۰	۴۰۹۰	۴۱۵۰
پاسداران	آب	۶۹۰	۱۰	۶/۹	۱۲/۵
	غذا	۳/۷	۱۲	۳۴	۶۱
	دارو و تجهیزات پزشکی	۲۲	۳۴۷۰	۱۹۶۰	۱۱۸۰
	پوشاک و پتو	۱۱۲۰	۳۴۵۰	۱۹۶۰	۱۱۸۰

جدول ۱۰. توزیع انواع اقلام امدادی به هر یک از نواحی

Table 10. Distribution of types of relief items to each region

سناریو		اقلام امدادی	نواحی آسیب‌دیده
سناریو اول	سناریو دوم		
۱	۱	آب	جمال‌آباد
۱	۰	غذا	
۱	۱	دارو و تجهیزات پزشکی	
۱	۱	پوشاک و پتو	
۰	۱	آب	دارآباد
۱	۰	غذا	
۱	۰	دارو و تجهیزات پزشکی	
۱	۰	پوشاک و پتو	
۱	۱	آب	امیدوار
۱	۰	غذا	
۰	۱	دارو و تجهیزات پزشکی	
۰	۱	پوشاک و پتو	
۰	۱	آب	کامرانیه
۱	۱	غذا	
۰	۰	دارو و تجهیزات پزشکی	
۱	۰	پوشاک و پتو	
۰	۱	آب	آقایی
۱	۰	غذا	
۱	۱	دارو و تجهیزات پزشکی	
۱	۱	پوشاک و پتو	
۱	۱	آب	اقدسیه
۱	۰	غذا	
۰	۰	دارو و تجهیزات پزشکی	
۱	۱	پوشاک و پتو	
۱	۰	آب	پاسداران
۰	۱	غذا	
۰	۱	دارو و تجهیزات پزشکی	
۱	۱	پوشاک و پتو	

اجرای هر آزمایش و محاسبه مقدار شاخص MID، سطح پاسخ موردنظر با استفاده از این شاخص برآورد می‌شود. حال، با ارائه این خروجی‌ها به نرم‌افزار MINITAB، نمودار S/N به صورت شکل ۳ ارائه می‌شود. بر اساس مقدار محاسبه شده نسبت سیگنال به نویز به ازای کلیه سطوح در نظر گرفته شده برای هر یک از فاکتورها، هر چه این مقدار برای سطح موردنظر کمتر باشد، آن سطح برای فاکتور مربوطه انتخاب می‌شود.

نتایج اجرا در جدول ۱۲ ارائه شده است. در این جدول، کلیه حالات ممکن به ازای سطوح مختلفی که برای فاکتورهای الگوریتم NSGA-II در نظر گرفته شده، نشان داده شده است. برای مثال، در آزمایش اول، کلیه فاکتورها با کمترین سطح خود شرکت دارند. در آزمایش دوم، فاکتور PS با مقدار کمترین سطح و سایر فاکتورها با مقدار سطح متوسط حضور دارند. به همین ترتیب، سایر حالات ممکن بر اساس قاعده جایگشت در آمار تکمیل می‌شود. با

## جدول ۱۱. پارامترها و سطوح آن‌ها برای الگوریتم NSGA-II

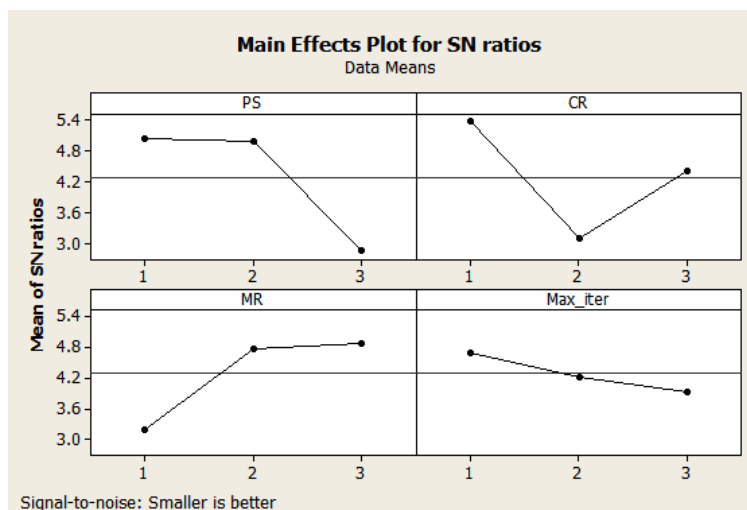
Table 11. Parameters and their levels for the NSGA-II algorithm

پارامتر	نماد	مقادیر هر سطح		
		سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
اندازه جمعیت	PS	۵۰	۱۰۰	۲۰۰
نرخ عملگر ترکیب	CR	۰/۵	۰/۷	۰/۹
نرخ عملگر جهش	MR	۰/۲	۰/۳	۰/۵
حداکثر تکرار	Max_iter	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰

## جدول ۱۲. مقادیر متغیر پاسخ در تکنیک تاگوچی برای NSGA-II

Table 10. Distribution of types of relief items to each region

شماره اجرا	پارامترهای الگوریتم				شاخص MID
	PS	CR	MR	Max_iter	
۱	۱	۱	۱	۱	۰/۵۳۴
۲	۱	۲	۲	۲	۰/۶۱۲
۳	۱	۳	۳	۳	۰/۵۳۷
۴	۲	۱	۲	۳	۰/۴۹۱
۵	۲	۲	۳	۱	۰/۵۷۶
۶	۲	۳	۱	۲	۰/۶۳۷
۷	۳	۱	۳	۲	۰/۵۹۹
۸	۳	۲	۱	۳	۰/۹۷۳
۹	۳	۳	۲	۱	۰/۶۴۲



شکل ۳. خروجی نرم‌افزار MINITAB برای روش تاگوچی در الگوریتم NSGA-II.

Figure 3. MINITAB software output for Taguchi method in NSGA-II algorithm.

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، کمترین مقدار نسبت سیگنال به نویز برای فاکتور PS زمانی رخ می‌دهد که این شاخص در سطح زیاد خود با کد ۳ قرار دارد؛ بنابراین، مقداری که برای این پارامتر در الگوریتم NSGA-II در نظر می‌گیریم، برابر با ۲۰۰ خواهد بود. همچنین، کمترین مقدار نسبت سیگنال به نویز برای

شاخص CR مربوط به سطح متوسط با کد ۲ این فاکتور است؛ بنابراین، فاکتور CR با مقدار ۰/۷ در الگوریتم حضور خواهد داشت. علاوه بر این، کمترین مقدار برای فاکتور MR مربوط به زمانی است که این فاکتور در سطح پایین خود با کد ۱ قرار دارد؛ بنابراین، این فاکتور در الگوریتم با مقدار ۰/۲ حضور خواهد داشت. سرانجام، فاکتور

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، کمترین مقدار نسبت سیگنال به نویز برای فاکتور PS زمانی رخ می‌دهد که این شاخص در سطح زیاد خود با کد ۳ قرار دارد؛ بنابراین، مقداری که برای این پارامتر در الگوریتم NSGA-II در نظر می‌گیریم، برابر با ۲۰۰ خواهد بود. همچنین، کمترین مقدار نسبت سیگنال به نویز برای

Parent	۸۱	۵۴	۴۶	۶۲	۷۱	۴۸
	۶	۶۱	۲۸	۹۵	۴۰۱	۱۰۰
	۴۷	۴۴	۵۷	۴۰۱	۴۶۱	۷۵
	۱۰۰	۳۲۱	۳۲	۶۳	۱۲۳	۹۱
Child	۸۱	۵۴	۴۶	۶۲	۷۱	۴۷
	۱۰۰	۴۰۱	۹۵	۲۸	۶۱	۶
	۴۷	۴۴	۵۷	۴۰۱	۴۶۱	۷۵
	۱۰۰	۳۲۱	۳۲	۶۳	۱۲۳	۹۱

شکل ۵. تنظیمات مربوط به عملگر جهش در الگوریتم

NSGA-II

Figure 5. Settings for the mutation operator in the NSGA-II algorithm.

علاوه بر این، در شکل‌های ۴ و ۵، تنظیمات مربوط به عملگرهای تقاطع و جهش نشان داده شده است. در شکل ۴، تقاطع نقاط در الگوریتم NSGA-II نشان داده شده است. سازوکار این عملگر به این صورت است که دو نقطه به‌طور تصادفی در کروموزوم انتخاب می‌شوند و رشته‌های هر کروموزوم جابه‌جا می‌شوند. در شکل ۵، نحوه جهش در الگوریتم NSGA-II برای این تحقیق نشان داده شده است. این عملگر بیان می‌کند که دو نقطه به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شوند و هر رشته در این ردیف معکوس می‌شود. در ادامه، به مقایسه نتایج مدل پیشنهادی با الگوریتم فراابتکاری NSGA-II پرداخته می‌شود (جدول ۱۴). کارایی الگوریتم بر اساس دو مفهوم تعیین می‌شود: اول کیفیت و دوم سرعت پاسخگویی. همچنین، اختلاف مقدار تابع هدف NSGA-II با مقدار تابع هدف ارائه‌شده در GAMS با یکدیگر مقایسه می‌شود و در سرعت، زمان حل این دو روش با هم مقایسه می‌شود. به‌منظور بررسی الگوریتم NSGA-II استفاده‌شده برای این مسئله، این الگوریتم در محیط متلب کدنویسی شده است. پس‌از آن، هفت مسئله در ابعاد مختلف به ازای تغییرات در پارامترها تولید شده است. با توجه به اینکه در مسائل کوچک و متوسط، گپ بین مدل ریاضی و مدل فراابتکاری قابل‌اغماض بوده است، با اعتماد به نتایج محاسبه‌شده طبق مدل فراابتکاری، می‌توانیم برای حل مسائل در ابعاد بزرگ، به نتایج ارائه‌شده توسط آن تکیه کنیم؛ بنابراین، با توجه به اینکه اختلاف نتایج به‌دست‌آمده بین مدل ریاضی

Max\_iter کمترین مقدار نسبت سیگنال به نویز را زمانی دارد که در سطح زیاد خود با کد ۳ قرار داشته باشد؛ بنابراین، این فاکتور در الگوریتم با مقدار ۲۰۰ حضور خواهد داشت. حال، بر اساس خروجی ارائه‌شده در نمودار فوق، بهترین مقدار هر پارامتر در جدول ۱۳ مشخص شده و سایر مثال‌ها با این مقادیر پارامترهای الگوریتم اجرا می‌شود. در جدول ۱۳، مقادیر بهینه پارامترها ارائه شده است.

جدول ۱۳. مقدار بهینه متغیرها در NSGA-II

Table 13. Optimal value of variables in NSGA-II

پارامتر	نماد	مقدار بهینه
اندازه جمعیت	PS	۲۰۰
نرخ عملگر ترکیب	CR	۰/۷
نرخ عملگر جهش	MR	۰/۲
حداکثر تکرار	Max_iter	۲۰۰

Parent 1	۳۲	۵۶	۴۵	۵۵	۱۰۰	۲۴
	۲۴	۵۸	۹۱	۱۲۶	۲۰۱	۷۵
	۴۵	۴۶	۳۱	۴۱	۴۶۱	۱۲۰
	۱۲۴	۳۱۴	۸۸	۲۰۰	۱۲۳	۸۱
Parent 2	۱۱	۶۳	۷۳	۸۲	۳۱	۹۵
	۳۷	۴۶	۸۱	۱۰۰	۵۹	۶۳
	۸۴	۶۴	۷۷	۵۰۲	۷۸	۳۹
	۴۱۲	۴۷	۹۳	۵۴	۶۷	۵۴
Child 1	۳۲	۵۶	۷۳	۸۲	۱۰۰	۲۴
	۲۴	۵۸	۸۱	۱۰۰	۲۰۱	۷۵
	۴۵	۴۶	۷۷	۵۰۲	۴۶۱	۱۲۰
	۱۲۴	۳۱۴	۹۳	۵۴	۱۲۳	۸۱
Child 2	۱۱	۶۳	۴۵	۵۵	۳۱	۹۵
	۳۷	۴۶	۹۱	۱۲۶	۵۹	۶۳
	۸۴	۶۴	۳۱	۴۱	۷۸	۳۹
	۴۱۲	۴۷	۸۸	۲۰۰	۶۷	۵۴

شکل ۴. تنظیمات مربوط به عملگر تقاطع در الگوریتم

NSGA-II

Figure 4. Settings for the crossover operator in the NSGA-II algorithm.

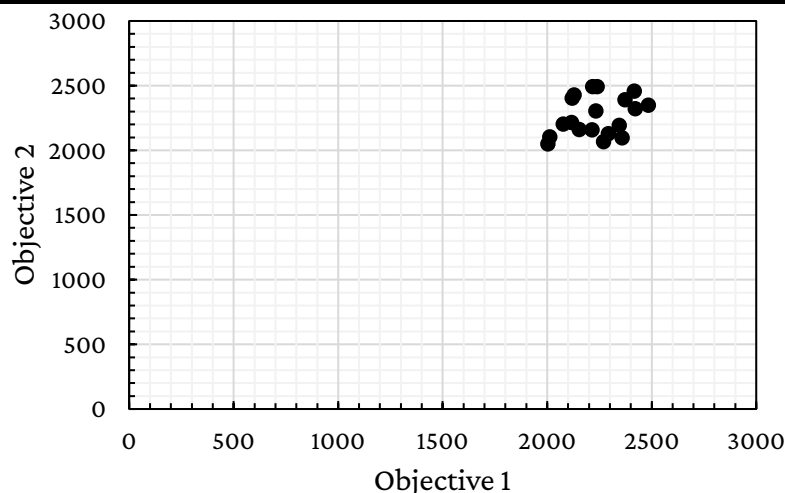
مقایسه با توابع هدف اول با پنجم، دوم با سوم، دوم با چهارم، دوم با پنجم، سوم با چهارم و سوم با پنجم نشان داده شده است. با توجه به هر یک از حالات در نظر گرفته شده، تعداد راه‌حل‌های نامغلوب برابر با ۲۴، ۲۷، ۳۵، ۲۴ و ۲۷ است که در این حالت، راه‌حل‌های به‌دست‌آمده دارای همگرایی قابل قبولی هستند. کیفیت راه‌حل‌های ارائه شده در حالت مقایسه توابع هدف اول و چهارم، مناسب‌تر از تمامی حالات در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، برای تحلیل کمی کیفیت پاسخ‌ها، از شاخص‌های میانگین فاصله جمعی معکوس و شاخص تنوع نیز استفاده شده است. شاخص IGD بیانگر میزان نزدیکی مجموعه راه‌حل‌های حاصل به مرز پارتوی واقعی است؛ بدین معنا که هرچه مقدار این شاخص کمتر باشد، الگوریتم از همگرایی بیشتری برخوردار است.

و روش فراابتکاری جزئی و قابل‌اغماض است، با توجه به ماهیت مسئله انتخابی، الگوریتم فراابتکاری ژنتیک پاسخ منطقی می‌دهد و با مدل پیشنهادی همخوانی دارد؛ بنابراین، در شکل‌های ۶ تا ۱۴، نقاط نامغلوب به‌دست‌آمده از روش NSGA-II برای مسئله چندهدفه در نظر گرفته شده نشان داده شده است. با توجه به مرز ایجاد شده، همگرایی پاسخ‌ها مشهود است. در شکل ۶، جواب‌ها در مقایسه با توابع هدف اول و دوم نشان داده شده‌اند. در این مورد، ۱۵ راه‌حل نامغلوب برای مسئله ایجاد شده است. همچنین، در شکل ۷، جواب‌ها در مقایسه با توابع هدف اول و سوم نشان داده شده‌اند. در این مورد، ۱۹ راه‌حل نامغلوب برای مسئله ایجاد شده است. علاوه بر این، در شکل ۸، جواب‌ها در مقایسه با توابع هدف اول و چهارم نشان داده شده‌اند. در این مورد، ۸۶ راه‌حل نامغلوب برای مسئله ایجاد شده است. در شکل‌های ۹ تا ۱۴، راه‌حل‌های نامغلوب در

جدول ۱۴. نتایج حل مسائل نمونه با GAMS و الگوریتم NSGA-II

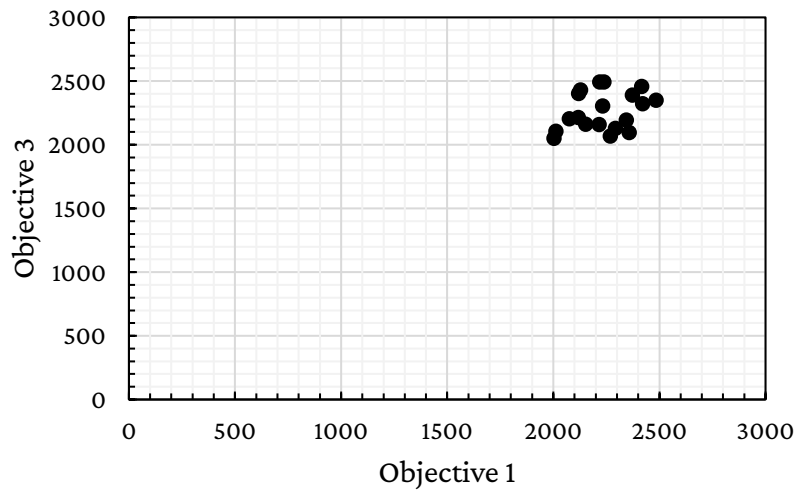
Table 14. Results of solving sample problems with GAMS and the NSGA-II algorithm

GAP (%)	حل دقیق با نرم‌افزار GAMS		الگوریتم ژنتیک چندهدفه		T	Q	P	L	شماره مسئله	بعد مسئله
	زمان حل (S)	تابع هدف	زمان حل (S)	تابع هدف						
۰	۵۷/۷	۶۸۸۰	۱۲۵	۶۸۸۰	۱	۱	۱	۱	PR1	بعد کوچک
۰	۶۵/۳۲	۷۵۸۹	۱۴۰	۷۵۸۹	۱	۱	۱	۲	PR2	
۰	۱۷۹/۸۲۷	۳۵۲۰	۱۳۳۰	۳۵۲۰	۱	۲	۲	۳	PR3	بعد متوسط
۲	۲۶۳/۸	۲۹۳۲	۲۸۵۰	۳۹۶۵	۱	۲	۲	۴	PR4	
۰/۰۲	۳۹۴/۹	۴۰۶۲	۳۳۶۰	۴۱۸۷	۲	۳	۲	۵	PR5	
-	۵۶۷/۴	۵۵۶۴	-	-	۲	۴	۳	۶	PR6	بعد بزرگ
-	۶۶۴/۷	۶۰۳۶	-	-	۲	۴	۳	۷	PR7	



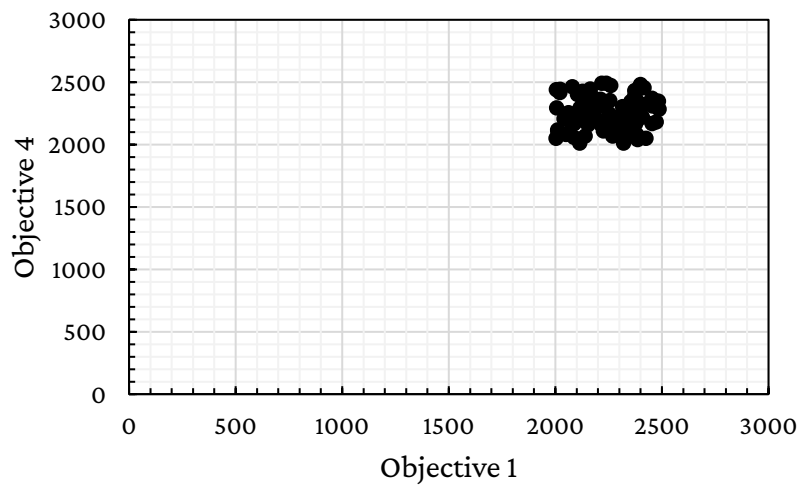
شکل ۶. نقاط نامغلوب مقایسه توابع هدف اول با دوم.

Figure 6. Indeterminate points comparing the first and second objective functions.



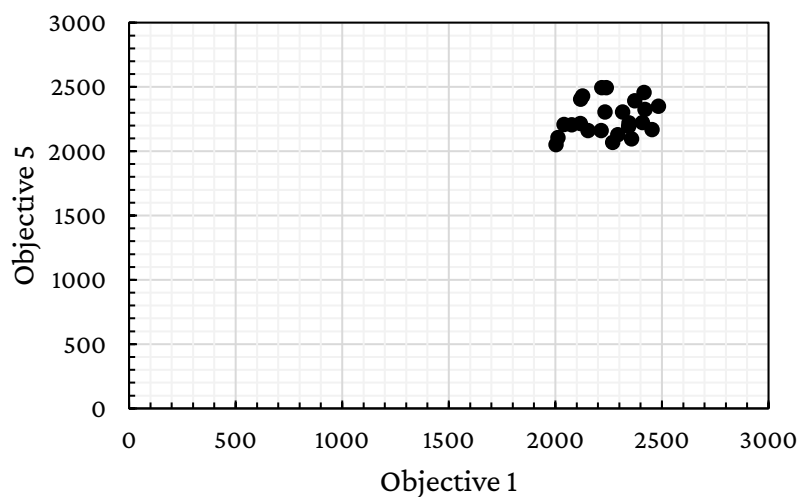
شکل ۷. نقاط نامغلوب مقایسه توابع هدف اول و سوم.

**Figure 7.** Indeterminate points comparing the first and third objective functions.



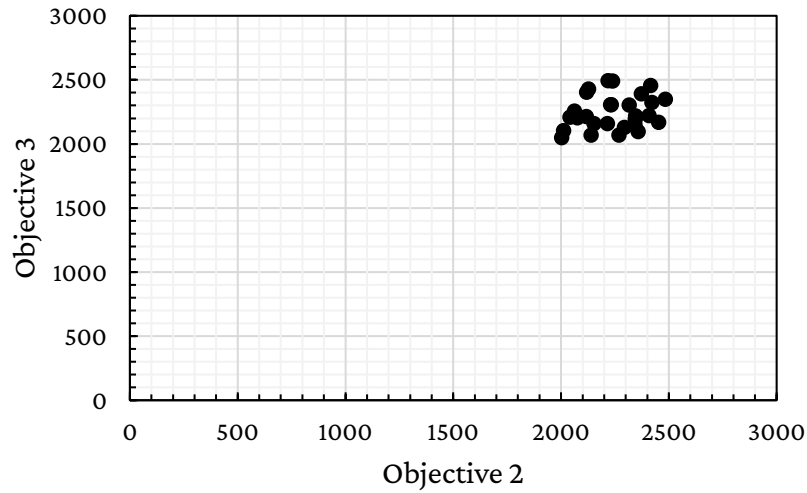
شکل ۸. نقاط نامغلوب مقایسه توابع هدف اول و چهارم.

**Figure 8.** Indeterminate points comparing the first and fourth objective functions.



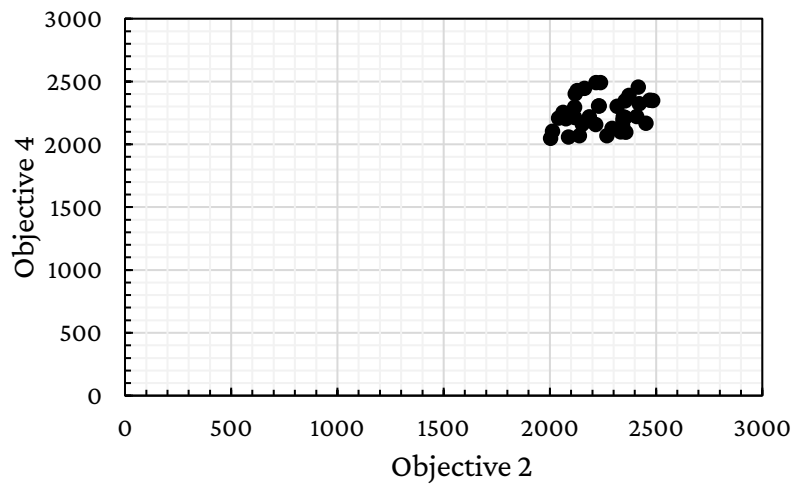
شکل ۹. نقاط نامغلوب مقایسه توابع هدف اول و پنجم.

**Figure 9.** Indeterminate points comparing the first and fifth objective functions.



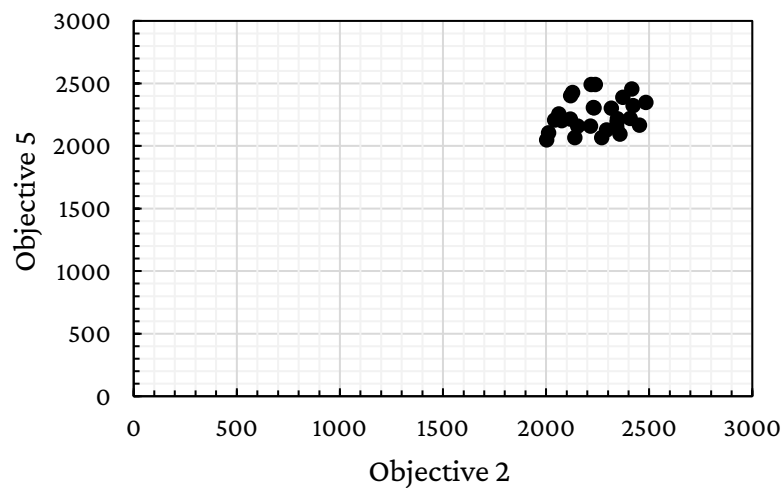
شکل ۱۰. نقاط نامغلوب مقایسه توابع دوم با سوم.

**Figure 10.** Indeterminate points comparing the second and third objective functions.



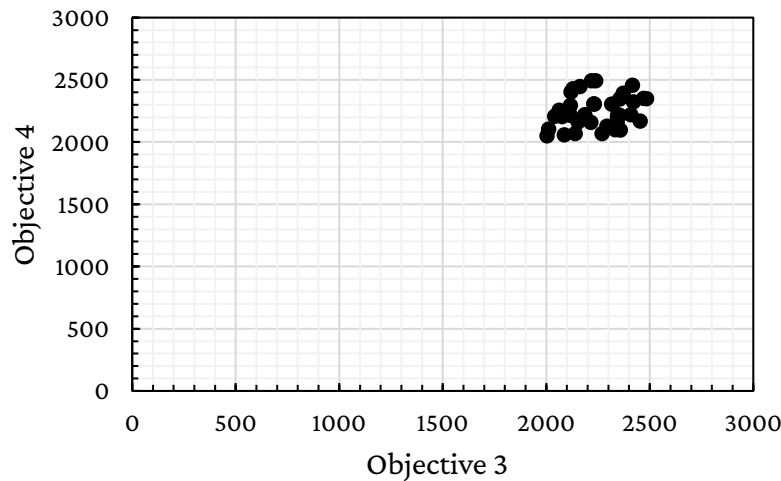
شکل ۱۱. نقاط نامغلوب مقایسه توابع دوم با چهارم.

**Figure 11.** Indeterminate points comparing the second and fourth objective functions.



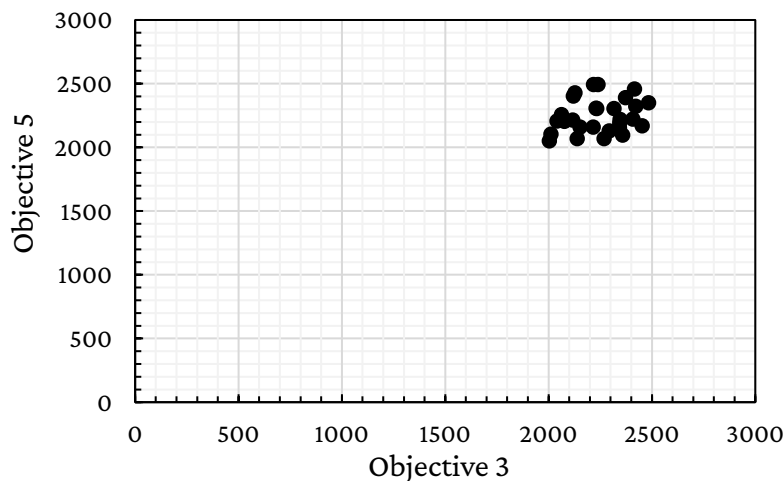
شکل ۱۲. نقاط نامغلوب مقایسه توابع دوم و پنجم.

**Figure 12.** Indeterminate points comparing the second and fifth objective functions.



شکل ۱۳. نقاط نامغلوب مقایسه سوم و چهارم.

Figure 13. Indeterminate points comparing the third and fourth objective functions.



شکل ۱۴. نقاط نامغلوب مقایسه سوم و پنجم.

Figure 14. Indeterminate points comparing the third and fifth objective functions.

در اکثر حالات، پاسخ‌ها از پوشش یکنواخت و توزیع گسترده‌ای برخوردارند و الگوریتم توانسته است از تمرکز راه‌حل‌ها در ناحیه‌ای محدود جلوگیری کند. در مجموع، تحلیل‌های کیفی و کمی هر دو نشان می‌دهند که الگوریتم پیشنهادی توانسته است میان دو معیار کلیدی همگرایی<sup>۳</sup> و تنوع، توازن مطلوبی برقرار کند. همچنین، حالت مقایسه توابع هدف اول و چهارم از نظر هر دو شاخص IGD و تنوع، بهترین کیفیت مرز پارتو را در میان تمام حالات مورد بررسی ارائه داده است. برای هر نقطه  $P_i$  در مجموعه راه‌حل‌های به دست آمده، نزدیک‌ترین نقطه  $Q_j$  در مجموعه پارتو پیدا می‌شود. فاصله اقلیدسی بین این دو نقطه به صورت  $d(P_i, Q_j) = \sqrt{\sum_{k=1}^m (P_{ik} - Q_{jk})^2}$

علاوه بر این، برای تحلیل کمی کیفیت پاسخ‌ها، از شاخص‌های میانگین فاصله جمعی معکوس<sup>۱</sup> و شاخص تنوع<sup>۲</sup> نیز استفاده شده است. شاخص IGD بیانگر میزان نزدیکی مجموعه راه‌حل‌های حاصل به مرز پارتوی واقعی است؛ بدین معنا که هرچه مقدار این شاخص کمتر باشد، الگوریتم از همگرایی بیشتری برخوردار است. بررسی مقادیر محاسبه شده نشان داد که در حالت مقایسه توابع هدف اول و چهارم، مقدار IGD به حداقل رسیده و بدین ترتیب، بیشترین همگرایی و کیفیت پاسخ‌ها در این حالت مشاهده شده است. از سوی دیگر، شاخص تنوع بیانگر میزان پراکندگی و توزیع یکنواخت راه‌حل‌ها در امتداد جبهه پارتو است. نتایج این شاخص نیز نشان می‌دهد که

<sup>۱</sup> Inverted Generational Distance (IGD)

<sup>۲</sup> Diversity Index

<sup>۳</sup> Convergence

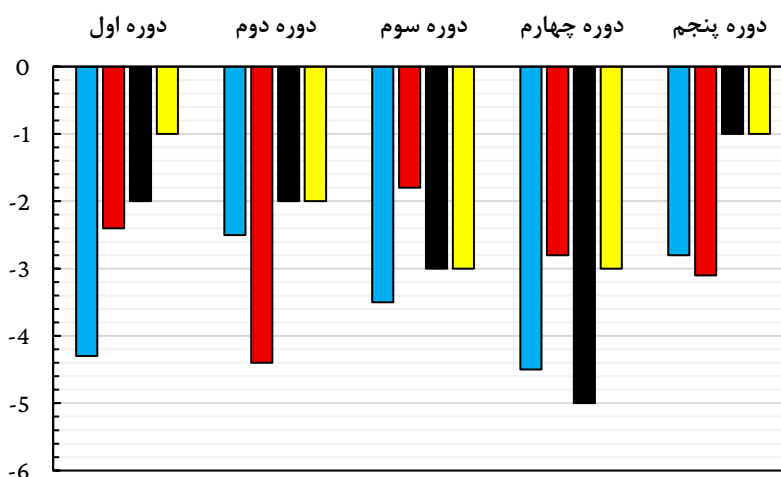
نشده افزایش می‌یابد و در همه دوره‌ها، اقلام ضروری با کمبود مواجه می‌شوند. این کمبود بر مطلوبیت توزیع در میان تقاضاکنندگان تأثیر می‌گذارد؛ زیرا کاهش مقدار عرضه، عدم مطلوبیت در میان تقاضاکنندگان ایجاد می‌کند و تأثیر منفی بر عملکرد زنجیره تأمین بشردوستانه و توزیع منصفانه می‌گذارد. در این صورت، بسیاری از تقاضاها بدون پاسخ باقی می‌مانند. همچنین، اگر مقدار پارامتر  $Spqt$  افزایش یابد، با مزاد اقلام روبه‌رو می‌شویم و با توجه به پنجره زمانی در نظر گرفته‌شده، ممکن است تقاضایی برای برخی اقلام خوراکی وجود نداشته باشد و آن‌ها فاسد شوند که در این صورت، هزینه‌های اضافی به زنجیره تحمیل می‌شود (شکل ۱۶).

با توجه به اینکه روش اپسیلون محدودیت برای حل مسئله ریاضی معرفی شده است، به ازای مقادیر مختلف اپسیلون، مقادیر توابع هدف محاسبه و در جدول ۱۵ نشان داده شده است. حالت قطعی این مدل با استفاده از نرم‌افزار GAMS و solver CPLEX حل شده است. در این جدول، مقادیر مختلفی برای اپسیلون تعریف و توابع هدف بر اساس آن‌ها حل شده‌اند. همان‌طور که از جدول مشخص است، مقادیر تابع هدف با افزایش اپسیلون تا مقدار مشخصی، تغییر قابل توجهی نشان نمی‌دهند؛ اما از نقطه‌ای به بعد (برای مثال، تابع هدف اول)، افزایش مقدار اپسیلون منجر به افزایش با شیب قابل ملاحظه در مقادیر توابع هدف می‌شود. این تغییرات در توابع هدف، شیب‌های متفاوتی را نشان می‌دهند.

محاسبه می‌شود، که در آن  $m$  تعداد اهداف است و  $P_{ik}$  و  $Q_{jk}$  به ترتیب مقادیر هدف  $k$  برای نقاط  $P_i$  و  $Q_j$  هستند. بر اساس نتایج حاصل‌شده، الگوریتم NSGA-II به‌عنوان یک ابزار بهینه‌سازی چندهدفه، در شرایط بحرانی به‌ویژه در مدیریت تخصیص کالاهای امدادی، می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان کمک کند تا به‌طور هم‌زمان چندین هدف را دنبال کنند. این اهداف می‌تواند شامل کاهش هزینه‌ها، افزایش سرعت توزیع و بهینه‌سازی میزان نشر آلودگی باشد. با استفاده از این الگوریتم، می‌توان به مجموعه‌ای از راه‌حل‌های بهینه (پارتو) دست یافت که به تصمیم‌گیرندگان امکان می‌دهد تا بهترین گزینه‌ها را با توجه به اولویت‌های خود انتخاب کنند؛ زیرا با توجه به شرایط بحرانی و چالش‌های موجود، اتخاذ تصمیمات سریع و مؤثر می‌تواند به کاهش آسیب‌ها و بهبود وضعیت کمک کند. رعایت نکات عملی فوق به تصمیم‌گیرندگان این امکان را می‌دهد که در شرایط دشوار به بهترین نحو عمل کنند و به نیازهای جامعه پاسخ دهند.

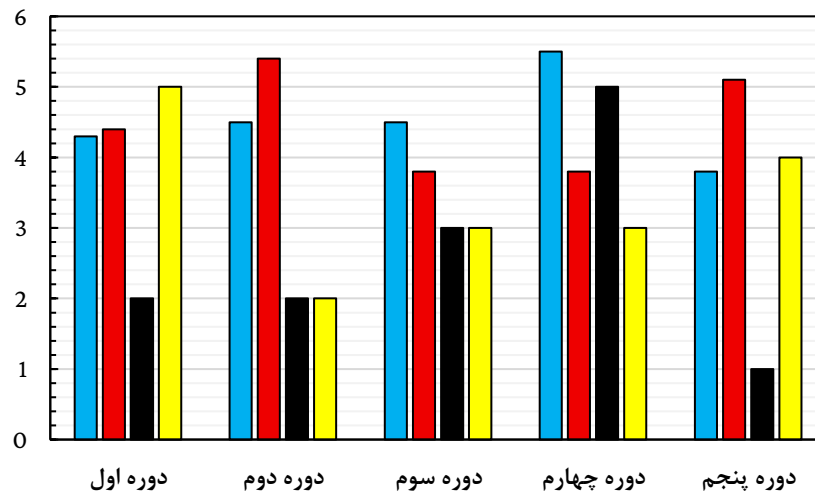
#### ۴-۴- تحلیل حساسیت

در این بخش، تأثیر مقدار عرضه مواد ضروری  $q$  در مرکز امدادی  $p$  در هر دوره بر مقدار تابع هدف سنجیده می‌شود و با وضعیت موجود مقایسه می‌گردد. برای این منظور، مقدار پارامتر  $Spqt$  را ۱۰ درصد افزایش و کاهش می‌دهیم. همان‌طور که در شکل ۱۵ نشان داده شده است، در صورت کاهش مقدار پارامتر  $Spqt$ ، تقاضای برآورده



شکل ۱۵. تأثیر کاهش عرضه مواد ضروری بر روی تقاضا (راه‌نمای رنگ: زرد ← آب؛ مشکی ← غذای؛ قرمز ← دارو و تجهیزات؛ آبی ← پوشاک و پتو).

Figure 15. The impact of reduced supply of essential goods on demand (color guide: yellow → water; black → food; red → medicine and equipment; blue → clothing and blankets).



شکل ۱۶. تأثیر افزایش عرضه مواد ضروری بر روی تقاضا (راهنمای رنگ: زرد←آب؛ مشکی←غذا؛ قرمز←دارو و تجهیزات؛ آبی←پوشاک و پتو).

**Figure 16.** The impact of increasing the supply of essential goods on demand (color guide: yellow→water; black→food; red→medicine and equipment; blue→clothing and blankets).

#### جدول ۱۵. نتایج تغییر اپسیلون

**Table 15.** The results of changing Epsilon

اپسیلون	تقاضای برآورده نشده	درصد خطرات زیست‌محیطی	کل هزینه‌های اضطراری	رضایت بازماندگان
۵۰	۵۱۲	۰/۷۱	۵۷	۰/۷۲
۱۰۰	۵۶۳	۰/۷۴	۵۵	۰/۷۴
۱۵۰	۳۸۲	۰/۷۰	۶۲	۰/۷۸
۲۰۰	۴۵۰	۰/۷۵	۵۷	۰/۷۲
۲۵۰	۴۳۰	۰/۷۸	۶۸	۰/۷۳
۳۰۰	۴۱۳	۰/۷۵	۷۵	۰/۷۲۵
۳۵۰	۳۹۸	۰/۷۵	۵۸	۰/۷۱
۴۰۰	۳۶۵	۰/۷۵	۹۴	۰/۷۲
۴۵۰	۳۴۸	۰/۷۴	۸۶	۰/۷۳
۵۰۰	۳۰۷	۰/۷۵	۵۸	۰/۷۲۵
۵۵۰	۴۸۰	۰/۷۱	۶۲	۰/۷۱
۶۰۰	۵۱۲	۰/۷۶	۴۸	۰/۷۱
۶۵۰	۵۶۳	۰/۷۶	۷۲	۰/۷۲
۷۰۰	۴۵۰	۰/۸۲	۹۸	۰/۷۳
۷۵۰	۴۶۰	۰/۷۳	۷۸	۰/۷۱
۸۰۰	۴۱۳	۰/۸۳	۸۱	۰/۷۱
۸۵۰	۵۱۰	۰/۷۵	۸۲	۰/۷۲
۹۰۰	۳۹۸	۰/۸۶	۷۰	۰/۷۳
مقدار بهینه	۳۰۷	۰/۷۰	۴۸	۰/۷۸

اپسیلون بین ۵۰ تا ۹۰۰ به‌عنوان بردار بهبوددهنده تعیین شده است. تعیین این بازه مشخص می‌کند که اگر مقدار اپسیلون کمتر از ۵۰ یا بیشتر از ۹۰۰ در نظر گرفته شود،

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، به ازای آزمایش مقادیر مختلف اپسیلون، ناحیه شدنی و بردار بهبوددهنده توابع هدف ایجاد شده است. طبق نتایج، سطح تغییرات معنادار

پاسخ مسئله خارج از ناحیه شدنی قرار می‌گیرد؛ بنابراین، مقدار اپسیلون برای جستجوی جواب بهینه محلی تابع هدف اول، ۵۰۰ است؛ زیرا در این نقطه، جواب بهینه برای تابع هدف اول رخ می‌دهد. وضعیت بهینه برای تابع هدف دوم در اپسیلون ۱۵۰ رخ می‌دهد. وضعیت بهینه برای تابع هدف سوم در اپسیلون ۶۰۰ رخ می‌دهد. وضعیت بهینه برای تابع هدف چهارم در اپسیلون ۱۵۰ رخ می‌دهد؛ بنابراین، محدوده پاسخ بهینه بین اپسیلون ۱۵۰ تا ۵۰۰ است. در جدول ۱۵، نتایج حل مدل با طول گام برابر با ۵۰ برای اپسیلون نشان داده شده است.

### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای توزیع اقلام امداد رسانی بر پایه طراحی یک مدل چندهدفه و چند دوره‌ای برای توزیع منصفانه ارائه شده است؛ بنابراین، این مقاله در راستای تحقق اهداف، یک مدل بهینه‌سازی برای توزیع بسته‌های معیشتی در شرایط بحرانی به منظور مقابله با بحران پیشنهاد می‌کند. به این منظور، یک زنجیره‌تأمین بشردوستانه چندهدفه و چندسطحی برای توزیع عادلانه بسته‌های معیشتی در مقابله با بحران توسعه یافته است. با توجه به اینکه تحقیقات پیشین در زمینه تخصیص مواد اضطراری معمولاً یک یا دو شاخص را در نظر می‌گیرند، این مقاله چهار بعد از شاخص‌های لجستیک بشردوستانه را بررسی می‌کند که عبارت‌اند از: هزینه دسترسی و حمل‌ونقل، نرخ تقاضای برآورده نشده در هر دوره، فاصله بین نرخ پر کردن تقاضا و نرخ رضایت ایده‌آل تقاضا در کل دوره، و خطرات زیست‌محیطی. علاوه بر این، به جای استفاده از شبکه‌های توزیع امداد رسانی تک‌منطقه‌ای یا حالت‌های توزیع تک‌دوره‌ای یا دو دوره‌ای، این مقاله یک مدل تخصیص مواد ضروری - شامل آب، غذا، دارو، تجهیزات، پوشاک و پتو - از مراکز امداد رسانی متعدد به مناطق آسیب‌دیده مختلف می‌سازد که قادر به رفتار منصفانه در توزیع اقلام میان مناطق است. این رویکرد، برنامه‌ریزی را با وضعیت واقعی مناطق آسیب‌دیده سازگارتر می‌سازد. مدل پیشنهادی برای بلایای طبیعی ناگهانی در مقیاس بزرگ محلی (نه ملی) مناسب است که در مناطق شهری با جمعیت معین رخ می‌دهد. در مقایسه با زلزله‌هایی که این کار روی آن‌ها متمرکز است، نمی‌توان

آن را مستقیماً برای طوفان‌ها یا سایر بلایای کم تأثیر و پراکنده به کار برد. در نهایت، یک تحلیل حساسیت بر روی مقدار اپسیلون برای یافتن جواب بهینه محلی توابع هدف انجام شده است. مقادیر بهینه تابع هدف اول در اپسیلون ۵۰۰ به دست آمده است. وضعیت مطلوب برای تابع هدف دوم در اپسیلون ۱۵۰ مشاهده شده است. وضعیت بهینه تابع هدف سوم در اپسیلون ۶۰۰ تنظیم گردیده است. همچنین، وضعیت مطلوب برای تابع هدف چهارم در اپسیلون ۱۵۰ محاسبه شده است. در نهایت، وضعیت بهینه برای تابع هدف پنجم نیز در اپسیلون ۶۰۰ تعیین شده است؛ بنابراین، محدوده پاسخ‌های مطلوب بین اپسیلون ۱۵۰ تا ۵۰۰ مشخص شده است. سرانجام، با اعمال مقادیر مختلف اپسیلون، توابع هدف به منظور تعیین راه‌حل‌های نامغلوب سنجیده شده‌اند. ابتدا، جواب‌ها در مقایسه توابع هدف اول با دوم تعیین شده‌اند که در این مورد، ۱۵ راه‌حل نامغلوب برای مسئله ایجاد شده است. همچنین، جواب‌ها در مقایسه توابع هدف اول با سوم تعیین شده‌اند که در این مورد، ۱۹ راه‌حل نامغلوب برای مسئله ایجاد شده است. علاوه بر این، جواب‌ها در مقایسه توابع هدف اول با چهارم نشان داده شده‌اند که در این مورد، ۸۶ راه‌حل نامغلوب برای مسئله ایجاد شده است. راه‌حل‌های نامغلوب در مقایسه توابع هدف اول با پنجم، دوم با سوم، دوم با چهارم، دوم با پنجم، سوم با چهارم و سوم با پنجم تعیین شده‌اند. با توجه به هر یک از حالات در نظر گرفته شده، تعداد راه‌حل‌های نامغلوب برابر با ۲۴، ۲۷، ۳۵، ۲۴، ۲۷ و ۳۵ تعیین شده است که در این حالت، راه‌حل‌های به دست آمده دارای همگرایی قابل قبولی هستند. کیفیت راه‌حل‌های ارائه شده در حالت مقایسه توابع هدف اول و چهارم، مناسب‌تر از تمامی حالات در نظر گرفته شده است.

برای تحقیقات آتی، پیشنهاد می‌شود اولویت‌بندی هر یک از اقلام با استفاده از تصمیم‌گیری چندمعیاره برای اولویت‌بندی اقلام و اعمال آن در مدل ریاضی در نظر گرفته شود. علاوه بر این، استفاده از مدل‌های تحلیل پوششی داده‌ها به منظور محاسبه امتیاز کارایی و رتبه‌بندی عملکرد زنجیره‌تأمین در طول دوره برنامه‌ریزی، می‌تواند نقش مطلوبی در توسعه تصمیمات مختلف ایفا کند.

humanitarian supply chains. *International Journal of Production Economics*, 235, 108081. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108081>

Eghbal, F., Ehsanifar, M., Mirhosseini, M., & Mazaheri, H. (2025). Identification and Modeling of key factors significant to the financial performance of Iranian construction Companies. *System Engineering and Productivity*, 4(4), 77-94 (In Persian).

<https://doi.org/10.22034/msb.2024.2034092.1218>

Ghahremani-Nahr, J., Nozari, H., & Szmelter-Jarosz, A. (2024). Designing a humanitarian relief logistics network considering the cost of deprivation using a robust-fuzzy-probabilistic planning method. *Journal of International Humanitarian Action*, 9(1), 19.

<https://doi.org/10.1186/s41018-024-00163-8>

Gholsheikh, N. G., Sanavi Garousiyan, V., & Hosseinzadeh, A. (2025). Design and validation of smart customer experience in Agricultural Bank of Khorasan Razavi Province with a mixed-methods approach. *System Engineering and Productivity*, 5(1), 65-91 (In Persian).

<https://doi.org/10.22034/sep.2025.2049020.1244>

Jahangiri, S., Abolghasemian, M., Ghasemi, P., & Pourghader Chobar, A. (2023). Simulation-based optimisation: Analysis of the emergency department resources under COVID-19 conditions. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 43(1), 1-19.

<https://doi.org/10.1504/IJISE.2023.128399>

Jahangiri, S., Abolghasemian, M., Pourghader Chobar, A., Nadaffard, A., & Mottaghi, V. (2021). Ranking of key resources in the humanitarian supply chain in the emergency department of Iranian hospital: A real case study in COVID-19 conditions. *Journal of Applied Research on Industrial Engineering*, 8(Special Issue), 1-10.

<https://doi.org/10.22105/jarie.2021.275255.1263>

Kanoun, I., Chabchoub, H., & Aouni, B. (2010). Goal programming model for fire and emergency service facilities site selection. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 48(3), 143-153.

<https://doi.org/10.3138/infor.48.3.143>

Karimi Zarachi, M., Fathi, M. R., Raeesi Nafchi, S., & Hosseini Zarch, S. M. (2023). The impact of supply chain relationship quality on knowledge sharing and innovation performance in the packaging industry. *System Engineering and Productivity*, 3(3), 63-81 (In Persian).

<https://doi.org/10.22034/msb.2023.711490>

Kashanian Monfared, N., Safaie, N., & Hosseinezhad, S. J. (2025). A decision-making model for the problem of designing the layout of medical centers considering uncertainty. *System Engineering and Productivity*, 5(2), 97-118 (In Persian).

<https://doi.org/10.22034/sep.2025.2049327.1252>

Maghfiroh, M. F. N., & Hanaoka, S. (2020). Multi-modal relief distribution model for disaster response operations. *Progress in Disaster Science*, 6,

## مشارکت‌های نویسندگان

**سمیه خوش‌نامی:** تهیه پیش‌نویس خطی، بازنگری اولیه گزارش، روش‌شناسی پژوهش، مدل مفهومی پژوهش، بررسی ادبیات نظری و پیشینه مرتبط، تجزیه و تحلیل داده‌ها، پیش‌نویس تحلیل آماری و بازبینی متن؛ **المیرا مشایخی:** تهیه پیش‌نویس خطی، بازنگری اولیه گزارش، روش‌شناسی پژوهش، راهنمایی، بازبینی متن.

## تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه تضاد منافع مرتبط با تحقیق حاضر ندارند و نتایج به صورت بی‌طرفانه و بدون دخالت منافع شخصی یا حرفه‌ای به دست آمده است.

## قدردانی

نویسندگان از عوامل اجرایی نشریه مهندسی سیستم و بهره‌وری و همچنین داوران محترم که کیفیت این مقاله را افزایش دادند، قدردانی می‌نمایند.

## مراجع

Abolghasemian, M., Ghane Kanafi, A., & Daneshmandmehr, M. (2020). A two-phase simulation-based optimization of hauling system in open-pit mine. *International Journal of Management Studies*, 13(4), 705-732.

<https://doi.org/10.22059/ijms.2020.294809.673898>

Aghajani, M., Torabi, S. A., & Heydari, J. (2020). A novel option contract integrated with supplier selection and inventory prepositioning for humanitarian relief supply chains. *Socio-Economic Planning Sciences*, 71, 100780.

<https://doi.org/10.1016/j.seps.2019.100780>

Avazpour, M., Zarei, J., & Alinezhad, E. (2025). Evaluation and prioritization of electricity generation technologies in Iran using a multi-criteria decision-making approach. *System Engineering and Productivity*, 5(3), 179-198 (In Persian).

<https://doi.org/10.22034/sep.2025.2063697.1333>

Boonmee, C., Arimura, M., & Asada, T. (2017). Facility location optimization model for emergency humanitarian logistics. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 24, 485-498.

<https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2017.01.017>

Cao, C., Liu, Y., Tang, O., & Gao, X. (2021). A fuzzy bi-level optimization model for multi-period post-disaster relief distribution in sustainable

- Sabouhi, F., Bozorgi-Amiri, A., & Vaez, P. (2020). Stochastic optimization for transportation planning in disaster relief under disruption and uncertainty. *Kybernetes*, 49(11), 2681–2703. <https://doi.org/10.1108/K-10-2020-0632>
- Shao-Hong, Y., Jia-Yang, N., Tai-Long, C., Qiu-Tong, L., Cen, Y., Jia-Qing, C., & Jie, L. (2023). Location algorithm of transfer stations based on density peak and outlier detection. *Applied Intelligence*, 53(13), 16634–16646. <https://doi.org/10.1007/s10489-022-03206-y>
- Temiz, S., Kazanç, H. C., Soysal, M., & Çimen, M. (2025). A probabilistic bi-objective model for a humanitarian location-routing problem under uncertain demand and road closure. *International Transactions in Operational Research*, 32(2), 590–625. <https://doi.org/10.1111/itor.13475>
- Tureci-Isik, H., Çelik, M., & Sancı, E. (2025). The stochastic location-routing problem with parallel truck-drone operations for humanitarian aid delivery. *European Journal of Operational Research*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2025.08.057>
- Wang, B., Qian, Q., Gao, J., Tan, Z., & Zhou, Y. (2021). The optimization of warehouse location and resources distribution for emergency rescue under uncertainty. *Advanced Engineering Informatics*, 48, 101278. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101278>
100095. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2020.100095>
- Maharjan, R., & Hanaoka, S. (2020). A credibility-based multi-objective temporary logistics hub location-allocation model for relief supply and distribution under uncertainty. *Socio-Economic Planning Sciences*, 70, 100727. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2019.07.003>
- Mamashli, Z., Bozorgi-Amiri, A., Dadashpour, I., Nayeri, S., & Heydari, J. (2021). A heuristic-based multi-choice goal programming for the stochastic sustainable-resilient routing-allocation problem in relief logistics. *Neural Computing and Applications*, 33(21), 14283–14309. <https://doi.org/10.1007/s00521-021-06074-8>
- Mansoori, S., Bozorgi-Amiri, A., & Pishvaei, M. S. (2020). A robust multi-objective humanitarian relief chain network design for earthquake response, with evacuation assumption under uncertainties. *Neural Computing and Applications*, 32(7), 2183–2203. <https://doi.org/10.1007/s00521-019-04193-x>
- Narimani, R., Motamedi, M., & Amoozad Khalili, H. (2023). Applying a mathematical model for the distribution of earthquake relief items to the affected areas of Tehran. *Disaster Prevention and Management Knowledge*, 13(2), 184–203. <http://dx.doi.org/10.32598/DMKP.13.2.747.1>
- Ozbay, E., Çavuş, Ö., & Kara, B. Y. (2019). Shelter site location under multi-hazard scenarios. *Computers & Operations Research*, 106, 102–118. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.02.008>
- Peng, D., Ye, C., & Wan, M. (2022). A multi-objective improved novel discrete particle swarm optimization for emergency resource center location problem. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 111, 104725. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.104725>
- Pirouz, B., & Khorram, E. (2022). A computational approach based on the  $\epsilon$ -constraint method in multi-objective optimization problems. *Operations Research Forum*, 3(1), 1–20. <https://doi.org/10.17654/ASO49060453>
- Praneetpholkraeng, P., & Huynh, V. N. (2020). Shelter site location and allocation model for efficient response to humanitarian relief logistics. In M. Klumpp, M. Neukirchen, & M. Teuck (Eds.), *Dynamics in Logistics* (pp. 309–318). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-44783-0\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-030-44783-0_30)
- 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*, 2021, Article 7215374. <https://doi.org/10.1155/2021/7217182>
- Roh, S.-Y., Shin, Y.-R., & Seo, Y.-J. (2018). The pre-positioned warehouse location selection for international humanitarian relief logistics. *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, 34(4), 297–307. <https://doi.org/10.1016/j.ajsl.2018.12.003>