

Review Paper

A Multi-objective Optimization Model for Post-natural Disaster Waste Clean-Up with Multimodal Transport




Hamidreza Darvishi¹ , *Javad Rezaeian¹ , Babak Shirazi¹ , Iraj Mahdavi¹ 

1. Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Babol, Iran.



Citation Darvishi, H., Rezaeian, J., Shirazi, B., & Mahdavi, I. (2026). A Multi-Objective Optimization Model for Post-Natural Disaster Waste Clean-Up with Multimodal Transport. *Disaster Prevention and Management Knowledge*, 15(4):462-509. <https://doi.org/10.32598/DMKP.15.4.218.2>

 <https://doi.org/10.32598/DMKP.15.4.218.2>

ABSTRACT

Background and objective Natural disasters result in the generation of massive volumes of waste, leading to severe environmental, economic, and social problems. Inefficient waste management can delay the recovery efforts and incur additional costs. This study aims to develop a multi-objective optimization (MOO) model for post-disaster waste cleanup, employing a multimodal transportation approach (truck/train) and risk prioritization of affected areas.

Method In this study, the affected areas were first ranked using the analytic hierarchy process (AHP) based on five risk criteria (life risk, environmental pollution, psychological impacts, economic disruption, and risks from disaster waste). Then, the MOO model was implemented using the epsilon-constraint method across seven defined problems with varying scales. The scenarios were applied to the flooded rural areas of Gorgan city and Aqqala county in Golestan province, Iran. The model considered the minimization of the time for the completion of debris removal and waste transportation operations, as well as the reduction of transportation and equipment costs (for train stations and temporary waste management sites), as two objective functions.

Results As the problem scale increased, computation time also increased, with the model exhibiting NP-Hard characteristics at larger scales. The obtained Pareto points confirmed the trade-off between time minimization and cost reduction objectives, highlighting the need for selections aligned with operational policies. Furthermore, multimodal transportation, compared with road-only mode, resulted in a 30.1% reduction in operating time and an 11.3% reduction in total costs. Further analysis revealed that road transport performed better over short distances between the affected areas and final disposal sites, whereas multimodal transport was superior over longer distances. Risk prioritization results demonstrated a targeted resource allocation to high-risk areas.

Conclusion The presented model can serve as a practical tool for crisis managers in planning post-disaster waste clean-up. Employing multimodal transport alongside a multi-criteria decision-making approach not only enhances decision-making efficiency and quality but also enables optimal resource allocation to high-risk regions.

Keywords Natural disaster, Waste clean-up, Temporary disaster waste management site, Multimodal transport, ϵ -constraint

Article Info:

Received: 23 Jul 2025

Accepted: 13 Oct 2025

Available Online: 01 Jan 2026

*** Corresponding Author:**

Javad Rezaeian, Associate Professor.

Address: Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Babol, Iran.

Tel: +98 (920) 9201348

E-mail: j.rezaeian@ustmb.ac.ir



Copyright © 2026 The Author(s);

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY-NC: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.en>), which permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and is not used for commercial purposes.

English Version

Introduction

According to the International Natural Disaster Database, the world has witnessed an increasing growth in the number of natural disasters in recent decades, and given climate change and weather patterns, this trend is likely to continue (EM-DAT Database, 2020). Natural disasters such as earthquakes, floods, and storms have several consequences for societies beyond loss of life and property. One of the important consequences is the production of a huge volume of waste in a short time, the improper management of which can have long-term environmental, health, economic, and social effects. This huge volume of waste disrupts other areas of natural disaster management and reduces the effectiveness of disaster response and recovery efforts (Brown et al., 2011). For example, the 2008 Sichuan earthquake and 2005 Hurricane Katrina generated approximately 381 and 100 million tons of solid waste, respectively, and managing these huge amounts put significant strain on existing systems and slowed down the recovery process (Xiao et al., 2012; Lorca et al., 2017). The capacity of countries to respond to problems after major natural disasters is usually limited; the production of a large volume of waste can be 5-15 times the annual waste production rate of affected countries (Zhang et al., 2019). In some cases, waste disposal may take up to 5 years (Brown et al., 2011).

The measures taken to clean up post-disaster waste during the response phase are time-consuming, costly, and difficult, accounting for about a quarter of the costs of the disaster response phase (FEMA, 2007). Given the significant impact of disaster waste management on other response and recovery operations, it is essential to develop strategies, operational tools, and decision support for post-disaster waste cleanup. The disaster waste management operations typically include collection, sorting, and preliminary processing, transportation, recycling, and finally final disposal; each of these stages has its own limitations and challenges (Caldera et al., 2025a). To facilitate the cleanup process, reference organizations, including the Federal Emergency Management Agency (FEMA), have recommended the creation and operation of temporary disaster waste management sites (TDWMSs) as an operational solution. These sites provide facilities such as temporary storage, sorting and processing, reduce waste volume and time, improve the efficiency of the cleanup system, increase the rate and ease of recycling, and reduce environmental risks and the time it takes to transport waste to recycling centers or final landfills, thereby accelerating

the cleanup process (FEMA, 2007; Cheng et al., 2022a). Inefficiency in disaster waste management can have numerous consequences, including health and psychological problems, delayed reconstruction, and increased costs (Brown et al., 2011; Zhang et al., 2019; United States Environmental Protection Agency, 2019; Babbitt, 2019; Nikdoost et al., 2022; Zawawi et al., 2018; Ghorbanzadeh et al., 2020). However, selecting the location of these sites, providing capacity, and allocating resources to them is a complex multi-criteria issue that must simultaneously consider environmental considerations, land ownership, road access, social considerations, and operational constraints (Nikdoost et al. 2022; Habib et al., 2022).

One of the key constraints in implementing post-disaster waste cleanup operations is the weakness or damage of transportation networks, especially when roads and bridges are collapsed or there is insufficient transportation capacity for long distances. In such circumstances, relying solely on road transport can lead to increased waste transport time and cost. Recent studies have shown that combining transportation modes and designing integrated routes can significantly reduce transportation times and costs during disasters and increase the overall resilience of the post-disaster logistics network (Ma et al., 2024; uddin et al., 2019). Multimodal or combined transport (truck-train), in which trucks are used for local collection and trains for long-distance transport, has been proposed as a practical solution to increase waste carrying capacity, reduce costs, and improve logistical resilience (Archetti et al., 2022). Recent studies have emphasized the importance of considering interdependencies between infrastructure (e.g. roads) and potential disruptions to them, as ignoring these dependencies can reduce the efficiency of planning models and make decisions operationally vulnerable (Cheng et al., 2018; Akiyama et al., 2025).

In recent years, research has focused on developing mathematical models and optimization approaches for disaster waste management. Among them, methods such as mixed-integer programming (MIP), multi-stage scenario models, and multi-objective approaches have been proposed to balance economic, environmental, and temporal objectives (Cheng et al., 2021; Xiao et al., 2022). Some studies have also developed decision-making models in the field of human logistics and distribution of relief items, which can be inspiring in the development of disaster waste management models (Narimani et al., 2024; Poornaser et al., 2022). A study developed a mathematical model to determine the optimal location of central and secondary warehouses in a multi-level supply chain for perishable products, with a focus on cost minimization, which can provide an effective approach to designing ef-



efficient logistics networks (Mousavi et al., 2024). Also, combining multi-objective optimization (MOO) models with scenario-based risk management approaches, especially in situations where multiple and incompatible criteria (such as costs, risks, and effectiveness) are involved, was recognized in a study as a successful strategy for managing the blood supply chain during the COVID-19 pandemic (Babazadeh et al., 2023). In addition, the use of modern technologies, including artificial intelligence (AI), for waste sorting and improving processing efficiency, has also been investigated in a recent study (Boonmee et al., 2024).

Despite these advancements, several important challenges and gaps in the literature indicate the need for further research. A significant number of studies have focused on road transport, whereas the full benefits of combined transport in post-disaster waste cleanup have been less explored. The integration of risk prioritization approaches for affected areas with a comprehensive multi-objective model that simultaneously considers TDWMS location, operational team allocation, and combined transport planning has also been less investigated in previous studies. Moreover, many existing models assume continuous and healthy access to the transport network and have not studied the simulation of partial or complete disruptions in the road-rail network, while real-world experiences show that such disruptions can have a profound impact on the time and cost of operations and network resilience (Torabi et al., 2016; Ma et al., 2024). Given the increasing occurrence of disasters and the multidimensional impacts of their waste production, the need for comprehensive, operational models that simultaneously encompass location, risk prioritization, and combined transportation planning is evident. Therefore, this study aims to develop an MOO model for post-disaster waste cleanup with a combined transportation approach (truck/train) and the analytic hierarchy process (AHP) method to identify and focus on high-risk areas. The proposed model attempts to balance time and cost objectives, optimize the allocation of multi-purpose debris removal teams, and examine the effects of infrastructure dependencies in numerical scenarios to demonstrate its applicability and sustainability in different disasters.

Literature review

Disaster waste management, as one of the main pillars of crisis management, has received widespread attention from researchers in recent decades. In this area, a major part of the studies has focused on the use of TDWMSs. These sites play a key role in facilitating waste cleanup, reducing operational time and costs, and improving the efficiency of the recycling system. Early research in this

field has identified the need for and initial design of such waste management sites (Alziari et al., 1981; Rafee et al., 2008; Karumasena et al., 2012; Oh and Kang, 2013; Brown and Milke, 2016; Amato et al., 2019; Amato et al., 2020; Xiao et al., 2022). Selecting the appropriate location for these sites is a complex, multi-criteria process that requires consideration of geographical, social, environmental, and economic factors. Cheng et al. (2016) and Lee et al. (2022) investigated this issue using a combined MOO and multi-criteria analysis (MCA) approach. Onan et al. (2015) presented a decision-making model in which the location of TDWMSs was selected by simultaneously considering environmental and economic factors. Their framework showed that combining different objectives can lead to increased efficiency of the waste management system. Habib et al. (2017) proposed a two-stage framework; the first step identifies optimal locations using the AHP and fuzzy TOPSIS techniques, and the second step uses mathematical models to allocate waste to these locations.

One emerging method for locating TDWMSs is the use of geographic information systems (GIS). Nikdoost et al. (2022) presented a GIS-based framework for locating TDWMSs. This framework follows the optimization of cleanup operations based on geographical parameters set by the governing bodies, taking into account geographical requirements and spatial and operational constraints. At the same time, it considers health risks, recyclability and social impacts of waste disposal, and focuses on minimizing the impact of uncollected waste on the community and economy of the affected areas. Cheng et al. (2022b), in a study on small disasters, seek to improve the efficiency of waste cleanup in the response phase of disaster management. They aimed to minimize the total cost and time of waste cleanup by optimizing the relevant operations. A multi-period two-echelon location routing model was used. This model helps in deciding on the location of TDWMSs and vehicle routing, which includes optimizing three key processes: routing waste collection from affected areas to TDWMSs, cycles of collection vehicles between TDWMSs without the need to return to the depot, and routing waste transport from TDWMSs to recycling and final disposal sites. To model and solve this complex model, they used MIP and genetic algorithms.

Recent research has highlighted the importance of considering the risk of disruption to access to TDWMSs. Habib et al. (2022) showed that, unlike many previous studies where TDWMSs were assumed to be always available, these locations may become inaccessible due to road blockages or infrastructure damage. They developed a two-stage model, first selecting sites and then allocating waste, and presented a solution to deal with these prob-

lems. This risk-based perspective is in line with recent studies that emphasize the resilience of transportation systems during disasters (Ma et al., 2024; Uddin et al., 2019; Akiyama et al., 2025). Cheng et al. (2021) introduced a MIP-based model that optimizes four main waste management operations (demolition, collection, processing, and transportation) in an integrated manner. Their model showed that optimal selection of TDWMSs and appropriate sequencing of operations can lead to significant reductions in total time and cost. Xiao et al. (2022) presented a two-level model that includes decisions about the location of processing facilities, the deployment of demolition resources, and the allocation of vehicles. The main goal of their model was to simultaneously reduce cost, time, and environmental impacts, and the results showed that two-level approaches can provide greater flexibility in responding to critical situations.

Some research has addressed the issue of combined transport management in the waste chain under non-hazardous conditions. Tonneau et al. (2015) developed a linear programming model for the supply chain of non-hazardous waste that incorporated processing operations such as compaction. This model, based on a case study of the Brangeon company in France, reduced logistics costs by 14.7% through the combination of road and rail transport. The importance of their study lies in demonstrating that multimodal transport approaches, even in non-disaster situations, can be effective for optimal waste management and can be applied in natural disasters.

In more recent studies, the focus has become more pronounced on improving the resilience of multimodal transport networks for post-disaster waste management. For example, studies by Ma et al. (2024), Uddin et al. (2019), and Pan et al. (2025) emphasized the benefits of combining transportation modes and designing hybrid networks in disaster situations. Caldera et al. (2025b) emphasized the role of industry managers and decision-makers in promoting community resilience by presenting a comprehensive framework for disaster waste management. There are also studies that have designed similar models in the field of human supply chains, which can be methodologically extended to disaster waste management. For example, Narimani & Motamedi, 2023; Narimani et al., 2024 and Poornaser et al. (2022) developed models for the distribution of relief items using scenario-based MOO approaches. Babazadeh et al. (2023) and Babazadeh Rafiee et al. (2024) presented a model for risk management in the blood supply chain during the COVID-19 pandemic, which is conceptually applicable to disaster waste management. These studies represent a shift in research toward more comprehensive and realistic models that simultane-

ously consider risk, cost, and time. Another important point is the use of new technologies in disaster waste management. Boonmee et al. (2024) used an AI-based system for waste classification and to improve processing efficiency. Also, recent studies in the field of resilience have shown that considering interdependencies between transportation and waste disposal processes can influence the estimation of cleanup time and the quality of decision-making (Akiyama et al., 2025; Caldera et al., 2025a).

Overall, the literature review shows that disaster waste management, as an interdisciplinary field, has been studied in various aspects such as locating TDWMSs, designing optimization models, applying GIS-based systems, integrating new technologies, and risk-based approaches. Many studies have focused on the location and design of TDWMSs, but in many of these studies, only road transportation has been considered, and the benefits of combined transportation (such as truck/train) have received less attention. Also, although recent research has addressed the importance of transportation network resilience and infrastructure disruptions, a comprehensive examination of how these disruptions affect the efficiency of waste management models remains limited. On the other hand, few studies have developed comprehensive multi-objective models that simultaneously address conflicting criteria such as time, risk, and cost within an integrated framework. In the studies by Cheng et al. (2021) and Xiao et al. (2022), the focus was on employing independent teams to demolish damaged buildings. In our study, debris removal teams are considered multi-purpose teams that simultaneously handle responsibilities such as hazardous waste management, demolition of damaged buildings, and waste and debris sorting. This approach is more consistent with the field realities of post-disaster operations, as relief and rescue units often have combined tasks. In addition, the use of risk prioritization approaches for affected areas, along with waste logistics optimization, has still not been studied in systematic and integrative manners. On the other hand, the use of a multimodal transportation system in this research reduces waste transportation time and costs and can play an effective role in optimizing the process of locating TDWMSs, recycling sites, and landfills. The present study aims to address research gaps by presenting an MOO model that incorporates TDWMS locating, risk prioritization, and multimodal truck/train transportation. This framework, in addition to considering time, risk, and cost, allows for more realistic decision-making. The proposed model is a strategic planning tool with real-world applicability that helps crisis managers allocate resources and improve the resilience of the post-disaster logistics network.



Materials and Methods

Problem definition

The problem in this study was the allocation of debris removal teams/scheduling of debris removal and waste collection/transportation after a disaster. This problem is defined in two main stages, including debris removal operations and waste collection/transportation. In formulating this problem, attention was paid to the existing risks classified into five categories: Life risk, environmental pollution, psychological impacts, disruption of economic activity, and waste-related accidents. In each operational stage, the allocation of debris removal teams and the scheduling of debris removal are based on the results of the risk assessment and prioritization for the affected areas, with higher-risk areas being prioritized.

The sites involved in this problem included the crisis management center (Depot), areas requiring debris removal, areas requiring waste collection/transportation, areas requiring both debris removal and waste collection/transportation, train stations, and TDWMSs. After a disaster, relief teams are dispatched from the depot. In some situations, due to the entanglement of debris and waste, direct loading and transportation are not possible. In such cases, debris removal teams are responsible for separating the waste and debris, securing the environment, and eliminating potential hazards. To improve the efficiency of waste cleanup, a multimodal transportation system (truck/train) was used. Waste collection/transportation teams use this method to collect and transport post-disaster waste. For waste transportation, two options were set: (a) initial transport to the train station by truck, followed by transport to the TDWMS by train, (b) direct transport to the TDWMS by truck without rail transport. It should be noted that equipping with machinery and facilities required for loading waste, using train stations, and constructing each of the TDWMSs requires specific costs.

The problem will continue until all debris removal and waste transportation operations in the affected areas are completed and the teams return to the depot. The objective functions in this problem include minimizing the time to complete the debris removal operation and transportation of waste to TDWMSs (considering the risk of the areas), minimizing the costs of waste transportation, minimizing the costs of dispatching rescue teams, and minimizing the costs of equipping and using train stations and constructing TDWMSs. Figure 1 shows a diagram of debris removal and waste transportation stages, and Figure 2 presents a graphical representation of the post-disaster waste cleanup model using a multimodal transportation approach.

Assumptions

1) Multiple relief teams cannot serve in the same affected area at the same time. 2) The time for debris removal and waste transportation depends on the capability of the relief teams. 3) Waste transportation is multimodal (road and rail transportation). 4) The location of TDWMSs is determined in advance.

Waste transportation from each area is possible after the relief teams have completed their debris removal.

1) Waste from areas that do not require separation can be transported directly. 2) The waste transportation capacity of vehicles is limited and specified. 3) The volume of waste in each area can be estimated. 4) The time required for debris removal in each area can be predicted. 5) The relief priority is determined for each area based on the levels of damage and the importance of the affected areas. 6) The loading and unloading time for each waste transport team in each area is determined. 7) The travel time for each route between areas can be estimated for each team. 8) Train stations are part of the multimodal transport system that remains usable after disasters and not intended to be demolished.

Mathematical model

In this section, the indices, inputs, and decision variables are presented, and the objective function and constraints are explained separately.

Indices

1) Areas requiring debris removal ($i, j=1, \dots, Nr$); 2) Areas requiring waste collection/transportation ($o, p=1, \dots, Nc$); 3) Train stations ($r=1, \dots, R$); 4) TDWMSs ($s=1, \dots, S$); 5) Debris removal team ($k=1, \dots, K$); 6) Waste collection/transportation team ($l=1, \dots, L$).

Inputs

1) M =Large number; 2) W_r^j =Risk level of the affected area j in the debris removal phase; 3) W_c^p =Risk level of the affected area p in the waste collection/transportation phase; 4) Pr_j^k = Estimated time (min) of debris removal for the area j by team k

1) Pcr_{pr}^l =Estimated time (min) to transfer waste from the area p to the train station r by team l ; 2) Pcr_{ps}^l =Estimated time (min) to transfer waste from the area p to the TDWMS s by team l ; 3) Dr_{ij}^{ki} = Estimated time (min) to travel the distance from the area i to the area j by team k ; 4)

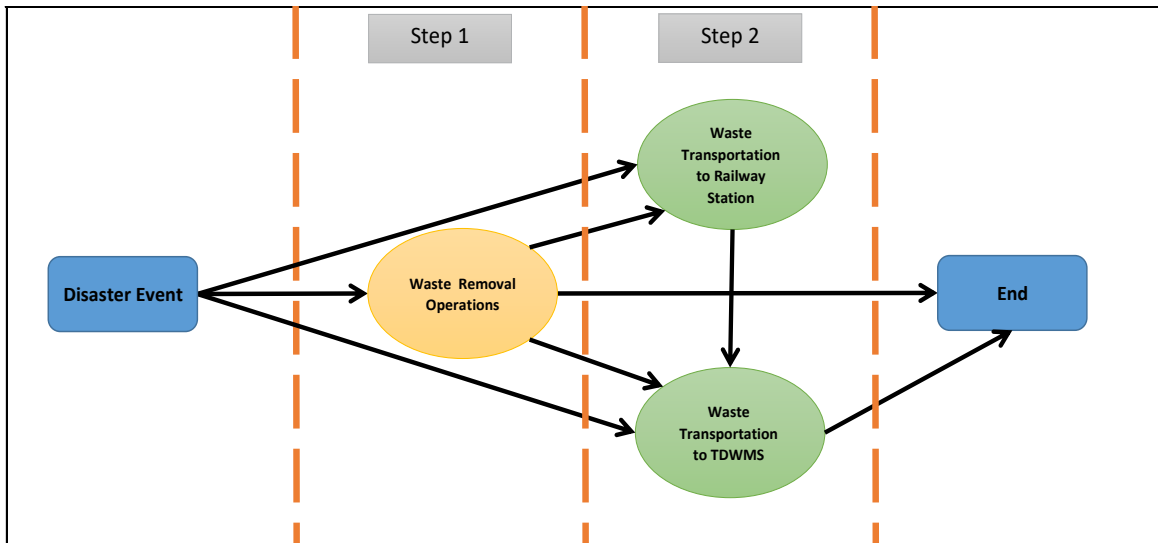


Figure 1. Diagram of debris removal and waste transportation stages

Dc_{op}^l = Estimated time (min) to travel the distance from the area o to the area p by team l; 5) Dc_{or}^l = Estimated time (min) to travel the distance from the area o to the train station r by team l; 6) Dc_{os}^l = Estimated time (min) to travel the distance from the area o to the TDWMS s by team l; 7) WV_p = Estimated waste volume (tons) in the area p; 8) $CCAP^l$ = Waste carrying capacity (in tons) per transport for team l; 9) LT^l = Estimated waste loading time (min) per transport for team l; 10) UT^l = Estimated waste unloading time (min) per transport for team l; 11) $cost^k$ = Cost of traveling per kilometer by team k during the debris removal phase; 12) $cost^l$ = Cost of traveling (unloaded)

per kilometer by team l during the waste collection/transportation phase; 13) $cost^l$ = Cost of traveling (loaded) per kilometer by team l during the waste collection/transportation phase. 14) $cost_{rs}$ = Cost of transporting waste per ton of waste by train from station r to TDWMSs; 15) $cost_r$ = Cost of equipping the train station r if it is used; 16) $cost_s$ = Cost of constructing a TDWMS

Decision variables

1) FTr_j^k = Time (min) to complete the debris removal in the area j by team k; 2) FTc_p^l = Time (min) to complete

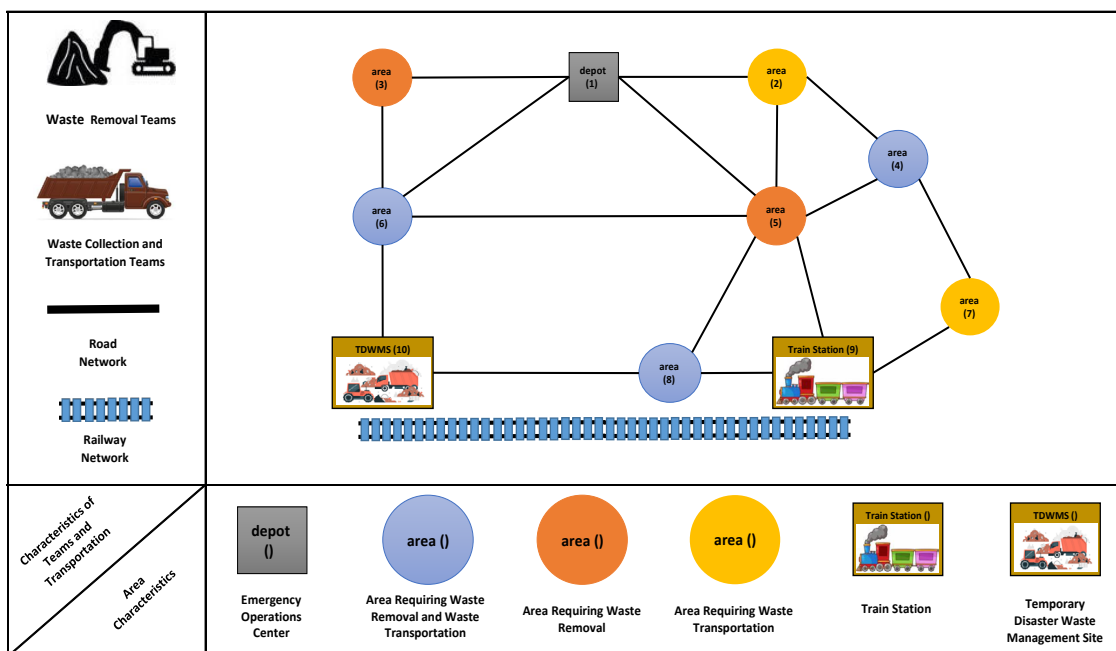


Figure 2. Graphical representation of the post-disaster waste cleanup model using a multimodal transportation approach.

waste transport from the area p by team l; 3) $NTS_p^l =$ Number of waste transportation services from the area p by team l; 4) $Zr_j^k = 1$, if the team k is assigned to the area j; otherwise, consider it 0; 5) $Zc_p^l = 1$, if the team l is assigned to the area p; otherwise, consider it 0; 6) $Xr_{ij}^k = 1$, If the team k goes to the area j after completing the debris removal of the area i; otherwise, consider it 0; 7) $Xc_{op}^l = 1$, If the team l goes to the area p after completing the waste transportation from the area o; otherwise, consider it 0; 8) $Xcr_{or}^l = 1$, If the team l transports the waste of the area o to the train station r; otherwise, consider it 0; 9) $Xcs_{os}^l = 1$, If the team l transports the waste of the area o to the TDWMS s; otherwise, consider it 0; 10) $UR_{rp}^l = 1$, If the team l goes to the area p after transporting waste to the train station r; otherwise, consider it 0; 11) $US_{sp}^l = 1$, If the team l goes to the area p after transporting waste to the TDWMS s; otherwise, consider it 0; 12) $Q^{kl} = 1$, if the teams k and l is assigned to the area i; otherwise, consider it 0; 13) $ALR_r = 1$, if the train station r is used; otherwise, consider it 0; 14) $ALS_s = 1$, if the TDWMS s is built; otherwise, consider it 0; 15) $Y_{ors} = 1$, if the waste from the area o is transported by train to the TDWMS s after being transported to the train station r; otherwise, consider it 0

Objective functions

We defined two objective functions for the problem as Equation 1:

$$1. \text{Min } Z1 = \sum_{j \in Ar} \sum_{k \in K} W_{r_{ej}} \cdot FT_{r_j}^k + \sum_{p \in Ac} \sum_{l \in L} W_c \cdot FT_{c_p}^l$$

$$\text{Min } Z2 = \sum_{i \in 0 \cup Ar} \sum_{j \in 0 \cup Ar, j \neq i} \sum_{k \in K} Dr_{ij}^k \cdot \text{cost}^k \cdot Xr_{ij}^k + \sum_{o \in 0} \sum_{p \in Ac} \sum_{l \in L} Dc_{op}^l \cdot \text{cost}^l \cdot Xc_{op}^l + \sum_{o \in Ac} \sum_{r \in At} (LT^l + Dcr_{or}^l + UT^l) \cdot NTS_o^l \cdot \text{cost}^l \cdot Xcr_{or}^l + \sum_{o \in Ac} \sum_{r \in At} (LT^l + Dcr_{or}^l + UT^l) \cdot NTS_o^l \cdot \text{cost}^l \cdot Xcr_{or}^l + \sum_{o \in Ac} \sum_{s \in As} \sum_{l \in L} (LT^l + Dcs_{os}^l + UT^l) \cdot NTS_o^l \cdot \text{cost}^l \cdot Xcs_{os}^l + \sum_{o \in Ac} \sum_{s \in As} \sum_{l \in L} (LT^l + Dcs_{os}^l + UT^l) \cdot NTS_o^l \cdot \text{cost}^l \cdot Xcs_{os}^l + \sum_{o \in Ac} \sum_{p \in 0} \sum_{r \in At} \sum_{l \in L} Dcr_{pr}^l \cdot \text{cost}^l \cdot UR_{rp}^l + \sum_{o \in Ac} \sum_{p \in 0} \sum_{s \in As} \sum_{l \in L} Dcs_{pr}^l \cdot \text{cost}^l \cdot US_{sp}^l + \sum_{o \in Ac} \sum_{r \in At} W_{V_o} \cdot \text{cost}_r \cdot Y_{ors} + \sum_{r \in At} \text{cost}_r \cdot ALR_r + \sum_{s \in As} \text{cost}_s \cdot ALS_s$$

The first objective function minimizes the sum of the time taken to complete the debris removal and waste transportation operations multiplied by the risk level of each area. This approach aims to prioritize high-risk areas and reduce the risks caused by delays in waste collection. The second objective function focuses on minimizing the costs associated with transporting debris removal and waste collection teams, transporting waste by rail, as well as the costs associated with equipping train stations and building TDWMSs.

Constraints

$$2. \sum_{i \in 0 \cup Ar, i \neq j} \sum_{k \in K} Xr_{ij}^k = 1 \quad \forall j \in Ar$$

According to Equation 2, each area can be served only by one debris removal team.

$$3. \sum_{j \in 0 \cup Ar, j \neq i} Xr_{ij}^k = \sum_{j \in 0 \cup Ar, j \neq i} Xr_{ji}^k \quad \forall i \in Ar, \forall k \in K$$

According to Equation 3, after completing the operation in each area, the team k moves to the next area for debris removal.

$$4. \sum_{j \in Ar, j \neq i} Xr_{ij}^k \leq 1 \quad \forall i \in 0, \forall k \in K$$

According to Equation 4, the debris removal team k can leave the depot at most once.

$$5. \sum_{i \in Ar, i \neq j} Xr_{ij}^k \leq 1 \quad \forall j \in 0, \forall k \in K$$

According to Equation 5, the debris removal team k can enter the depot at most once.

$$6. \sum_{i \in 0 \cup Ar} Xr_{ij}^k = Zr_j^k \quad \forall j \in Ar, \forall k \in K$$

Equation 6 defines the assignment of the debris removal team k to the area j.

$$7. FT_{r_j}^k + (M \cdot (1 - Xr_{ij}^k)) \geq (FT_{r_i}^k + Dr_{ij}^k + Pr_j^k) \cdot Zr_j^k$$

$$\forall i \in 0 \cup Ar, \forall j \in Ar, j \neq i, \forall k \in K$$

Equation 7 defines the time for the completion of debris removal in the area j, when it is done immediately after the area i by the team k.

$$8. FT_{r_i}^k \geq 0 \quad \forall i \in Ar, \forall k \in K$$

According to Equation 8, the time to complete the debris removal operation in the area i is non-negative.

$$9. \sum_{o \in 0 \cup Ac, o \neq p} \sum_{l \in L} Xc_{op}^l = 1 \quad \forall p \in Ac$$

According to Equation 9, each area only be served can by one waste collection/transportation team.

$$10. \sum_{p \in 0 \cup Ac, p \neq o} Xc_{op}^l = \sum_{p \in 0 \cup Ac, p \neq o} Xc_{po}^l \quad \forall o \in Ac, \forall l \in L$$

According to Equation 10, after completing the operation in each area, the team l moves to the next area for waste collection/transportation.

$$11. \sum_{p \in Ac, p \neq o} Xc_{op}^l \leq 1 \quad \forall o \in 0, \forall l \in L$$

According to Equation 11, the waste collection/transportation team l can leave the depot at most once.

$$12. \sum_{o \in Ac, o \neq p} Xc_{op}^l \leq 1 \quad \forall p \in 0, \forall l \in L$$

According to Equation 12, the waste collection/transportation team l can enter the depot at most once.

$$13. \sum_{o \in 0 \cup Ac} Xc_{op}^l = Zc_p^l \quad \forall p \in Ac, \forall l \in L$$

Equation 13 defines the assignment of the waste collection/transportation team l to the area p .

$$14. FTc_p^l + (M \cdot (1 - Xc_{op}^l)) \geq (FTc_o^l + Dc_{op}^l + \sum_{r \in At} Pcr_p^l + \sum_{s \in As} Pcs_p^l) \cdot Zc_p^l$$

$$\forall o \in 0, \forall p \in Ac, p \neq 0, \forall l \in L$$

$$15. FTc_p^l + (M \cdot (1 - Xc_{op}^l)) \geq (FTc_o^l + (\sum_{r \in At} (UR_{op}^l \cdot Dcr_o^l) + \sum_{r \in At} Pcr_p^l + \sum_{s \in As} (US_{op}^l \cdot Dcs_o^l) + \sum_{s \in As} Pcs_p^l)) \cdot Zc_p^l$$

$$\forall o \in Ac, \forall p \in Ac, p \neq 0, \forall l \in L$$

Equations 14 and 15 define the time for the completion of waste collection/transportation in the area p , when it is done immediately after the area o by the team l .

$$16. FTc_o^l \geq 0 \quad \forall o \in Ac, \forall l \in L$$

According to Equation 16, the time to complete the waste collection/transportation operation in the area o is non-negative.

$$17. Pcr_o^l = ((LT^l + (Dcr_o^l \cdot 2) + UT^l) \cdot (NTS_o^l - 1)) + (LT^l + Dcr_o^l + UT^l) \cdot Xcr_o^l$$

$$\forall o \in Ac, \forall r \in At, \forall l \in L$$

Equation 17 defines the time taken to collect and transport waste from the area o , which is transported by the team l to the train station r .

$$18. Pcs_o^l = ((LT^l + (Dcs_o^l \cdot 2) + UT^l) \cdot (NTS_o^l - 1)) + (LT^l + Dcs_o^l + UT^l) \cdot Xcs_o^l$$

$$\forall o \in Ac, \forall s \in As, \forall l \in L$$

Equation 18 defines the time taken to collect and transport waste from the area o , which is transported by the team l to the TDWMS s .

$$19. \sum_{r \in At} \sum_{l \in L} Xcr_o^l + \sum_{s \in As} \sum_{l \in L} Xcs_o^l = 1$$

$$\forall o \in Ac$$

$$20. \sum_{p \in 0 \cup Ac, p \neq 0} Xc_{op}^l = \sum_{r \in At} Xcr_o^l + \sum_{s \in As} Xcs_o^l$$

$$\forall o \in Ac, \forall l \in L$$

According to Equations 19 and 20, the waste from the area o is transported directly to the train station or to a TDWMS.

$$21. NTS_o^l \geq (WV_o / CCAP^l) \cdot Zc_o^l \quad \forall o \in Ac, \forall l \in L$$

$$22. NTS_o^l \leq ((WV_o / CCAP^l) \cdot Zc_o^l) + 1 \quad \forall o \in Ac, \forall l \in L$$

$$23. NTS_o^l \cdot NTS_o^l = 0 \quad \forall o \in Ac, \forall l \in L, \forall l' \in L, l' \neq l$$

Equations 21, 22, and 23 define the number of transport services from the area o by the team l for the wastes that should be transported.

$$24. Zr_j^k \cdot Zc_p^l = Q_j^k$$

$$\forall j \in (Ar \cap Ac), \forall p \in (Ac \cap Ar), p = j, \forall k \in K, \forall l \in L$$

$$25. FTc_p^l - (\sum_{r \in At} Pcr_p^l + \sum_{s \in As} Pcs_p^l) \cdot FTTr_j^k \cdot Q_j^k \geq 0$$

$$\forall j \in (Ar \cap Ac), \forall p \in (Ac \cap Ar), p = j, \forall k \in K, \forall l \in L$$

Equations 24 and 25 show that waste collection/transportation in the area j takes place after the completion of debris removal.

$$26. UR_{rp}^l = \sum_{o \in Ac, o \neq p} Xc_{op}^l \cdot Xcr_{or}^l$$

$$\forall o \in Ac, \forall p \in 0 \cup Ac, p \neq 0, \forall r \in At, \forall l \in L$$

According to Equation 26, the team l , after transporting the waste to the train station r , goes to the area p .

$$27. US_{sp}^l = \sum_{o \in Ac, o \neq p} Xc_{op}^l \cdot Xcs_{os}^l$$

$$\forall o \in Ac, \forall p \in 0 \cup Ac, p \neq 0, \forall s \in As, \forall l \in L$$

According to Equation 27, the team l , after transporting the waste to the TDWMS s , goes to the area p .

$$28. \sum_{s \in As} Y_{ors} = \sum_{l \in L} Xcr_{or}^l \quad \forall o \in Ac, \forall r \in At$$

According to Equation 28, if a team transports waste from the area o to the train station r , it should be transported from the train station to a TDWMS.

$$29. ALR_r = \min((\sum_{o \in Ac} \sum_{l \in L} Xcr_{or}^l), 1) \quad \forall r \in At$$



Equation 29 determines whether the train station r is used or not.

$$30. ALS = \min(\sum_{o \in Ac} \sum_{r \in At} Y_{ors}, 1) \quad \forall s \in As$$

Equation 30 determines whether the TDWMS s is constructed or not.

Risk assessment and prioritization

In this study, the AHP was used to assess and prioritize the risk level of affected areas after the disaster. The AHP is one of the well-known and reliable methods in the field of multi-criteria decision making, developed by Thomas Saaty in the 1970s. The AHP model designed in this study (Figure 3) consists of three levels: Goal (as the first level, it includes the risk assessment and prioritization of the affected areas post-disaster), criteria (as the second level, it includes five key criteria: life risk, environmental pollution, psychological impacts, economic disruption, and risks from disaster waste), and alternatives (as the third level, it includes four affected areas as evaluation options).

Risk criteria

The five risk criteria (life risk, environmental pollution, psychological impacts, economic disruption, and risks from disaster waste), were selected after a comprehensive review of 20 related studies on natural disaster waste management (Table 1). They were selected to cover human, environmental, social, economic, and operational dimensions, ensuring that the prioritization of risks is comprehensive and based on scientific evidence. The hierarchical levels using the AHP method were determined through pairwise comparisons based on Saaty (2008)'s 1-9 scale (Table 2). The pairwise comparison matrix was prepared based on the opinions of 20 experts in the fields of crisis management, environment, safety, local economy from Golestan province, and professors from Mazandaran University of Science and Technology, who were selected via snowball sampling. They had at least 10 years of experience in the related field. To conduct pairwise comparisons of risk criteria, flooded areas in Golestan province (Gorgan city and Aqqala county) were selected as the sample. To aggregate the data, the geometric mean values given by the experts was used. The pairwise comparison matrix is shown in Table 3. Next, the inconsistency rate of each of the comparison matrices was calculated. The value should not be greater than 10% (Saaty, 1980). Then, the matrix was normalized and the final weight of the criteria was obtained by averaging row entries, which is reported in Table 4.

The scenarios for solving the problem

In this study, 7 problems of varying sizes were identified that represent areas requiring debris removal, waste transportation, train stations, TDWMSs, and relief teams; the details are presented in Tables 5 and 6. The scenarios were applied to the flooded rural areas of Gorgan city and Aqqala county. Given that the proposed problem is new, the hypothetical values shown in Table 7 were used to generate its input parameters.

Epsilon constraint method

In this study, seven MOO problems were solved by the epsilon-constraint method. This method is one of the classical and widely used methods in solving MOO problems, in which, to create the Pareto front, one of the objective functions is selected as the main objective function and the other objective functions are included in the model in the form of inequality constraints with a certain threshold limit (ϵ). This method was first introduced by Haimes et al. (1971). The general form of the equation (for two objectives) is as Equation 31:

$$31. \min f_1(x) \text{ Subject to: } f_2(x) \leq \epsilon \quad x \in X$$

Where, f_1 is the main objective function and f_2 is a constraint with a threshold ϵ . The set X includes the feasible space. The value of ϵ is changed in different intervals to obtain different points of the Pareto front.

Results

To solve the problems using the epsilon-constraint method, seven small-sized MOO problems were first designed, and the model size was then gradually increased by increasing the problem size. The goal was to examine the changes in processing time and obtain the Pareto front at different scales, where seven points are examined in each problem. The problems were solved using different values of the epsilon parameter and a set of Pareto efficient points was extracted. The results of each step include the optimal values of the objective functions and feasible points. The results are presented in Tables 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 and 15. The time taken to solve the problems is presented in Table 16 and Figure 4. It should be noted that the problems were solved in Lingo 9.0 software run on a laptop (Intel Core i7-7700HQ processor, 16 GB RAM (2133 MHz), Windows 10). As can be seen in Table 16, the seventh problem had a solution time that tends towards infinity, due to the increase in problem size and being NP-hard.

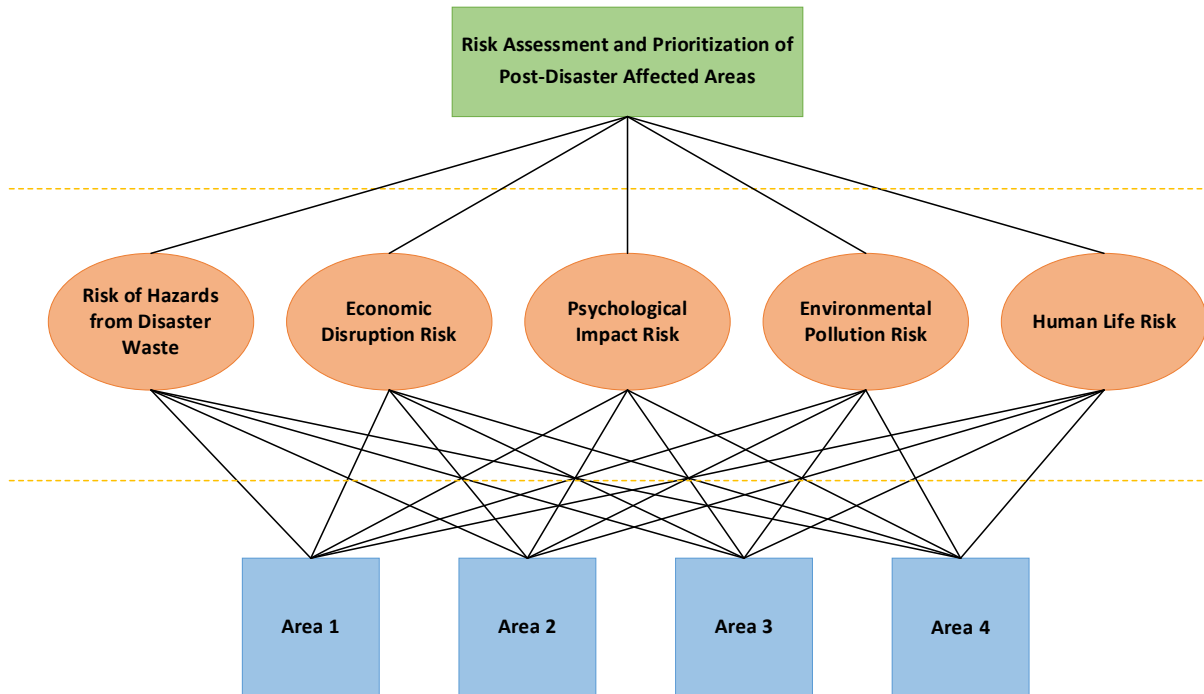


Figure 3. The AHP model of risk assessment and prioritization of the affected areas

Table 1. The risk criteria for the prioritization of the affected areas

Criterion	Justification for Selection and Literature Support	Primary References
Human Life Risk	This criterion focuses on public health, hygiene, and lifesaving considerations, as disaster waste can lead to disease outbreaks, physical injuries, and obstruction of rescue operations. Studies indicate that disaster waste can significantly exacerbate lifethreatening risks, for example by blocking emergency access routes and delaying response activities.	Brown et al. (2011); National Institute of Environmental Research (2012); Nikdoost et al. (2022); United States Environmental Protection Agency (2019); Habib et al. (2022); Ghannad et al. (2021); EM-DAT database (2020)
Environmental Pollution Risk	Disaster waste can lead to soil, water, and air pollution, producing long-term impacts on ecosystems. This criterion is essential for ensuring environmental sustainability and has been widely highlighted in the literature as one of the most significant disaster risks.	Brown et al. (2011); National Institute of Environmental Research (2012); Nikdoost et al. (2022); Babbitt et al. (2019); Boonmee et al. (2018); Xiao et al. (2012); Lorca et al. (2017); Wang et al. (2019); Onan et al. (2015); Jalloul et al. (2022); United States Environmental Protection Agency (2019); Cheng et al. (2022); Habib et al. (2022)
Psychological Impact Risk	Disaster waste can impose stress, anxiety, and psychological burdens on affected communities, particularly during the recovery phase. The literature emphasizes the adverse psychosocial effects that stem from inadequate disaster waste management.	Hu and Sheu (2013); Ghorbanzadeh et al. (2020); Zhang et al. (2019); Jalloul et al. (2022); Habib et al. (2022)
Economic Disruption Risk	Disaster waste can delay reconstruction activities and increase economic costs, such as financial losses and disruptions to local economic functions. This criterion was selected based on empirical data on the economic consequences of disasters.	EM-DAT database (2020); Nikdoost et al. (2022); Ghorbanzadeh et al. (2020); Zhang et al. (2019); Jalloul et al. (2022); Habib et al. (2022)
Risk of Hazards from Disaster Waste	This criterion focuses on operational risks, including exposure to hazardous materials, the potential for secondary disasters, and obstruction of response operations. The literature indicates that disaster waste can create additional hazards that complicate emergency management efforts.	Hu and Shiu (2013); Onan et al. (2015); Jha et al. (2012); Lee et al. (2022); Babbitt et al. (2019); Jalloul et al. (2022); Luther (2010); Ghannad et al. (2021); Habib et al. (2022)

Table 2. Scale for pairwise comparisons of risk criteria

Intensity of Importance	Definition
1	Equal importance
3	Moderate importance
5	Strong importance
7	Very strong importance
9	Extreme importance
2, 4, 6, 8	Intermediate levels

Table 3. The pairwise comparison matrix

Criterion	Human Life Risk	Environmental Pollution Risk	Psychological Impact Risk	Economic Disruption Risk	Risk of Hazards from Disaster Waste
Human Life Risk	1	3.2	5.1	6.5	4.3
Environmental Pollution Risk	0.3125	1	3.6	5.2	2.8
Psychological Impact Risk	0.196	0.278	1	3.4	2.1
Economic Disruption Risk	0.154	0.192	0.294	1	0.62
Risk of Hazards from Disaster Waste	0.232	0.357	0.476	1.61	1

Table 4. The normalized pairwise comparison matrix and the final weight of risk criteria

Criterion	Human Life Risk	Environmental Pollution Risk	Psychological Impact Risk	Economic Disruption Risk	Risk of Hazards from Disaster Waste	Final Weight
Human Life Risk	0.5278	0.6366	0.4871	0.367	0.3974	0.4832
Environmental Pollution Risk	0.165	0.1989	0.3438	0.2936	0.2588	0.252
Psychological Impact Risk	0.1035	0.0553	0.0955	0.192	0.1941	0.1281
Economic Disruption Risk	0.0813	0.0382	0.0281	0.0565	0.0573	0.0523
Risk of Hazards from Disaster Waste	0.1225	0.071	0.0455	0.0909	0.0924	0.0844

Table 5. The multi-objective mathematical model for the research problem

Problem	No. of Areas - Removal And Transportaton	No. of Areas - Removal	No. of Areas - Transportaton	Number of Train Stations	Number of TDWMSs	Number of Waste Removal Teams	No. of Collection / Transportation Teams
1	1	1	1	1	1	2	2
2	2	1	1	1	1	2	2
3	2	2	1	1	1	2	2
4	2	2	2	1	1	2	2
5	2	2	2	2	2	2	2
6	2	2	2	2	2	3	3
7	3	3	3	2	2	3	3

Table 6. The assumed scenarios for solving the research problem

Scenario	No. of Areas - Removal And Transportat	No. of Areas - Removal	No. of Areas - Transportat	Train Station	TDWMSs	Crisis Management Center	Number of Waste Removal Teams	No. of Collection / Transportation Teams
Problem 1	Amir Abad	Karim Abad	Qaleh Mahmoud	Gorgan Station	Temporary Site 1	Gorgan Crisis Management Center	2	2
Problem 2	Amir Abad, Mamayi	Karim Abad	Qaleh Mahmoud	Gorgan Station	Temporary Site 1	Gorgan Crisis Management Center	2	2
Problem 3	Amir Abad, Mamayi	Karim Abad, Shir Ali Abad	Qad, Mamoud	Gorgan Station	Temporary Site 1	Gorgan Crisis Management Center	2	2
Problem 4	Amir Abad, Mamayi	Karim Abad, Shir Ali Abad	Qaleh Mahmoud, Zangiyan	Gorgan Station	Temporary Site 1	Gorgan Crisis Management Center	2	2
Problem 5	Amir Abad, Mamayi	Karim Abad, Shir Ali Abad	Qaleh Mahmoud, Zangiyan	Gorgan Station, Yampi Station	Temporary Site 1, Temporary Site 2	Gorgan Crisis Management Center	2	2
Problem 6	Amir Abad, Mamayi	Karim Abad, Shir Ali Abad	Qaleh Mahmoud, Zangiyan	Gorgan Station, Yampi Station	Temporary Site 1, Temporary Site 2	Gorgan Crisis Management Center	3	3
Problem 7	Amir Abad, Mamayi, Ghorban Abad	Karim Abad, Shir Ali Abad, Yampi	Qaleh Mahmoud, Zangiyan, Shah Tappeh	Gorgan Station, Yampi Station	Temporary Site 1, Temporary Site 2	Gorgan Crisis Management Center	3	3

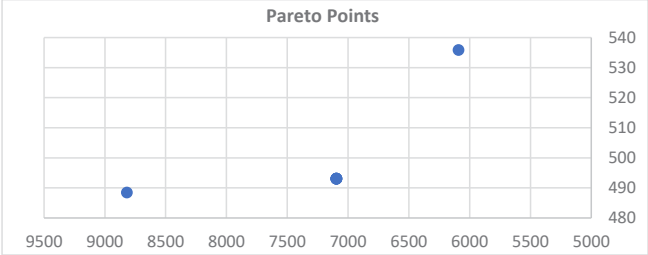
GCMC= Gorgan Crisis Management Center

Table 7. Probability distribution for generating problem input parameters

Input	Unit	U (a,b)
Pr_j^k	Minute	U (200,1000)
Dr_{ij}^k	Minute	U (10,30)
DC_{OP}^l	Minute	U (5,15)
DCr_{Or}^l	Minute	U (5,15)
Dsc_{OS}^l	Minute	U (5,15)
WV_p	Ton	U (1000,10000)
$CCAP^l$	Ton	U (10,20)
LT^l	Minute	U (10,15)
UT^l	Minute	U (5,10)
$costr^k$	Billion IRR	U (0.1,0.2)
$costce^l$	Billion IRR	U (0.15,0.25)
$costcf^l$	Billion IRR	U (0.25,0.35)
$costt_{rs}$	Billion IRR	U (0.0001,0.0002)
$coste_r$	Billion IRR	U (10,30)
$costs_s$	Billion IRR	U (40,100)

Table 8. Solving the first MOO problem

Problem 1	Main Objective Function (First Objective Function)	Value of the First Objective Function	Value of the Second Objective Function					
	Solution Based on the First Objective Function	6091.6	535.86					
	Solution Based on the Second Objective Function	8818.8	488.48					
	Max	8818.8	535.86					
	Min	6091.6	488.48					
The number of evaluated points is seven (7).								
ϵ	488.48	496.376667	504.273333	512.17	520.066667	527.963333	535.86	
Value of the First Objective Function	8818.8	7095.6	7095.6	7095.6	7095.6	7095.6	7095.6	6091.6
Value of the Second Objective Function	488.48	493.12	493.12	493.12	493.12	493.12	493.12	535.86



The sensitivity analysis of the problems was also conducted to compare road and multimodal transportation systems. The Pareto values of the objective functions in different scenarios for two modes of road and multimodal transport are presented in Tables 17, 18, 19, 20, 21 and 22.

To analyze the impact of geographical distance, Problem 4 was investigated across 10 scenarios with varying traveling time between affected areas and TDWMSs. These times range from 1 to 30 minutes and were arranged in

descending order. The basic information for these ten scenarios is presented in Table 23. Problem 4 was solved for each scenario and each objective function separately to determine which waste transport system should be selected for each objective in each area. The results obtained for the two objective functions are presented in Tables 24 and 25. These results showed that for short distances, the road transport system is more efficient. As the distance increases, the multimodal transport performs better.

Table 9. Solving the second MOO problem

Problem 2	Main Objective Function (First Objective Function)	Value of the First Objective Function	Value of the Second Objective Function					
	Solution Based on the First Objective Function	8655.4	899.2					
	Solution Based on the Second Objective Function	15347.4	789.1					
	Max	15347.4	899.2					
	Min	8655.4	789.1					
The number of evaluated points is seven (7).								
ϵ	789.1	807.45	825.8	844.15	862.5	880.85	899.2	
Value of the First Objective Function	15347.4	10173.8	10173.8	8832.6	8832.6	8832.6	8832.6	8655.4
Value of the Second Objective Function	789.1	793.8	793.8	836.86	836.86	836.86	836.86	899.2

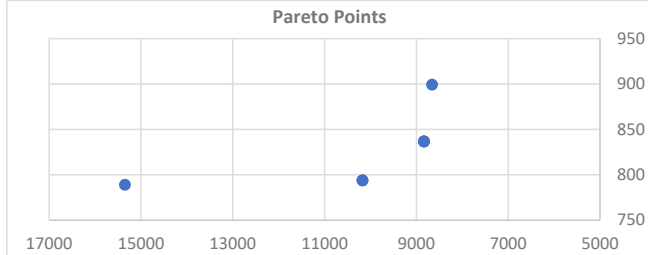
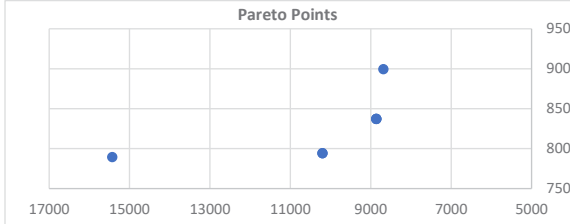


Table 10. Solving the third MOO problem

	Main Objective Function (First Objective Function)	Value of the First Objective Function	Value of the Second Objective Function					
Problem 3	Solution Based on the First Objective Function	8683.4	899.5					
	Solution Based on the Second Objective Function	15429.4	789.3					
	Max	15429.4	899.5					
	Min	8683.4	789.3					
	The number of evaluated points is seven (7).							
	ϵ	789.3	807.666667	826.033333	844.4	862.766667	881.133333	899.5
	Value of the First Objective Function	15429.4	10201.8	10201.8	8860.6	8860.6	8860.6	8683.4
	Value of the Second Objective Function	789.3	794.1	794.1	837.16	837.16	837.16	899.5



Discussion

The findings of this study indicated that the proposed MOO model was able to simulate and analyze various dimensions of the post-disaster waste cleanup process with appropriate accuracy. In order to evaluate the performance of the model, seven sample problems with different sizes were designed and solved using the epsilon-constraint method. The results from these scenarios showed that

increasing the problem size (in terms of the number of areas requiring debris removal and waste transportation, the number of TDWMSs, train stations, and operational teams) leads to exponential growth in computational complexity and processing time. For example, in the first problem, which had the smallest size, the model achieved the globally optimal solution in just 1 second, while in the seventh problem, which had a larger size, only a locally optimal solution was achieved, despite spending

Table 11. Solving the fourth MOO problem

	Main Objective Function (First Objective Function)	Value of the First Objective Function	Value of the Second Objective Function					
Problem 4	Solution Based on the First Objective Function	8106.6	961.94					
	Solution Based on the Second Objective Function	11585.2	883.04					
	Max	11585.2	961.94					
	Min	8106.6	883.04					
	The number of evaluated points is seven (7).							
	ϵ	883.04	896.19	909.34	922.49	935.64	948.79	961.94
	Value of the First Objective Function	11585.2	10239.2	10239.2	8957.1	8784.2	8784.2	8106.6
	Value of the Second Objective Function	883.04	887.8	887.8	919.12	930.7	930.7	961.94

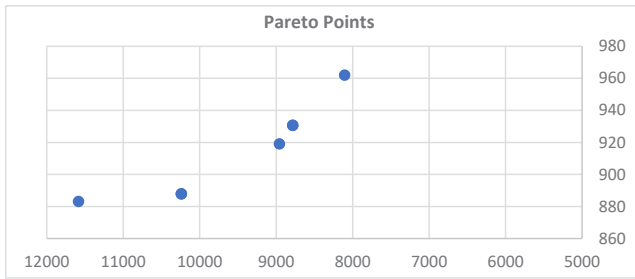
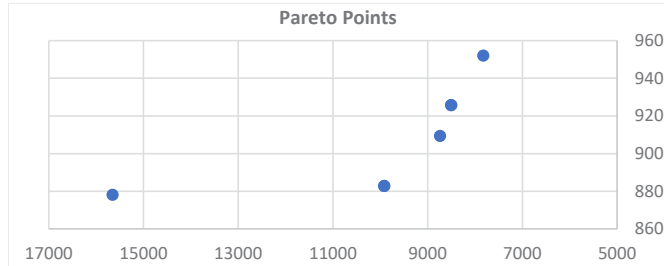


Table 12. Solving the fifth problem using the epsilon constraint method

Problem 5	Main Objective Function (First Objective Function)	Value of the First Objective Function	Value of the Second Objective Function					
	Solution Based on the First Objective Function	7827.1	951.96					
	Solution Based on the Second Objective Function	15653.1	878.05					
	Max	15653.1	951.96					
	Min	7827.1	878.05					
The number of evaluated points is seven (7).								
ϵ	878.05	890.368333	902.686667	915.005	927.323333	939.641667	951.96	
Value of the First Objective Function	15653.1	9918.5	9918.5	8737.8	8504.3	8504.3	7827.1	
Value of the Second Objective Function	878.05	882.77	882.77	909.34	925.71	925.71	951.96	



more than 10 hours (36,000 seconds) of computational time. This finding clearly confirms the NP-Hard nature of the problem and the limitations of exact methods on large scales.

Examining the Pareto fronts in all problems showed that there was a trade-off between the two main goals of the model, i.e., reducing the time to complete the operation (taking into account the risk level of the areas) and re-

ducing the total costs, including transportation, equipping train stations, and constructing TDWMSs. In other words, choosing solutions that minimize operation time will increase costs, whereas decisions that are less costly will require more time to complete the operation. This indicates that decision makers have to choose an equilibrium point on the Pareto front based on policies and operational priorities.

Table 13. Solving the fifth MOO problem

Problem 6	Main Objective Function (First Objective Function)	Value of the First Objective Function	Value of the Second Objective Function					
	Solution Based on the First Objective Function	7130.302	1110.04					
	Solution Based on the Second Objective Function	15653.1	878.05					
	Max	15653.1	1110.04					
	Min	7130.302	878.05					
The number of evaluated points is seven (7).								
ϵ	878.05	916.715	955.38	994.045	1032.71	1071.375	1110.04	
Value of the First Objective Function	15653.1	8837.4	8388.1	7439	7342.6	7130.302	7130.302	
Value of the Second Objective Function	878.05	914.44	950.26	965.24	1017.58	1060.04	1110.04	

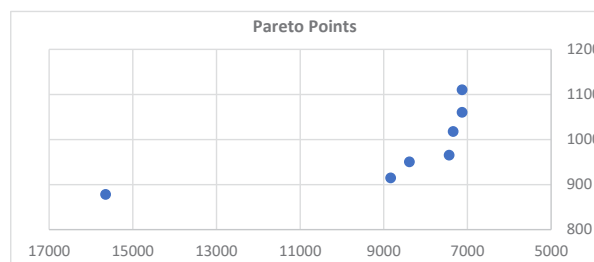
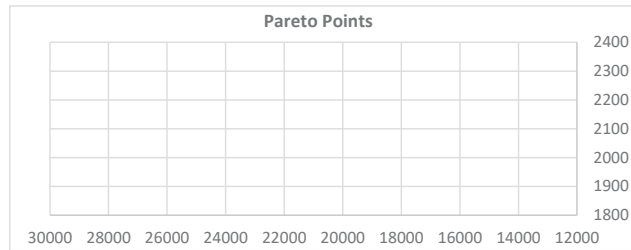


Table 14. Solving the sixth MOO problem

	Main Objective Function (First Objective Function)	Value of the First Objective Function	Value of the Second Objective Function
Problem 7	Solution Based on the First Objective Function	13416.3	2256.74
	Solution Based on the Second Objective Function	28356.2	1955.06
	Max	28356.2	2256.74
	Min	13416.3	1955.06
	The number of evaluated points is seven (7).		
Note:	Due to the computational time of approximately 36,000 seconds, the global optimal solution was not obtained.		



A comparative analysis of two road and multimodal (truck/train) transportation systems showed that when the travel time between the affected areas and TDWMSs is long, the multimodal transport performs much better. On average, multimodal transport reduced total operating time by 30.1% and total costs by 11.3% compared with road transport. This difference was especially noticeable in problems with longer travel time, such that at travel times greater than 20 minutes, road transport lost its efficiency and the model automatically selected multimodal solutions. In contrast, when the travel time between the affected areas and the TDWMSs was shorter (as in problems 1 and 2), road transport remained an optimal and efficient option.

The analysis of the model’s sensitivity to regional risk showed that areas with higher risk (especially in terms of life risk and environmental pollution) were prioritized for the allocation of debris removal and waste transportation teams. This indicates that the AHP used for the risk prioritization

was able to guide the model’s decision-making with appropriate accuracy. Specifically, in all scenarios, areas with higher risk scores were covered by operations earlier than other areas, which indicates that the model results are consistent with the operational logic of crisis management.

Overall, the findings of this study revealed that as problem size increases, solution time grows exponentially, underscoring the need for metaheuristic methods at real-world scales. Additionally, there was a trade-off between time and cost reduction goals, and the choice of the final solution depends on the decision-makers’ priorities. For long distances, the multimodal transport performed better, while for short distances, road-only transport was more efficient. The use of the AHP-based risk assessment approach improves the accuracy and effectiveness of team allocation and demonstrates the adaptability of the proposed model to real-world conditions in post-disaster operations.

Table 15. Solving the seventh MOO problem

	CPU Time (s)	State
Problem 1	1	Global Opt
Problem 2	7	Global Opt
Problem 3	35	Global Opt
Problem 4	110	Global Opt
Problem 5	156	Global Opt
Problem 6	734	Global Opt
Problem 7	36000	Local Opt



Table 16. The time taken to solve MOO problems

		Pareto Points							
Problem 1	Multimodal Transportation	Value of the First Objective Function	8818.8	7095.6	7095.6	7095.6	7095.6	7095.6	6091.6
		Value of the Second Objective Function	488.5	493.1	493.1	493.1	493.1	493.1	535.9
	Road Transportation	Value of the First Objective Function	9202.0	9202.0	9202.0	9202.0	9202.0	9202.0	8650.0
		Value of the Second Objective Function	591.2	591.2	591.2	591.2	591.2	591.2	595.6
	Comparison of the Two Transportation Models	Comparison of the First Objective Function	4.3%	29.7%	29.7%	29.7%	29.7%	29.7%	42.0%
		Comparison of the Second Objective Function	21.0%	19.9%	19.9%	19.9%	19.9%	19.9%	11.1%

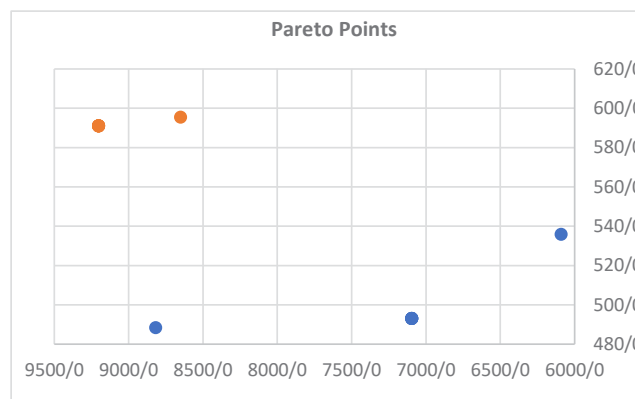


Table 17. Pareto points of two transportation systems (road and multimodal) in problem 1

		Pareto Points							
Problem 2	Multimodal Transportation	Value of the First Objective Function	15347.4	10173.8	10173.8	8832.6	8832.6	8832.6	8655.4
		Value of the Second Objective Function	789.1	793.8	793.8	836.9	836.9	836.9	899.2
	Road Transportation	Value of the First Objective Function	16291.6	13371.0	13371.0	11710.2	11710.2	11710.2	10893.0
		Value of the Second Objective Function	848.8	853.3	853.3	896.4	896.4	896.4	958.6
	Comparison of the Two Transportation Models	Comparison of the First Objective Function	6.2%	31.4%	31.4%	32.6%	32.6%	32.6%	25.9%
		Comparison of the Second Objective Function	7.6%	7.5%	7.5%	7.1%	7.1%	7.1%	6.6%

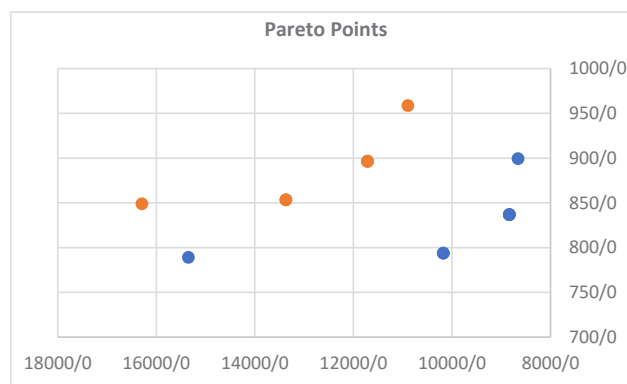


Table 18. Pareto points of two transportation systems (road and multimodal) in problem 2

		Pareto Points							
Problem 3	Multimodal Transportation	Value of the First Objective Function	15429.4	10201.8	10201.8	8860.6	8860.6	8860.6	8683.4
		Value of the Second Objective Function	789.3	794.1	794.1	837.2	837.2	837.2	899.5
	Road Transportation	Value of the First Objective Function	18703.0	13399.0	13399.0	11738.2	11738.2	11738.2	10921.0
		Value of the Second Objective Function	849.0	853.6	853.6	896.7	896.7	896.7	958.9
	Comparison of the Two Transportation Models	Comparison of the First Objective Function	21.2%	31.3%	31.3%	32.5%	32.5%	32.5%	25.8%
		Comparison of the Second Objective Function	7.6%	7.5%	7.5%	7.1%	7.1%	7.1%	6.6%

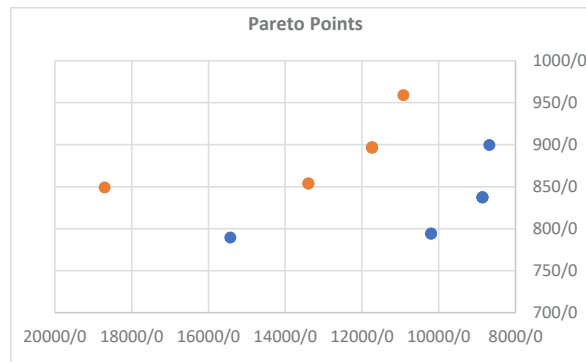


Table 19. Pareto points of two transportation systems (road and multimodal) in problem 3

		Pareto Points							
Problem 4	Multimodal Transportation	Value of the First Objective Function	11585.2	10239.2	10239.2	8957.1	8784.2	8784.2	8106.6
		Value of the Second Objective Function	883.0	887.8	887.8	919.1	930.7	930.7	961.9
	Road Transportation	Value of the First Objective Function	18352.2	13557.4	11852.2	11702.2	10703.4	10703.4	10688.2
		Value of the Second Objective Function	945.8	951.3	983.5	993.5	1026.2	1026.2	1088.6
	Comparison of the Two Transportation Models	Comparison of the First Objective Function	58.4%	32.4%	15.8%	30.6%	21.8%	21.8%	31.8%
		Comparison of the Second Objective Function	7.1%	7.2%	10.8%	8.1%	10.3%	10.3%	13.2%

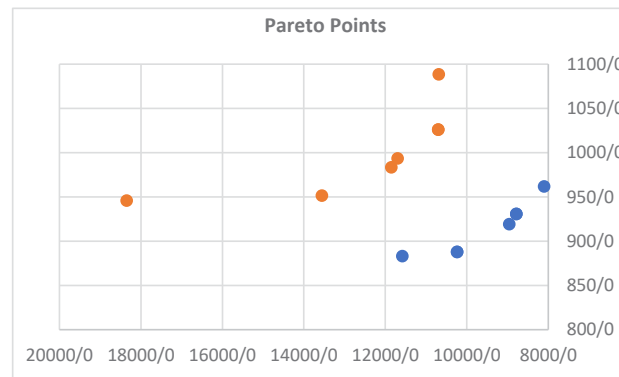


Table 20. Pareto points of two transportation systems (road and multimodal) in problem 4

		Pareto Points							
Problem 5	Multimodal Transportation	Value of the First Objective Function	15653.1	9918.5	9918.5	8737.8	8504.3	8504.3	7827.1
		Value of the Second Objective Function	878.1	882.8	882.8	909.3	925.7	925.7	952.0
	Road Transportation	Value of the First Objective Function	15222.8	14084.8	12362.2	12221.7	11169.6	10970.7	10689.9
		Value of the Second Objective Function	979.2	983.8	1018.5	1039.9	1074.3	1099.4	1138.6
	Comparison of the Two Transportation Models	Comparison of the First Objective Function	-2.7%	42.0%	24.6%	39.9%	31.3%	29.0%	36.6%
		Comparison of the Second Objective Function	11.5%	11.4%	15.4%	14.4%	16.1%	18.8%	19.6%

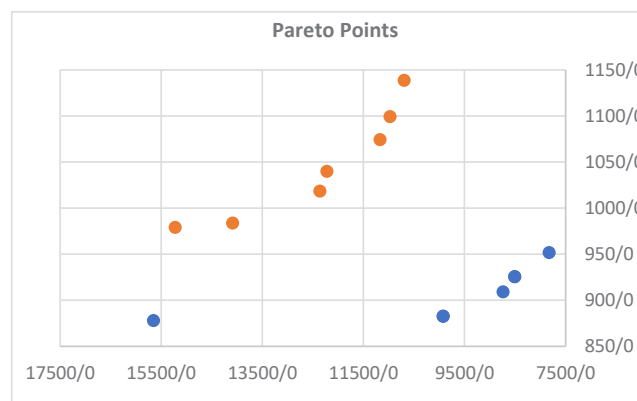


Table 21. Pareto points of two transportation systems (road and multimodal) in problem 5

		Pareto Points							
Problem 6	Multimodal Transportation	Value of the First Objective Function	15653.1	8837.4	8388.1	7439.0	7342.6	7130.3	7130.3
		Value of the Second Objective Function	878.1	914.4	950.3	965.2	1017.6	1060.0	1110.0
	Road Transportation	Value of the First Objective Function	16817.6	13066.0	12123.3	10682.1	10160.0	10060.5	9528.5
		Value of the Second Objective Function	979.2	1015.4	1042.9	1077.6	1116.7	1141.8	1197.6
	Comparison of the Two Transportation Models	Comparison of the First Objective Function	7.4%	47.8%	44.5%	43.6%	38.4%	41.1%	33.6%
		Comparison of the Second Objective Function	11.5%	11.0%	9.8%	11.6%	9.7%	7.7%	7.9%

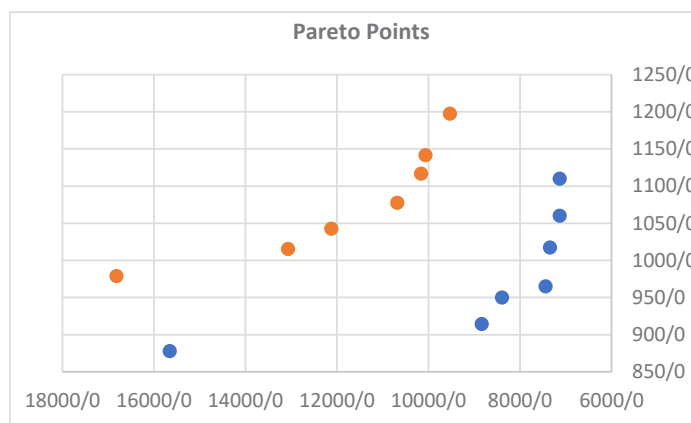


Table 22. Pareto points of two transportation systems (road and multimodal) in [problem 6](#)

	Areas Requiring Waste Removal	Waste Volume of the Area (ton)	Distance to the train station	Distance to the Temporary Waste Management Site									
				Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5	Scenario 6	Scenario 7	Scenario 8	Scenario 9	Scenario 10
Problem 4	Area 1	2000	14	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Area 2	4000	2	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
	Area 3	3000	14	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
	Area 4	1000	10	4	7	9	11	14	16	18	20	23	25

Conclusion

By the proposed MOO model for post-disaster waste cleanup, we can achieve a relative balance between two conflicting goals: Reducing the time to complete the operations and minimizing total operational costs. At the same time, by guiding the allocation of cleanup teams based on the risk level, it brings the decision-making process closer to the field realities of post-disaster operations. This

indicates that the model is not only theoretically valid but also practically applicable and usable in real disaster situations. The choice between road and road/rail transports depend on the geographical distance between the affected areas and final disposal sites. When distances are short, road transport is more efficient, enabling operations to be completed in less time and at lower cost. In contrast, as distances increase, combined truck-train transportation offers a significant advantage, resulting in simultaneous

Table 23. The scenarios of problem 4 for assessing the impact of geographical distance (travel time)

	Areas Requiring Waste Removal	Waste Volume of the Area (ton)	Distance to the train station	Waste Transportation Model Strategy (Solution Based on the Second Objective Function)										
				Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5	Scenario 6	Scenario 7	Scenario 8	Scenario 9	Scenario 10	
Problem 4	Area 1	2000	14	Road	Road	Road	Road	Road	Road	Road	Multi-modal	Road	Road	Multi-modal
	Area 2	4000	2	Road	Road	Road	Multi-modal	Multi-modal	Multi-modal	Multi-modal	Multi-modal	Multi-modal	Multi-modal	Multi-modal
	Area 3	3000	14	Road	Road	Road	Road	Multi-modal	Multi-modal	Multi-modal	Multi-modal	Multi-modal	Multi-modal	Multi-modal
	Area 4	1000	10	Road	Road	Road	Multi-modal	Multi-modal	Multi-modal	Road	Multi-modal	Multi-modal	Multi-modal	Multi-modal

Table 24. Results of solving ten scenarios for problem 4 using the first objective function

	Areas Requiring Waste Removal	Waste Volume of the Area (ton)	Distance to the train station	Waste Transportation Model Strategy (Solution Based on the Second Objective Function)										
				Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5	Scenario 6	Scenario 7	Scenario 8	Scenario 9	Scenario 10	
Problem 4	Area 1	2000	14	Road	Road	Road	Road	Road	Road	Road	Multi-modal	Road	Road	Multi-modal
	Area 2	4000	2	Road	Road	Road	Multi-modal	Multi-modal	Multi-modal	Multi-modal	Multi-modal	Multi-modal	Multi-modal	Multi-modal
	Area 3	3000	14	Road	Road	Road	Road	Multi-modal	Multi-modal	Multi-modal	Multi-modal	Multi-modal	Multi-modal	Multi-modal
	Area 4	1000	10	Road	Road	Road	Multi-modal	Multi-modal	Multi-modal	Road	Multi-modal	Multi-modal	Multi-modal	Multi-modal

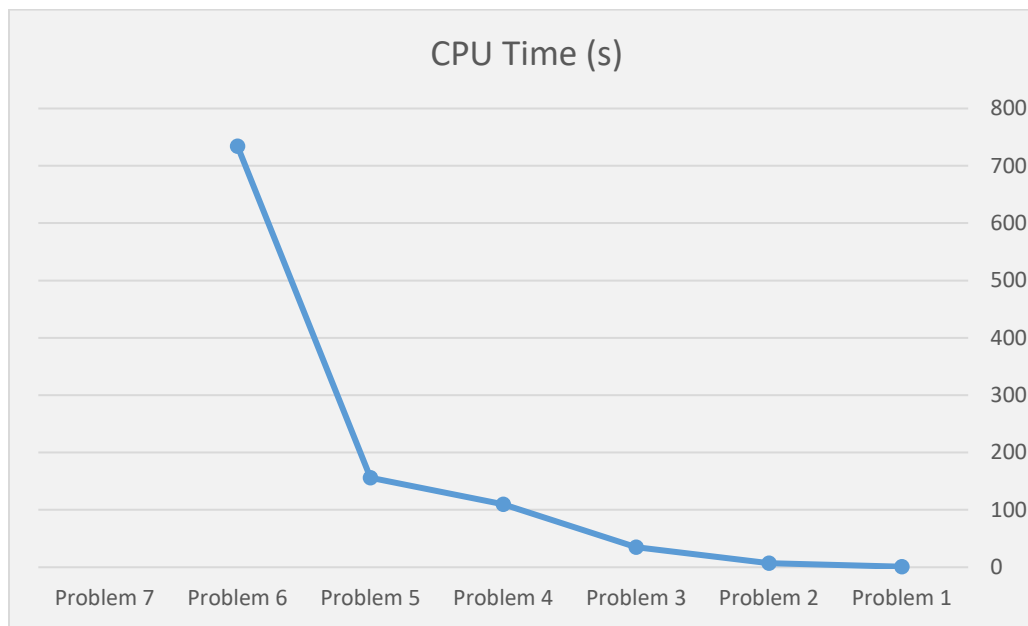


Figure 4. Comparison of the CPU times for solving seven MOO problems

reductions in cost and operating time. Numerical results showed that in such conditions, using a multimodal approach leads to a reduction by about 30% in total operational time and a reduction by more than 11% in operational costs, confirming the importance of designing resilient and flexible transportation networks.

According to the results, the AHP method optimized the allocation of operational teams, enabling waste cleanup operations to cover higher-risk areas sooner. This shows that combining mathematical optimization methods with multi-criteria decision-making approaches can be a powerful tool for crisis managers and significantly increase the effectiveness of post-disaster interventions.

From a computational perspective, the MOO model was well-suited to small-scale problems, and globally optimal solutions were obtained in a very short time. However, as the problem size increased, the solution time increased exponentially, and in some cases, only locally optimal solutions were obtained, even after several hours. This finding indicates that, although the MOO model is conceptually and structurally powerful, for large-scale problems it requires the development and application of metaheuristic methods and advanced algorithms to achieve high-quality solutions within a reasonable time. From an applied perspective, the model can enhance the resilience of post-disaster logistics networks, improve resource allocation, and mitigate the negative environmental and social impacts of inefficient waste management.

The results of this study provide a comprehensive and practical framework for post-disaster waste management that can help managers and policymakers select optimal strategies. By simultaneously considering time, cost, and risk, this framework enables decision-makers to select solutions appropriate to real-world conditions and operational constraints. For future studies, it is recommended that the optimization model be field validated in the context of real-world scenarios while simultaneously incorporating uncertainties about infrastructure availability and transportation capacities. The integration of metaheuristic algorithms and AI can pave the way for achieving high-quality solutions for problems on a large scale. This can make the proposed model not only theoretically richer but also a practical, efficient tool for disaster management and for reducing its destructive effects on vulnerable communities.

Ethical Considerations

Compliance with ethical guidelines

This study did not involve human participants or animals; therefore, no specific ethical approval or ethical guidelines were required.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Authors' contributions

All authors contributed equally to the conception and design of the study, data collection and analysis, interpretation of the results, and drafting of the manuscript. Each author approved the final version of the manuscript for submission.

Conflicts of interest

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments

The authors would like to express sincere appreciation to all professors of Mazandaran University of Science and Technology for their valuable support.

This Page Intentionally Left Blank



مقاله پژوهشی

مدل بهینه‌سازی چندهدفه برای پاکسازی پسماند بلایای طبیعی با رویکرد حمل‌ونقل ترکیبی

حمیدرضا درویشی^۱، *جواد رضائیان^۱، بابک شیرازی^۱، ایرج مهدی^۱

۱. گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران.

Use your device to scan and read the article online

**Citation** Darvishi, H., Rezaeian, J., Shirazi, B., & Mahdavi, I. (2026). A Multi-Objective Optimization Model for Post-Natural Disaster Waste Clean-Up with Multimodal Transport. *Disaster Prevention and Management Knowledge*, 15(4):462-509. <https://doi.org/10.32598/DMKP.15.4.218.2>**doi** <https://doi.org/10.32598/DMKP.15.4.218.2>

حکیده

زمینه و هدف: وقوع بلایای طبیعی به تولید حجم عظیمی از پسماند منجر می‌شود که پیامدهای جدی زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی دارد. مدیریت ناکارآمد این پسماندها می‌تواند روند بازسازی را با تأخیر و هزینه‌های اضافی همراه سازد. هدف این پژوهش توسعه یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه برای پاکسازی پسماندهای ناشی از بلایا با رویکرد حمل‌ونقل ترکیبی (کامیون-قطار) و اولویت‌بندی ریسک مناطق آسیب‌دیده است.

روش: در گام نخست، مناطق آسیب‌دیده با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) براساس پنج شاخص ریسک رتبه‌بندی شدند. سپس مدل پیشنهادی با بهره‌گیری از روش اپسیلون-محدودیت در قالب هفت مسئله نمونه با ابعاد مختلف پیاده‌سازی گردید. در این مدل، حداقل‌سازی زمان اتمام عملیات آواربرداری و حمل پسماند و کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل و تجهیز زیرساخت‌ها به‌عنوان توابع هدف در نظر گرفته شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد با افزایش ابعاد مسئله، زمان حل به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته و مدل در مقیاس‌های بزرگ‌تر ماهیت NP-Hard پیدا می‌کند. نقاط پارتو به‌دست‌آمده، تضاد میان اهداف کاهش زمان و کاهش هزینه را تأیید و لزوم انتخاب گزینه‌های سازگار با سیاست‌های عملیاتی را نمایان کرد. همچنین مشخص شد سیستم حمل‌ونقل ترکیبی نسبت به حالت صرفاً جاده‌ای، به‌طور میانگین موجب ۳۰/۱ درصد کاهش در زمان اتمام عملیات و ۱۱/۳ درصد کاهش در هزینه کل شده است. تحلیل بیشتر نشان داد در فواصل کوتاه، حمل‌ونقل جاده‌ای عملکرد بهتری دارد اما با افزایش فاصله، برتری سیستم ترکیبی به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. نتایج اولویت‌بندی ریسک هم نشان داد تخصیص منابع به مناطق پرخطر به‌صورت هدفمند انجام می‌شود.

نتیجه‌گیری: یافته‌های پژوهش بیانگر آن است که مدل ارائه‌شده می‌تواند به‌عنوان ابزاری کاربردی برای مدیران بحران در برنامه‌ریزی پاکسازی پسماند پس‌ابحران مورد استفاده قرار گیرد. به‌کارگیری حمل‌ونقل ترکیبی همراه با رویکرد چندمعیاره، علاوه‌بر ارتقای کارایی و کیفیت تصمیم‌گیری، امکان تخصیص بهینه منابع به مناطق پرریسک را نیز فراهم می‌سازد.

کلیدواژه‌ها: پاکسازی پسماند بلایای طبیعی، سایت موقت مدیریت پسماند بلایا، حمل‌ونقل ترکیبی، روش اپسیلون-محدودیت

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۰۱ مرداد ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش: ۲۱ مهر ۱۴۰۴

تاریخ انتشار: ۰۹ مهر ۱۴۰۴

* نویسنده مسئول:

دکتر جواد رضائیان

نشانی: بابل، دانشگاه علوم و فنون مازندران، دانشکده مهندسی صنایع، گروه مهندسی صنایع.

تلفن: ۹۲۰ ۱۳۴۸ ۹۲۰ (۹۲۰) +۹۸

پست الکترونیکی: j.rezaeian@ustmb.ac.ir

Copyright © 2026 The Author(s);

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY-NC): [https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode\(en\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode/en), which permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and is not used for commercial purposes.



مقدمه

به منظور تسهیل فرآیند پاکسازی، سازمان‌های مرجع از جمله سازمان مدیریت بحران فدرال، ایجاد و بهره‌برداری از سایت‌های موقت مدیریت پسماند^۲ را به عنوان راهکاری عملیاتی توصیه کرده‌اند. این سایت‌ها با فراهم کردن امکاناتی همچون ذخیره‌سازی موقت، تفکیک و پردازش مقدماتی، کاهش حجم و زمان جمع‌آوری پسماند، ارتقای کارایی سیستم پاکسازی، افزایش نرخ و سهولت بازیافت، کاهش خطرات زیست‌محیطی و نیز کاهش زمان انتقال پسماند به مراکز بازیافت یا دفن نهایی شده و در نتیجه روند پاکسازی را تسریع می‌کنند (سازمان مدیریت بحران فدرال، ۲۰۰۷؛ چنگ و همکاران، ۲۰۲۲a).

ناکارآمدی در مدیریت پسماند بلایا می‌تواند به پیامدهای منفی متعددی از جمله مشکلات بهداشتی، روانی منجر و تأخیر در بازسازی و افزایش هزینه‌ها را شامل شود (براون و همکاران، ۲۰۱۱؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۹؛ آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده، ۲۰۱۹؛ باییت، ۲۰۱۹؛ نیکدوست و همکاران، ۲۰۲۲؛ زوای و همکاران، ۲۰۱۸؛ قربان‌زاده و همکاران، ۲۰۲۰) با وجود این، انتخاب مکان این سایت‌ها، ظرفیت‌دهی و تخصیص منابع به آن‌ها یک مسئله پیچیده چندمعیاره است که ملاحظات زیست‌محیطی، مالکیت زمین، دسترسی جاده‌ای، ملاحظات اجتماعی و محدودیت‌های عملیاتی را باید هم‌زمان در نظر بگیرد (نیکدوست و همکاران، ۲۰۲۲؛ حبیب و همکاران، ۲۰۲۲).

یکی از محدودیت‌های کلیدی در اجرای عملیات پاکسازی، ضعف یا آسیب‌دیدگی شبکه‌های حمل‌ونقل است؛ به‌ویژه زمانی که جاده‌ها و پل‌ها دچار آسیب شده یا ظرفیت جابه‌جایی در فاصله‌های طولانی ناکافی باشد. در چنین شرایطی، متکی بودن صرف بر حمل‌ونقل جاده‌ای می‌تواند به افزایش زمان و هزینه انتقال پسماند منجر شود. رویکردهای چندوجهی یا حمل‌ونقل ترکیبی (کامیون-قطار) که در آن از کامیون برای جمع‌آوری محلی و از قطار برای جابه‌جایی در مسافت‌های طولانی استفاده می‌شود، به عنوان یک راهکار عملی برای افزایش ظرفیت حمل، کاهش هزینه و بهبود تاب‌آوری لجستیکی مطرح شده‌اند (آرچی و همکاران، ۲۰۲۲).

مطالعات جدید نشان می‌دهند ترکیب مدهای حمل‌ونقل و طراحی مسیرهای ترکیبی می‌تواند در شرایط بحران سبب کاهش چشمگیر زمان انتقال و هزینه‌ها گردد و تاب‌آوری کلی شبکه لجستیک پس‌بحران را افزایش دهد (ما و همکاران، ۲۰۲۴؛ یودین و همکاران، ۲۰۱۹). گذشته از این، پژوهش‌های اخیر بر اهمیت در نظر گرفتن وابستگی‌های متقابل میان زیرساخت‌ها (جاده‌ای) و نیز احتمال اختلالات در آن‌ها تأکید کرده‌اند؛ چرا که نادیده گرفتن این وابستگی‌ها می‌تواند کارایی مدل‌های برنامه‌ریزی را کاهش دهد و تصمیم‌های اتخاذشده را از نظر عملیاتی آسیب‌پذیر سازد (چنگ و همکاران، ۲۰۱۸؛ آکی یاما و همکاران، ۲۰۲۵).

بر اساس پایگاه داده بین‌المللی بلایای طبیعی، جهان در دهه‌های اخیر شاهد افزایش قابل توجهی در تعداد بلایای طبیعی بوده است و باتوجه به تغییرات اقلیمی و الگوهای آب‌وهوایی، احتمالاً این روند همچنان ادامه خواهد داشت (پایگاه داده EM-DAT، ۲۰۲۰). وقوع بلایای طبیعی مانند زلزله، سیل و طوفان، پیامدهای چندبعدی و گسترده‌ای برای جوامع به همراه دارد که فراتر از خسارت‌های جانی و مالی است. یکی از برجسته‌ترین این پیامدها تولید حجم بسیار زیاد پسماند در بازه‌های زمانی کوتاه است که مدیریت نامناسب آن می‌تواند پیامدهای زیست‌محیطی، بهداشتی، اقتصادی و اجتماعی بلندمدت به دنبال داشته باشد. این حجم عظیمی از پسماند، باعث مختل شدن سایر حوزه‌های مدیریت بلایای طبیعی شده و کاهش کارایی اقدامات مرحله مقابله و بازسازی را به همراه دارد (براون و همکاران، ۲۰۱۱).

برای نمونه، در زمین‌لرزه ونچوان در سال ۲۰۰۸ و طوفان کاترینا در سال ۲۰۰۵ به ترتیب حدود ۳۸۱ و ۱۰۰ میلیون تن پسماند جامد تولید شد که مدیریت این مقادیر عظیم، سیستم‌های موجود را تحت فشار قابل توجهی قرار داد و روند بازسازی را کند نمود (شیائو و همکاران، ۲۰۱۱؛ لورکا و همکاران، ۲۰۱۷). بر اساس پایگاه‌های داده بین‌المللی بلایای طبیعی، جهان در چند دهه اخیر رشد فزاینده بلایای طبیعی را شاهد بوده است (پایگاه داده EM-DAT، ۲۰۲۰). باتوجه به تغییرات اقلیمی و الگوهای آب‌وهوایی، این روند احتمالاً ادامه خواهد یافت (پایگاه داده EM-DAT، ۲۰۲۰).

ظرفیت پاسخگویی جوامع به مشکلات پس از بلایای طبیعی بزرگ، معمولاً محدود و بسیار فراتر از توان جوامع بوده است و این حجم زیاد پسماند می‌تواند ۵ الی ۱۵ برابر نرخ تولید پسماند سالانه جامعه آسیب‌دیده باشد (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۹). در برخی از مواقع هم امکان دارد زمان دفع پسماند تا ۵ سال هم به طول انجامد (براون و همکاران، ۲۰۱۱). مجموعه اقداماتی که برای حذف پسماند در مرحله بازسازی صورت می‌گیرد زمان بر، پرهزینه و دشوار بوده که حدود یک‌چهارم هزینه‌های مرحله واکنش بلایا را شامل می‌شود (سازمان مدیریت بحران فدرال، ۲۰۰۷).

به دلیل اثرگذاری گسترده مدیریت پسماند بلایا^۱ بر سایر ابعاد عملیات واکنش و بازسازی، تدوین راهبردها و ابزارهای عملیاتی و تصمیم‌پشتیبان برای پاکسازی پسماند پس از بحران از اهمیت فراوانی برخوردار است. مجموعه عملیات مدیریت پسماند بلایا به‌طور معمول شامل جمع‌آوری، تفکیک و پردازش مقدماتی، حمل‌ونقل، بازیافت و در نهایت دفع نهایی است؛ و هریک از این مراحل شامل محدودیت‌ها و چالش‌های خاص خود می‌باشد (کالدرا و همکاران، ۲۰۲۵a).



رویکرد حمل‌ونقل ترکیبی (کامیون-قطار) و با بهره‌گیری از اولویت‌بندی مبتنی بر روش فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی^۳ برای شناسایی و تمرکز بر مناطق پرریسک است. مدل پیشنهادی تلاش می‌کند تعادل میان اهداف زمان و هزینه را برقرار سازد، تخصیص تیم‌های چندمنظوره آواربرداری را بهینه نماید و اثرات وابستگی‌های زیرساختی را در سناریوهای عددی بررسی کند تا کاربردپذیری و پایداری آن در شرایط مختلف بحران آشکار شود.

باتوجه به روند رو به رشد وقوع بلايا و آثار چندبعدی ناشی از تولید پسماند، نیاز به مدل‌های جامع و عملیاتی که به‌طور هم‌زمان مکان‌یابی، اولویت‌بندی ریسک و برنامه‌ریزی حمل‌ونقل ترکیبی را دربر گیرند، کاملاً احساس می‌شود. مقاله حاضر با ترکیب این مؤلفه‌ها و افزودن تحلیل سناریویی و بررسی حساسیت، قصد دارد چارچوبی کاربردی و قابل‌تطبيق برای مدیران بحران و برنامه‌ریزان فراهم آورد.

این پژوهش با مقدمه‌ای آغاز می‌شود که به تبیین اهمیت موضوع، بررسی پیشینه تحقیق و شناسایی شکاف‌های موجود در ادبیات علمی، همراه با تشریح اهداف کلی تحقیق می‌پردازد. در ادامه، بخش روش به تعریف دقیق مسئله پژوهش، تدوین فرضیات و ارائه مدل‌سازی ریاضی اختصاص یافته است. سپس، ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک مناطق آسیب‌دیده با استفاده از روش فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی انجام شده و در پی آن، مدل ریاضی با بهره‌گیری از روش اپسیلون-محدودیت^۴ حل می‌گردد. این مدل در سناریوهای مختلف پیاده‌سازی و اعتبارسنجی شده است. بخش یافته‌ها به بحث و بررسی نتایج پژوهش اختصاص دارد و درنهایت، بخش نتیجه‌گیری به ارائه جمع‌بندی نهایی و پیشنهادات می‌پردازد.

پیشینه پژوهش

مدیریت پسماند بلايا به‌عنوان یکی از ارکان اصلی مدیریت بحران، در دهه‌های اخیر به‌طور گسترده مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در این حوزه، بخش عمده‌ای از مطالعات بر به‌کارگیری سایت‌های موقت مدیریت پسماند متمرکز بوده‌اند. این سایت‌ها نقشی کلیدی در تسهیل فرآیند پاکسازی، کاهش زمان و هزینه عملیات، و بهبود کارایی سیستم بازیافت ایفا می‌کنند. پژوهش‌های اولیه در این زمینه به شناسایی ضرورت و طراحی اولیه چنین مکان‌هایی پرداخته‌اند (الزیاری و همکاران، ۱۹۸۱؛ رافی و همکاران، ۲۰۰۸؛ کاروناسنا و همکاران، ۲۰۱۲؛ اوه و کانگ، ۲۰۱۳؛ براون و میلک، ۲۰۱۶؛ آماتو و همکاران، ۲۰۲۰؛ زی و او و همکاران، ۲۰۲۲).

در سال‌های اخیر، تلاش‌های پژوهشی متنوعی به توسعه مدل‌های ریاضی و رویکردهای بهینه‌سازی برای مدیریت پسماند بلايا متمرکز بوده است. در این میان، روش‌هایی همچون برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط، مدل‌های سناریویی چندمرحله‌ای و رویکردهای چندهدفه با هدف متعادل‌سازی اهداف اقتصادی، زیست‌محیطی و زمانی مورد توجه قرار گرفته‌اند (چنگ و همکاران، ۲۰۲۱؛ زی او و همکاران، ۲۰۲۲). همچنین تعدادی از پژوهش‌ها به بسط مدل‌های تصمیم‌گیری در حوزه لجستیک انسانی و توزیع اقلام امدادی پرداخته‌اند که می‌تواند در توسعه مدل‌های مدیریت پسماند بلايا الهام‌بخش باشد (نریمانی و همکاران، ۲۰۲۴؛ پورناصر و همکاران، ۲۰۲۲).

در حوزه روش‌شناسی، توسعه مدلی ریاضی برای مکان‌یابی بهینه انبارهای مرکزی و ثانویه در زنجیره تأمین چندسطحی محصولات فسادپذیر، با تمرکز بر حداقل‌سازی هزینه‌ها، رویکردی مؤثر برای طراحی کارآمد شبکه‌های لجستیکی ارائه کرده است (موسوی و همکاران، ۲۰۲۴). همچنین، تلفیق مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه با رویکردهای مدیریت ریسک مبتنی بر سناریو، به‌ویژه در شرایطی که معیارهای متعدد و ناسازگار (مانند هزینه‌ها، ریسک‌ها و قابلیت اطمینان) مطرح هستند، به‌عنوان یک استراتژی موفق برای مدیریت زنجیره تأمین خون در شرایط همه‌گیری کووید-۱۹ شناخته شده است (بابازاده رفیعی و همکاران، ۲۰۲۳). افزون‌براین، کاربرد تکنیک‌های نوین از جمله به‌کارگیری هوش مصنوعی برای طبقه‌بندی پسماند و بهبود کارایی پردازش نیز در مطالعات اخیر مورد بررسی قرار گرفته است (بونمی و همکاران، ۲۰۲۴).

باوجود این پیشرفت‌ها، چند چالش و شکاف مهم در ادبیات وجود دارد که ضرورت پژوهش‌های تکمیلی را نشان می‌دهد. نخست آنکه بخش قابل‌توجهی از مطالعات تمرکز بر حمل‌ونقل جاده‌ای داشته و بهره‌مندی کامل از مزایای حمل‌ونقل ترکیبی در چارچوب پاکسازی پسماند بلايا کمتر بررسی شده است. دوم، ادغام رویکردهای اولویت‌بندی ریسک مناطق آسیب‌دیده با یک مدل چندهدفه جامع که هم‌زمان مکان‌یابی سایت‌های موقت، تخصیص تیم‌های عملیاتی و برنامه‌ریزی حمل‌ونقل ترکیبی را در نظر بگیرد، در مطالعات پیشین محدود است. سوم، بسیاری از مدل‌های موجود فرض دسترسی پیوسته و سالم شبکه حمل‌ونقل را برقرار می‌دانند و کمتر به شبیه‌سازی اختلالات جزئی یا کامل در لینک‌های جاده‌ای و ریلی پرداخته‌اند؛ درحالی‌که تجربه‌های واقعی نشان می‌دهد چنین اختلالاتی می‌توانند اثر عمیقی بر زمان و هزینه عملیات و تاب‌آوری شبکه داشته باشند (ترابی و همکاران، ۲۰۱۶؛ ما و همکاران، ۲۰۲۴).

پژوهش حاضر در همین راستا طراحی شده است تا این شکاف‌ها را تا حدی کاهش دهد. هدف اصلی این مقاله توسعه یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه برای پاکسازی پسماند بلايا با

3. Analytical Hierarchy Process (AHP)

4. ε-Constraint



از سوی دیگر، پژوهش‌های اخیر اهمیت در نظر گرفتن ریسک اختلال در دسترسی به سایت‌های موقت را برجسته کرده‌اند. **حبیب و همکاران (۲۰۲۲)** نشان دادند برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین که سایت‌های موقت را همواره در دسترس فرض می‌کردند، این مکان‌ها ممکن است به دلیل انسداد جاده‌ها یا آسیب دیدگی زیرساختی غیرقابل استفاده شوند. آن‌ها با توسعه یک مدل دو مرحله‌ای، ابتدا به انتخاب سایت‌ها و سپس به تخصیص پسماند پرداخته و راهکاری برای مواجهه با این اختلالات ارائه دادند. این نگاه ریسک‌محور، هم‌راستا با مطالعات جدیدی است که بر تاب‌آوری سیستم‌های حمل‌ونقل در شرایط بحران تأکید می‌کنند (ما و همکاران، ۲۰۲۴؛ یودین و همکاران، ۲۰۱۹؛ آکی‌یاما و همکاران، ۲۰۲۵).

در سطح کلان‌تر، **چنگ و همکاران (۲۰۲۱)** مدلی مبتنی بر برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط معرفی کردند که چهار عملیات اصلی مدیریت پسماند (آواربرداری، جمع‌آوری، پردازش و انتقال) را به صورت یکپارچه بهینه‌سازی می‌کند. این مدل نشان داد انتخاب بهینه سایت‌های موقت و تعیین توالی مناسب عملیات می‌تواند به کاهش چشمگیر زمان و هزینه کل منجر شود.

به موازات آن، **ژی او و همکاران، ۲۰۲۲** مدلی دوسطحی ارائه دادند که تصمیم‌گیری درباره مکان تأسیسات پردازش، به‌کارگیری منابع تخریب و تخصیص وسایل نقلیه را شامل می‌شود. هدف اصلی این مدل کاهش هم‌زمان هزینه، زمان و اثرات زیست‌محیطی بود؛ نتایج نشان دادند رویکردهای دوسطحی می‌توانند انعطاف‌پذیری بیشتری در پاسخ به شرایط بحرانی ایجاد کنند.

در کنار مطالعات بحران‌محور، برخی پژوهش‌ها به موضوع مدیریت حمل‌ونقل ترکیبی در زنجیره پسماند در شرایط غیربحرانی پرداخته‌اند. **تونو و همکاران (۲۰۱۵)** مدلی مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی برای زنجیره تأمین پسماندهای غیرخطرناک توسعه دادند که در آن از فرآیندهای پردازش مانند فشرده‌سازی استفاده شده بود. این مدل که براساس مطالعه موردی شرکت برانژون^۵ در فرانسه طراحی شد، با ترکیب حمل‌ونقل جاده‌ای و ریلی توانست هزینه‌های لجستیکی را تا ۱۴/۷ درصد کاهش دهد. اهمیت این مطالعه در آن است که نشان می‌دهد رویکردهای حمل‌ونقل چندوجهی، حتی در شرایط غیربحرانی، می‌توانند در مدیریت بهینه پسماند مؤثر باشند و همین منطق قابلیت تصمیم به شرایط بحرانی و بلایای طبیعی را دارد.

در پژوهش‌های جدیدتر، تمرکز بر بهبود تاب‌آوری شبکه‌های حمل‌ونقل ترکیبی برای مدیریت پسماند پس‌بحران پررنگ‌تر شده است. برای مثال، مطالعاتی مانند **ما و همکاران (۲۰۲۴)**، **یودین و همکاران (۲۰۱۹)** و **پان و همکاران (۲۰۲۵)**، بر مزایای ترکیب

انتخاب محل مناسب برای استقرار این سایت‌ها فرآیندی پیچیده و چندمعیاره است که مستلزم در نظر گرفتن عوامل جغرافیایی، اجتماعی، زیست‌محیطی و اقتصادی می‌باشد. برای مثال، **چنگ و همکاران، (۲۰۱۶)** و **لی و همکاران (۲۰۲۲)** این مسئله را با رویکردهای بهینه‌سازی ترکیبی و تحلیل چندمعیاره بررسی کرده‌اند.

در راستای توسعه چارچوب‌های تصمیم‌گیری، **اونان و همکاران (۲۰۱۵)** مدلی ارائه کردند که در آن انتخاب مکان سایت‌های موقت با در نظر گرفتن هم‌زمان ابعاد زیست‌محیطی و اقتصادی صورت می‌گیرد. این چارچوب نشان داد ترکیب اهداف مختلف می‌تواند به افزایش کارایی سیستم مدیریت پسماند منجر شود. به همین ترتیب، **حبیب و همکاران (۲۰۱۷)** یک چارچوب دو مرحله‌ای معرفی کردند که در گام نخست با استفاده از فرآیند شبکه تحلیلی^۶ و تکنیک‌های تاپسیس فازی^۶ مکان‌های بهینه را شناسایی کرده و در گام دوم از مدل‌های ریاضی برای تخصیص پسماند به این مکان‌ها بهره می‌برد.

یکی از جریان‌های نوظهور در این حوزه، استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی^۷ برای مکان‌یابی سایت‌های موقت است. **نیکدوست و همکاران (۲۰۲۲)** چارچوبی مبتنی بر سامانه اطلاعات جغرافیایی ارائه کردند که برای انتخاب محل‌های مدیریت موقت پسماند ارائه می‌کنند. این چارچوب از پارامترهای جغرافیایی تعیین شده توسط سازمان‌های حاکم و با در نظر گرفتن الزامات جغرافیایی و محدودیت‌های مکانی و عملیاتی، بهینه‌سازی عملیات پاکسازی را دنبال می‌کند. در عین حال، خطرات بهداشتی، امکان بازیافت و اثرات اجتماعی دفع پسماند را نیز در نظر می‌گیرد و بر حداقل نمودن اثرات پسماند جمع‌آوری نشده بر جامعه و اقتصاد مناطق آسیب‌دیده تمرکز دارد.

چنگ و همکاران (۲۰۲۲b) در پژوهشی بر روی بلایای کوچک، به دنبال ارتقای کارایی پاکسازی پسماند در مرحله مقابله‌ای مدیریت بلایا هستند. هدف آن‌ها به حداقل رساندن هزینه کل و زمان پاکسازی پسماند با بهینه‌سازی عملیات مربوطه است. از یک مدل مسیریابی مکان‌یابی دو مرحله‌ای چند دوره‌ای استفاده شده است. این مدل به تصمیم‌گیری در مورد مکان سایت‌های موقت مدیریت پسماند و مسیریابی وسایل نقلیه کمک می‌کند که شامل بهینه‌سازی سه فرآیند کلیدی، مسیریابی جمع‌آوری پسماند از مناطق آسیب‌دیده به سایت‌های موقت، چرخه وسایل نقلیه بین سایت‌های موقت بدون نیاز به بازگشت به دیپوت و مسیریابی انتقال پسماند از سایت‌های موقت به مراکز بازیافت و دفع نهایی می‌باشد. برای مدل‌سازی و حل این مدل پیچیده، چنگ و همکاران از یک برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط و الگوریتم ژنتیک استفاده می‌کنند.

5. Analytical Network Process

6. Fuzzy Topsis

7. Geographic Information System (GIS)

8. Brangeon



ساختمان‌های آسیب‌دیده بوده است؛ در حالی که در پژوهش حاضر، تیم‌های آواربرداری به‌عنوان تیم‌هایی چندمنظوره در نظر گرفته شده‌اند که مسئولیت‌هایی از قبیل مدیریت پسماندهای خطرناک، تخریب سازه‌های آسیب‌دیده، و تفکیک پسماند و آوار را به‌صورت هم‌زمان بر عهده دارند. این رویکرد با واقعیت‌های میدانی عملیات‌های پس‌بحران تطابق بیشتری دارد، چراکه در عمل، واحدهای امداد و نجات اغلب دارای وظایف ترکیبی هستند. علاوه بر این، بهره‌گیری از رویکردهای اولویت‌بندی ریسک مناطق آسیب‌دیده در کنار بهینه‌سازی لجستیک پسماند هنوز به‌صورت نظام‌مند و یکپارچه کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است.

از سوی دیگر، استفاده از سامانه حمل‌ونقل ترکیبی در این تحقیق، موجب کاهش زمان و هزینه‌های حمل پسماند شده و می‌تواند نقشی مؤثر در بهینه‌سازی فرآیند انتخاب محل احداث سایت‌های موقت مدیریت پسماند، مراکز بازیافت و مکان‌های دفن ایفا کند. به‌عنوان نمونه، در فرآیند مکان‌یابی سایت‌های موقت، چالش‌هایی نظیر محدودیت‌های زیست‌محیطی، مسائل مربوط به مالکیت زمین و کمبود ماشین‌آلات حمل پسماند مطرح است که بهره‌گیری از حمل‌ونقل ترکیبی می‌تواند راه‌حلی عملی برای رفع این موانع ارائه دهد.

بر این اساس، پژوهش حاضر تلاشی است برای پرکردن بخشی از این شکاف‌ها از طریق ارائه یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه که ترکیبی از مکان‌یابی سایت‌های موقت، اولویت‌بندی ریسک مناطق آسیب‌دیده و برنامه‌ریزی حمل‌ونقل ترکیبی کامیون-قطار را در نظر می‌گیرد. این چارچوب علاوه بر لحاظ نمودن زمان، ریسک و هزینه، امکان تصمیم‌گیری واقع‌بینانه‌تر را فراهم می‌کند. مدل پیشنهادی یک ابزار برنامه‌ریزی استراتژیک با قابلیت کاربرد در شرایط واقعی است که به مدیران بحران در تخصیص منابع و ارتقای تاب‌آوری شبکه لجستیک پس‌بحران کمک می‌کند.

روش

تعریف مسئله

مسئله مورد بررسی در این پژوهش، به تخصیص و زمان‌بندی تیم‌های آواربرداری و جمع‌آوری و حمل پسماند پس از وقوع بحران اختصاص دارد. این فرآیند در دو مرحله اصلی شامل عملیات آواربرداری و جمع‌آوری و حمل پسماند تعریف شده است. در تدوین این مسئله، به ریسک‌های موجود در هر منطقه نیز توجه شده که در پنج دسته ریسک جانی، آلودگی زیست‌محیطی، تأثیرات روانی، اختلالات اقتصادی و حادثه‌آفرینی پسماند طبقه‌بندی می‌شوند. در هر یک از مراحل عملیاتی، تخصیص و زمان‌بندی تیم‌ها بر اساس نتایج ارزیابی اولویت‌بندی ریسک مناطق آسیب‌دیده صورت می‌گیرد، به‌گونه‌ای که مناطق با ریسک بالاتر در اولویت اعزام تیم‌ها قرار دارند.

مدل‌های حمل‌ونقل و طراحی شبکه‌های ترکیبی در شرایط بحران تأکید کرده‌اند. در این میان، (کالدرا و همکاران، ۲۰۲۵a) با ارائه یک چارچوب جامع برای مدیریت پسماند بلایا، بر نقش مدیران و تصمیم‌گیرندگان حوزه صنعت در ارتقای تاب‌آوری جوامع تأکید کرده‌اند. افزون بر این، پژوهش‌هایی نیز به طراحی مدل‌های مشابه در حوزه زنجیره تأمین انسانی پرداخته‌اند که از نظر روش‌شناختی می‌توانند به حوزه مدیریت پسماند بلایا تعمیم داده شوند.

برای نمونه، نریمانی و معتمدی، (۲۰۲۳)، نریمانی و همکاران، ۲۰۲۴ و پورناصر و همکاران، (۲۰۲۲)، مدل‌هایی برای توزیع اقلام امدادی با استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه و سناریومحور توسعه داده‌اند. همچنین، بابازاده رفیعی و همکاران، (۲۰۲۳) و بابازاده رفیعی و همکاران (۲۰۲۴) مدلی برای مدیریت ریسک در زنجیره تأمین خون در شرایط همه‌گیری کووید-۱۹ ارائه کردند که از نظر مفهومی قابلیت انتقال به مدیریت ریسک در حوزه پسماند بلایا را دارد. این مطالعات بیانگر حرکت پژوهش‌ها به سوی مدل‌های جامع‌تر و واقع‌بینانه‌تر هستند که هم‌زمان معیارهای ریسک، هزینه و زمان را لحاظ می‌کنند.

نکته مهم دیگر، توجه به فناوری‌های نوین در مدیریت پسماند است. پژوهش‌هایی مانند بونمی و همکاران (۲۰۲۴) بر کاربرد هوش مصنوعی برای طبقه‌بندی پسماند و بهبود کارایی پردازش تمرکز کرده‌اند. همچنین، مطالعات اخیر در حوزه تاب‌آوری نشان داده‌اند در نظر گرفتن وابستگی‌های متقابل میان زیرساخت‌های حمل‌ونقل و فرآیندهای دفع می‌تواند بر برآورد زمان پاکسازی و کیفیت تصمیم‌گیری تأثیرگذار باشد (آکی‌یاما و همکاران، ۲۰۲۵؛ کالدرا و همکاران، ۲۰۲۵a).

به‌طور کلی، مرور ادبیات نشان می‌دهد مدیریت پسماند بلایا به‌عنوان یک حوزه میان‌رشته‌ای، از جنبه‌های مختلفی نظیر انتخاب مکان سایت‌های موقت، طراحی مدل‌های بهینه‌سازی، استفاده از سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی، ادغام فناوری‌های نوین و رویکردهای ریسک‌محور بررسی شده است. بخش مهمی از پژوهش‌ها بر مکان‌یابی و طراحی سایت‌های موقت تمرکز داشته‌اند، اما در بسیاری از این مطالعات، حمل‌ونقل صرفاً جاده‌ای در نظر گرفته شده و امکان بهره‌گیری از مزایای سیستم‌های ترکیبی (مانند کامیون-قطار) کمتر مورد توجه قرار گرفته است. همچنین اگرچه پژوهش‌های اخیر به اهمیت تاب‌آوری شبکه‌های حمل‌ونقل و اختلالات زیرساختی پرداخته‌اند، اما همچنان بررسی جامع تأثیر این اختلالات بر کارایی مدل‌های مدیریت پسماند، محدود باقی مانده است.

از سوی دیگر، تعداد اندکی از مطالعات به توسعه مدل‌های جامع چندهدفه پرداخته‌اند که بتوانند هم‌زمان معیارهای متعارضی مانند زمان، ریسک و هزینه را در یک چارچوب یکپارچه پوشش دهند. در مطالعات چنگ و همکاران (۲۰۲۱) و ژی او و همکاران (۲۰۲۲)، تمرکز بر به‌کارگیری واحدهایی مستقل برای تخریب



- حمل پسماند هر منطقه پس از اتمام زمان آواربرداری تیم‌های امدادی امکان‌پذیر است.

- پسماند مناطقی که به تفکیک نیاز ندارند، مستقیماً قابل حمل است.

- ظرفیت حمل پسماند وسایل نقلیه محدود و مشخص می‌باشد.

- حجم پسماند هر منطقه قابل برآورد می‌باشد.

- مدت‌زمان موردنیاز برای آواربرداری هر منطقه قابل پیش‌بینی می‌باشد.

اندیس‌ها

- باتوجه به سطوح آسیب‌دیدگی و اهمیت مناطق آسیب‌دیده برای هر منطقه درجه اولویت امدادرسانی مشخص می‌گردد.

- مدت‌زمان بارگیری و تخلیه برای هر یک از تیم‌های حمل پسماند در هر منطقه مشخص است.

- مدت‌زمان پیمایش هر مسیر بین مناطق برای هر تیم قابل برآورد می‌باشد.

- ایستگاه‌های ریلی به‌عنوان بخشی از زیرساخت حمل‌ونقل ترکیبی هستند که پس از وقوع بلایا شبکه ریلی همچنان قابل استفاده باقی می‌ماند و تخریب آن مد نظر نیست.

مدل ریاضی

در این بخش، ابتدا به تعریف اندیس‌ها، پارامترهای ورودی و متغیرهای تصمیم‌گیری پرداخته می‌شود و در ادامه تابع هدف و محدودیت‌ها به‌صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته و تشریح می‌شوند.

z و i: اندیس‌های مناطق نیازمند آواربرداری $i = 1, 2, \dots, n$
o, p: اندیس‌های مناطق نیازمند عملیات جمع‌آوری و حمل پسماند $o, p = 1, 2, \dots, n_c$

r: اندیس ایستگاه‌های قطار $r = 1, 2, \dots, n_r$

S: اندیس سایت‌های موقت مدیریت پسماند بلایا $s = 1, 2, \dots, n_s$

K: اندیس تیم‌های آواربرداری $k = 1, 2, \dots, n_k$

a: اندیس تیم‌های جمع‌آوری و حمل پسماند $a = 1, 2, \dots, n_a$

پارامترهای ورودی

M: عدد بزرگ

W_{rj}: ام در مرحله آواربرداری j میزان ریسک منطقه آسیب‌دیده

W_{cp}: میزان ریسک منطقه آسیب‌دیده p ام در مرحله جمع‌آوری

و حمل پسماند

P_{rj}^k: تخمین مدت‌زمان آواربرداری منطقه j ام توسط تیم k ام (واحد: دقیقه)

دقیقه)

P_{pr}^a: تخمین مدت‌زمان انتقال پسماند منطقه p ام به ایستگاه قطار r

مجموعه مناطق درگیر در این مسئله شامل مرکز مدیریت بحران، مناطق نیازمند عملیات آواربرداری، مناطق نیازمند عملیات جمع‌آوری و حمل پسماند، مناطق نیازمند انجام هر دو عملیات، ایستگاه‌های قطار و سایت‌های موقت مدیریت پسماند بلایا می‌باشد. پس از بروز بحران، تیم‌های امدادی در مرکز مدیریت بحران مستقر شده و عملیات خود را از این مرکز آغاز می‌کنند. در برخی شرایط، به‌دلیل درهم‌تنیدگی آوار و پسماند، امکان بارگیری و انتقال مستقیم وجود ندارد. در چنین مواردی، تیم‌های آواربرداری موظف به جداسازی پسماند و آوار، ایمن‌سازی محیط، و رفع خطرات احتمالی می‌باشند.

برای ارتقای کارایی عملیات پاکسازی و انتقال پسماند، از سیستم حمل‌ونقل ترکیبی (ترکیب کامیون و قطار) بهره‌گیری می‌شود. تیم‌های جمع‌آوری و حمل پسماند، با استفاده از این روش، پسماندهای ناشی از بلایا را جمع‌آوری و منتقل می‌کنند. برای انتقال پسماند، دو گزینه پیش‌بینی شده است: انتقال اولیه به ایستگاه قطار و سپس حمل ریلی به سایت موقت مدیریت پسماند، یا انتقال مستقیم به سایت موقت بدون استفاده از حمل‌ونقل ریلی. تجهیز (تجهیز به ماشین آلات و امکانات موردنیاز برای بارگیری پسماند) و استفاده از ایستگاه‌های قطار و احداث هر یک از سایت‌های موقت مستلزم پرداخت هزینه‌های مشخصی است.

مسئله موردپژوهش تا زمانی ادامه می‌یابد که کلیه عملیات‌های آواربرداری و حمل پسماند در مناطق آسیب‌دیده به پایان برسد و تیم‌ها به مرکز مدیریت بحران بازگردند.

توابع هدف در این مسئله شامل مواردی چون حداقل‌سازی زمان اتمام عملیات آواربرداری و حمل پسماند به سایت‌های موقت مدیریت پسماند با لحاظ کردن ریسک مناطق و حداقل‌سازی هزینه‌های حمل‌ونقل پسماند، هزینه‌های اعزام تیم‌های امدادی، و هزینه‌های تجهیز و استفاده از ایستگاه‌های قطار و احداث سایت‌های موقت مدیریت پسماند بلایا می‌باشد.

در تصاویر شماره ۱ و ۲ جریان آواربرداری و حمل پسماند و نمایش گرافیکی پسماند بلایا ی طبیعی با رویکرد حمل‌ونقل ترکیبی نمایش داده می‌شود:

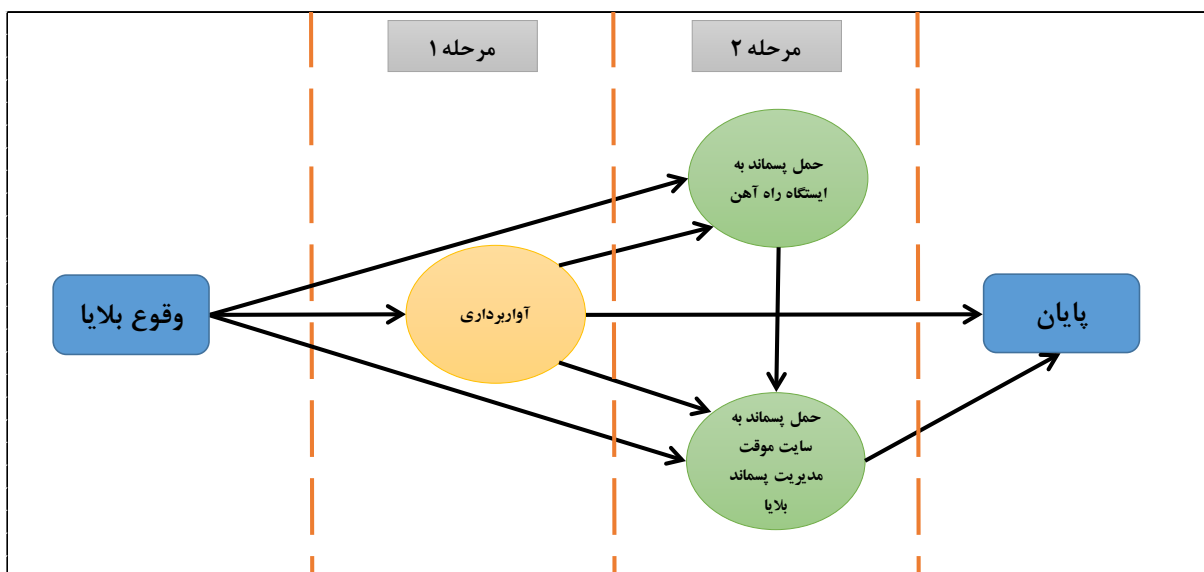
مفروضات

- چند تیم امدادی در زمان واحد نمی‌توانند در یک منطقه آسیب‌دیده خدمت‌رسانی کنند.

- زمان آواربرداری و حمل پسماند متناسب با سطح توانمندی تیم‌های امدادی می‌باشد.

- حمل‌ونقل پسماند به‌صورت ترکیبی از حمل جاده و ریلی می‌باشد.

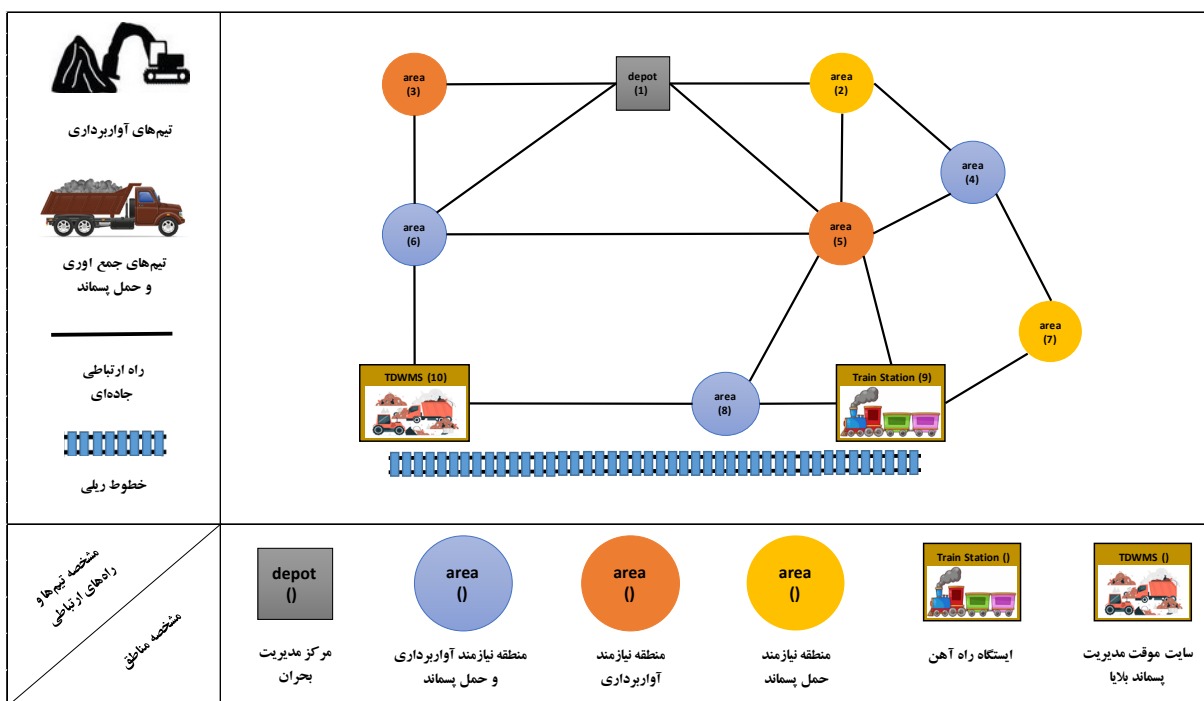
- مکان سایت‌های موقت از قبل مشخص می‌باشد.



تصویر ۱. نمودار جریان آواربرداری و حمل پسماند

t : ام توسط تیم ام (واحد: دقیقه)
 DCS_{os}^1 : برآورد زمان طی مسافت بین منطقه o و سایت موقت s توسط تیم ام (واحد: دقیقه)
 WV_p : برآورد حجم پسماند منطقه p (واحد: تن)
 $CCAP$: ظرفیت حمل پسماند (واحد: تن) برای تیم ام در هر بار حمل
 LT^1 : برآورد مدت زمان بارگیری پسماند برای تیم ام در هر بار حمل (واحد: دقیقه)

t : ام توسط تیم ام (واحد: دقیقه)
 PCS_{ps}^1 : تخمین مدت زمان انتقال پسماند منطقه p به سایت موقت s ام توسط تیم ام (واحد: دقیقه)
 DR_{ij}^k : برآورد زمان طی مسافت از منطقه am به منطقه am توسط تیم k ام (واحد: دقیقه)
 DC_{op}^1 : برآورد زمان طی مسافت از منطقه o به منطقه p توسط تیم ام (واحد: دقیقه)
 DC_{or}^1 : برآورد زمان طی مسافت بین منطقه o و ایستگاه قطار



تصویر ۲. نمایش گرافیکی پاکسازی پسماند بلاياي طبيعي با رویکرد حمل و نقل ترکیبی مفروضات



تابع اهداف

1.

$$\text{Min } Z1 = \sum_{j \in Ar} \sum_{k \in K} W_{r_{ej}} \cdot FTr_j^k + \sum_{p \in Ac} \sum_{l \in L} W_{c_p} FTe_p^l$$

$$\begin{aligned} \text{Min } Z2 = & \sum_{i \in 0} \cup_{Ar} \sum_{j \in 0} \cup_{Ar} j \neq i \sum_{k \in K} Dr_{ij}^k \cdot \text{cost}^k \cdot Xr_{ij}^k + \\ & \sum_{o \in 0} \sum_{p \in Ac} \sum_{l \in L} Dc_{op}^l \cdot \text{cost}^l \cdot Xc_{op}^l + \sum_{o \in Ac} \sum_{r \in At} \sum_{l \in L} (LT^l + Dcr^l + UT^l) \cdot NTS_o^l \cdot \text{cost}^l \cdot Xcr_{or}^l + \sum_{o \in Ac} \sum_{r \in At} \\ & \sum_{l \in L} (LT^l + Dcr_{or}^l + UT^l) \cdot NTS_o^{l-1} \cdot \text{cost}^l \cdot Xcr_{or}^l + \sum_{o \in Ac} \sum_{r \in At} \\ & \sum_{s \in As} \sum_{l \in L} (LT^l + Dcs_{os}^l + UT^l) \cdot NTS_o^l \cdot \text{cost}^l \cdot Xcs_{os}^l + \sum_{o \in Ac} \sum_{r \in At} \\ & \sum_{s \in As} \sum_{l \in L} (LT^l + Dcs_{os}^l + UT^l) \cdot NTS_o^{l-1} \cdot \text{cost}^l \cdot Xcs_{os}^l + \\ & \sum_{o \in Ac} \sum_{p \in 0} \cup_{Ac, p \neq o} \sum_{r \in At} \sum_{l \in L} Dcr_{pr}^l \cdot \text{cost}^l \cdot UR_{op}^l + \sum_{o \in Ac} \sum_{p \in 0} \cup_{Ac, p \neq o} \\ & \sum_{s \in As} \sum_{l \in L} Dcs_{pr}^l \cdot \text{cost}^l \cdot US_{os}^l + \sum_{o \in Ac} \sum_{r \in At} \sum_{s \in As} WV_o \cdot \text{cost}^l \cdot Y_{ors} + \sum_{r \in At} \text{cost}_r \cdot ALR + \sum_{s \in As} \text{cost}_s \cdot \\ & ALS_s \end{aligned}$$

در فرمول شماره ۱، دو تابع هدف برای مسئله تعریف شده است. تابع هدف نخست به حداقل سازی مجموع حاصل ضرب زمان اتمام عملیات آواربرداری و حمل پسماند در میزان ریسک هر منطقه می پردازد. این رویکرد با هدف اولویت بندی مناطق پرریسک و کاهش مخاطرات ناشی از تأخیر در جمع آوری پسماند اتخاذ شده است. تابع هدف دوم نیز بر کمینه سازی هزینه های مرتبط با حمل و نقل تیم های آواربرداری و جمع آوری پسماند، انتقال پسماند از طریق حمل و نقل ریلی، و همچنین هزینه های مربوط به تجهیز ایستگاه های قطار و احداث سایت های موقت مدیریت پسماند تمرکز دارد.

محدودیت ها

توجه: منطقه صفر، همان مرکز مدیریت بحران (دیپوت) و یا همان محل تجمع و شروع به کار تیم های امدادی است.

2.

$$\sum_{i \in 0 \cup Ar, i \neq j} Xr_{ij}^k = 1 \quad \forall j \in Ar$$

فرمول شماره ۲ در سطر قبل بیان می کند که هر منطقه تنها توسط یک تیم آواربرداری قابل ارائه خدمات می باشد.

3.

$$\sum_{j \in 0 \cup Ar, j \neq i} Xr_{ij}^k = \sum_{j \in 0 \cup Ar, j \neq i} Xr_{ji}^k \quad \forall i \in Ar, \forall k \in K$$

فرمول شماره ۳ حفظ جریان عملیات تیم آواربرداری kام پس از اتمام عملیات در هر منطقه به منطقه بعدی برای آواربرداری منتقل می شود.

4.

$$Xr_{ij}^k \leq 1 \quad \forall i \in 0, \forall k \in K$$

فرمول شماره ۴ مشخص می کند تیم آواربرداری kام حداکثر ۱

UT: برآورد مدت زمان تخلیه پسماند برای تیم ام در هر بار حمل (واحد: دقیقه)

cost^k: هزینه طی کردن هر واحد مسافت توسط تیم kام در مرحله آواربرداری

cost^l: هزینه طی کردن هر واحد مسافت توسط تیم ام در مرحله جمع آوری و حمل پسماند بدون بار

cost^f: هزینه طی کردن هر واحد مسافت توسط تیم ام در مرحله جمع آوری و حمل پسماند با بار

cost_{ts}: هزینه جابه جایی پسماند توسط قطار ایستگاه ام به سایت موقت مدیریت پسماند ام به ازای هر تن پسماند

cost_r: هزینه تجهیز ایستگاه قطار ام در صورت استفاده از آن

cost_s: هزینه احداث سایت موقت مدیریت پسماند ام

متغیرهای تصمیم گیری

FTr_j^k: زمان اتمام آواربرداری منطقه زام توسط تیم kام (واحد: دقیقه)

FTC_p^l: زمان اتمام انتقال پسماند منطقه pام توسط تیم ام (واحد: دقیقه)

NTS_p^l: تعداد سرویس های حمل پسماند از منطقه pام توسط تیم ام

Zr_j^k: اگر تیم kام به منطقه زام تخصیص داده شود ۱ در غیر این صورت صفر

Zc_p^l: اگر تیم ام به منطقه pام تخصیص داده شود ۱ در غیر این صورت صفر

Xr_{ij}^k: اگر تیم kام پس از اتمام آواربرداری منطقه ام به منطقه زام برود ۱ در غیر این صورت صفر

Xc_{op}^l: اگر تیم ام پس از اتمام حمل پسماند منطقه ام به منطقه pام برود ۱ در غیر این صورت صفر

Xcr_{or}^l: اگر تیم ام پسماند منطقه ام را به ایستگاه قطار ام برود ۱ در غیر این صورت صفر

Xcs_{os}^l: اگر تیم ام پسماند منطقه ام را به سایت موقت ام برود ۱ در غیر این صورت صفر

UR_{rp}^l: اگر تیم ام پس از حمل پسماند منطقه ای به ایستگاه قطار ام، به منطقه pام برود ۱ و در غیر این صورت صفر

US_{sp}^l: اگر تیم ام پس از حمل پسماند منطقه ای به سایت موقت ام، به منطقه pام برود ۱ و در غیر این صورت صفر

Q_k^l: اگر تیم kام و ام به منطقه ام تخصیص داده شود ۱ در غیر این صورت صفر

ALR_r: اگر ایستگاه قطار ام به کار گیری شود ۱ و در غیر این صورت صفر

ALS_s: اگر سایت موقت ام احداث شود ۱ و در غیر این صورت صفر

Y_{ors}: اگر پسماند منطقه ام پس از حمل به ایستگاه قطار ام، توسط قطار به سایت موقت ام منتقل شود ۱ و در غیر این صورت صفر



بار می تواند از مرکز مدیریت بحران خارج گردد.

$$\forall p \in 0, \forall l \in L$$

فرمول شماره ۱۲ مشخص می کند تیم جمع آوری و حمل پسماند ام حداکثر ۱ بار می تواند به مرکز مدیریت بحران وارد شود.

13.

$$\sum_{o \in 0 \cup Ac} Xc_{op}^1 = Zc_p^1$$

$$\forall p \in Ac, \forall l \in L$$

فرمول شماره ۱۳ تخصیص تیم جمع آوری و حمل پسماند ام را به منطقه p نشان می دهد.

14.

$$FTc_p^1 + (M \cdot (1 - Xc_{op}^1)) \geq (FTc_o^1 + Dc_{op}^1 + \sum_{r \in At} Pcr_r^1 + \sum_{s \in As} Pcs_s^1) \cdot Zc_p^1$$

$$\forall o \in 0, \forall p \in Ac, p \neq o, \forall l \in L$$

15.

$$FTc_p^1 + (M \cdot (1 - Xc_{op}^1)) \geq (FTc_o^1 + (\sum_{r \in At} UR_{op}^1 \cdot Dcr_r^1) + \sum_{r \in At} Pcr_r^1 + \sum_{s \in As} (US_{op}^1 \cdot Dcs_s^1) + \sum_{s \in As} Pcs_s^1)) \cdot Zc_p^1$$

$$\forall o \in Ac, \forall p \in Ac, p \neq o, \forall l \in L$$

فرمول های شماره ۱۴ و ۱۵ زمان تکمیل جمع آوری و حمل پسماند منطقه p را مشخص می کند، وقتی بلافاصله بعد از منطقه o توسط تیم جمع آوری و حمل پسماند ام حمل گردد.

16.

$$FTc_o^1 \geq 0$$

$$\forall o \in Ac, \forall l \in L$$

فرمول شماره ۱۶ بیان می کند زمان تکمیل عملیات جمع آوری و حمل پسماند منطقه o غیر منفی می باشد.

17.

$$Pcr_o^1 = (((LT^1 + (Dcr_o^1 \cdot 2) + UT^1) \cdot (NTS_o^1 - 1)) + (LT^1 + Dcr_o^1 + UT^1)) \cdot Xcr_o^1$$

$$\forall o \in Ac, \forall r \in At, \forall l \in L$$

فرمول شماره ۱۷ مدت زمان جمع آوری و حمل پسماند منطقه o که توسط تیم ام به ایستگاه قطار ام حمل می شود.

18.

$$Pcs_p^1 = (((LT^1 + (Dcs_p^1 \cdot 2) + UT^1) \cdot (NTS_o^1 - 1)) + (LT^1 + Dcs_p^1 + UT^1)) \cdot Xcs_p^1$$

$$\forall o \in Ac, \forall s \in As, \forall l \in L$$

فرمول شماره ۱۸ مدت زمان جمع آوری و حمل پسماند منطقه o که توسط تیم ام به سایت موقت ام حمل می شود.

19.

$$\sum_{r \in At} \sum_{l \in L} Xcr_r^1 + \sum_{s \in As} \sum_{l \in L} Xcs_s^1 = 1$$

$$\forall o \in Ac$$

20.

5.

$$\sum_{i \in Ar, i \neq j} Xr_{ij}^k \leq 1$$

$$\forall j \in 0, \forall k \in K$$

فرمول شماره ۵ مشخص می کند تیم آواربرداری ام حداکثر ۱

بار می تواند به مرکز مدیریت بحران وارد شود.

6.

$$\sum_{i \in 0 \cup Ar} Xr_{ij}^k = Zr_j^k$$

$$\forall j \in Ar, \forall k \in K$$

فرمول شماره ۶ تخصیص تیم آواربرداری ام را به منطقه زام

نشان می دهد.

7.

$$FTr_j^k + (M \cdot (1 - Xr_{ij}^k)) \geq (FTr_i^k + Dr_{ij}^k + Pr_j^k) \cdot Zr_j^k$$

$$\forall i \in 0 \cup Ar, \forall j \in Ar, j \neq i, \forall k \in K$$

فرمول شماره ۷ زمان تکمیل آواربرداری منطقه زام را مشخص

می کند، وقتی بلافاصله بعد از منطقه ام توسط تیم آواربرداری ام آواربرداری گردد.

8.

$$FTr_i^k \geq 0$$

$$\forall i \in Ar, \forall k \in K$$

فرمول شماره ۸ بیان می کند زمان تکمیل عملیات آواربرداری

منطقه ام غیر منفی می باشد.

9.

$$\sum_{o \in 0 \cup Ac, o \neq p} \sum_{l \in L} Xc_{op}^1 = 1$$

$$\forall p \in Ac$$

فرمول شماره ۹ بیان می کند هر منطقه تنها توسط یک تیم

جمع آوری و حمل پسماند قابل ارائه خدمات می باشد.

10.

$$\sum_{p \in 0 \cup Ac, p \neq o} Xc_{op}^1 = \sum_{p \in 0 \cup Ac, p \neq o} Xc_{po}^1$$

$$\forall o \in Ac, \forall l \in L$$

فرمول شماره ۱۰ حفظ جریان عملیات تیم جمع آوری و حمل

پسماند ام پس از اتمام عملیات در هر منطقه، به منطقه بعدی برای حمل پسماند منتقل می شود.

11.

$$\sum_{p \in Ac, p \neq o} Xc_{op}^1 \leq 1$$

$$\forall o \in 0, \forall l \in L$$

فرمول شماره ۱۱ مشخص می کند تیم جمع آوری و حمل

پسماند ام حداکثر ۱ بار می تواند از مرکز مدیریت بحران خارج گردد.

12.

$$\sum_{o \in Ac, o \neq p} Xc_{op}^1 \leq 1$$



فرمول شماره ۲۸ نشان می‌دهد اگر تیمی پسماند منطقه o را به ایستگاه قطار r حمل کند، باید از ایستگاه قطار r به یک سایت موقت منتقل گردد.

29.

$$ALR_r = \min(\sum_{o \in Ac} \sum_{l \in L} X_{cr}^l, 1)$$

$$\forall r \in At$$

در فرمول شماره ۲۹ مشخص می‌گردد ایستگاه قطار r به کارگیری می‌شود یا خیر.

30.

$$ALS = \min(\sum_{o \in Ac} \sum_{r \in At} Y_{ors}, 1)$$

$$\forall s \in As$$

در فرمول شماره ۳۰ مشخص می‌گردد سایت موقت s ام احداث می‌شود یا خیر.

ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک مناطق آسیب‌دیده

فرآیند تحلیل سلسله مراتبی یکی از روش‌های شناخته‌شده و معتبر در حوزه تصمیم‌گیری چند معیاره است که توسط آقای توماس ساعتی در دهه ۱۹۷۰ ارائه شده است. فرآیند تحلیل سلسله مراتبی به تحلیل ساختار یافته مسائل پیچیده با در نظر گرفتن معیارهای مختلف کمک می‌کند. در این پژوهش، از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی جهت ارزیابی و اولویت‌بندی سطح ریسک مناطق آسیب‌دیده پس از بحران استفاده شده است؛ هدف از این فرآیند، پشتیبانی از تصمیم‌گیری در زمینه تخصیص مطلوب منابع و تیم‌های اجرایی به مناطقی است که بیشترین نیاز و بیشترین سطح ریسک را دارند.

مدل سلسله‌مراتبی طراحی شده در این تحقیق شامل سه سطح است که سطح هدف (سطح اول ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک مناطق آسیب‌دیده پس از بحران، سطح معیارها (سطح دوم) شامل پنج معیار کلیدی: ریسک جانی، آلودگی زیست‌محیطی، تأثیرات روانی، اختلال اقتصادی و خطرات ناشی از پسماند بحران و سطح گزینه‌ها (سطح سوم) شامل چهار منطقه آسیب‌دیده به‌عنوان گزینه‌های ارزیابی می‌باشد (تصویر شماره ۳).

انتخاب معیار ریسک

معیارهای ریسک برای اولویت‌بندی مناطق آسیب‌دیده شامل ریسک جانی، آلودگی زیست‌محیطی، تأثیرات روانی، اختلال اقتصادی و خطرات ناشی از پسماند بحران هستند. این معیارها براساس بررسی جامع ادبیات موجود در زمینه مدیریت پسماند بلایای طبیعی انتخاب شده‌اند (جدول شماره ۱). انتخاب آن‌ها به‌گونه‌ای صورت گرفت که ابعاد انسانی، زیست‌محیطی، اجتماعی، اقتصادی و عملیاتی را پوشش دهد و بدین ترتیب اولویت‌بندی

$$\sum_{p \in 0 \cup Ac, p \neq o} X_{cp}^l = \sum_{r \in At} X_{cr}^l + \sum_{s \in As} X_{cs}^l$$

$$\forall o \in Ac, \forall l \in L$$

فرمول‌های شماره ۱۹ و ۲۰ بیان می‌کند پسماند منطقه o ام مستقیماً به ایستگاه قطار r یا به سایت موقت حمل می‌گردد.

21.

$$NTS_o^l \geq (WV / CCAP^l) \cdot Zc_o^l$$

$$\forall o \in Ac, \forall l \in L$$

22.

$$NTS_o^l \leq ((WV / CCAP^l) \cdot Zc_o^l) + 1$$

$$\forall o \in Ac, \forall l \in L$$

23.

$$NTS_o^l \cdot NTS_o^{l'} = 0$$

$$\forall o \in Ac, \forall l \in L, \forall l' \in L, l' \neq l$$

فرمول‌های شماره ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ تعداد سرویس‌های حمل پسماند از منطقه o توسط تیم l ام که باید حمل شود را محاسبه می‌کند.

24.

$$Zr_j^k \cdot Zc_p^l = Q_j^k l$$

$$\forall j \in (Ar \cap Ac), \forall p \in (Ac \cap Ar), p = j,$$

$$\forall k \in K, \forall l \in L$$

25.

$$FTc_p^l - (\sum_{r \in At} Pcr_r^l + \sum_{s \in As} Pcs_s^l) - FTr_j^k \cdot Q_j^k l \geq 0$$

$$\forall j \in (Ar \cap Ac), \forall p \in (Ac \cap Ar), p = j,$$

$$\forall k \in K, \forall l \in L$$

فرمول‌های شماره ۲۴ و ۲۵ نشان می‌دهد زمان عملیات جمع‌آوری و حمل پسماند منطقه o ام بعد از اتمام عملیات آواربرداری صورت می‌گردد.

26.

$$UR_{op}^l = \sum_{o \in Ac, o \neq p} X_{cp}^l \cdot X_{cr}^l$$

$$\forall o \in Ac, \forall p \in 0 \cup Ac, p \neq o, \forall r \in At, \forall l \in L$$

در فرمول شماره ۲۶ مشخص می‌گردد تیم l ام پس از حمل پسماند منطقه‌ای به ایستگاه قطار r ام، به منطقه p ام می‌رود.

27.

$$US_{sp}^l = \sum_{o \in Ac, o \neq p} X_{cp}^l \cdot X_{cs}^l$$

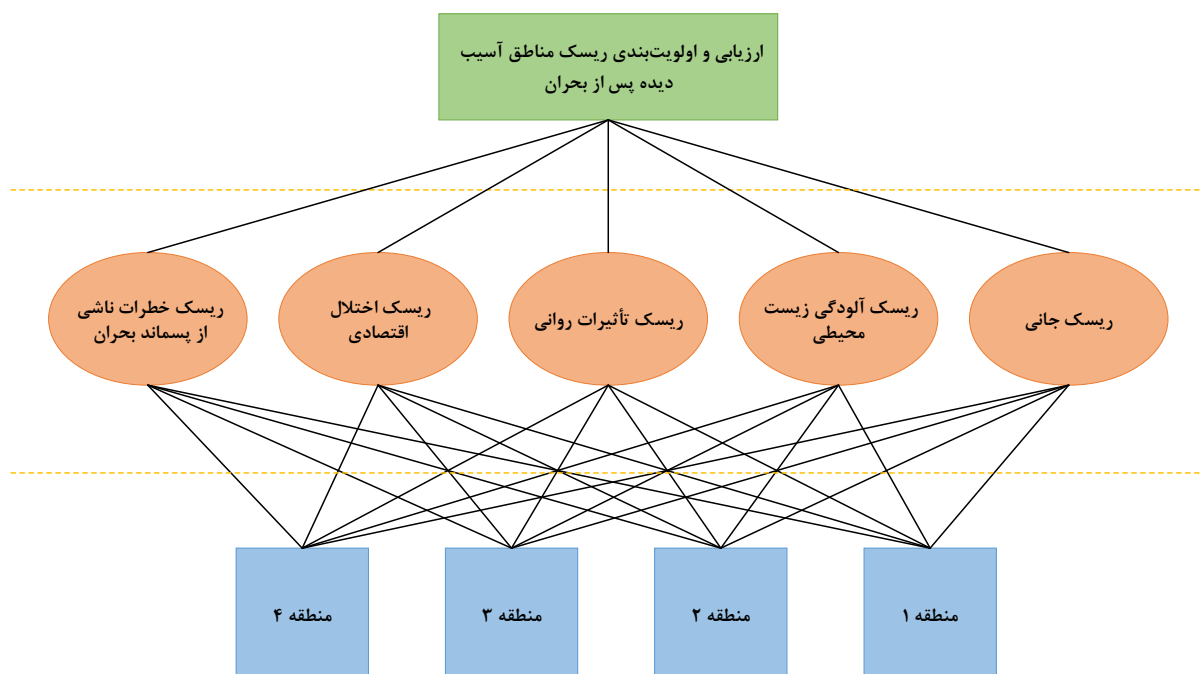
$$\forall o \in Ac, \forall p \in 0 \cup Ac, p \neq o, \forall s \in As, \forall l \in L$$

در فرمول شماره ۲۷ مشخص می‌گردد تیم l ام پس از حمل پسماند منطقه‌ای به سایت موقت s ام، به منطقه p ام می‌رود.

28.

$$\sum_{s \in As} Y_{ors} = \sum_{l \in L} X_{cr}^l$$

$$\forall o \in Ac, \forall r \in At$$



تصویر ۳. ساختار سلسله مراتبی ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک مناطق آسیب‌دیده پس از بحران

اقتصادی، و همچنین دسترس‌پذیری و تمایل به مشارکت در پژوهش صورت گرفت تا اطمینان حاصل شود قضاوت‌ها معتبر، بی‌طرفانه و مبتنی بر تجربه عملی باشند.

برای تجمیع داده‌ها، از میانگین هندسی مقادیر داده شده توسط خبرگان استفاده شد. نتایج میانگین‌گیری در **جدول شماره ۳** نمایش داده شده است. در ادامه نرخ ناسازگاری هر یک از ماتریس‌های نظرات محاسبه شده که این مقدار نباید فراتر از ۱۰ درصد باشد تا قضاوت سازگاری مورد تأیید قرار گیرد (**ساعتی، ۱۹۸۰**).

در مرحله بعد، ماتریس فوق نرمال‌سازی شده و بامیانگین‌گیری سطری، وزن نهایی معیارها به دست آمد که در **جدول شماره ۴** گزارش شده است.

در ادامه جهت ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک مناطق آسیب‌دیده یک فاجعه می‌توان مقایسات زوجی میان مناطق (گزینه‌ها) را برای هر یک از معیارها به صورت جداگانه انجام داد و وزن نسبی هر منطقه تحت هر معیار محاسبه گردد. سپس با ترکیب این اوزان با وزن معیارها، امتیاز نهایی هر منطقه استخراج و بر اساس آن رتبه‌بندی مناطق انجام شود.

این رتبه‌بندی نقش مهمی در تصمیم‌گیری‌های اجرایی مدیریت بحران دارد و به تخصیص مطلوب منابع در مناطقی که بیشترین ریسک را دارند کمک می‌کند.

ریسک‌ها جامع و مبتنی بر شواهد علمی باشد.

فرآیند انتخاب معیارها در دو گام اصلی انجام شد. نخست، بررسی ادبیات که طی آن بیش از ۲۰ مطالعه مرتبط تحلیل شد و نشان داد این پنج معیار بیشترین تکرار و اهمیت را دارند و می‌توانند ابعاد مختلف ریسک‌های پسماند بلافاصله را پوشش دهند. دوم، تعیین سطوح سلسله‌مراتبی با استفاده از روش AHP که شامل مقایسه‌های زوجی بر اساس مقیاس ساعتی بود. ماتریس مقایسه جفتی بر پایه نظرات خبرگان حوزه مدیریت بحران، محیط‌زیست، ایمنی، اقتصاد محلی و اساتید دانشگاه تهیه و با داده‌های ادبیات تکمیل گردید. نرخ ناسازگاری کمتر از ۰/۱ به دست آمد که اعتبار مدل را تأیید می‌کند. در نهایت وزن نهایی هر معیار با استفاده از نرم‌افزار Excel محاسبه شد.

در مرحله بعد، به منظور انجام مقایسات زوجی بین معیارها، یک نمونه واقعی از مناطق سیل‌زده استان گلستان (شهرستان‌های گرگان و آق‌قلا) انتخاب گردید. نظرات تخصصی ۲۰ نفر از خبرگان و کارشناسان مدیریت بحران، محیط‌زیست، ایمنی، اقتصاد محلی و اساتید دانشگاه با استفاده از مقیاس ساعتی ۱ تا ۹ گردآوری شده است (**ساعتی، ۲۰۰۸**) (**جدول شماره ۲**). ترکیب خبرگان و کارشناسان با استفاده از روش گلوله برفی (**گودمن، ۱۹۶۱**) و با نظر خبرگان سازمان مدیریت بحران استان گلستان و اساتید دانشگاه علوم و فنون مازندران مشخص شد. انتخاب آن‌ها بر اساس معیارهایی همچون حداقل ۱۰ سال تجربه در حوزه تخصصی مربوطه برای تضمین دانش عمیق، تنوع حرفه‌ای به منظور پوشش جنبه‌های چندبعدی ریسک از جمله انسانی، زیست‌محیطی و



جدول ۱. معیارهای ریسک برای اولویت‌بندی مناطق آسیب‌دیده

معیار	دلیل انتخاب و ارتباط با ادبیات	منابع کلیدی
ریسک جانی	این معیار بر سلامت عمومی، بهداشت و نجات جان تمرکز دارد، زیرا پسماند می‌تواند منجر به بیماری‌ها، آسیب‌های جسمی و مانع عملیات نجات شود. مطالعات نشان می‌دهند که پسماند بلافاصله می‌تواند خطرات جانی را تشدید کند، مانند مسدود کردن مسیرهای امداد.	براون و همکاران (۲۰۱۱)؛ مؤسسه ملی تحقیقات زیست‌محیطی (۲۰۱۲)؛ نیک‌دوست و همکاران (۲۰۲۳)؛ آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده (۲۰۱۹)؛ حبیب و همکاران (۲۰۲۲)؛ قناد و همکاران (۲۰۲۱)؛ پایگاه داده EM-DAT (۲۰۲۰) براون و همکاران (۲۰۱۱)؛ مؤسسه ملی تحقیقات زیست‌محیطی (۲۰۱۲)؛ نیک‌دوست و همکاران (۲۰۲۲)؛ باییت و همکاران (۲۰۱۹)؛ بونمی و همکاران (۲۰۱۸)؛ شیائو و همکاران (۲۰۱۲)؛ لورکا و همکاران (۲۰۱۷)؛ وانگ و همکاران (۲۰۱۹)؛ اونان و همکاران (۲۰۱۵)؛ جالول و همکاران (۲۰۲۲)؛ آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده (۲۰۱۹)؛ چنگ و همکاران (۲۰۲۲)؛ حبیب و همکاران (۲۰۲۲)
آلودگی زیست‌محیطی	پسماند بلافاصله می‌تواند آلودگی خاک، آب و هوا ایجاد کند و اثرات بلندمدت بر اکوسیستم داشته باشد. این معیار برای پایداری محیطی ضروری است و در ادبیات به عنوان یکی از اصلی‌ترین ریسک‌ها برجسته شده.	براون و همکاران (۲۰۱۱)؛ مؤسسه ملی تحقیقات زیست‌محیطی (۲۰۱۲)؛ نیک‌دوست و همکاران (۲۰۲۲)؛ باییت و همکاران (۲۰۱۹)؛ بونمی و همکاران (۲۰۱۸)؛ شیائو و همکاران (۲۰۱۲)؛ لورکا و همکاران (۲۰۱۷)؛ وانگ و همکاران (۲۰۱۹)؛ اونان و همکاران (۲۰۱۵)؛ جالول و همکاران (۲۰۲۲)؛ آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده (۲۰۱۹)؛ چنگ و همکاران (۲۰۲۲)؛ حبیب و همکاران (۲۰۲۲)
تأثیرات روانی	پسماند می‌تواند استرس، اضطراب و اثرات روانی بر جوامع ایجاد کند، به ویژه در مرحله بازیابی. ادبیات بر اثرات نامطلوب روانی ناشی از عدم مدیریت پسماند تأکید دارد.	هو و شیو (۲۰۱۳)؛ قربان‌زاده و همکاران (۲۰۲۰)؛ ژانگ و همکاران (۲۰۱۹)؛ جالول و همکاران (۲۰۲۲)؛ حبیب و همکاران (۲۰۲۲)
اختلال اقتصادی	پسماند می‌تواند بازسازی را تأخیر انداخته و هزینه‌های اقتصادی (مانند خسارات مالی و اختلال در فعالیت‌ها) را افزایش دهد. این معیار بر اساس داده‌های اقتصادی بلافاصله انتخاب شده.	پایگاه داده EM-DAT (۲۰۲۰)؛ نیک‌دوست و همکاران (۲۰۲۲)؛ قربان‌زاده و همکاران (۲۰۲۰)؛ ژانگ و همکاران (۲۰۱۹)؛ جالول و همکاران (۲۰۲۲)؛ حبیب و همکاران (۲۰۲۲)
خطرات ناشی از پسماند بحران	این معیار بر ریسک‌های عملیاتی مانند قرار گرفتن در معرض مواد خطرناک، تشدید بلافاصله ثانویه و مانع شدن عملیات واکنش تمرکز دارد. ادبیات نشان می‌دهد که پسماند می‌تواند خطرات اضافی ایجاد کند.	هو و شیو (۲۰۱۳)؛ اونان و همکاران (۲۰۱۵)؛ جها و همکاران (۲۰۱۲)؛ لی و همکاران (۲۰۲۲)؛ باییت و همکاران (۲۰۱۹)؛ جالول و همکاران (۲۰۲۲)؛ لوسر (۲۰۱۰)؛ قناد و همکاران (۲۰۲۱)؛ حبیب و همکاران (۲۰۲۲)

چندهدفه با استفاده از تکنیک‌های تک‌هدفه است.

روش حل مسئله

فرمول شماره ۳۱ حالت کلی معادله (برای دو هدف) را نشان می‌دهد:

$$31. \min f_1(x) \text{ Subject to: } f_2(x) \leq \epsilon x \in X$$

در این مدل، تابع هدف اصلی است و به شکل محدودیت با آستانه تعریف می‌شود. مجموعه فضای شدنی را شامل می‌شود. مقدار در بازه‌های مختلف تغییر داده می‌شود تا نقاط مختلف جبهه پارتو به دست آید. در ادامه هفت مسئله با روش اپسیلون-محدودیت حل شده که نتایج آن به صورت مجزا آورده شده است.

حل مسئله

در این مطالعه، به منظور ارزیابی عملی روش اپسیلون-محدودیت، ابتدا هفت مسئله بهینه‌سازی چندهدفه با ابعاد کوچک طراحی شد که سپس با رویکرد افزایش سایز مسئله، به تدریج سایز مدل افزایش یافته است. هدف از این روند، بررسی تغییرات زمان پردازش و به دست آوردن جبهه پارتو در مقیاس‌های مختلف می‌باشد که در هر مسئله، هفت نقطه مورد بررسی قرار گرفته است.

در این تحقیق ۷ مسئله با سایزهای متفاوت که بیانگر مناطق نیازمند آواربرداری، حمل پسماند، ایستگاه‌های قطار، سایت‌های موقت و تیم‌های امداد رسانی است که اطلاعات آن در **جدول شماره ۵ و ۶** نمایش داده می‌شود. این سناریوهای مطرح شده برای وقوع سیل در مناطق روستایی شهرستان گرگان و آق‌قلا فرض شده است. برای تولید پارامترها باتوجه به اینکه مسئله پیشنهادی جدید می‌باشد از مقادیری فرضی که در **جدول شماره ۷** آمده، استفاده شده است.

به منظور حل مسئله در سایز کوچک، روش اپسیلون-محدودیت پیشنهاد می‌شود که در ادامه به طور کامل شرح داده شده است.

روش اپسیلون-محدودیت

روش اپسیلون محدودیت یکی از روش‌های کلاسیک و پرکاربرد در حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه است که در آن، برای دستیابی به جبهه پارتو، یکی از توابع هدف به عنوان تابع هدف اصلی انتخاب می‌شود و سایر توابع هدف به شکل محدودیت‌های نابرابری با حد آستانه مشخص (ϵ) در مدل لحاظ می‌شوند. اولین بار این روش را همیس و همکاران (۱۹۷۱) معرفی کرده‌اند. ایده اصلی آن ارائه یک چارچوب ساده و منعطف برای حل مسائل



جدول ۲. نمره‌دهی مقایسات زوجی

مقدار	توضیح
۱	اهمیت برابر
۳	کمی مهم‌تر
۵	مهم‌تر
۷	خیلی مهم‌تر
۹	کاملاً مهم‌تر
۸, ۴, ۲	مقدارهای بینابینی

تا ۳۰ دقیقه متغیر بوده و به ترتیب از کم به زیاد مرتب شده‌اند. اطلاعات اولیه مربوط به این ۱۰ سناریو در جدول شماره ۲۲ ارائه شده است. مسئله برای هر سناریو و هر تابع هدف به صورت جداگانه حل شده است تا مشخص شود برای هر هدف در هر منطقه، کدام مدل حمل پسماند انتخاب شده است. نتایج به دست آمده برای دو تابع هدف به صورت مجزا در جدول شماره ۲۳ و ۲۴ ارائه شده‌اند. این نتایج نشان می‌دهند که در فواصل کوتاه، سیستم حمل و نقل جاده‌ای کارآمدتر است، اما با افزایش فاصله، سیستم ترکیبی عملکرد بهتری دارد. (واحد فاصله بین مناطق در جداول برحسب دقیقه است.)

یافته‌ها

یافته‌های این پژوهش بیانگر آن است که مدل بهینه‌سازی چندهدفه پیشنهادی توانسته است ابعاد مختلف فرآیند پاکسازی پسماند پس از بلایا را با دقت مناسبی شبیه‌سازی و تحلیل کند. به منظور ارزیابی عملکرد مدل، هفت مسئله نمونه با ابعاد متفاوت طراحی و با استفاده از روش اپسیلون محدودیت حل گردید. نتایج به دست آمده از این سناریوها نشان داد افزایش مقیاس مسئله (از نظر تعداد مناطق نیازمند آواربرداری و جمع‌آوری پسماند، تعداد سایت‌های موقت، ایستگاه‌های قطار و تیم‌های عملیاتی) به رشد نمایی پیچیدگی محاسبات و زمان پردازش منجر می‌شود. برای مثال، در مسئله اول که کوچک‌ترین مقیاس را داشت، مدل در مدت‌زمان تنها ۱ ثانیه به جواب بهینه سراسری دست یافت؛ در حالی که در مسئله هفتم با ابعاد گسترده‌تر، با وجود صرف

در این قسمت، مسئله با استفاده از مقادیر مختلف پارامتر اپسیلون حل گردید و مجموعه‌ای از نقاط کارای پارتو استخراج شد. نتایج هر مرحله، شامل مقادیر بهینه توابع هدف و نقاط شدنی می‌باشد (جدول شماره ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴). در جدول شماره ۱۵ زمان حل مسئله‌ها ارائه شده است. مسائل فوق به وسیله نرم‌افزار لینگو^{۱۰} نسخه ۹، ۰ و لپ‌تاپ با مشخصات (Intel Core i7-7700HQ processor, 16 GB RAM (2133 MHz), running Windows 10) حل گردیده است. همان‌طور که در جدول شماره ۱۴ و تصویر شماره ۴ مشاهده می‌کنید، مسئله هفتم به علت افزایش سایز مسئله و NP-hard بودن، زمان حل آن به سمت بی‌نهایت میل کرده است.

در ادامه، تحلیل حساسیت مسئله به مقایسه سیستم‌های حمل و نقل جاده‌ای و ترکیبی اختصاص دارد. مقادیر پارتوی توابع هدف در سناریوهای مختلف برای دو حالت حمل و نقل جاده‌ای و ترکیبی محاسبه و در جدول شماره ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰ و ۲۱ ارائه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند به‌طور میانگین، سیستم ترکیبی در مقایسه با سیستم صرفاً جاده‌ای، زمان اتمام عملیات را لحاظ کردن ریسک مناطق (تابع هدف اول) را ۳۰/۱ درصد و هزینه کل (تابع هدف دوم) را ۱۱/۳ درصد کاهش داده است.

به‌منظور تحلیل تأثیر فاصله جغرافیایی، مسئله ۴ در ۱۰ سناریوی مختلف با فواصل متفاوت بین مناطق آسیب‌دیده و سایت‌های موقت مدیریت پسماند بررسی شد. این فواصل از ۱

10. Lingo

جدول ۳. مقایسات زوجی معیارها

معیار	ریسک جانی	آلودگی زیست‌محیطی	تأثیرات روانی	اختلال اقتصادی	خطرات ناشی از پسماند بحران
ریسک جانی	۱	۳/۲	۵/۱	۶/۵	۴/۳
آلودگی زیست‌محیطی	۰/۳۱۲۵	۱	۳/۶	۵/۲	۲/۸
تأثیرات روانی	۰/۱۹۶	۰/۲۷۸	۱	۳/۴	۲/۱
اختلال اقتصادی	۰/۱۵۴	۰/۱۹۲	۰/۲۹۴	۱	۰/۶۲
خطرات ناشی از پسماند بحران	۰/۲۳۲	۰/۳۵۷	۰/۴۷۶	۱/۶۱	۱



جدول ۴. نرمال‌سازی مقایسات زوجی و وزن نهایی معیارها

معيار	ريسك جاني	آلودگي زيست‌محيطي	تأثيرات رواني	اختلال اقتصادي	خطرات ناشي از پسماند بحران	وزن نهایی
ريسك جاني	۰/۵۲۷۸	۰/۶۳۶۶	۰/۴۸۷۱	۰/۳۶۷	۰/۳۹۷۴	۰/۴۸۳۲
آلودگي زيست‌محيطي	۰/۱۶۵	۰/۱۹۸۹	۰/۳۴۳۸	۰/۲۹۳۶	۰/۲۵۸۸	۰/۲۵۲
تأثيرات رواني	۰/۱۰۳۵	۰/۰۵۵۳	۰/۰۹۵۵	۰/۱۹۲	۰/۱۹۴۱	۰/۱۲۸۱
اختلال اقتصادي	۰/۰۸۱۳	۰/۰۳۸۲	۰/۰۲۸۱	۰/۰۵۶۵	۰/۰۵۷۳	۰/۰۵۲۳
خطرات ناشي از پسماند بحران	۰/۱۲۲۵	۰/۰۷۱	۰/۰۴۵۵	۰/۰۹۰۹	۰/۰۹۳۴	۰/۰۸۴۴

جدول ۵. توسعه مدل ریاضی چند هدفه برای مسئله مورد پژوهش

مسئله	تعداد منطقه نیازمند آوار برداری و حمل پسماند	تعداد منطقه نیازمند آوار برداری	تعداد منطقه نیازمند حمل پسماند	تعداد ایستگاه قطار	تعداد سایت موقت مدیریت پسماند	تعداد تیم‌های آوار برداری	تعداد تیم‌های جمع‌آوری و حمل پسماند
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۲	۲
۲	۲	۱	۱	۱	۱	۲	۲
۳	۲	۲	۱	۱	۱	۲	۲
۴	۲	۲	۲	۱	۱	۲	۲
۵	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۶	۲	۲	۲	۲	۲	۳	۳
۷	۳	۳	۳	۲	۲	۳	۳

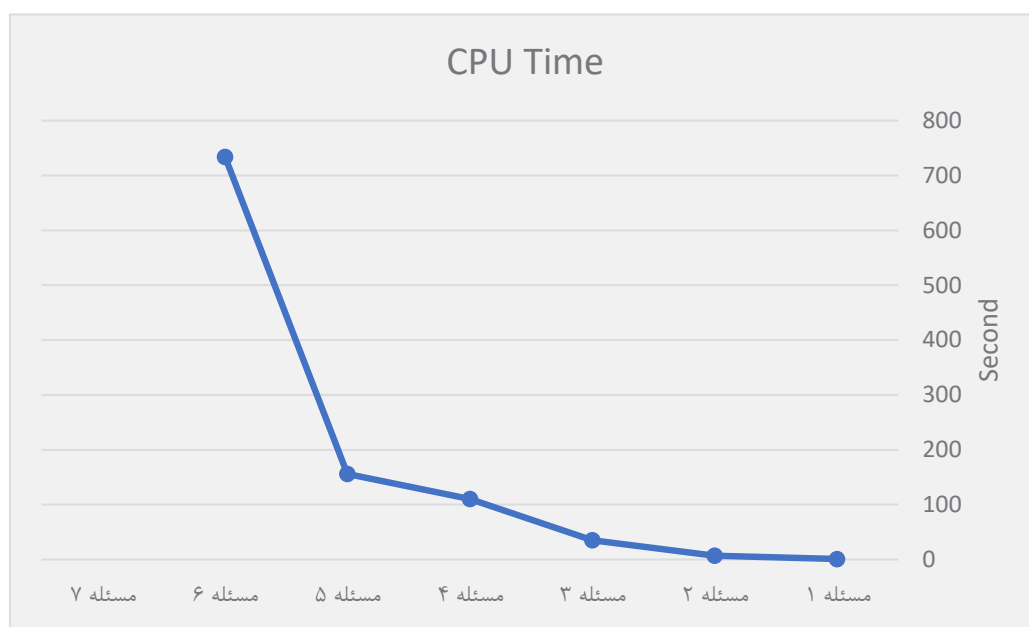
جدول ۶. اطلاعات سناریوهای مطرح‌شده

مسئله	مناطق نیازمند آواربرداری و حمل پسماند	مناطق نیازمند آواربرداری	مناطق نیازمند حمل پسماند	ایستگاه قطار	سایت‌های موقت مدیریت پسماند	مرکز مدیریت بحران	تعداد تیم‌های جمع‌آوری و حمل پسماند	تعداد تیم‌های آواربرداری
۱	امیر آباد	کریم آباد	قلعه محمود	ایستگاه گرگان	سایت موقت ۱	مرکز مدیریت بحران گرگان	۲	۲
۲	امیر آباد، مامایی	کریم آباد	قلعه محمود	ایستگاه گرگان	سایت موقت ۱	مرکز مدیریت بحران گرگان	۲	۲
۳	امیر آباد، مامایی	کریم آباد، شیر	قلعه محمود	ایستگاه گرگان	سایت موقت ۱	مرکز مدیریت بحران گرگان	۲	۲
۴	امیر آباد، مامایی	کریم آباد، شیر	قلعه محمود، زنگیان	ایستگاه گرگان	سایت موقت ۱	مرکز مدیریت بحران گرگان	۲	۲
۵	امیر آباد، مامایی	کریم آباد، شیر	قلعه محمود، زنگیان	ایستگاه گرگان، ایستگاه مامایی	سایت موقت ۱، ۲	مرکز مدیریت بحران گرگان	۲	۲
۶	امیر آباد، مامایی	کریم آباد، شیر	قلعه محمود، زنگیان	ایستگاه گرگان، ایستگاه مامایی	سایت موقت ۱، ۲	مرکز مدیریت بحران گرگان	۳	۳
۷	امیر آباد، مامایی، قریان آباد	کریم آباد، شیر	قلعه محمود، زنگیان، شاه تپه	ایستگاه گرگان، ایستگاه مامایی	سایت موقت ۱، ۲	مرکز مدیریت بحران گرگان	۳	۳



جدول ۷. توزیع احتمال برای تولید پارامترهای ورودی مسئله

پارامتر	واحد	U (a,b)
Pr_j^k	دقیقه	$U(200,1000)$
Dr_{ij}^k	دقیقه	$U(10,30)$
DC_{OP}^I	دقیقه	$U(5,15)$
DCr_{Or}^I	دقیقه	$U(5,15)$
Dsc_{OS}^I	دقیقه	$U(5,15)$
WV_p	تن	$U(1000,10000)$
$CCAP^I$	تن	$U(10,20)$
LT^I	دقیقه	$U(10,15)$
UT^I	دقیقه	$U(5,10)$
$costr^k$	میلیارد ریال	$U(0,1,0,2)$
$costce^I$	میلیارد ریال	$U(0,15,0,25)$
$costcf^I$	میلیارد ریال	$U(0,25,0,35)$
$costt_{rs}$	میلیارد ریال	$U(0,0001,0,0002)$
$coste_r$	میلیارد ریال	$U(10,30)$
$costs_s$	میلیارد ریال	$U(40,100)$



تصویر ۴. زمان حل ۷ سناریو



جدول ۸. حل مسئله اول به روش محدودیت افسیلون

نمودار پارتو		مقدار تابع هدف اول		مقدار تابع هدف دوم		تابع هدف اصلی (تابع هدف اول)	مسئله ۱		
540	530	520	510	500	490	480		حل با تابع هدف اول	
9500	9000	8500	8000	7500	7000	6500		5500	حل با تابع هدف دوم
525/86	527/963333	520/6667	512/17	504/273333	496/27667	488/48		Max	
6091/6	7095/6	7095/6	7095/6	7095/6	7095/6	881/8		Min	
525/86	493/12	493/12	493/12	493/12	493/12	488/48	تعداد نقاط مورد بررسی ۷ نقطه می‌باشد.		
525/86	527/963333	520/6667	512/17	504/273333	496/27667	488/48	ع		
6091/6	7095/6	7095/6	7095/6	7095/6	7095/6	881/8	مقدار تابع هدف اول		
525/86	493/12	493/12	493/12	493/12	493/12	488/48	مقدار تابع هدف دوم		

تحلیل مقایسه‌ای میان دو سیستم حمل‌ونقل صرفاً جاده‌ای و ترکیبی (کامیون-قطار) نیز از یافته‌های کلیدی این پژوهش است. نتایج نشان داد در شرایطی که فاصله جغرافیایی میان مناطق آسیب‌دیده و مراکز بازیافت یا سایت‌های موقت زیاد باشد، سیستم ترکیبی عملکرد به مراتب بهتری دارد. به‌طور میانگین، استفاده از حمل‌ونقل ترکیبی به ۳۰/۱ درصد کاهش در زمان کل عملیات و ۱۱/۳ درصد کاهش در هزینه‌های کل نسبت به سیستم صرفاً جاده‌ای منجر شد. این تفاوت به‌ویژه در مسائل با فواصل طولانی‌تر چشمگیرتر بود، به‌گونه‌ای که در فواصل بیش از ۲۰ دقیقه، حمل‌ونقل جاده‌ای کارایی خود را از دست داده و مدل به‌طور خودکار راهکارهای ترکیبی را انتخاب نمود. در مقابل، زمانی که فاصله میان مناطق و سایت‌های مقصد کوتاه‌تر بود (مانند مسئله اول و دوم)، حمل‌ونقل جاده‌ای همچنان گزینه‌ای بهینه و کارآمد باقی ماند. این نتیجه بر اهمیت در نظر گرفتن ویژگی‌های جغرافیایی و زیرساختی هر بحران در انتخاب استراتژی حمل‌ونقل تأکید می‌کند.

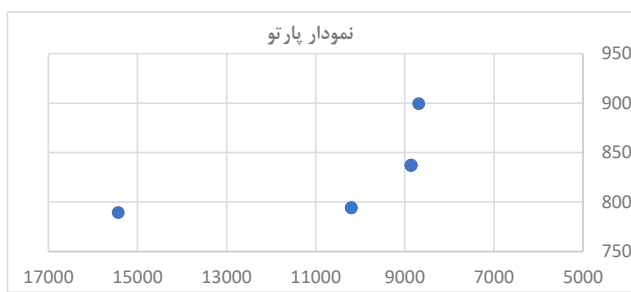
بیش از ۱۰ ساعت (۳۶۰۰۰ ثانیه) زمان محاسباتی، تنها جواب بهینه محلی حاصل گردید. این یافته به‌روشنی ماهیت NP-Hard مسئله و محدودیت‌های روش‌های دقیق در مقیاس‌های بزرگ را تأیید می‌کند.

بررسی جبهه‌های پارتو در تمامی مسائل نمونه نشان داد میان دو هدف اصلی مدل یعنی کاهش زمان اتمام عملیات (با در نظر گرفتن سطح ریسک مناطق) و کاهش هزینه‌های کل شامل حمل‌ونقل، تجهیز ایستگاه‌ها و احداث سایت‌های موقت همواره رابطه‌ای معکوس وجود دارد. به‌بیان دیگر، انتخاب راهکارهایی که زمان عملیات را به حداقل می‌رسانند، به افزایش هزینه‌ها منجر شده و بالعکس، تصمیماتی که کم‌هزینه‌تر هستند، نیازمند زمان بیشتری برای تکمیل عملیات خواهند بود. این نتیجه بیانگر آن است که تصمیم‌گیرندگان ناگزیرند براساس سیاست‌ها و اولویت‌های عملیاتی، نقطه‌ای تعادلی را از روی جبهه پارتو انتخاب کنند.

جدول ۹. حل مسئله دوم به روش محدودیت افسیلون

نمودار پارتو		مقدار تابع هدف اول		مقدار تابع هدف دوم		تابع هدف اصلی (تابع هدف اول)	مسئله ۲	
950	900	850	800	750	700	650		حل با تابع هدف اول
17000	15000	13000	11000	9000	7000	5000		حل با تابع هدف دوم
899/2	880/85	862/5	844/15	825/8	807/45	789/1		Max
8655/4	8832/6	8832/6	8832/6	10173/8	10173/8	15347/4		Min
899/2	836/86	836/86	836/86	793/8	793/8	789/1	تعداد نقاط مورد بررسی ۷ نقطه می‌باشد.	
899/2	880/85	862/5	844/15	825/8	807/45	789/1	ع	
8655/4	8832/6	8832/6	8832/6	10173/8	10173/8	15347/4	مقدار تابع هدف اول	
899/2	836/86	836/86	836/86	793/8	793/8	789/1	مقدار تابع هدف دوم	

جدول ۱۰. حل مسئله سوم به روش محدودیت افسیلون



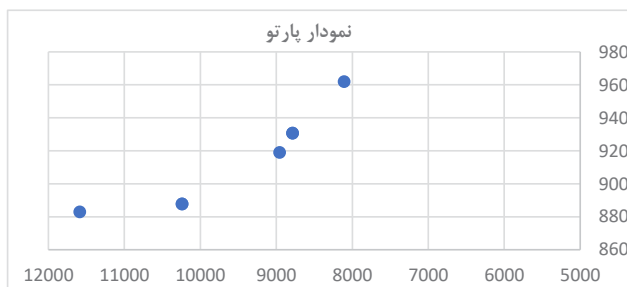
مقدار تابع هدف دوم	مقدار تابع هدف اول	تابع هدف اصلی (تابع هدف اول)
۸۹۹/۵	۸۶۸۳/۴	حل با تابع هدف اول
۷۸۹/۳	۱۵۴۲۹/۴	حل با تابع هدف دوم
۸۹۹/۵	۱۵۴۲۹/۴	Max
۷۸۹/۳	۸۶۸۳/۴	Min

مسئله ۳

تعداد نقاط مورد بررسی ۷ نقطه می‌باشد.

۸۹۹/۵	۸۸۱/۱۳۳۳۳۳	۸۰۷/۶۶۶۶۷	۸۴۴/۴	۸۲۶/۰۳۳۳۳	۸۰۷/۶۶۶۶۷	۷۸۹/۳	۴
۸۶۸۳/۴	۸۸۶۰/۶	۸۸۶۰/۶	۸۸۶۰/۶	۱۰۲۰/۱/۸	۱۰۲۰/۱/۸	۱۵۴۲۹/۴	مقدار تابع هدف اول
۸۹۹/۵	۸۳۷/۱۶	۸۳۷/۱۶	۸۳۷/۱۶	۷۹۴/۱	۷۹۴/۱	۷۸۹/۳	مقدار تابع هدف دوم

جدول ۱۱. حل مسئله چهارم به روش محدودیت افسیلون



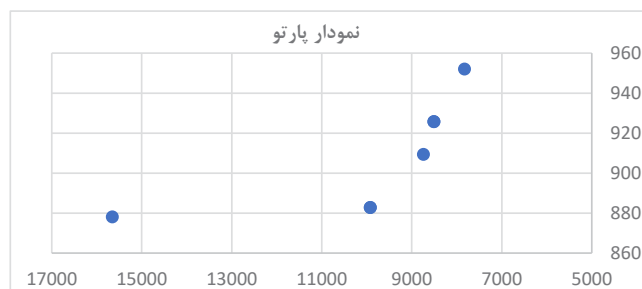
مقدار تابع هدف دوم	مقدار تابع هدف اول	تابع هدف اصلی (تابع هدف اول)
۹۶۱/۹۴	۸۱۰۶/۶	حل با تابع هدف اول
۸۸۳/۰۴	۱۱۵۸۵/۲	حل با تابع هدف دوم
۹۶۱/۹۴	۱۱۵۸۵/۲	Max
۸۸۳/۰۴	۸۱۰۶/۶	Min

مسئله ۴

تعداد نقاط مورد بررسی ۷ نقطه می‌باشد.

۹۶۱/۹۴	۹۴۸/۷۹	۹۳۵/۶۴	۹۲۲/۴۹	۹۰۹/۳۴	۸۹۶/۱۹	۸۸۳/۰۴	۴
۸۱۰۶/۶	۸۷۸۴/۲	۸۷۸۴/۲	۸۹۵۷/۱	۱۰۲۳۹/۲	۱۰۲۳۹/۲	۱۱۵۸۵/۲	مقدار تابع هدف اول
۹۶۱/۹۴	۹۳۰/۷	۹۳۰/۷	۹۱۹/۱۲	۸۸۷/۸	۸۸۷/۸	۸۸۳/۰۴	مقدار تابع هدف دوم

جدول ۲۱. حل مسئله پنجم به روش محدودیت افسیلون



مقدار تابع هدف دوم	مقدار تابع هدف اول	تابع هدف اصلی (تابع هدف اول)
۹۵۱/۹۶	۷۸۳۷/۱	حل با تابع هدف اول
۸۷۸/۰۵	۱۵۶۵۳/۱	حل با تابع هدف دوم
۹۵۱/۹۶	۱۵۶۵۳/۱	Max
۸۷۸/۰۵	۷۸۳۷/۱	Min

مسئله ۵

تعداد نقاط مورد بررسی ۷ نقطه می‌باشد.

۹۵۱/۹۶	۹۳۹/۶۴۱۶۶۷	۹۲۷/۳۳۳۳۳	۹۱۵/۰۰۵	۹۰۲/۶۸۶۶۷	۸۹۰/۳۶۸۳۳	۸۷۸/۰۵	۴
۷۸۳۷/۱	۸۵۰۴/۳	۸۵۰۴/۳	۸۷۳۷/۱	۹۹۱/۸۵	۹۹۱/۸۵	۱۵۶۵۳/۱	مقدار تابع هدف اول
۹۵۱/۹۶	۹۲۵/۷۱	۹۲۵/۷۱	۹۰۹/۳۴	۸۸۲/۷۷	۸۸۲/۷۷	۸۷۸/۰۵	مقدار تابع هدف دوم



جدول ۳۱. حل مسئله ششم به روش محدودیت افسیلون

نمودار پارتو		مقدار تابع هدف دوم	مقدار تابع هدف اول	تابع هدف اصلی (تابع هدف اول)	مسئله ۶		
۱۱۱۰/۰۴	۱۰۷۱/۳۷۵	۱۰۳۲/۷۱	۹۹۴/۰۴۵	۹۵۵/۳۸	۹۱۶/۷۱۵	۸۷۸/۰۵	۴
۷۱۳۰/۳۰۲	۷۱۳۰/۳۰۲	۷۳۴۲/۶	۷۴۳۹	۲۸۸۷/۱	۸۸۳۷/۴	۱۵۶۵۳/۱	مقدار تابع هدف اول
۱۱۱۰/۰۴	۱۰۶۰/۰۴	۱۰۱۷/۵۸	۹۶۵/۲۴	۹۵۰/۲۶	۹۱۴/۴۴	۸۷۸/۰۵	مقدار تابع هدف دوم

تعداد نقاط مورد بررسی ۷ نقطه می‌باشد.

جدول ۴۱. حل مسئله هفتم به روش محدودیت افسیلون

نمودار پارتو		مقدار تابع هدف دوم	مقدار تابع هدف اول	تابع هدف اصلی (تابع هدف اول)	مسئله ۷	
۲۲۵۶/۷۴	۱۳۴۱۶/۳	۲۸۲۵۶/۲	۲۸۳۵۶/۲	۱۳۴۱۶/۳	۱۳۴۱۶/۳	حل با تابع هدف اول
۱۹۵۵/۰۶	۱۳۴۱۶/۳	۲۸۲۵۶/۲	۲۸۳۵۶/۲	۱۳۴۱۶/۳	۱۳۴۱۶/۳	حل با تابع هدف دوم
۲۲۵۶/۷۴	۱۳۴۱۶/۳	۲۸۲۵۶/۲	۲۸۳۵۶/۲	۱۳۴۱۶/۳	۱۳۴۱۶/۳	Max
۱۹۵۵/۰۶	۱۳۴۱۶/۳	۲۸۲۵۶/۲	۲۸۳۵۶/۲	۱۳۴۱۶/۳	۱۳۴۱۶/۳	Min

تابع اهداف بالا به جواب بهینه سراسری دست نیافت.

توجه: باتوجهبه زمان حل مسئله در حدود ۳۶۰۰۰ ثانیه به جواب بهینه سراسری دست یافته نشد.

به‌طور مشخص، در تمامی سناریوها، مناطقی که امتیاز ریسک بالاتری داشتند، زودتر از سایر مناطق تحت پوشش عملیات قرار گرفتند که این موضوع از انطباق نتایج مدل با منطق عملیاتی مدیریت بحران حکایت دارد.

افزون‌براین، تحلیل حساسیت مدل نسبت به ریسک مناطق نشان داد مناطق با ریسک بالاتر (به‌ویژه از نظر ریسک جانی و آلودگی زیست‌محیطی) در اولویت تخصیص تیم‌های آواربرداری و جمع‌آوری قرار گرفتند. این امر بیانگر آن است که فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) به‌کاررفته در مرحله اولویت‌بندی ریسک، توانسته است با دقت مناسبی تصمیم‌گیری مدل را هدایت کند.

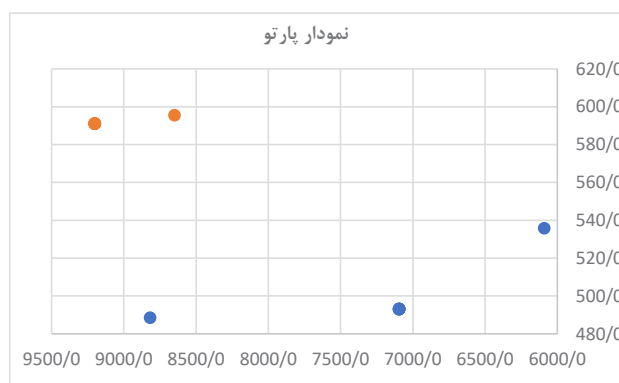
جدول ۵۱. زمان حل و جواب مسئله

State	CPU Time (s)	مسئله
Global Opt	۱	۱
Global Opt	۷	۲
Global Opt	۳۵	۳
Global Opt	۱۱۰	۴
Global Opt	۱۵۶	۵
Global Opt	۷۳۴	۶
Local Opt	۳۶۰۰۰	۷



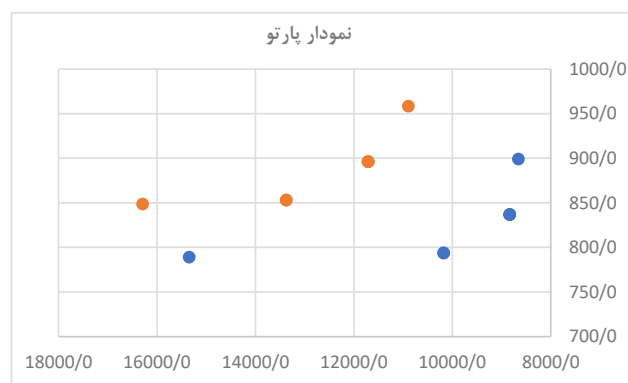
جدول ۶۱. مقایسه نقاط پارتو دو سیستم حمل و نقل مسئله ۱ (به روش محدودیت اِپسیلون)

نقاط پارتو							مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم	مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم	مقایسه تابع هدف اول	مقایسه تابع هدف دوم	مسئله ۱		
۶۰۹۱/۶	۷۰۹۵/۶	۷۰۹۵/۶	۷۰۹۵/۶	۷۰۹۵/۶	۷۰۹۵/۶	۸۸۱/۸									
۶۰۹۱/۶	۷۰۹۵/۶	۷۰۹۵/۶	۷۰۹۵/۶	۷۰۹۵/۶	۷۰۹۵/۶	۸۸۱/۸	مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم	مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم	مقایسه تابع هدف اول	مقایسه تابع هدف دوم		مسئله ۱	
۵۳۵/۹	۴۹۳/۱	۴۹۳/۱	۴۹۳/۱	۴۹۳/۱	۴۹۳/۱	۴۸۸/۵	مقدار تابع هدف دوم	مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم	مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم	مقایسه تابع هدف اول			مقایسه تابع هدف دوم
۸۶۵۰/۰	۹۲۰۲/۰	۹۲۰۲/۰	۹۲۰۲/۰	۹۲۰۲/۰	۹۲۰۲/۰	۹۲۰۲/۰	مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم	مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم	مقایسه تابع هدف اول	مقایسه تابع هدف دوم			مسئله ۲
۵۹۵/۶	۵۹۱/۲	۵۹۱/۲	۵۹۱/۲	۵۹۱/۲	۵۹۱/۲	۵۹۱/۲	مقدار تابع هدف دوم	مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم	مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم	مقایسه تابع هدف اول			
۴۲/۰	۲۹/۷	۲۹/۷	۲۹/۷	۲۹/۷	۲۹/۷	۴/۳	مقایسه تابع هدف اول	مقایسه تابع هدف دوم	مقایسه تابع هدف اول	مقایسه تابع هدف دوم	مقایسه تابع هدف اول	مقایسه تابع هدف دوم	مسئله ۲		
۱۱/۱	۱۹/۹	۱۹/۹	۱۹/۹	۱۹/۹	۱۹/۹	۲۱/۰	مقایسه تابع هدف دوم	مقایسه تابع هدف اول	مقایسه تابع هدف دوم	مقایسه تابع هدف اول	مقایسه تابع هدف دوم	مقایسه تابع هدف اول			مقایسه تابع هدف دوم



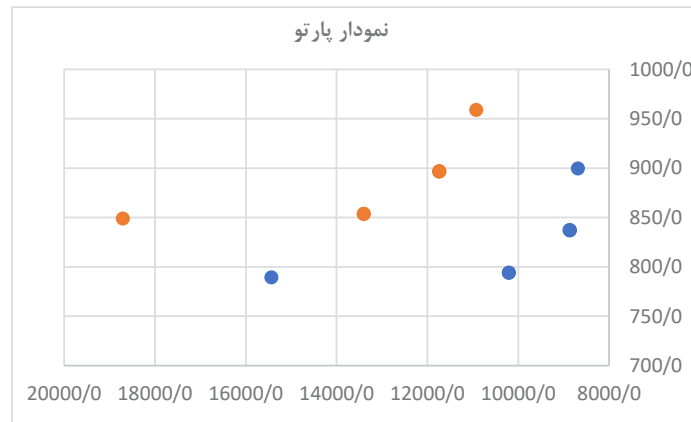
جدول ۷۱. مقایسه نقاط پارتو دو سیستم حمل و نقل مسئله ۲ (به روش محدودیت اِپسیلون)

نقاط پارتو							مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم	مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم	مقایسه تابع هدف اول	مقایسه تابع هدف دوم	مسئله ۲		
۸۶۵۵/۴	۸۸۳۲/۶	۸۸۳۲/۶	۸۸۳۲/۶	۱۰۱۷۳/۸	۱۰۱۷۳/۸	۱۵۳۳۷/۴									
۸۶۵۵/۴	۸۸۳۲/۶	۸۸۳۲/۶	۸۸۳۲/۶	۱۰۱۷۳/۸	۱۰۱۷۳/۸	۱۵۳۳۷/۴	مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم	مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم	مقایسه تابع هدف اول	مقایسه تابع هدف دوم		مسئله ۲	
۸۹۹/۲	۸۳۶/۹	۸۳۶/۹	۸۳۶/۹	۷۹۳/۸	۷۹۳/۸	۷۸۹/۱	مقدار تابع هدف دوم	مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم	مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم	مقایسه تابع هدف اول			مقایسه تابع هدف دوم
۱۰۸۹۳/۰	۱۱۷۱۰/۲	۱۱۷۱۰/۲	۱۱۷۱۰/۲	۱۳۳۷۱/۰	۱۳۳۷۱/۰	۱۶۲۹۱/۶	مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم	مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم	مقایسه تابع هدف اول	مقایسه تابع هدف دوم			مسئله ۲
۹۵۸/۶	۸۹۶/۴	۸۹۶/۴	۸۹۶/۴	۸۵۳/۳	۸۵۳/۳	۸۴۸/۸	مقدار تابع هدف دوم	مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم	مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم	مقایسه تابع هدف اول			
۲۵/۹	۳۲/۶	۳۲/۶	۳۲/۶	۳۱/۴	۳۱/۴	۶/۲	مقایسه تابع هدف اول	مقایسه تابع هدف دوم	مقایسه تابع هدف اول	مقایسه تابع هدف دوم	مقایسه تابع هدف اول	مقایسه تابع هدف دوم	مسئله ۲		
۶/۶	۷/۱	۷/۱	۷/۱	۷/۵	۷/۵	۷/۶	مقایسه تابع هدف دوم	مقایسه تابع هدف اول	مقایسه تابع هدف دوم	مقایسه تابع هدف اول	مقایسه تابع هدف دوم	مقایسه تابع هدف اول			مقایسه تابع هدف دوم



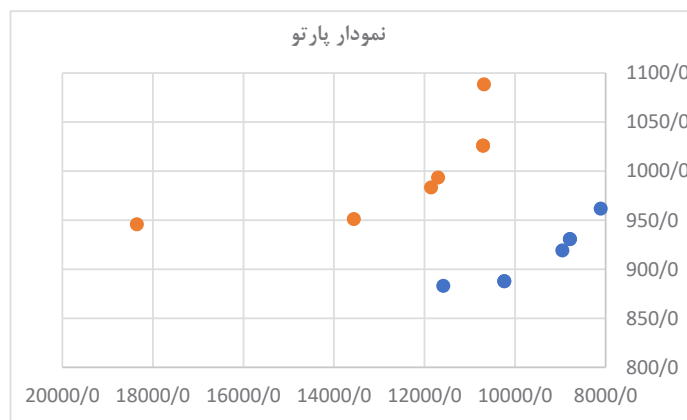
جدول ۸۱. مقایسه نقاط پارتو دو سیستم حمل و نقل مسئله ۳ (به روش محدودیت اپسیلون)

نقاط پارتو							مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم	مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم	مقایسه تابع هدف اول	مقایسه تابع هدف دوم	مسئله ۳
۸۶۸۳/۴	۸۸۶۰/۶	۸۸۶۰/۶	۸۸۶۰/۶	۱۰۲۰۱/۸	۱۰۲۰۱/۸	۱۵۴۲۹/۴							
۸۹۹,۵	۸۳۷/۲	۸۳۷/۲	۸۳۷/۲	۷۹۴/۱	۷۹۴/۱	۷۸۹/۳	۷۸۹/۳	۱۸۷۰۳/۰	۸۴۹/۰	۲۱/۲	۷/۶	حمل و نقل جاده‌ای	
۱۰۹۲۱/۰	۱۱۷۳۸/۲	۱۱۷۳۸/۲	۱۱۷۳۸/۲	۱۳۳۹۹/۰	۱۳۳۹۹/۰	۱۸۷۰۳/۰	۷۸۹/۳	۱۸۷۰۳/۰	۸۴۹/۰	۲۱/۲	۷/۶	مقایسه دو مدل	
۹۵۸/۹	۸۹۶/۷	۸۹۶/۷	۸۹۶/۷	۸۵۳/۶	۸۵۳/۶	۸۴۹/۰	۷۸۹/۳	۱۸۷۰۳/۰	۸۴۹/۰	۲۱/۲	۷/۶	حمل و نقل	
۲۵/۸	۳۲/۵	۳۲/۵	۳۲/۵	۳۱/۳	۳۱/۳	۲۱/۲	۷۸۹/۳	۱۸۷۰۳/۰	۸۴۹/۰	۲۱/۲	۷/۶	مقایسه دو مدل	
۶/۶	۷/۱	۷/۱	۷/۱	۷/۵	۷/۵	۷/۶	۷۸۹/۳	۱۸۷۰۳/۰	۸۴۹/۰	۲۱/۲	۷/۶	حمل و نقل	



جدول ۹۱. مقایسه نقاط پارتو دو سیستم حمل و نقل مسئله ۴ (به روش محدودیت اپسیلون)

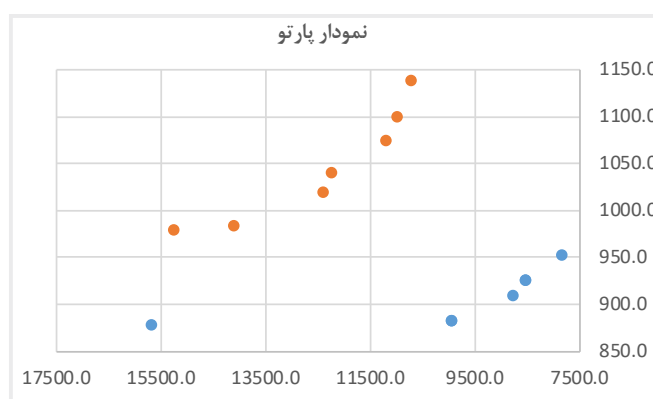
نقاط پارتو							مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم	مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم	مقایسه تابع هدف اول	مقایسه تابع هدف دوم	مسئله ۴
۸۱۰۶/۶	۸۷۸۴/۲	۸۷۸۴/۲	۸۹۵۷/۱	۱۰۲۳۹/۲	۱۰۲۳۹/۲	۱۱۵۸۵/۲							
۹۶۱/۹	۹۳۰/۷	۹۳۰/۷	۹۱۹/۱	۸۸۷/۸	۸۸۷/۸	۸۸۳/۰	۸۸۳/۰	۱۸۳۵۲/۲	۹۴۵/۸	۵۸/۴	۷/۱	حمل و نقل جاده‌ای	
۱۰۶۸۸/۲	۱۰۷۰۳/۴	۱۰۷۰۳/۴	۱۱۷۰۲/۲	۱۱۸۵۲/۲	۱۳۵۵۷/۴	۱۸۳۵۲/۲	۹۴۵/۸	۱۸۳۵۲/۲	۹۴۵/۸	۵۸/۴	۷/۱	مقایسه دو مدل	
۱۰۸۸/۶	۱۰۲۶/۲	۱۰۲۶/۲	۹۹۳/۵	۹۸۳/۵	۹۵۱/۳	۹۴۵/۸	۹۴۵/۸	۱۸۳۵۲/۲	۹۴۵/۸	۵۸/۴	۷/۱	حمل و نقل	
۳۱/۸	۲۱/۸	۲۱/۸	۳۰/۶	۱۵/۸	۳۲/۴	۵۸/۴	۹۴۵/۸	۱۸۳۵۲/۲	۹۴۵/۸	۵۸/۴	۷/۱	مقایسه دو مدل	
۱۳/۲	۱۰/۳	۱۰/۳	۸/۱	۱۰/۸	۷/۲	۷/۱	۹۴۵/۸	۱۸۳۵۲/۲	۹۴۵/۸	۵۸/۴	۷/۱	حمل و نقل	





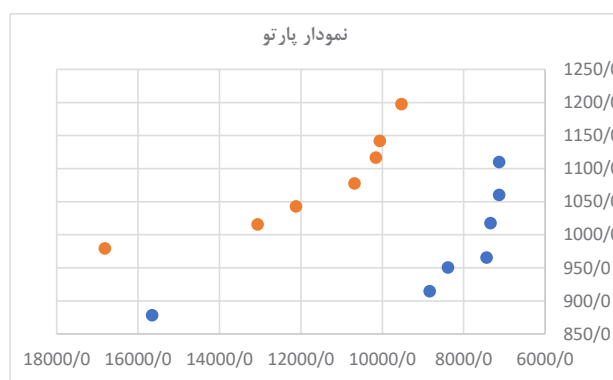
جدول ۰۲. مقایسه نقاط پارتو دو سیستم حمل و نقل مسئله ۵ (به روش محدودیت اسپیلون)

نقاط پارتو							مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم	مقایسه تابع هدف اول	مقایسه تابع هدف دوم	مسئله ۵
۷۸۲۷/۱	۸۵۰۴/۳	۸۵۰۴/۳	۸۷۳۷/۸	۹۹۱۸/۵	۹۹۱۸/۵	۱۵۶۵۳/۱					
۹۵۲/۰	۹۲۵/۷	۹۲۵/۷	۹۰۹/۳	۸۸۲/۸	۸۸۲/۸	۸۷۸/۱	مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم	مقایسه تابع هدف اول	مقایسه تابع هدف دوم	
۱۰۶۸۹,۹	۱۰۹۷۰,۷	۱۱۱۶۹,۶	۱۲۲۲۱,۷	۱۲۳۶۲,۲	۱۴۰۸۴,۸	۱۵۲۲۲,۸	مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم	مقایسه تابع هدف اول	مقایسه تابع هدف دوم	
۱۱۳۸/۶	۱۰۹۹/۴	۱۰۷۴/۳	۱۰۳۹/۹	۱۰۱۸/۵	۹۳۸/۸	۹۷۹/۲	مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم	مقایسه تابع هدف اول	مقایسه تابع هدف دوم	
۳۶/۶	۲۹/۰	۳۱/۳	۳۹/۹	۲۴/۶	۴۲/۰	-۲/۷	مقایسه تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم	مقایسه تابع هدف اول	مقایسه تابع هدف دوم	
۱۹/۶	۱۸/۸	۱۶/۱	۱۴/۴	۱۵/۴	۱۱/۴	۱۱/۵	مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم	مقایسه تابع هدف اول	مقایسه تابع هدف دوم	



جدول ۰۳. مقایسه نقاط پارتو دو سیستم حمل و نقل مسئله ۶ (به روش محدودیت اسپیلون)

نقاط پارتو							مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم	مقایسه تابع هدف اول	مقایسه تابع هدف دوم	مسئله ۶
۷۱۳۰/۳	۷۱۳۰/۳	۷۳۴۲/۶	۷۴۳۹/۰	۸۳۸۷/۱	۸۸۳۷/۴	۱۵۶۵۳/۱					
۱۱۱۰/۰	۱۰۶۰/۰	۱۰۱۷/۶	۹۶۵/۲	۹۵۰/۳	۹۱۴/۴	۸۷۸/۱	مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم	مقایسه تابع هدف اول	مقایسه تابع هدف دوم	
۹۵۲۸/۵	۱۰۰۶۰/۵	۱۰۱۶۰/۰	۱۰۶۸۲/۱	۱۲۱۲۳/۳	۱۳۰۶۶/۰	۱۶۸۱۷/۶	مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم	مقایسه تابع هدف اول	مقایسه تابع هدف دوم	
۱۱۹۷/۶	۱۱۴۱/۸	۱۱۱۶/۷	۱۰۷۷۷/۶	۱۰۴۲/۹	۱۰۱۵/۴	۹۷۹/۲	مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم	مقایسه تابع هدف اول	مقایسه تابع هدف دوم	
۳۳/۶	۴۱/۱	۳۸/۴	۴۳/۶	۴۴/۵	۴۷/۸	۷/۴	مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم	مقایسه تابع هدف اول	مقایسه تابع هدف دوم	
۷/۹	۷/۷	۹/۷	۱۱/۶	۹/۸	۱۱/۰	۱۱/۵	مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم	مقایسه تابع هدف اول	مقایسه تابع هدف دوم	





جدول ۲۲. اطلاعات اولیه ده سناریو مسئله ۴

سناریو	فاصله تا سایت موقت مدیریت پسماند									فاصله تا ایستگاه قطار	حجم پسماند منطقه (تن)	مناطق نیازمند آواربرداری	مسئله ۴
	سناریو ۱۰	سناریو ۹	سناریو ۸	سناریو ۷	سناریو ۶	سناریو ۵	سناریو ۴	سناریو ۳	سناریو ۲				
۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۱۴	۲۰۰۰	منطقه ۱	
۲۰	۱۸	۱۶	۱۴	۱۲	۱۰	۸	۶	۴	۲	۲	۴۰۰۰	منطقه ۲	
۳۰	۲۷	۲۴	۲۱	۱۸	۱۵	۱۲	۹	۶	۳	۱۴	۳۰۰۰	منطقه ۳	
۲۵	۲۳	۲۰	۱۸	۱۶	۱۴	۱۱	۹	۷	۴	۱۰	۱۰۰۰	منطقه ۴	

جدول ۳۲. نتایج حل ده سناریو مسئله ۴ برای تابع هدف اول

سناریو	نوع مدل حمل پسماند (حل با تابع هدف اول)									فاصله تا ایستگاه قطار	حجم پسماند منطقه (تن)	مناطق نیازمند آواربرداری	مسئله ۴	
	سناریو ۱۰	سناریو ۹	سناریو ۸	سناریو ۷	سناریو ۶	سناریو ۵	سناریو ۴	سناریو ۳	سناریو ۲					سناریو ۱
	جاده‌ای	جاده‌ای	جاده‌ای	جاده‌ای	جاده‌ای	جاده‌ای	جاده‌ای	جاده‌ای	جاده‌ای	جاده‌ای	۱۴	۲۰۰۰	منطقه ۱	
	ترکیبی	ترکیبی	ترکیبی	ترکیبی	ترکیبی	ترکیبی	ترکیبی	ترکیبی	جاده‌ای	جاده‌ای	۲	۴۰۰۰	منطقه ۲	
	ترکیبی	ترکیبی	ترکیبی	ترکیبی	ترکیبی	جاده‌ای	جاده‌ای	جاده‌ای	جاده‌ای	جاده‌ای	۱۴	۳۰۰۰	منطقه ۳	
	ترکیبی	ترکیبی	ترکیبی	ترکیبی	ترکیبی	ترکیبی	جاده‌ای	جاده‌ای	جاده‌ای	جاده‌ای	۱۰	۱۰۰۰	منطقه ۴	

جدول ۴۲. نتایج حل ده سناریو مسئله ۴ برای تابع هدف دوم

سناریو	نوع مدل حمل پسماند (حل با تابع هدف دوم)									فاصله تا ایستگاه قطار	حجم پسماند منطقه (تن)	مناطق نیازمند آواربرداری	مسئله ۴	
	سناریو ۱۰	سناریو ۹	سناریو ۸	سناریو ۷	سناریو ۶	سناریو ۵	سناریو ۴	سناریو ۳	سناریو ۲					سناریو ۱
	ترکیبی	جاده‌ای	جاده‌ای	ترکیبی	جاده‌ای	جاده‌ای	جاده‌ای	جاده‌ای	جاده‌ای	جاده‌ای	۱۴	۲۰۰۰	منطقه ۱	
	ترکیبی	ترکیبی	ترکیبی	ترکیبی	ترکیبی	ترکیبی	جاده‌ای	جاده‌ای	جاده‌ای	جاده‌ای	۲	۴۰۰۰	منطقه ۲	
	ترکیبی	ترکیبی	ترکیبی	ترکیبی	ترکیبی	جاده‌ای	جاده‌ای	جاده‌ای	جاده‌ای	جاده‌ای	۱۴	۳۰۰۰	منطقه ۳	
	ترکیبی	ترکیبی	ترکیبی	جاده‌ای	ترکیبی	ترکیبی	جاده‌ای	جاده‌ای	جاده‌ای	جاده‌ای	۱۰	۱۰۰۰	منطقه ۴	

کارآمدتر عمل می‌کند. به کارگیری رویکرد ارزیابی ریسک مبتنی بر AHP نیز موجب افزایش دقت و اثربخشی تخصیص تیم‌ها شده و قابلیت انطباق مدل پیشنهادی با شرایط واقعی عملیات‌های پسابحران را تأیید می‌کند.

بحث

این پژوهش با هدف توسعه یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه برای پاکسازی پسماند ناشی از بلایای طبیعی طراحی شد که

به‌طور کلی، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد با افزایش ابعاد مسئله، پیچیدگی و زمان حل به‌صورت نمایی رشد می‌کند و این امر ضرورت استفاده از روش‌های فراابتکاری در مقیاس‌های واقعی را برجسته می‌سازد. همچنین میان اهداف کاهش زمان و کاهش هزینه رابطه‌ای متعارض برقرار است و انتخاب راهکار نهایی به اولویت‌های تصمیم‌گیرندگان وابسته می‌شود. افزون‌براین، نتایج نشان می‌دهد در فواصل طولانی، سیستم حمل‌ونقل ترکیبی عملکرد بهتری دارد و در فواصل کوتاه، حمل‌ونقل صرفاً جاده‌ای



نتیجه‌گیری

به‌طور کلی، نتایج این پژوهش چارچوبی جامع و کاربردی برای مدیریت پسماند پساب‌بحران فراهم می‌آورد که می‌تواند به مدیران و سیاست‌گذاران در انتخاب راهبردهای بهینه کمک کند. این چارچوب با در نظر گرفتن هم‌زمان زمان، هزینه و ریسک، به تصمیم‌گیرندگان امکان می‌دهد راهکارهایی متناسب با شرایط واقعی و محدودیت‌های عملیاتی انتخاب کنند. از منظر کاربردی، مدل می‌تواند به افزایش تاب‌آوری شبکه‌های لجستیک پساب‌بحران، بهبود تخصیص منابع و کاهش پیامدهای منفی زیست‌محیطی و اجتماعی ناشی از مدیریت ناکارآمد پسماند کمک کند.

برای توسعه‌های آتی، پیشنهاد می‌شود مدل در بستر سناریوهای واقعی مورد اعتبارسنجی میدانی قرار گیرد و هم‌زمان عدم قطعیت‌های مرتبط با دسترسی زیرساخت‌ها و ظرفیت‌های حمل‌ونقل در آن لحاظ شود. علاوه‌براین، ادغام الگوریتم‌های فرآینک‌سازی و هوش مصنوعی می‌تواند مسیر دستیابی به پاسخ‌های با کیفیت در مقیاس‌های بزرگ را هموارتر سازد. چنین رویکردی موجب خواهد شد مدل پیشنهادی نه‌تنها از نظر نظری غنی‌تر شود بلکه در عمل نیز به ابزاری کارآمد برای مدیریت بلافاصله کاهش آثار مخرب آن بر جوامع آسیب‌پذیر تبدیل گردد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

در این پژوهش اصول و قوانین اخلاقی رعایت شده است.

حامی مالی

این پژوهش هیچ‌گونه کمک مالی از سازمان‌های دولتی، خصوصی و غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان به‌طور یکسان در مفهوم و طراحی مطالعه، جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل داده‌ها، تفسیر نتایج و تهیه پیش‌نویس مقاله مشارکت داشتند.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، این مقاله تعارض منافع ندارد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از تمامی اساتید محترم دانشگاه علوم و فنون مازندران به خاطر حمایت‌های ارزشمندشان قدردانی می‌کنند.

ویژگی اصلی آن استفاده هم‌زمان از حمل‌ونقل ترکیبی کامیون-قطار و اولویت‌بندی مناطق آسیب‌دیده براساس سطح ریسک بود. نتایج حاصل از حل مسائل نمونه نشان داد مدل پیشنهادی قادر است میان دو هدف متعارض، یعنی کاهش زمان اتمام عملیات و کاهش هزینه‌های کل، تعادلی نسبی ایجاد کند و هم‌زمان با هدایت تخصیص منابع براساس ریسک، فرآیند تصمیم‌گیری را به واقعیت‌های میدانی عملیات‌های پساب‌بحران نزدیک‌تر سازد. این موضوع نشان می‌دهد مدل نه‌تنها از نظر تئوریک واجد اعتبار است بلکه قابلیت پیاده‌سازی عملی نیز دارد و می‌تواند در شرایط بحرانی واقعی مورد استفاده قرار گیرد.

بررسی کارایی سیستم حمل‌ونقل نشان داد انتخاب میان دو رویکرد صرفاً جاده‌ای و ترکیبی به‌شدت به ویژگی‌های جغرافیایی و فاصله میان مناطق بستگی دارد. زمانی که فاصله‌ها کوتاه باشد، حمل‌ونقل جاده‌ای کارآمدتر عمل می‌کند و امکان تکمیل عملیات در مدت‌زمان کمتر و با هزینه مناسب‌تر فراهم می‌شود. در مقابل، زمانی که فواصل میان مناطق آسیب‌دیده و مراکز دفع یا بازیافت افزایش می‌یابد، حمل‌ونقل ترکیبی کامیون-قطار مزیت قابل توجهی ایجاد می‌کند و به کاهش هم‌زمان هزینه و زمان عملیات منجر می‌شود. نتایج عددی نشان داد در چنین شرایطی، استفاده از رویکرد ترکیبی به کاهش حدود ۳۰ درصدی زمان کل و بیش از ۱۱ درصدی هزینه‌های عملیاتی منجر شده است که این یافته اهمیت طراحی شبکه‌های حمل‌ونقل مقاوم و منعطف را تأیید می‌کند.

یکی دیگر از جنبه‌های مهم نتایج این پژوهش، عملکرد فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی در اولویت‌بندی مناطق آسیب‌دیده بود. نتایج حاکی از آن است که به‌کارگیری این رویکرد توانست تخصیص تیم‌های عملیاتی را با دقت بیشتری هدایت کند و موجب شد مناطقی با ریسک بالاتر، زودتر تحت پوشش عملیات قرار گیرند. این امر نشان می‌دهد ترکیب روش‌های بهینه‌سازی ریاضی با رویکردهای تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌تواند ابزاری قدرتمند برای مدیران بحران باشد و کارایی مداخلات پساب‌بحران را به شکل معناداری افزایش دهد.

از منظر محاسباتی، نتایج نشان داد مدل در مقیاس‌های کوچک با کارایی کامل عمل می‌کند و پاسخ‌های بهینه سراسری در زمان بسیار کوتاه قابل دستیابی است. با این حال، با افزایش ابعاد مسئله، زمان حل به‌طور نمایی رشد می‌کند و در مواردی حتی پس از صرف چندین ساعت تنها پاسخ‌های محلی قابل دستیابی هستند. این یافته نشان می‌دهد هرچند مدل پیشنهادی از نظر مفهومی و ساختاری توانمند است، اما برای استفاده در مقیاس‌های بزرگ نیازمند توسعه و به‌کارگیری روش‌های فرآینک‌سازی و الگوریتم‌های پیشرفته است تا بتوان در زمان معقول به پاسخ‌های با کیفیت دست یافت.



References

- Alziari, S., Stepien, G., & Durand, R. (1981). In vitro incorporation of (35 S)-methionine in mitochondrial proteins of drosophila melanogaster. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 99(1), 1-8. [DOI:10.1016/0006-291X(81)91704-6] [PMID]
- Amato, A., Gabrielli, F., Spinozzi, F., Galluzzi, L. M., Balducci, S., & Beolchini, F. (2019). Strategies of disaster waste management after an earthquake: A sustainability assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, 146, 590-597. [DOI:10.1016/j.resconrec.2019.02.033]
- Amato, A., Gabrielli, F., Spinozzi, F., Magi Galluzzi, L., Balducci, S., & Beolchini, F. (2020). Disaster waste management after flood events. *Journal of Flood Risk Management*, 13, e12566. [DOI:10.1111/jfr3.12566]
- Aoki, K., Akiyama, M., Alhamid, A. K., Frangopol, D. M., & Koshimura, S. (2025). Resilience-based estimation of the disaster waste disposal time considering interdependencies between waste disposal and road network systems under seismic and tsunami hazards in coastal communities. *Reliability Engineering & System Safety*, 262, 111242. [DOI:10.1016/j.res.2025.111242]
- Archetti, C., Peirano, L., & Speranza, M. G. (2022). Optimization in multimodal freight transportation problems: A Survey. *European Journal of Operational Research*, 299(1), 1-20. [DOI:10.1016/j.ejor.2021.07.031]
- Babbitt, C. W. (2019). The role of clean technology research in disaster debris management. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21, 923-924. [DOI:10.1007/s10098-019-01712-1]
- Babazadeh Rafiei, A., Motamedi, M., Sohrabi, T., & Darvish Motevalli, M. H. (2023a). Design of a scenario-based multi-level and multi-objective mathematical model with the aim of reducing the risk of the blood supply chain in the conditions of the COVID-19 pandemic. *Journal of Industrial Engineering and Management Studies*, 10(2), 59-74. [Link]
- Babazadeh Rafiei, A., Sohrabi, T., Motamedi, M., & Darvish Motevalli, M. H. (2024). [A Robust Risk Management Model for the Blood Supply Chain in Corona Pandemic Condition (Persian)]. *Journal of Industrial Management Perspective*, 14(3), 56-78. [DOI: 10.48308/jimp.14.3.56]
- Brown, C., Milke, M., & Seville, E. (2011). Disaster waste management: a review article. *Waste management (New York, N.Y.)*, 31(6), 1085-1098. [DOI:10.1016/j.wasman.2011.01.027] [PMID]
- Brown, C., & Milke, M. (2016). Recycling disaster waste: Feasibility, method and effectiveness. *Resources, Conservation and Recycling*, 106, 21-32. [DOI:10.1016/j.resconrec.2015.10.021]
- Boonmee, C., Arimura, M., & Asada, T. (2018). Location and allocation optimization for integrated decisions on post-disaster waste supply chain management: On-site and off-site separation for recyclable materials. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 31, 902-917. [DOI:10.1016/j.ijdrr.2018.07.003]
- Caldera, S., Jayarathna, C., & Desha, C. (2025a). Evaluating the characteristics of disaster waste management in practice: Case studies from Queensland and New South Wales, Australia. *Sustainability*, 17(14), 6300. [DOI:10.3390/su17146300]
- Caldera, S., Jayarathna, C., & Desha, C. (2025). Disaster Waste Management for Resilient Communities: A systematic literature review. *Cleaner Waste Systems*, 100333. [DOI:10.1016/j.cwas.2024.100197]
- Caldera, S., Jayarathna, C., Ferguson, S., McNeill, J., & Desha, C. (2025). A resilient disaster waste management framework for communities: Experiences from Australian industry practitioners. *Cleaner Waste Systems*, 10, 100197. [DOI:10.1016/j.cwas.2024.100197]
- Cheng, C., Zhang, L., & Thompson, R. G. (2018). Reliability analysis for disaster waste management systems. *Waste Management*, 78, 31-42. [DOI:10.1016/j.wasman.2018.05.011] [PMID]
- Cheng, C., Zhu, R., Costa, A. M., & Thompson, R. G. (2021). Optimization of waste clean-up after large-scale disasters. *Waste Management*, 119, 1-10. [DOI:10.1016/j.wasman.2020.09.023] [PMID]
- Cheng, C., Lu, J. W., Zhu, R., Xiao, Z., Costa, A. M., & Thompson, R. G. (2022). An integrated multi-objective model for disaster waste clean-up systems optimization. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 165, 102867. [DOI:10.1016/j.tre.2022.102867]
- Cheng, C., & Thompson, R. G. (2016). Application of boolean logic and GIS for determining suitable locations for temporary disaster waste management sites. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 20, 78-92. [DOI:10.1016/j.ijdrr.2016.10.011]
- Cheng, C., Zhu, R., Costa, A. M., Thompson, R. G., & Huang, X. (2022b). Multi-period two-echelon location routing problem for disaster waste clean-up. *Transportmetrica A: Transport Science*, 18(3), 1053-1083. [DOI:10.1080/23249935.2021.1916644]
- Cheng, C., Lu, J. W., Zhu, R., Xiao, Z., Costa, A. M., & Thompson, R. G. (2022). An integrated multi-objective model for disaster waste clean-up systems optimization. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 165, 102867. [DOI:10.1016/j.tre.2022.102867]
- Guha-Sapir, D. (2020). *EM-DAT: The Emergency Events Database*. Belgium: Universite Catholique de Louvain. [Link]
- Ghannad, P., Lee, Y. C., & Choi, J. O. (2021). Prioritizing postdisaster recovery of transportation infrastructure systems using multi-agent reinforcement learning. *Journal of Management in Engineering*, 37(1), 04020100. [DOI:10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000868]
- Ghorbanzadeh, M., Koloushani, M., Ulak, M. B., Ozguven, E. E., & Jouneghani, R. A. (2020). Statistical and spatial analysis of hurricane-induced roadway closures and power outages. *Energies*, 13(5), 1098. [DOI:10.3390/en13051098]
- Goodman, L. A. (1961). Snowball sampling. *The Annals of Mathematical Statistics*, 148-170. [DOI:10.1214/aoms/1177705148]
- Habib, M. S., & Sarkar, B. (2017). An integrated location-allocation model for temporary disaster debris management under an uncertain environment. *Sustainability*, 9(5), 716. [DOI:10.3390/su9050716]
- Habib, M. S., Maqsood, M. H., Ahmed, N., Tayyab, M., & Omair, M. (2022). A multi-objective robust possibilistic programming approach for sustainable disaster waste management under disruptions and uncertainties. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 75, 102967. [DOI:10.1016/j.ijdrr.2022.102967]
- Haimes, Y. (1971). On a bicriterion formulation of the problems of integrated system identification and system optimization. *IEEE transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, (3), 296-297. [DOI:10.1109/TSMC.1971.4308298]
- Hu, Z. H., & Sheu, J. B. (2013). Post-disaster debris reverse logistics management under psychological cost minimization. *Transportation Research Part B: Methodological*, 55, 118-141. [DOI:10.1016/j.trb.2013.05.010]

- Jalloul, H., Choi, J., Yesiller, N., Manheim, D., & Derrible, S. (2022). A systematic approach to identify, characterize, and prioritize the data needs for quantitative sustainable disaster debris management. *Resources, Conservation and Recycling*, 180, 106174. [DOI:10.1016/j.resconrec.2022.106174]
- Jha, A. K., Bloch, R., & Lamond, J. (2012). *Cities and flooding: A guide to integrated urban flood risk management for the 21st century*. World Bank Publications. [DOI:10.1596/978-0-8213-8866-2]
- Karunasena, G., Amaratunga, D., & Haigh, R. (2012). Post-disaster construction & demolition debris management: a Sri Lanka case study. *Journal of Civil Engineering and Management*, 18(4), 457-468. [DOI:10.3846/13923730.2012.699913]
- Lee, Y. H., Kim, Y. C., & Lee, H. K. (2022). Framework for selection of temporary disaster waste management sites for post-flood recovery in Seoul, South Korea. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 71, 102832. [DOI:10.1016/j.ijdr.2022.102832]
- Lorca, Á., Çelik, M., Ergun, Ö., & Keskinocak, P. (2017). An optimization-based decision-support tool for post-disaster debris operations. *Production and Operations Management*, 26(6), 1076-1091. [DOI:10.1111/poms.12643]
- Luther, L. (2010). *Managing disaster debris: Overview of regulatory requirements, agency roles, and selected challenges*. Washington: Congressional Research Service. [Link]
- Ma, W., Lin, S., Ci, Y., & Li, R. (2024). Resilience evaluation and improvement of post-disaster multimodal transportation networks. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 189, 104243. [DOI:10.1016/j.tra.2024.104243]
- Mousavi, S. M., Motamedi, M., & Karimi, R. (2024b). A mathematical model of the location problem for central and secondary warehouses in the multi-level supply chain network of perishable products. *International Journal of Research in Industrial Engineering*, 13(1), 11-24. [DOI:10.22105/riiej.2024.394527.1378]
- Nickdoost, N., Jalloul, H., & Choi, J. (2022). An integrated framework for temporary disaster debris management sites selection and debris collection logistics planning using geographic information systems and agent-based modeling. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 80, 103215. [DOI:10.1016/j.ijdr.2022.103215]
- Narimani, R., Motamedi, M., & Khalili, H. A. (2024). [A Mathematical Programming Model for the Distribution of Relief Items in a Humanitarian Supply Chain (Persian)]. *Journal of Emergency Management*, 13(1), 51-69. [Link]
- Narimani, R., & Motamedi, M. (2023). Applying a Mathematical Model for the Distribution of Earthquake Relief Items to the Affected Areas of Tehran. *Disaster Prevention and Management Knowledge (quarterly)*, 13(2), 184-203. [DOI:10.32598/DMKP.13.2.747.1]
- Kim, M. S. (2012). *Safe Treatment and Recycling of Waste According to Recycling Ways - A Study for Making Out Disaster Waste Management Guideline*. Incheon: National Institute of Environmental Research (NIER), Republic of Korea. [Link]
- Onan, K., Ülengin, F., & Sennaroglu, B. (2015). An evolutionary multi-objective optimization approach to disaster waste management: A case study of Istanbul, Turkey. *Expert Systems with Applications*, 42(22), 8850-8857. [DOI:10.1016/j.eswa.2015.07.039]
- Oh, G. J., & Kang, Y. Y. (2013). The status of flood wastes treatment and future tasks in South Korea. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 15, 282-289. [DOI:10.1007/s10163-013-0147-4]
- Pan, X., Guo, S., Mangla, S. K., Madaan, J., Bo, H., & Song, M. (2025). Robust optimization of emergency material multimodal transport supply chain considering collaborative platform. *Annals of Operations Research*, 1-42. [DOI:10.1007/s10479-025-06826-y]
- Pitakaso, R., Srichok, T., Khonjun, S., Golinska-Dawson, P., Sethanan, K., & Nanthasamroeng, N., et al. (2024). Optimization-driven artificial intelligence-enhanced municipal waste classification system for disaster waste management. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 133, 108614. [DOI:10.1016/j.engappai.2024.108614]
- Poornaser, M., Amoozadkhalili, H., Momeni, E., Movahedi, M. M., & Motamedi M. (2022). [Routing disaster relief vehicles in a humanitarian supply chain (Persian)]. *Disaster Prevention and Management Knowledge (quarterly)*, 12(2), 205-216. [Link]
- Rafee, N., Karbassi, A. R., Nouri, J., Safari, E., & Mehrdadi, M. (2008). Strategic management of municipal debris aftermath of an earthquake. *International Journal of Environmental Research*, 2(2), 205-214. [Link]
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83-98. [DOI:10.1504/IJSSCI.2008.017590]
- Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process*. New York: McGraw-Hill. [Link]
- The Federal Emergency Management Agency. (2007). *Public assistance: Debris management guide (FEMA 325)*. Washington: The Federal Emergency Management Agency (FEMA). [Link]
- Torabi, S. A., Namdar, J., Hatefi, S. M., & Jolai, F. (2016). An enhanced possibilistic programming approach for reliable closed-loop supply chain network design. *International Journal of Production Research*, 54(5), 1358-1387. [DOI:10.1080/00207543.2015.1070215]
- Tonneau, Q., Bostel, N., Dejax, P., Hospitalz, R., Mülhauptz, V., & Yeung, T. (2015, October). Multimodal multi-flow problem with transformation: Application to waste supply chain. In *2015 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM)* (pp. 876-882). IEEE. [DOI:10.1109/IESM.2015.7380259]
- Uddin, M., & Huynh, N. (2019). Reliable routing of road-rail intermodal freight under uncertainty. *Networks and Spatial Economics*, 19(3), 929-952. [DOI:10.1007/s11067-018-9438-6]
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). (2019). *Planning for Natural Disaster Debris*. Washington: United States Environmental Protection Agency. [Link]
- Wang, Z., Hu, H., Guo, M., & Gong, J. (2019). Optimization of temporary debris management site selection and site service regions for enhancing postdisaster debris removal operations. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 34(3), 230-247. [DOI:10.1111/mice.12410]
- Xiao, J., Xie, H., & Zhang, C. (2012). Investigation on building waste and reclaim in Wenchuan earthquake disaster area. *Resources, Conservation and Recycling*, 61, 109-117. [DOI:10.1016/j.resconrec.2012.01.012]
- Zhang, F., Cao, C., Li, C., Liu, Y., & Huisingh, D. (2019). A systematic review of recent developments in disaster waste management. *Journal of Cleaner Production*, 235, 822-840. [DOI:10.1016/j.jclepro.2019.06.229]
- Zawawi, E. M. A., Yusof, N. S., & Ismail, Z. (2018). Adoption of post-disaster waste management plan into disaster management guidelines for Malaysia. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 20, 223-236. [DOI:10.1007/s10163-016-0569-x]