



A Multi-Stage Stochastic Programming Model for Humanitarian Relief Logistics in Simultaneous Crisis Situation

Ezzatollah Asgharizadeh*^{ID}

Reza Jalali**^{ID}

Alireza Saffarian***^{ID}

Extended Abstract

Introduction: Efficient management of relief operations in situations involving concurrent disasters—particularly when secondary crises follow primary ones—constitutes one of the major challenges in humanitarian logistics planning. The complexity of such conditions is intensified by uncertainties in resource demand and the probability of various scenarios, highlighting the necessity of designing models that are both effective and sensitive to these fluctuations. The primary objective of this study is to develop a multi-objective model for resource allocation, transportation scheduling, and minimizing the impacts of resource shortages under simultaneous primary and secondary disaster events. In addition to reducing transportation time and cost, the proposed model aims to minimize unmet demand and ensure a fair distribution of resources among affected areas.

Methods: To achieve these goals, a three-objective model was developed to minimize transportation time, transportation cost, and unmet demand. Using the weighting method, the model was transformed into an equivalent single-objective formulation and solved under diverse uncertainty scenarios related to demand and the likelihood of secondary disasters. To evaluate model robustness, sensitivity analyses were conducted on key parameters, including resource demand and scenario occurrence probabilities. The model's performance in larger-scale settings was also assessed by increasing the number of disaster points, storage centers, and scenarios. Additionally, separate analyses were performed to examine the effects of variations in secondary-disaster demand and transportation costs, allowing for a comprehensive assessment of the model's capability in different crisis conditions.

Received : Jan. 26, 2025; Revised : Feb. 06, 2025; Accepted : May. 13, 2025; Published Online : May. 24, 2025.

*Associate professor, Department of Industrial Management, Faculty of management, Tehran University, Tehran, Iran.

**Assistant Professor, Department of Industrial Management, Faculty of Business and Economics, Persian Gulf University, Bushehr, Iran.

Corresponding Author : Jallai.reza@pgu.ac.ir

***Ph.D. Candidate, Department of Industrial Management, Kish International Campus, Tehran University, Kish, Iran.



Results: Initial results under equal weighting of the three objectives indicated that optimal transportation time and cost remained within acceptable ranges, while unmet demand was minimized, demonstrating the model's effectiveness in balancing conflicting goals. Sensitivity analysis showed that a 20% increase in demand leads to a 5.3% rise in transportation time and a 7.1% increase in unmet demand, whereas costs rise by only 3.8%, indicating the model's robustness. Similarly, a 10% increase in the probability of secondary-disaster scenarios increases transportation time by 4.6% and unmet demand by 3.2%. Large-scale experiments revealed that when the number of disaster points increases to 50 and scenarios to 100, applying the two-stage method reduces the solution time from 145 to 48 minutes, while the resource coverage rate declines by only 2.9%, confirming the model's scalability. Evaluation of objective weights indicated that the cost function is the most sensitive to weight variations, whereas transportation time and unmet demand exhibit relatively stable behavior. Comparing resource allocation between scenarios with and without secondary disasters showed that including secondary crises increases the average resource coverage in non-priority areas from 8% to 60%, reflecting a more equitable distribution of resources. Analysis of the secondary disaster demonstrated that a 20% increase in storm-related demand raises total cost by 13% and unmet demand by 20%. Furthermore, a 20% increase in transportation cost in the secondary stage increases total cost by 10% while slightly improving transportation time. The final unmet-demand sensitivity analysis confirmed the model's stability against variations in key parameters.

Conclusion: Overall, the proposed model exhibits robustness and flexibility under uncertainty and can effectively and equitably improve resource allocation in complex situations involving simultaneous disasters. The distinct sensitivity of the objectives and the significant role of secondary disasters suggest that effective humanitarian logistics planning requires an appropriate combination of objective weighting and careful consideration of secondary crisis dynamics.

Keywords: Humanitarian Relief; Simultaneous Crises; Stochastic Programming; Multi-Objective Programming; Resource Allocation.

How to Cite: Asgharizadeh, Ezzatollah; Jalali, Reza; Saffarian, Alireza (2025). A Multi-Stage Stochastic Programming Model for Humanitarian Relief Logistics in Simultaneous Crisis Situation. *Ind. Manag. Persp.*, 15(3), 91-117 (In Persian).



مدل برنامه‌ریزی تصادفی چند مرحله‌ای لجستیک امداد بشردوستانه در شرایط بحران‌های همزمان

عزت‌الله اصغری‌زاده^{۱*}

رضا جلالی^{۲**}

علیرضا صفاریان^{۳***}

چکیده گسترده

مقدمه: مدیریت بهینه عملیات امداد و نجات در شرایط وقوع بلایای همزمان، به‌ویژه هنگامی که بحران‌های ثانویه نیز به دنبال بحران‌های اولیه رخ می‌دهند، یکی از چالش‌های اساسی در برنامه‌ریزی لجستیک انسان‌دوستانه محسوب می‌شود. پیچیدگی این شرایط در اثر عدم قطعیت در تقاضای منابع و احتمال وقوع سناریوهای مختلف تشدید شده و لزوم طراحی مدل‌هایی کارآمد و حساس به این تغییرات را ضروری می‌کند. هدف اصلی این پژوهش توسعه مدلی چندهدفه برای تخصیص منابع، زمان‌بندی حمل‌ونقل و به حداقل رساندن اثرات کمبود منابع در شرایط وقوع همزمان بلایای اولیه و ثانویه است. این مدل تلاش دارد علاوه بر کاهش زمان و هزینه حمل‌ونقل، سطح تقاضای تأمین‌نشده را نیز تا حد ممکن کاهش داده و توزیعی عادلانه از منابع را در میان مناطق آسیب‌دیده تضمین کند.

روش‌ها: برای دستیابی به اهداف فوق، یک مدل سه‌هدفه شامل کمینه‌سازی زمان حمل‌ونقل، هزینه حمل‌ونقل و تقاضای تأمین‌نشده توسعه یافت. مدل با استفاده از روش وزن‌دهی به یک مدل تک‌هدفه معادل تبدیل و با اعمال سناریوهای متنوع عدم قطعیت در تقاضا و احتمال وقوع بلایای ثانویه حل شد. جهت ارزیابی پایداری مدل، تحلیل حساسیت روی پارامترهای کلیدی شامل تقاضای منابع و احتمال وقوع سناریوها انجام گرفت. همچنین عملکرد مدل در مقیاس‌های بزرگ‌تر با افزایش تعداد نقاط بحران، مراکز ذخیره‌سازی و سناریوها بررسی شد. علاوه بر این، تأثیر تغییرات تقاضای بحران ثانویه و هزینه‌های حمل‌ونقل نیز از طریق تحلیل‌های جداگانه مورد ارزیابی قرار گرفت تا توانایی مدل در شرایط متفاوت بحرانی سنجیده شود.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۷، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۱۸، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۳، تاریخ اولین انتشار: ۱۴۰۴/۰۳/۰۶.

*دانشیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

**استادیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده کسب و کار و اقتصاد، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران.

***دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، پردیس کیش، دانشگاه تهران، کیش، ایران.

نوع مقاله: پژوهشی

یافته‌ها: نتایج اولیه مدل در شرایط وزن‌دهی برابر میان سه هدف نشان داد که مقدار بهینه زمان و هزینه حمل‌ونقل در سطح قابل‌قبولی حفظ شده و میزان تقاضای تأمین‌نشده نیز در کمترین مقدار ممکن قرار می‌گیرد، که بیانگر کارایی مدل در ایجاد توازن میان اهداف متعارض است. تحلیل حساسیت نشان داد افزایش ۲۰ درصدی تقاضا منجر به افزایش ۵/۳ درصدی زمان حمل‌ونقل و ۷/۱ درصدی تقاضای تأمین‌نشده می‌شود، در حالی که هزینه تنها ۳/۸ درصد افزایش می‌یابد که نشانگر پایداری مدل است. همچنین، افزایش ۱۰ درصدی احتمال وقوع سناریوهای ثانویه زمان حمل‌ونقل را ۴/۶ درصد و تقاضای تأمین‌نشده را ۳/۲ درصد افزایش می‌دهد. نتایج مقیاس بزرگ نیز نشان داد با افزایش تعداد نقاط بحران به ۵۰ و تعداد سناریوها به ۱۰۰، استفاده از روش دومرحله‌ای زمان حل را از ۱۴۵ به ۴۸ دقیقه کاهش داده و نرخ تأمین منابع تنها ۲/۹ درصد افت می‌کند، که قابلیت تعمیم مدل را تأیید می‌کند. ارزیابی وزن اهداف نشان داد تابع هزینه بیشترین حساسیت را به وزن‌ها دارد، در حالی که زمان حمل‌ونقل و تقاضای تأمین‌نشده رفتار نسبتاً پایداری نشان می‌دهند. مقایسه تخصیص منابع در سناریوهای شامل بلایای اولیه و ثانویه نیز آشکار ساخت در نظر گرفتن بلایای ثانویه موجب افزایش میانگین نرخ تأمین منابع از ۸٪ به ۶۰٪ در مناطق غیر اولویت‌دار می‌شود که حاکی از توزیع عادلانه‌تر منابع است. تحلیل بحران ثانویه نشان داد افزایش ۲۰٪ تقاضای طوفان، هزینه کل را ۱۳٪ و تقاضای تأمین‌نشده را ۲۰٪ افزایش می‌دهد. همچنین افزایش ۲۰٪ هزینه حمل‌ونقل در مرحله ثانویه، هزینه کل را ۱۰٪ افزایش اما زمان حمل‌ونقل را اندکی بهبود می‌دهد. تحلیل نهایی حساسیت تقاضای تأمین‌نشده نیز پایدار بودن مدل را در برابر تغییرات پارامترهای کلیدی تأیید کرد.

نتیجه‌گیری: جمع‌بندی نتایج بیانگر آن است که مدل پیشنهادی ضمن برخورداری از پایداری و انعطاف‌پذیری در برابر عدم قطعیت، قادر است تخصیص منابع را در شرایط پیچیده بلایای هم‌زمان به شکل مؤثر و عادلانه بهبود دهد. همچنین حساسیت متفاوت اهداف و اهمیت بلایای ثانویه نشان می‌دهد که برنامه‌ریزی کارآمد لجستیک امدادی باید به ترکیبی از وزن‌دهی مناسب اهداف و لحاظ دقیق بحران‌های ثانویه توجه داشته باشد.

واژگان کلیدی: امدادبشردوستانه، بحران‌های هم‌زمان، برنامه‌ریزی تصادفی، برنامه‌ریزی چندهدفه، تخصیص منابع.

استناددهی: اصغری‌زاده، عزت‌الله؛ جلالی، رضا؛ صفاریان، علیرضا (۱۴۰۴). مدل برنامه‌ریزی تصادفی چند مرحله‌ای لجستیک امداد بشردوستانه در شرایط بحران‌های هم‌زمان. چشم‌انداز مدیریت صنعتی، ۱۵(۳)، ۹۱-۱۱۷.



۱. مقدمه

بلایای طبیعی همواره بخشی جدایی‌ناپذیر از تاریخ بشریت بوده‌اند و پیامدهای مخربی بر جوامع انسانی بر جای گذاشته‌اند. این بلایا که شامل زلزله، سیلاب، طوفان، خشکسالی و آتش‌سوزی می‌شوند، به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم بر زندگی میلیون‌ها نفر تأثیر گذاشته‌اند [۹، ۱۰]. با رشد جمعیت و گسترش شهرنشینی، خطر و شدت این بلایا افزایش یافته و نیاز به مدیریت مؤثر و کارآمد آن‌ها بیش از پیش احساس می‌شود. در دهه‌های گذشته، بلایای بزرگ نظیر زلزله‌های ازمیت (۱۹۹۹)، بم (۲۰۰۳)، سونامی اندونزی (۲۰۰۴) و طوفان کاترینا (۲۰۰۵) اهمیت مدیریت بلایا را در سطح جهانی برجسته کرده‌اند [۶]. غفلت از آن نه تنها روند توسعه پایدار را کاهش می‌دهد، بلکه در صورت غفلت می‌تواند صدمات فاجعه‌بار و گاه جبران‌ناپذیری به رفاه جامعه وارد سازد [۳].

بی‌شک مهمترین موضوع در هنگام وقوع بحران، مسأله کنترل و مدیریت بحران است که لجستیک امداد یکی از مهمترین فعالیت‌ها در این زمینه می‌باشد [۱۲]. هدف مدیریت بحران فراهم‌کردن پناهگاه، کمک به قربانیان و حادثه‌دیدگان و کاهش آلام آنان است [۱۰، ۱۸]. یکی از ابعاد کلیدی مدیریت بلایا، توزیع منابع و اقلام امدادی به آسیب‌دیدگان است [۴۴]. طراحی شبکه‌های امدادی و مکان‌یابی انبارها از دهه ۱۹۵۰ مورد توجه محققان قرار گرفت. بومل و ولف^۱ (۱۹۵۸) نخستین مطالعات در این زمینه را انجام داده و مدل‌هایی برای مکان‌یابی انبارهای امدادی ارائه کردند [۷]. این تحقیقات به‌مرور تکامل یافته و مدل‌های پیچیده‌تری با اهداف چندگانه و روش‌های حل گوناگون معرفی شده‌اند [۱۵]. بااین‌حال، بسیاری از این مدل‌ها از نادیده گرفتن برخی واقعیت‌های عملیاتی و چالش‌های ناشی از بلایای ثانویه یا همزمان رنج می‌برند.

بلایای ثانویه، که معمولاً پس از بحران اولیه رخ می‌دهند، می‌توانند اثرات ویرانگرتری نسبت به حادثه اولیه داشته باشند. به‌عنوان مثال، سیلاب‌های بزرگ می‌توانند منجر به رانش زمین یا تخریب زیرساخت‌ها شوند [۴۰]. مدیریت این بحران‌های متوالی چالشی بزرگ است که نیازمند برنامه‌ریزی دقیق و جامع می‌باشد. نمونه‌هایی از این بحران‌ها، زلزله توهوکو در ژاپن (۲۰۱۱) بود که به بحران هسته‌ای فوکوشیما منجر شد، یا سیلاب‌های شدید چین در سال ۲۰۱۶ که همراه با رانش زمین، آسیب‌های گسترده‌ای به مردم و زیرساخت‌ها وارد کرد [۳۷]. در چنین شرایطی، نهادهای امدادگران باید با محدودیت‌های متعددی دست‌وپنجه نرم کنند. این محدودیت‌ها شامل کمبود منابع، اختلال در شبکه‌های حمل‌ونقل و عدم قطعیت‌های ناشی از ماهیت بحران است. تغییر سریع نیازها و شرایط پس از وقوع بحران نیز برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری را پیچیده‌تر می‌کند [۳۰].

و [۴]. از دیدگاه نظری، یکی از شکاف‌های اصلی در ادبیات موجود، عدم توجه به مدل‌سازی جامع بحران‌های همزمان یا متوالی است. بسیاری از مطالعات تنها بر بحران‌های اولیه متمرکز شده‌اند و اثرات زنجیره‌ای ناشی از بحران‌های ثانویه را در نظر نگرفته‌اند. از منظر عملی نیز، چالش اصلی در ارائه راهکارهایی است که بتوانند در شرایط واقعی پیاده‌سازی شده و ضمن کاهش تأخیرها و هزینه‌ها، تلفات انسانی را به حداقل برسانند [۳۶]. در هنگام وقوع بحران‌های همزمان یا متوالی، مشکلات متعددی بروز می‌کنند که بر روند امدادگرسانی تأثیر منفی می‌گذارند. یکی از این مشکلات، اختلال در شبکه‌های زیرساختی و حمل‌ونقل است. زیرساخت‌هایی که در بحران اولیه آسیب می‌بینند، ممکن است در بحران ثانویه نیز کاملاً تخریب شوند و مانع از دسترسی سریع به مناطق آسیب‌دیده شوند [۳۹]. به‌عنوان نمونه، پس از زلزله بم، بسیاری از جاده‌های ارتباطی مسدود شده و تأمین منابع امدادی با تأخیر مواجه شد. مشکل دیگر، تغییرات سریع در تقاضا برای منابع امدادی است. در مراحل اولیه بحران، تقاضا بیشتر به آب، غذا و پناهگاه متمرکز است، در حالی که در مراحل بعدی، نیازهای بهداشتی و بازسازی اولویت پیدا می‌کنند [۱۳]. عدم توجه به این تغییرات می‌تواند منجر به تخصیص نادرست منابع شود.

از نظر نظری نیز، مدل‌های موجود اغلب فاقد انعطاف‌پذیری کافی برای مدیریت بحران‌های متوالی هستند. این مدل‌ها معمولاً فرض می‌کنند که تنها یک بحران رخ داده و شرایط پس از آن ثابت است [۳۱]. اما در واقعیت، ماهیت دینامیک بحران‌ها و وقوع بلایای ثانویه، نیازمند مدل‌هایی است

که بتوانند تصمیم‌گیری‌های تطبیقی ارائه دهند. از اینرو تحقیق حاضر قصد دارد با تلفیق مفاهیم مدیریت بحران و بهینه‌سازی چندهدفه، به دو هدف اصلی دست یابد:

۱. تخصیص بهینه منابع در شرایط نامطمئن: استفاده از رویکردهای تحلیل سناریو برای ارائه راه‌حل‌هایی که با تغییر شرایط سازگار باشند.
۲. کاهش تأخیرهای عملیاتی: طراحی مدل‌هایی که بتوانند ضمن بهینه‌سازی هزینه‌ها، به کاهش تأخیر در توزیع منابع و افزایش کارایی عملیات امدادرسانی کمک کنند.

فرآیند لجستیک امداد در کشور به هنگام وقوع بلایای طبیعی مانند سیل و زلزله، چالش‌های متعددی داشته است که عمدتاً یکی از مسائل آن‌ها ناکارایی در تخصیص به‌موقع و عادلانه منابع بوده است؛ این امر لزوم مدیریت مؤثر این فرآیند را پررنگ می‌سازد. در چالش‌های همزمان این موضوع اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. گزارشات مربوط به سیل سال ۱۳۹۵ در استان خراسان شمالی، حاکی از تأخیر در ارسال اقلام امدادی مانند چادر و آب آشامیدنی به مناطق روستایی و ناکافی بودن توزیع منابع به دلیل عدم پیش‌بینی اثرات زنجیره‌ای بلایای ثانویه (مانند طوفان) بود. این ناکارایی‌ها خسارات مادی را تشدید کرد و اثرات اجتماعی و روانی قابل توجهی بر جوامع آسیب‌دیده به جا گذاشت. عدم قطعیت در تقاضا و پیچیدگی‌های ناشی از وقوع همزمان چندین بحران، مدیریت لجستیک امداد را دشوارتر می‌سازد. از این‌رو، این پژوهش با تمرکز بر مطالعه موردی خراسان شمالی، مدلی تصادفی سه‌مرحله‌ای برای بهینه‌سازی تخصیص اقلام امدادی ارائه می‌دهد تا با در نظر گرفتن سناریوهای ترکیبی و عدم قطعیت‌ها، کارایی لجستیک امداد را در چنین شرایطی بهبود بخشد. انتظار می‌رود مدل پیشنهادی این تحقیق، به‌طور مستقیم به بهبود کارایی عملیات امدادرسانی کمک کند. از جمله نتایج عملی این مدل می‌توان به کاهش هزینه‌ها، افزایش سرعت در توزیع منابع و افزایش رضایت در برابر بحران‌های متوالی اشاره کرد. علاوه بر این، این تحقیق به غنی‌سازی ادبیات مرتبط با مدیریت بحران و ارائه راهکارهایی جامع‌تر برای مقابله با بلایای پیچیده کمک خواهد کرد. در ادامه مقاله، ابتدا به بررسی ادبیات پژوهشی مرتبط پرداخته و مدل پیشنهادی را تشریح می‌کنیم. سپس نتایج حاصل از آزمایش‌های عددی و شبیه‌سازی‌ها ارائه شده و راهکارهایی برای بهبود عملکرد مدل در شرایط واقعی پیشنهاد خواهد شد.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

بلایای طبیعی همواره تهدیدی جدی برای انسان‌ها محسوب می‌شود و به اموال آنان خسارات قابل توجهی وارد می‌کند. پس از وقوع یک فاجعه، نیاز فوری به منابع اضطراری وجود دارد و تجهیزات نجات باید در مدت زمان محدودی به مناطق آسیب‌دیده ارسال شوند. بنابراین، تخصیص به‌موقع منابع محدود به این مناطق از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۳۷]. نخستین مطالعات در زمینه طراحی شبکه‌های امدادرسانی برای بلایای طبیعی توسط بومول و وولف (۱۹۵۸) آغاز شد. آن‌ها روشی نوین برای مدل‌سازی مکان‌یابی انبارها در شرایط تک منبع ارائه دادند که تنها به انتخاب مکان‌های انبار با توجه به توزیع تقاضای شناخته‌شده متمرکز بود. پس از آن، تحقیقات بسیاری برای رفع این چالش‌ها انجام شد. بیشتر این مطالعات به تصمیم‌گیری در خصوص سطح موجودی و انتخاب مکان‌های مناسب توجه داشته‌اند. برای نمونه، هو^۱ و همکاران (۲۰۱۷) یک مدل تصادفی دو مرحله‌ای برای هماهنگی سطوح موجودی قبل و بعد از وقوع فاجعه در امدادرسانی انسانی مطرح کردند. در تحقیقات اخیر، ملاحظات واقعی‌تری نیز مورد توجه قرار گرفته است [۱۴]. به عنوان مثال، ژانگ^۲ و همکاران (۲۰۱۹) بلایای ثانویه را با یک سناریوی احتمالات شرطی در نظر گرفتند [۴۵]. برای ارائه پاسخ‌های مؤثر و استفاده بهینه از منابع، مورنو^۳ و همکاران (۲۰۱۸) مدلی ریاضی برای بهینه‌سازی تصمیمات مکان‌یابی، حمل‌ونقل و اندازه ناوگان ارائه دادند که شامل استفاده از وسایل نقلیه برای سفرهای متعدد در زمان‌های مختلف (ساعات یا روزها) بود [۲۲]. در ساعات اولیه

1. Hu

2. Zhang

3. Moreno

فاجعه، زیرساخت‌های حمل‌ونقل به عنوان کانال غیرقابل اعتمادی برای تأمین امداد عمل می‌کنند که بارباروسوغللو^۱ و همکاران (۲۰۰۲) به این موضوع پرداخته‌اند. آن‌ها مدل‌سازی برنامه نجات را انجام دادند که شامل استفاده از هلیکوپترها بود [۵]. پراناگانا^۲ و همکاران (۲۰۱۶) مدلی یکپارچه برای تخصیص و توزیع منابع پیشنهاد کردند که در آن بلایا موجب کاهش بخشی از موجودی از پیش تعیین شده می‌شود. مشکل توزیع کمک‌های اضطراری از انبارها به مراکز امدادی به دلیل عدم قطعیت‌ها و تقاضای سریع برای پاسخ، پیچیده است [۲۶].

در مطالعه‌ای دیگر، اوزدمار^۳ و همکاران (۲۰۱۱) مدلی ریاضی برای برنامه‌ریزی زنجیره تأمین طراحی کردند که در آن هلیکوپترها برای جابه‌جایی قربانیان زخمی و تجهیزات پزشکی به کار می‌روند. در این مدل، هدف کاهش زمان کلی برای پاسخگویی به نیازهای قربانیان است [۲۴]. اقبال^۴ و همکاران (۲۰۱۸) از یک مدل آماری برای تحلیل مکان مراکز امدادی و توزیع اقلام امدادی در مدیریت بلایای طبیعی استفاده کردند. آن‌ها برای مدل‌سازی سناریوی واقعی مکان‌یابی و توزیع امدادی، از مدل موتور جستجوی PRISM^۵ بهره بردند و عواملی مانند تقاضای تجهیزات پزشکی در بیمارستان‌ها، مسیرهای از پیش تعیین شده، ظرفیت انبارها و برنامه‌های حمل‌ونقل را در نظر گرفتند [۱۷]. نجفی و همکاران (۲۰۱۴) به مسئله مدیریت زنجیره تأمین برای ارسال اقلام امدادی به مناطق آسیب‌دیده و انتقال مصدومان به بیمارستان‌ها پرداخته و مدلشان قابلیت به‌روزرسانی اطلاعات را برای تنظیم برنامه‌ها فراهم می‌کرد. هدف این مدل کاهش زمان کل حمل‌ونقل، شامل انتقال افراد به بیمارستان‌ها و ارسال تجهیزات به مناطق آسیب‌دیده بود [۲۳]. والتر و گوتجاهر^۶ (۲۰۱۴) نیز مدلی برای مسیریابی و مکان‌یابی در عملیات امدادرسانی پیشنهاد کرده و بر ضرورت تأسیس انبارهای موقتی برای تسریع امدادرسانی تأکید کرده‌اند [۳۴]. هوانگ^۷ و همکاران (۲۰۱۰) از برنامه‌ریزی دینامیکی برای حل مشکلات مکان‌یابی در شبکه‌های اضطراری مقیاس بزرگ استفاده کردند [۱۶]. لو و شو^۸ (۲۰۱۳) مدلی برای انتخاب مکان بهینه مرکز توزیع امداد از میان سایت‌های پیشنهادی طراحی کردند [۲۱]. همچنین، علینجیان و همکاران (۲۰۱۹) مدلی برای مکان‌یابی مراکز امداد موقت به گونه‌ای که هر منطقه آسیب‌دیده حداقل توسط یک مرکز پوشش داده شود، پیشنهاد کردند. آنان برای بهبود خدمات از طراحی دینامیک مسیر تخصیص هلیکوپتر بهره بردند [۲].

لیو^۹ و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی مکان‌یابی ایستگاه‌های خدمات پزشکی اضطراری پرداخته و از اطلاعات لحظه‌ای برای مدیریت عدم قطعیت در توزیع تقاضا استفاده کردند. تعداد مطالعاتی که به توزیع اقلام امدادی پرداخته‌اند بیشتر از آن‌هایی است که بر عملیات نجات متمرکز هستند [۲۰]. لو^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۳) به‌طور مشترک زنجیره تأمین اقلام امدادی و انتقال مصدومان را در یک مسئله چندمحصوله و چنددوره‌ای مدل کردند و از یک چارچوب مبتنی بر افق غلتان برای به‌روزرسانی برنامه‌ها استفاده کردند [۲۱].

در بسیاری از مطالعات پیشین، توجه ویژه‌ای به اهداف انسانی در مدیریت بلایا شده است. برای مثال، رضایی‌ملک و توکلی‌مقدم (۲۰۱۴) مدلی MILP^{۱۱} دوهدفه برای برنامه‌ریزی عملیاتی خرید انسان‌دوستانه ارائه دادند که هدف آن کاهش زمان پاسخگویی و هزینه‌های عملیاتی (شامل هزینه‌های ساخت انبار، نگهداری اقلام اضافی و هزینه‌های تقاضای برآورده نشده) با تضمین مکان‌یابی بهینه انبارها و برنامه‌های توزیع بود [۲۸]. تحقیقات اخیر در زمینه تأمین انسان‌دوستانه شامل توابع هدفی مانند عدالت، انصاف و کاهش رنج افراد هستند [۲۰ و ۱۴]. زنگنه و همکاران (۲۰۱۹)

1. Barbarosoğlu

2. Pradhananga

3. Özdamar

4 Iqbal

5.. Probabilistic Real-Time Systems Model Checker

6. Walter & Gutjahr

7. Huang

8. Lu & Sheu

9. Liu

10. Lu

11. Mixed Integer Linear Programming

مدلی دوهدفه برای توزیع اقلام امدادی پس از فاجعه ارائه دادند و به دلیل تغییرات پارامترها در طول زمان، از رویکرد برنامه‌ریزی افق غلتان استفاده کردند. با این حال، هیچ‌کدام از این تحقیقات به‌طور همزمان به برنامه‌ریزی نجات و توزیع امداد و جابه‌جایی افراد آسیب‌دیده نپرداخته‌اند [۴۱ و ۴۲]. افشار و هگانی (۲۰۱۲) مدلی پویا ارائه دادند که مشابه این تحقیق است و فوریت نسبی نقاط تقاضا را در تابع هدف مدنظر قرار می‌دهد. فوریت به نوع کالای امدادی، ویژگی‌های نقطه تقاضا و زمان پاسخگویی بستگی دارد. اما در این مدل، به‌جای نسبت تقاضای برآورده‌نشده، از ارزش کل تقاضا استفاده شده است و محدودیت‌های بودجه‌ای برای اقدامات انسان‌دوستانه در نظر گرفته نشده است [۱]. پرز-رودریگز و هولگوین-وراس^۱ (۲۰۱۳) به حداقل‌سازی هزینه‌های اجتماعی مانند هزینه‌های لجستیکی و محرومیت پرداخته‌اند، ولی محدودیت‌های بودجه‌ای را لحاظ نکرده‌اند [۲۵]. مطالعه ریورا-رویرو^۲ و همکاران (۲۰۱۶) از نظر مدل‌سازی و تابع هدف مشابه این تحقیق است، اما تفاوت اصلی آن با سایر تحقیقات این است که هیچ‌یک از این مطالعات برنامه‌ریزی نجات مصدومان و افراد جابه‌جا شده را هم‌زمان در نظر نگرفته‌اند. رویکرد افق غلتان رویکردی عملی برای مشکلات بلادرنگ عرضه و تقاضا در سیستم‌های توزیع است، به ویژه در مسائلی که نیاز به به‌روزرسانی اطلاعات تقاضای آینده در افق زمانی دارند [۲۹].

ژانگ و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی پاسخ اضطراری در شرایطی که منابع و انبارهای متعدد وجود دارند و بلایای ثانویه نیز در نظر گرفته شده‌اند، پرداختند. با این حال، این مطالعه تنها یک هدف داشت و مسائل مربوط به حمل‌ونقل و کمبود منابع را نادیده گرفت [۴۳]. یون^۳ و همکاران (۲۰۱۲) مدلی شبیه‌سازی پویا مبتنی بر گروه برای تخلیه بلایای اولیه و ثانویه پیشنهاد دادند [۳۹]. ژانگ و همکاران (۲۰۱۴) نیز مدل دومرحله‌ای برای توزیع منابع اضطراری ارائه کردند که هدف آن حداقل‌سازی زمان امداد حداکثری به‌عنوان معیار عملکرد امدادی در شرایط بلایای ثانویه بود [۴۵]. در سال ۲۰۱۹، ژانگ و همکاران تخصیص منابع اضطراری را با در نظر گرفتن بلایای اولیه و ثانویه بررسی کردند تا قابلیت نجات پایدار در مدیریت امداد اضطراری را بهبود دهند. آن‌ها از یک سناریو درختی مبتنی بر احتمال شرطی برای تعریف ارتباط بین بلایای اولیه و ثانویه استفاده کردند و مدل برنامه‌ریزی تصادفی سه‌مرحله‌ای و چندهدفه‌ای را طراحی کردند که به‌طور هم‌زمان زمان حمل‌ونقل، هزینه‌های حمل‌ونقل و تقاضای برآورده‌نشده را حداقل می‌کرد. در این مدل از متغیرهای کمکی فازی برای تبدیل توابع چندهدفه به یک مدل تک‌هدفه استفاده شد [۴۶]. در پژوهش اخیر، لی^۴ و همکاران (۲۰۲۰) یک مدل برنامه‌ریزی سه سطحی تصادفی برای تحلیل ارتباط بین بلایای اولیه و ثانویه در شرایط عدم قطعیت پیشنهاد دادند و از الگوریتم تجزیه بندرز برای حل مسئله بهره بردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که در مقایسه با حالتی که تنها بلایای اولیه در نظر گرفته می‌شد، با در نظر گرفتن بلایای ثانویه، رضایت از تقاضا به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد [۱۹].

قاسمی و بابایی‌نیمی (۲۰۲۰) شبیه‌سازی منابع ایستگاه آتش‌نشانی را با توجه به زمان خرابی ماشین‌ها بررسی کردند. هدف این مطالعه بهینه‌سازی استفاده از تجهیزات ایستگاه آتش‌نشانی و کاهش زمان رسیدن به حادثه از طریق مدیریت ارجاع تماس‌ها بود. در این تحقیق، منابع مورد نیاز در ایستگاه آتش‌نشانی ساری با استفاده از نرم‌افزار Enterprise Dynamic شبیه‌سازی شد. نتایج این تحقیق نشان داد که با اضافه کردن یک منبع جدید، زمان امداد به میزان ۲۰ درصد بهبود یافت [۱۳]. لی و همکاران (۲۰۲۰) همچنین مدلی ترکیبی، سه‌مرحله‌ای و تصادفی مبتنی بر سناریو ارائه کردند که به‌طور مؤثری اقلام امدادی را در شرایط عدم قطعیت و سناریوهای ترکیبی بلایای اولیه و ثانویه توزیع می‌کند. آن‌ها از یک الگوریتم پیشرفته تخصیص تدریجی مبتنی بر روش لاگرانژی تقویت‌شده برای حل مسئله استفاده کردند و نتایج نشان داد که ترکیب سناریوهای بلایای ثانویه می‌تواند پوشش امدادی را بهبود بخشد [۱۹].

1. Perez-Rodríguez & Holguín-Veras

2. Rivera-Royero

3. Yun

4. Li

رانسریکاربوم و میسون^۱ (۲۰۲۲) در پژوهشی با عنوان "مدل بهینه‌سازی چندهدفه در شبکه یکپارچه برای عملیات لجستیک بشردوستانه" یک مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط (MILP) چندهدفه را برای یکپارچه‌سازی توزیع منابع و بازسازی شبکه پس از طوفان ارائه داده‌اند. این مدل با الگوریتم هیوریستیک حل شده و نتایج حاکی از کاهش ۲۰ درصدی زمان پاسخگویی و ۱۲ درصدی هزینه‌های عملیاتی نسبت به رویکردهای تک‌هدفه است [۲۷]. بایراکتار^۲ و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهشی با عنوان "ارائه کمک امدادی به پناهندگان در مسیر: مکان‌یابی تأسیسات سیار چنددوره‌ای با تقاضای متحرک" مدلی چنددوره‌ای مبتنی بر برنامه‌ریزی عدد صحیح را برای مکان‌یابی تأسیسات سیار در بحران‌های مهاجرتی پیشنهاد کرده‌اند. حل دقیق این مدل نشان داد که زمان دسترسی به کمک‌های امدادی تا ۲۵ درصد کاهش می‌یابد [۸]. وانگ^۳ و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهشی با عنوان "مدل برنامه‌ریزی تصادفی برای پیش‌موقعیت‌یابی، انتقال و تدارکات اقلام اضطراری در ائتلاف بهداشتی منطقه‌ای" یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی را برای پیش‌موقعیت‌یابی و انتقال اقلام اضطراری در بحران‌های بهداشتی ارائه کرده‌اند. این مدل با روش‌های عددی حل شده و نتایج آن کاهش ۲۲ درصدی هزینه‌های تدارکات را در مقایسه با رویکردهای قطعی نشان می‌دهد [۳۵]. تیرکولایی^۴ و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهشی با عنوان "طراحی شبکه زنجیره تأمین بسته پایدار ماسک‌های صورت در دوران کووید-۱۹: الگوریتم‌های مبتنی بر پارتو" مدلی چندهدفه برای طراحی زنجیره تأمین پایدار ماسک در دوران پاندمی پیشنهاد کرده‌اند. این مدل با الگوریتم NSGA-II حل شده و نتایج نشان‌دهنده کاهش ۱۷ درصدی هزینه‌ها و ۱۰ درصدی اثرات زیست‌محیطی نسبت به زنجیره‌های تأمین متداول است [۳۲]. ژانگ و همکاران (۲۰۲۳) در پژوهشی با عنوان "بهینه‌سازی پویای لجستیک اضطراری برای اپیدمی‌های بزرگ با در نظر گرفتن فوریت تقاضا" یک مدل بهینه‌سازی پویا و تصادفی را برای توزیع منابع در شرایط اپیدمی پیشنهاد کرده‌اند که فوریت تقاضا را به‌عنوان معیار اصلی در نظر می‌گیرد. این مدل با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ذرات (PSO) حل شده و نتایج نشان داده‌اند که در مقایسه با روش‌های ایستا، تقاضای تأمین‌نشده تا ۱۵ درصد کاهش یافته است [۴۲]. فان^۵ و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهشی با عنوان "طراحی قرارداد بین سازمان‌های امدادی و فروشندگان بخش خصوصی: چارچوبی برای لجستیک بشردوستانه" چارچوبی چندهدفه برای طراحی قراردادهای لجستیک امداد توسعه داده‌اند که هدف آن حداقل‌سازی هزینه‌های محرومیت است. این مدل با استفاده از CPLEX حل شده و نتایج نشان‌دهنده بهبود ۱۸ درصدی در کارایی همکاری بین سازمان‌ها و بخش خصوصی در مقایسه با روش‌های سنتی است [۱۱]. خو و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهشی با عنوان "مدل‌سازی دوهدفه مکان‌یابی تأسیسات لجستیک اضطراری در محیط‌های نامطمئن" یک مدل دوهدفه مبتنی بر بهینه‌سازی استوار را برای مکان‌یابی تأسیسات لجستیک اضطراری در شرایط عدم قطعیت توسعه داده‌اند. نتایج این پژوهش حاکی از کاهش ۱۰ درصدی هزینه‌ها و ۱۵ درصدی زمان پاسخگویی در سناریوهای نامطمئن است [۳۸].

با این حال، بررسی تحقیقات در داخل و خارج از کشور نشان می‌دهد که مسأله تخصیص منابع در بحران‌های همزمان کمتر مورد توجه قرار گرفته است. جدول ۱ خلاصه‌ای از یازده پژوهش اخیر (۲۰۲۲-۲۰۲۴) در لجستیک امداد را ارائه می‌دهد که از منظر نوع مدل ریاضی، روش حل، مطالعه موردی، توابع هدف، و مسئله مورد بررسی با پژوهش حاضر مقایسه شده‌اند. این جدول نشان می‌دهد که پژوهش‌های پیشین از مدل‌های متنوعی مانند تصادفی، چندهدفه، و استوار استفاده کرده‌اند، اما عمدتاً بلایای ثانویه و مقیاس‌پذیری را نادیده گرفته‌اند. پژوهش حاضر با مدل سه‌مرحله‌ای تصادفی و روش حل ترکیبی CPLEX و تقریبی، به این شکاف‌ها پاسخ می‌دهد. تمرکز بر سیل و طوفان در خراسان شمالی و اهداف چندگانه (زمان، هزینه، تقاضای تأمین‌نشده) نیز تمایز آن را برجسته می‌کند. این مقایسه بر ارزش افزوده پژوهش حاضر در مدیریت بحران‌های چندلایه تأکید دارد.

1. Ransikarbum & Mason
2. Bayraktar
3. Wang
4. Tirkolaee
5. Fan

جدول ۱. خلاصه پیشینه پژوهش و مقایسه با پژوهش حاضر

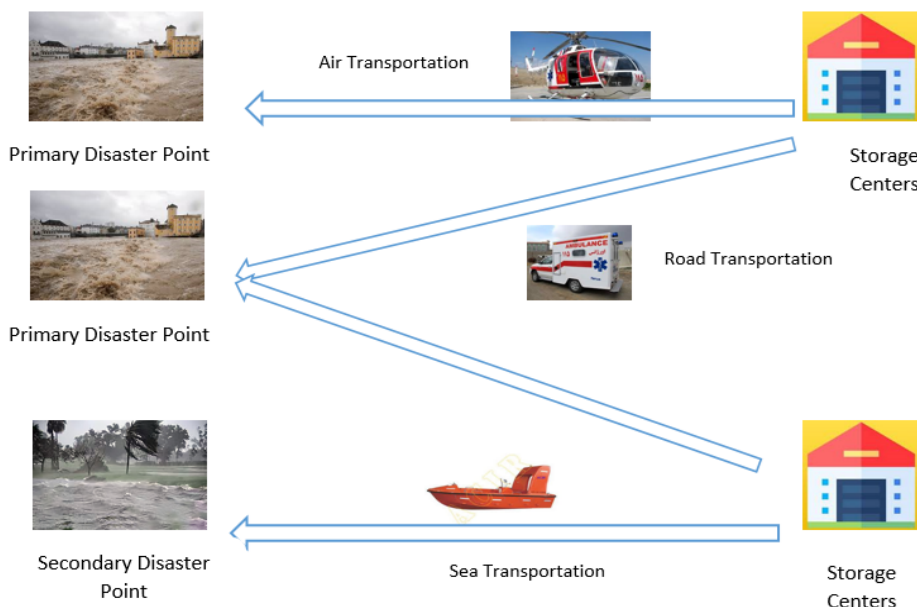
پژوهش	نوع مدل ریاضی	روش حل	نوع مطالعه موردی	نوع توابع هدف	نوع مسئله مورد بررسی	مقایسه با پژوهش حاضر
ژانگ و همکاران (۲۰۲۳)	پویا و تصادفی	الگوریتم PSO	ایپدیمی (چین)	حداقل‌سازی تقاضای تأمین‌نشده	تخصیص منابع	عدم توجه به بلایای ثانویه و مقیاس‌پذیری
رانسریکار بوم و میسون (۲۰۲۲)	چندهدفه MILP	الگوریتم هیوریستیک	طوفان (آمریکا)	حداقل‌سازی هزینه و زمان	توزیع و بازسازی شبکه	عدم در نظر گرفتن سناریوهای ترکیبی
فان و همکاران (۲۰۲۴)	چندهدفه	CPLEX	زلزله (جهانی)	حداقل‌سازی هزینه‌های محرومیت	طراحی قرارداد لجستیک	تمرکز بر قراردادهای، نه توزیع مستقیم
بایراکتار و همکاران (۲۰۲۲)	عدد صحیح چنددوره‌ای	حل دقیق	بحران مهاجرتی (نامشخص)	حداقل‌سازی زمان دسترسی	مکان‌یابی تأسیسات سبار	عدم بررسی بلایای طبیعی چندگانه
خو و همکاران (۲۰۲۴)	دوهدفه استوار	بهبودسازی استوار	فرضی	حداقل‌سازی هزینه و زمان	مکان‌یابی تأسیسات	محدود به سناریوهای فرضی و مقیاس کوچک
وانگ و همکاران (۲۰۲۲)	تصادفی	روش‌های عددی	بحران بهداشتی (منطقه‌ای)	حداقل‌سازی هزینه و تدارکات	پیش‌موقعیت‌یابی و انتقال	عدم پوشش بلایای طبیعی ترکیبی
تیرکولایی و همکاران (۲۰۲۲)	چندهدفه	NSGA-II	پاندمی (کووید-۱۹)	حداقل‌سازی هزینه و اثرات زیست‌محیطی	طراحی زنجیره تأمین	تمرکز بر پایداری، نه امداد اضطراری
لی و همکاران (۲۰۲۳)	تصادفی دومرحله‌ای	CPLEX	سیل (چین)	حداقل‌سازی هزینه و تأخیر	تخصیص و مسیریابی	عدم توجه به مقیاس‌پذیری و بلایای ترکیبی
گونزالس و همکاران (۲۰۲۲)	چندهدفه MILP	الگوریتم ژنتیک	زلزله (آمریکای لاتین)	حداقل‌سازی هزینه و زمان پاسخ	مکان‌یابی و توزیع	عدم در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های چندلایه
چوی و همکاران (۲۰۲۴)	استوار و تصادفی	روش بندرز	طوفان (جهانی)	حداقل‌سازی هزینه و ریسک	پیش‌موقعیت‌یابی و توزیع	تمرکز بر ریسک، نه بلایای ثانویه
محمدی و همکاران (۲۰۲۳)	چندهدفه فازی	الگوریتم NSGA-II	سیل و زلزله (ایران)	حداقل‌سازی هزینه و تقاضای تأمین‌نشده	تخصیص منابع و مکان‌یابی	عدم استفاده از رویکرد سه‌مرحله‌ای
پژوهش حاضر	تصادفی سه‌مرحله‌ای	CPLEX و روش تقریبی	سیل و طوفان (خراسان شمالی)	حداقل‌سازی زمان، هزینه، تقاضای تأمین‌نشده	تخصیص و توزیع منابع	توجه به بلایای ثانویه و مقیاس‌پذیری

۳. روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش از آنجائیکه بدنبال استفاده از مدل‌های ریاضی برای کمک به امداد رسانی بهتر در بحران‌های همزمان است، بنابراین از نظر هدف کاربردی می‌باشد. به‌دلیل آن‌که در آن از مطالعات کتابخانه‌ای و میدانی استفاده می‌شود، می‌توان این پژوهش را پژوهش توصیفی-پیمایشی به‌حساب آورد. همچنین این پژوهش بر اساس دسته‌بندی جان واکر^۱ (۱۹۹۸) [۳۳]، از نوع تحلیلی^۲ است که بر توسعه و حل یک مدل ریاضی تصادفی

1. Wacker
2. Analytical

سه مرحله‌ای برای بهینه‌سازی لجستیک امداد در شرایط بحرانی تمرکز دارد. داده‌های واقعی از سیل و طوفان سال ۱۳۹۵ در استان خراسان شمالی به عنوان مبنای مطالعه موردی برای اعتبارسنجی مدل استفاده شده‌اند. ساختار مساله به صورت شکل ۱ می‌باشد.



شکل ۱. ساختار مساله تحقیق

طراحی مدل

در این مقاله، مسئله توزیع منابع اضطراری از مراکز ذخیره‌سازی به نقاط بحران‌زده مورد بررسی قرار گرفته است. به طور مشخص‌تر، این مراکز ذخیره‌سازی به عنوان نقاط تأمین نزدیک به مناطق بحران‌زده عمل می‌کنند. از آنجا که ظرفیت این مراکز محدود است، میزان منابع قابل تأمین در هر مرکز ذخیره‌سازی محدود می‌باشد. نقاط بحران به دو دسته تقسیم می‌شوند: نقاط بحران اولیه که قبلاً رخ داده‌اند و نقاط بحران ثانویه که ممکن است در آینده نزدیک رخ دهند. توجه داشته باشید که بحران‌های ثانویه به وقوع بحران‌های اولیه وابسته هستند. مدل پیشنهادی در این پژوهش از طریق یک فرآیند ساختار یافته و سه‌گامی توسعه یافته است:

- **شناسایی مسئله و نیازهای عملیاتی:** ابتدا، با بررسی مطالعه موردی وقوع بلایای طبیعی در خراسان شمالی در سال ۱۳۹۵ (بخش مطالعه موردی)، نیاز به تخصیص بهینه منابع در شرایط بحران‌های همزمان شناسایی شد. این بررسی نشان داد که بلایای اولیه (سیل) و ثانویه (طوفان) اثرات زنجیره‌ای دارند و عدم قطعیت در تقاضا و وقوع بلایای ثانویه، چالش‌های اصلی امداد رسانی هستند. هدف، طراحی مدلی بود که بتواند منابع محدود را به‌طور کارآمد بین نقاط بحران توزیع کند.
- **انتخاب رویکرد مدل‌سازی:** با توجه به وجود عدم قطعیت و پیچیدگی‌های لجستیک امدادی، رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی سه مرحله‌ای انتخاب شد. این انتخاب بر اساس کارهای پیشین مانند ژانگ و همکاران (۲۰۱۹) [۴۶] انجام شد که نشان داده‌اند این روش برای مدیریت بلایای اولیه و ثانویه مؤثر است. مدل سه مرحله‌ای به این صورت طراحی شد: مرحله اول برای ذخیره‌سازی منابع قبل از بحران، مرحله دوم برای توزیع در بلایای اولیه، و مرحله سوم برای تطبیق توزیع با بلایای ثانویه. استفاده از سناریوها برای مدل‌سازی عدم قطعیت نیز از رویکردهای متداول در ادبیات (مانند لی و همکاران، ۲۰۲۰ [۱۹]) الهام گرفته شده است.

▪ **تعریف اهداف و محدودیت‌ها:** سه تابع هدف (حداقل‌سازی زمان حمل‌ونقل، هزینه‌ها، و تقاضای تأمین‌نشده) بر اساس نیازهای عملیاتی امدادرسانی و داده‌های واقعی (جدول ۲ تا ۵) تعریف شدند تا هم سرعت و هم کارایی اقتصادی و عدالت در توزیع را تضمین کنند. محدودیت‌ها (روابط ۵ تا ۱۲) نیز با توجه به ظرفیت‌های واقعی مراکز ذخیره‌سازی، وسایل نقلیه، و حداقل نرخ امنیتی تقاضا (جدول ۳) فرمول‌بندی شدند. این فرآیند تضمین کرد که مدل نه‌تنها واقع‌گرایانه باشد، بلکه با ابزارهای محاسباتی موجود مانند CPLEX قابل حل باشد و از طریق روش تقریبی دومرحله‌ای به مقیاس‌های بزرگ‌تر تعمیم یابد.

برای جلوگیری از کمبود احتمالی منابع پس از وقوع بحران‌های ثانویه، هنگام برنامه‌ریزی توزیع منابع اضطراری، بحران‌های ثانویه نیز در نظر گرفته می‌شوند و بخشی از منابع از پیش برای مقابله با بحران‌های آینده توزیع می‌گردند. با این حال، به دلیل عدم قطعیت بحران‌های ثانویه، این مسئله بهینه‌سازی تصادفی با استفاده از سناریوهای احتمالی که بحران‌های ثانویه و نتایج آن‌ها را نمایندگی می‌کنند، مورد بررسی قرار می‌گیرد. این سناریوها و احتمال‌های مرتبط با آن‌ها می‌توانند توسط کارشناسان مربوطه یا برنامه‌ریزان بحران بر اساس سوابق تاریخی شناخته‌شده تدوین شوند. قابل ذکر است که بحران‌های ثانویه ممکن است در نقاط بحران اولیه نیز رخ دهند.

سه نوع حمل‌ونقل (حمل‌ونقل هوایی، حمل‌ونقل جاده‌ای و حمل‌ونقل با قایق) در این مدل در نظر گرفته شده است؛ بر اساس شرایط واقعی، در هر نوع حمل‌ونقل، فقط یک نوع وسیله نقلیه وجود دارد. انتخاب نوع حمل‌ونقل به عواملی مانند فاصله حمل‌ونقل، زمان حمل‌ونقل و هزینه حمل‌ونقل بستگی دارد. چالش اصلی این است که چگونه منابع اضطراری محدود را به‌طور کارآمدتر به نقاط بحران اولیه و نقاط بحران ثانویه توزیع کنیم.

اندیس‌ها:

- I : مجموعه‌ای از مراکز ذخیره‌سازی، با اندیس i
- J : مجموعه‌ای از نقاط بحران اولیه، با اندیس j
- K : مجموعه‌ای از نقاط بحران ثانویه بالقوه، با اندیس k
- L : مجموعه‌ای از منابع، با اندیس l
- M : مجموعه‌ای از روش‌های حمل‌ونقل، با اندیس m
- Ξ : مجموعه‌ای از سناریوهای بحران اولیه، با اندیس ξ
- Ω : مجموعه‌ای از سناریوهای بحران ثانویه، با اندیس ω

پارامترها:

- C_{ij} : هزینه ثابت ذخیره‌سازی منبع i در مرکز j
- P^{ξ} : احتمال وقوع سناریوی بحران اولیه ξ
- P^{ω} : احتمال وقوع سناریوی بحران ثانویه ω
- p_{ij}^{ξ} : تقاضای منبع i در نقطه بحران اولیه j در سناریوی ξ
- p_{ij}^{ω} : تقاضای جدید منبع i در نقطه بحران ثانویه j در سناریوی ω
- a_{ij} : ظرفیت منبع i در مرکز ذخیره‌سازی j
- t_{ij}^{ξ} : زمان انتقال یک واحد منبع از مرکز i به نقطه بحران اولیه j با روش حمل‌ونقل m در سناریوی ξ
- t_{ij}^{ω} : زمان انتقال یک واحد منبع از مرکز i به نقطه بحران ثانویه k با روش حمل‌ونقل m در سناریوی ω
- s_{ij}^{ξ} : هزینه انتقال یک واحد منبع از مرکز i به نقطه بحران اولیه j با روش حمل‌ونقل m در سناریوی ξ

S^{ω} : هزینه انتقال یک واحد منبع از مرکز i به نقطه بحران ثانویه k با روش حمل‌ونقل m در سناریوی ω

a : ظرفیت روش حمل‌ونقل m

b : تعداد وسایل نقلیه برای روش حمل‌ونقل m در مرکز i

w : وزن واحد منبع l

e_i^{ξ} : حداقل نرخ امنیت تقاضا برای منبع i در سناریوی ξ

e_i^{ω} : حداقل نرخ امنیت تقاضا برای منبع i در سناریوی ω

متغیرهای تصمیم

x_{ijlm}^{ξ} : مقدار منبع l که از مرکز ذخیره‌سازی i به نقطه بحران اولیه j از طریق روش حمل‌ونقل m در سناریو ξ توزیع می‌شود.

v^{ω} : مقدار منبع l که از مرکز ذخیره‌سازی i به نقطه بحران ثانویه k از طریق روش حمل‌ونقل m در سناریو ω توزیع می‌شود.

z : متغیرهای دودویی که نشان می‌دهند آیا منبع l باید در مرکز i ذخیره شود یا خیر.

توصیف بحران‌های نامطمئن

در این مقاله، هدف بهبود قابلیت نجات پایدار با در نظر گرفتن همزمان بلایای اولیه و ثانویه در مسئله توزیع امداد است. همان‌طور که در فهرست نمادها تعریف شده است، هر بلای اولیه $\xi \in \Xi$ با احتمال وقوع p^{ξ} مشخص می‌شود. که بر اساس سوابق تاریخی بلایای مشابه در منطقه (مانند زلزله‌ها و سیل‌های گذشته در خراسان شمالی) و نظرات کارشناسان مدیریت بحران تخمین زده شده است. این احتمالات در بازه $[0.1, 0.3]$ قرار دارند و به‌صورت تصادفی برای ۳۰ سناریو تعریف شده‌اند. هر وقوع مربوط به تحقق تصادفی تقاضای منابع، زمان حمل‌ونقل و هزینه بین هر جفت گره است. تقاضای منابع (برای نقاط اولیه و ثانویه) به‌عنوان متغیرهای تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه‌های مشخص (مطابق جدول ۲) مدل‌سازی شده‌اند تا عدم قطعیت در نیازهای واقعی مناطق بحران‌زده را منعکس کنند. به‌عنوان مثال، تقاضای چادر در سناریوی اول برای نقطه ۱ در شرایط اولیه ۷ واحد و در شرایط ثانویه بین ۳ تا ۵ واحد متغیر است که نشان‌دهنده تغییرات احتمالی ناشی از شدت بحران است.

.....در این مدل، سایر پارامترها مانند زمان حمل‌ونقل، هزینه‌های حمل‌ونقل و ظرفیت‌های مراکز ذخیره‌سازی و روش‌های حمل‌ونقل به‌صورت قطعی در نظر گرفته شده‌اند. این انتخاب به دو دلیل اصلی انجام شده است: اول، داده‌های واقعی مورد استفاده در مطالعه موردی (مانند فاصله‌ها و زمان‌های حمل‌ونقل از جدول ۴ و ۵) بر اساس شرایط جغرافیایی و زیرساختی ثابت منطقه در زمان وقوع بحران استخراج شده‌اند و تغییرات قابل‌توجهی در بازه زمانی کوتاه بحران نشان نمی‌دهند. دوم، تمرکز اصلی این پژوهش بر عدم قطعیت‌های کلیدی مرتبط با تقاضا و وقوع بلایای ثانویه است، زیرا این عوامل به دلیل ماهیت پویا و غیرقابل‌پیش‌بینی بحران‌های همزمان، تأثیر بیشتری بر تصمیم‌گیری امدادی دارند. با این حال، در شرایط واقعی که زیرساخت‌ها به‌طور گسترده تخریب شوند، می‌توان این پارامترها را نیز به‌صورت تصادفی مدل‌سازی کرد که به‌عنوان پیشنهادی برای تحقیقات آتی مطرح می‌شود.

هر وقوع مربوط به تحقق تصادفی تقاضای منابع، زمان حمل‌ونقل و هزینه بین هر جفت گره است. توجه داشته باشید که هر مکانی که بلای اولیه در آن رخ دهد ممکن است از بلای دیگری که ناشی از آن است، یعنی بلای ثانویه $\omega \in \Omega$ ، با احتمال وقوع p^{ω} رنج ببرد. احتمال p^{ω} با توجه به احتمال وقوع بلای اولیه مشخص می‌شود، به عبارت دیگر، به صورت $p^{\omega} = pr(\omega|\xi)$ تعریف می‌شود. این احتمال شرطی بر اساس ارتباط تاریخی بین بلایای اولیه و ثانویه (مانند وقوع طوفان پس از سیل) و با استفاده از داده‌های هواشناسی و گزارش‌های امدادی تخمین زده شده است. به‌عنوان مثال، احتمال وقوع طوفان پس از سیل در منطقه مطالعه‌شده در بازه $[0.15, 0.25]$ قرار دارد. بلای ثانویه ممکن است باعث تغییر در تقاضا در هر مکان، و همچنین تغییر در زمان حمل‌ونقل و هزینه بین هر جفت گره شود. مسئله تخصیص منابع امدادی با در نظر گرفتن بلایای اولیه و

ثانویه اساساً شامل سه مرحله است. **مرحله اول** شامل تصمیم‌گیری درباره ذخیره‌سازی منابع امدادی در این مراکز قبل از وقوع بلایا است. در **مرحله دوم**، باید راه‌حل توزیع برای بلایای اولیه تعریف شود و **مرحله سوم** به بلایای ثانویه اختصاص دارد که ممکن است تغییراتی ایجاد کند. لازم به ذکر است که سناریوهای مرحله سوم به مرحله دوم بلایای اولیه وابسته هستند.

ساختار وابستگی بحران‌های اولیه و ثانویه از طریق یک درخت سناریو دوبخشی مدل‌سازی شده است. در سطح اول، ۱۰ سناریوی مختلف برای بحران اولیه (سیل با شدت‌های متفاوت) در نظر گرفته شد. سپس برای هر سناریوی اولیه، ۳ حالت بحران ثانویه (طوفان شدید، طوفان خفیف یا عدم وقوع طوفان) با احتمالات شرطی متفاوت تعریف گردید. این مدل به صورت یک درخت سناریو با ساختار (3×10) طراحی شد که در مجموع ۳۰ سناریوی ترکیبی ایجاد نمود. در این ساختار، احتمال وقوع هر سناریوی ترکیبی به صورت حاصلضرب احتمال سناریوی اولیه و احتمال شرطی وقوع حالت ثانویه محاسبه شده است. این روش اجازه می‌دهد وابستگی میان وقایع اولیه و ثانویه به طور دقیق لحاظ شود و تحلیل بهتری از توزیع منابع در شرایط واقعی بحران‌های همزمان ارائه گردد.

مدل برنامه‌ریزی تصادفی سه مرحله‌ای با اهداف چندگانه

از آنجا که مسائل لجستیک امداد نه تنها بر هزینه‌ها بلکه بر زمان‌بندی نیز تأکید دارند، اطمینان از عملکرد مطلوب راه‌حل بهینه بر روی شاخص‌های متعدد بسیار مهم است. بنابراین، یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفه ارائه می‌شود. در مرحله اول، هدف حداقل کردن مجموع هزینه‌های مورد انتظار است که می‌توان آن را به صورت زیر نوشت:

$$\min \left\{ \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} z_{il} c_{il} + E[f(Y, \omega)] \right\} \quad \text{رابطه (۱)}$$

جائیکه $E[f(Y, \omega)]$ نشان‌دهنده مجموع مورد انتظار زمان حمل‌ونقل وزنی، هزینه‌های حمل‌ونقل و تقاضای تأمین‌نشده‌ای است که به مرحله دوم مرتبط هستند. باید توجه داشت که $E[f(Y, \omega)]$ به عملکرد مرحله سوم که مربوط به بلایای ثانویه است وابسته است و در زیر بخش بعدی توضیح داده خواهد شد.

توابع چندهدفه

همانطور که گفته شد، در این مقاله بدنبال توسعه یک مدل بهینه‌سازی تصادفی سه مرحله‌ای هستیم. با توجه به پیچیدگی لجستیک امداد، هدف ما مدل‌سازی مسئله با تمرکز بر سه هدف در هر مرحله است:

✚ حداقل‌سازی مجموع زمان حمل‌ونقل مورد انتظار،

✚ حداقل‌سازی مجموع هزینه‌های مورد انتظار،

✚ حداقل‌سازی مجموع تقاضای تأمین‌نشده مورد انتظار.

در مرحله دوم، مجموع زمان حمل‌ونقل مورد انتظار f_1 به صورت زیر قابل فرمول‌بندی است:

$$f_1 = \min \left\{ \sum_{\xi \in \Xi} p^\xi \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} t_{ijm}^\xi x_{ijlm}^\xi + E[f_1^2(Y, \omega)] \right\} \quad \text{رابطه (۲)}$$

جائیکه تابع بازگشتی مرحله سوم برای زمان حمل‌ونقل در سناریوی ω است.

$$E[f_1^2(Y, \omega)] = \sum_{\omega \in \Omega} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} pr(\omega | \xi) t_{ijm}^\omega y_{ijlm}^\omega$$

کل هزینه حمل‌ونقل مورد انتظار می‌تواند به صورت زیر ارائه شود:

$$f_2 = \min \left\{ \sum_{\xi \in \Xi} p^\xi \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} s_{ijm}^\xi x_{ijlm}^\xi + E[f_2^2(Y, \omega)] \right\} \quad \text{رابطه (۳)}$$

تابع بازگشتی مرحله سوم برای هزینه حمل‌ونقل در سناریوی ω

جائیکه

$$E[f_2^2(Y, \omega)] = \sum_{\omega \in \Omega} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} pr(\omega|\xi) s_{ijm}^\omega y_{ijlm}^\omega$$

است. مجموع تقاضای تأمین‌نشده مورد انتظار می‌تواند به صورت زیر فرموله شود:

$$f_3 = \min \left\{ \sum_{\xi \in \Xi} p^\xi \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} w_{jl}^\xi + E[f_3^2(Y, \omega)] \right\} \quad \text{رابطه (۴)}$$

تابع بازگشتی مرحله سوم برای هزینه حمل‌ونقل در سناریوی ω

جائیکه

$$E[f_3^2(Y, \omega)] = \sum_{\omega \in \Omega} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} pr(\omega|\xi) \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} w_{jl}^\omega$$

است. w_{jl}^ω و w_{jl}^ξ نمایانگر مقدار تفاوت بین عرضه و تقاضا است.

بر اساس توابع هدف فوق، مدل سه هدف دارد که مجموع زمان حمل‌ونقل وزنی مورد انتظار، مجموع هزینه حمل‌ونقل مورد انتظار و مجموع تقاضای تأمین‌نشده مورد انتظار در مرحله دوم را به حداقل برساند. این مقادیر از اقدامات بازگشتی در مرحله سوم برای سناریوهای بعدی ناشی می‌شوند.

محدودیت‌ها

در مدل سه‌مرحله‌ای، تأمین منابع اضطراری در مراحل دوم و سوم محدود است. بنابراین، مقدار منابع اضطراری توزیع‌شده به تمام نقاط حادثه نباید بیشتر از مقدار موجود در مراکز ذخیره‌سازی باشد. محدودیت ظرفیت به صورت زیر قابل فرمول‌بندی است:

$$\sum_{l \in L} \left[\sum_{j \in J} \sum_{m \in M} x_{ijlm}^\xi + \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} y_{ijlm}^\omega \right] \leq a_{i,l}, \quad \forall i \in I, l \in L, \xi \in \Xi, \omega \in \Omega \quad \text{رابطه (۵)}$$

تعداد تجهیزات اضطراری توزیع‌شده به نقاط حادثه‌دیده نباید بیشتر از نیاز آنها باشد:

$$w_{jl}^\xi = \max \left(d_{jl}^\xi - \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} x_{ijlm}^\xi, 0 \right), \quad \forall j \in J, l \in L, \xi \in \Xi \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$w_{jl}^\omega = \max \left(d_{jl}^\omega - \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} y_{ijlm}^\omega, 0 \right), \quad \forall j \in J, l \in L, \omega \in \Omega \quad \text{رابطه (۷)}$$

مقدار حمل‌ونقل به هر نقطه نباید کمتر از نرخ حداقل ایمنی مربوطه باشد تا عدالت بین نقاط حادثه‌دیده تضمین شود، که به صورت زیر قابل فرمول‌بندی است:

$$\sum_{i \in I} \sum_{m \in M} x_{ijlm}^\xi \geq e_l^\xi d_{jl}^\xi, \quad \forall j \in J, l \in L, \xi \in \Xi$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{m \in M} x_{ijlm}^\omega \geq e_l^\omega d_{jl}^\omega, \quad \forall j \in J, l \in L, \omega \in \Omega$$

رابطه (۸ و ۹)

مقدار انتقال منابع نباید از کل ظرفیت حمل‌ونقل تجاوز کند:

$$\sum_{j \in J} \sum_{l \in L} x_{ijlm}^\xi w_l + \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} y_{ijlm}^\omega w_l \leq q_m b_{im}, \quad \forall j \in J, l \in L, \xi \in \Xi, \omega \in \Omega \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

هر متغیر تصمیم در مدل غیر منفی است:

$$x_{ijlm}^{\xi} \geq 0, \forall i \in I, j \in J, l \in L, m \in M, \xi \in \Xi$$

رابطه (۱۱ و ۱۲)

$$y_{ijlm}^{\omega} \geq 0, \forall i \in I, j \in J, l \in L, m \in M, \omega \in \Omega$$

مدل حاضر بر هزینه‌های مستقیم مانند هزینه‌های ذخیره‌سازی و حمل‌ونقل و تمرکز دارد، اما هزینه‌های غیرمستقیم مانند هزینه‌های اجتماعی (ناشی از تأخیر در امداد رسانی)، روانی (اثرات بر آسیب‌دیدگان) یا اقتصادی (خسارات بلندمدت به زیرساخت‌ها) در این پژوهش مدل‌سازی نشده‌اند. این تصمیم به دلیل نبود داده‌های قابل اعتماد برای کمی‌سازی این هزینه‌ها در مطالعه موردی و افزایش پیچیدگی محاسباتی مدل اتخاذ شده است.

روش حل

برای موارد با مقیاس کوچک یا متوسط، مسئله به‌خوبی با استفاده از حل‌کننده‌های مانند CPLEX قابل حل است. با این حال، برای موارد با مقیاس بزرگ، به رویکردی دیگر برای دستیابی به همگرایی سریع‌تر نیاز داریم. برای این منظور، یک برنامه‌ریزی احتمالاتی دو مرحله‌ای پیشنهاد شده است که راه‌حل‌های مناسبی را در مرحله سوم تخمین می‌زند. مشاهده می‌شود که مقدار بهینه مرحله سوم عمدتاً تحت تأثیر چند نقطه با احتمال وقوع بالایی بلایای ثانویه قرار دارد. این بدان معناست که راه‌حلی که تحت احتمال وقوع بالایی بلایای ثانویه به دست می‌آید، عموماً برای سایر سناریوها نیز مناسب خواهد بود. فرمول‌بندی این تقریب به صورت زیر قابل بیان است.

برای اطمینان از مقیاس‌پذیری مدل در شرایط واقعی با تعداد نقاط بحران و سناریوهای بیشتر، رویکرد تقریبی دوم مرحله‌ای به‌گونه‌ای طراحی شده است که تعداد سناریوهای مورد بررسی را کاهش داده و پیچیدگی محاسباتی را مدیریت می‌کند. این روش با تمرکز بر سناریوهای با احتمال وقوع بالا و تبدیل مسئله تصادفی به یک مسئله قطعی، امکان حل مسائل بزرگ‌مقیاس را فراهم می‌کند. به‌عنوان مثال، در شرایطی با صدها نقطه بحران و هزاران سناریو، این رویکرد می‌تواند با خوشه‌بندی سناریوها و استفاده از الگوریتم‌های موازی، زمان حل را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد. این ویژگی مدل را برای کاربرد در بحران‌های گسترده‌تر، مانند بلایای ملی یا منطقه‌ای با تعداد زیادی مناطق آسیب‌دیده، مناسب می‌سازد. برای مسائل بسیار پیچیده‌تر، استفاده از روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی یا بهینه‌سازی توزیع‌شده نیز به‌عنوان توسعه آتی پیشنهاد می‌شود.

$$f_1 = \min \left\{ \sum_{\xi \in \Xi} p^\xi \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} t_{ijlm}^\xi x_{ijlm}^\xi + \max_{\omega \in \Omega} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} t_{ijlm}^\omega y_{ijlm}^\omega \right\}$$

$$f_2 = \min \left\{ \sum_{\xi \in \Xi} p^\xi \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} s_{ijlm}^\xi x_{ijlm}^\xi + \max_{\omega \in \Omega} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} s_{ijlm}^\omega y_{ijlm}^\omega \right\}$$

$$f_3 = \min \left\{ \sum_{\xi \in \Xi} p^\xi \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} w_{jl}^\xi + \max_{\omega \in \Omega} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} w_{jl}^\omega \right\}$$

st :

$$w_{jl}^\xi = \max \left(d_{jl}^\xi - \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} x_{ijlm}^\xi, 0 \right) \quad \forall j \in J, l \in L, \xi \in \Xi$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{m \in M} x_{ijlm}^\xi \geq e_l^\xi d_{jl}^\xi \quad \forall j \in J, l \in L, \xi \in \Xi$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{m \in M} x_{ijlm}^\xi + \max_{\omega \in \Omega} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} y_{ijlm}^\omega \leq a_{il} \quad \forall i \in I, l \in L, \xi \in \Xi$$

$$w_{jl}^\omega = \max_{\omega \in \Omega} \left[\max \left(d_{jl}^\omega - \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} y_{ijlm}^\omega, 0 \right) \right] \quad \forall j \in J, l \in L$$

$$\max_{\omega \in \Omega} \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} y_{ijlm}^\omega \geq e_l^\omega d_{jl}^\omega \quad \forall j \in J, l \in L$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{l \in L} x_{ijlm}^\xi w_l + \max_{\omega \in \Omega} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} y_{ijlm}^\omega w_l \leq q_m b_{im} \quad \forall i \in I, l \in L, \xi \in \Xi \quad \text{روابط (۱۳ تا ۲۶)}$$

$$y_{ijlm}^\omega \in R^+ \cup \{0\}, \quad \forall i \in I, j \in J, l \in L, m \in M, \omega \in \Omega$$

$$x_{ijlm}^\xi \geq 0, \quad \forall i \in I, j \in J, l \in L, m \in M, \xi \in \Xi$$

این رویکرد از سناریوی بدترین حالت به صورت محدود استفاده می‌کند تا تمامی بلایای ثانویه احتمالی را پوشش دهد. در نتیجه، مسئله احتمالاتی در مرحله دوم به مسئله‌ای قطعی تبدیل می‌شود. این امر منجر به کاهش تعداد سناریوها و ساده‌سازی مسئله می‌شود. سپس از روش مجموع وزنی برای تبدیل توابع چندهدفه به بهینه‌سازی تک‌هدفه استفاده می‌کنیم. همانطور که اشاره شد، مدل پیشنهادی در این پژوهش یک مدل چندهدفه است که سه هدف اصلی را دنبال می‌کند: حداقل‌سازی زمان پاسخگویی (f_1)، هزینه کل لجستیک (f_2)، و تقاضای تأمین نشده (f_3). برای حل این مدل چندهدفه و غلبه بر پیچیدگی‌های محاسباتی، از روش مجموع وزنی استفاده شد تا به یک مدل تک‌هدفه تبدیل شود. در این روش، هر تابع هدف با یک وزن مشخص (W_1 ، W_2 و W_3) ترکیب شد، به‌طوری‌که تابع هدف نهایی به صورت $Z = W_1 f_1 + W_2 f_2 + W_3 f_3$ تعریف گردید.

مطالعه موردی

در این تحقیق مطالعه موردی مربوط به وقوع بلایای طبیعی مختلف در استان خراسان شمالی ایران در سال ۱۳۹۵ مورد بررسی قرار می‌گیرد. در اوایل صبح ۱۳ آبان ۱۳۹۵، زلزله‌ای با بزرگی ۴ رخ داد. روز بعد، به دلیل باران‌های سنگین، سیل بزرگی در جاده‌های ارتباطی به وقوع پیوست. وقوع سیل، رانش زمین و همچنین رعد و برق‌های متوالی باعث آتش‌سوزی در بخش‌های مختلف شهرستان‌های شیروان و قوچان و اطراف بجنورد، مرکز استان، شد. علاوه بر این، طوفانی با سرعت حدود ۱۰۸ کیلومتر در ساعت به روستاها و شهرهای بجنورد و بخش مرکزی شهر برخورد کرد. بنابراین،

چهار بلای طبیعی به‌طور هم‌زمان در فاصله زمانی کوتاهی رخ دادند. زلزله به دلیل شدت کم، تلفات جانی نداشت. آتش‌سوزی نیز به‌جز چند جراحت جزئی، تلفات جانی نداشت. سیل خسارات زیادی به بار آورد، خانه‌ها و زیرساخت‌ها را تخریب کرد و تعداد قابل‌توجهی کشته، زخمی و آواره بر جای گذاشت. همچنین گزارش‌هایی از مجروح شدن افراد و تخریب ساختمان‌ها توسط طوفان وجود داشت. بنابراین، سیل به‌عنوان بلایای اولیه و طوفان به‌عنوان بلایای ثانویه در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفت. تعداد کشته‌شدگان سیل، که در شیروان و بجنورد متمرکز بود، ۱۹ نفر اعلام شد.

بر اساس آمار رسمی، ۴۳۸۸ نفر زخمی و حدود ۱۰۷۰۰ نفر آواره شدند. تعداد نقاط آسیب‌دیده در این بلایای اولیه ۴ شهر و ۱۶۲۰ روستا بود. با این حال، تعداد نقاط تحت تأثیر به‌طور کلی ۲۷۱ مرکز روستایی و ۴ شهر به‌عنوان نقاط امداد و نجات تعیین شد. از این تعداد، ۱۰ نقطه به‌عنوان نقاط بحران در این مطالعه انتخاب شده‌اند. هر منطقه بحرانی دارای احتمال وقوع بلایای ثانویه است. برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها در لجستیک امداد، ۳۰ سناریو بر اساس ترکیب بلایای اولیه (سیل) و ثانویه (طوفان) طراحی شدند. این سناریوها با استفاده از داده‌های تاریخی سیل و طوفان ۱۳۹۵ در استان خراسان شمالی و نظرات کارشناسان محلی تعریف شده‌اند. شدت هر سناریو (کم، متوسط، زیاد) بر اساس میزان تخریب زیرساخت‌ها و تقاضای اقلام امدادی (چادر، آب آشامیدنی، بسته غذایی) تعیین گردید که از ترکیب آن‌ها ۳۰ سناریو طراحی شد. احتمال رخداد هر کدام در بازه [۰.۳، ۰.۱] قرار دارد.

همچنین دو مرکز به‌عنوان انبارهای اصلی (مراکز ذخیره‌سازی) جهت توزیع منابع در نظر گرفته شدند. منابع اضطراری شامل چادر، آب آشامیدنی و غذا توزیع شدند. امداد رسانی از سه طریق زمینی (ماشین)، هوایی (هلی‌کوپتر) و قایق صورت می‌گیرد. جدول زیر اطلاعات مربوط به میزان تقاضا برای سه مورد چادر، آب و غذا را برای سه سناریو نشان می‌دهد. این داده‌ها از گزارش‌های سازمان مدیریت بحران و نظرات کارشناسان محلی استخراج شده و بر اساس تحلیل داده‌های تاریخی و سناریوهای احتمالی محاسبه گردیده‌اند. واحدهای شمارش اعداد در جداول ۲ تا ۶، شامل تعداد (برای تقاضا)، میلیون ریال (برای هزینه‌ها)، و ساعت (برای زمان حمل‌ونقل) است.

جدول ۲. مقدار تقاضای منابع اضطراری در شرایط بحران اولیه و ثانویه

محل بحران	تقاضا در شرایط بحران اولیه			تقاضا در شرایط بحران ثانویه		
	سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳۰	سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳۰
۱	(۱۷، ۲۱، ۷)	(۲۳، ۲۵، ۶)	(۲۱، ۲۷، ۸)	(۱۴، ۱۱، ۳)	(۱۶، ۱۳، ۴)	(۱۶، ۱۲، ۵)
۲	(۱۹، ۲۶، ۵)	(۲۴، ۲۳، ۶)	(۲۵، ۲۱، ۴)	(۱۵، ۱۰، ۴)	(۱۶، ۱۲، ۳)	(۱۹، ۱۳، ۴)
۳	(۲۴، ۲۳، ۸)	(۲۵، ۲۱، ۷)	(۱۸، ۲۱، ۷)	(۱۳، ۱۲، ۵)	(۱۶، ۱۴، ۷)	(۱۶، ۱۱، ۳)
۴	(۲۶، ۲۶، ۴)	(۲۴، ۲۶، ۵)	(۲۳، ۲۵، ۴)	(۱۴، ۱۱، ۳)	(۱۶، ۱۵، ۵)	(۱۷، ۱۱، ۳)
۵	(۲۳، ۱۸، ۶)	(۲۲، ۲۲، ۴)	(۲۴، ۲۳، ۶)	(۱۲، ۱۰، ۶)	(۱۶، ۱۲، ۴)	(۱۶، ۱۲، ۵)
۶	(۱۸، ۲۱، ۷)	(۲۱، ۲۵، ۹)	(۱۹، ۲۶، ۵)	(۱۱، ۱۱، ۳)	(۱۷، ۱۲، ۴)	(۱۵، ۱۱، ۳)
۷	(۲۳، ۲۵، ۴)	(۱۷، ۲۳، ۳)	(۲۶، ۲۶، ۴)	(۱۰، ۱۲، ۲)	(۱۲، ۱۳، ۴)	(۱۴، ۱۰، ۳)
۸	(۲۳، ۲۳، ۹)	(۱۸، ۲۶، ۷)	(۲۴، ۲۶، ۵)	(۱۲، ۱۲، ۳)	(۱۶، ۱۴، ۵)	(۱۴، ۹، ۵)
۹	(۲۳، ۲۸، ۸)	(۲۱، ۲۷، ۸)	(۱۸، ۲۶، ۷)	(۱۷، ۱۱، ۱)	(۱۵، ۱۳، ۴)	(۱، ۱۰، ۴)
۱۰	(۲۸، ۲۹، ۳)	(۲۵، ۲۱، ۴)	(۲۳، ۲۸، ۸)	(۱۳، ۹، ۳)	(۱۷، ۱۲، ۶)	(۱۷، ۱۱، ۱)

مقادیر موجود منابع اضطراری شامل چادر و آب آشامیدنی و غذا در هر دو انبار و همچنین کمترین نرخ‌های امن تقاضا برای هر منبع در جدول ۳ نشان داده شده است. در این پژوهش، کمترین نرخ امنیتی تقاضا به‌عنوان حداقل مقدار هر کالای امدادی (چادر، آب آشامیدنی، بسته غذایی) تعریف شده که باید در هر سناریو تأمین شود تا سطح پایه‌ای از نیازهای حیاتی برآورده گردد. این پارامتر، به‌صورت کسری از تقاضای میانگین هر منبع

در سناریوهای اولیه و ثانویه تنظیم شده‌اند تا حداقل سطح امدادسانی تضمین شود. این مقادیر با استفاده از گزارش‌های سازمان مدیریت بحران ایران و نظرات کارشناسان تخمین زده شده‌اند و به‌عنوان یک محدودیت در مدل تصادفی سه‌مرحله‌ای لحاظ گردیده است.

جدول ۳. مقدار موجودی و مقدار نرخ امن مقدار تقاضا

چادر	آب آشامیدنی	غذا	
۴۲	۱۲۲	۱۳۶	انبار ۱
۳۸	۱۰۱	۱۱۱	انبار ۲
۱	۳	۵	سناریو ۱
۱	۴	۵	سناریو ۲
۱	۳	۴	سناریو ۳۰

موجودی

کمترین نرخ

امنیتی تقاضا

همچنین فاصله و زمان بین انبار اصلی و نقاط آسیب‌دیده نیز شناسایی شد که مطابق با جدول ۴ است.

جدول ۴. فاصله و زمان بین مراکز بحران و مراکز ذخیره

محل بحران	زمان (دقیقه)		فاصله (کیلومتر)	
	مرکز ذخیره ۲	مرکز ذخیره ۱	مرکز ذخیره ۲	مرکز ذخیره ۱
۱	۳۶، ۵، ۳۲	۴۱، ۸، ۳۸	۴۲، ۱۰، ۳۴	۴۸، ۱۲، ۳۵
۲	۳۲، ۵، ۲۸	۳۷، ۹، ۳۲	۴۶، ۱۳، ۳۶	۴۴، ۱۱، ۳۳
۳	۳۹، ۳، ۲۶	۴۲، ۶، ۳۲	۴۳، ۱۴، ۳۳	۵۰، ۱۵، ۳۷
۴	۲۸، ۴، ۳۱	۳۴، ۵، ۳۸	۴۹، ۱۲، ۳۵	۴۱، ۱۰، ۳۶
۵	۳۷، ۵، ۲۹	۴۱، ۹، ۳۵	۴۰، ۱۱، ۳۶	۵۲، ۱۶، ۳۸
۶	۲۷، ۳، ۳۱	۳۲، ۴، ۳۵	۴۵، ۱۳، ۳۳	۴۲، ۹، ۳۴
۷	۲۷، ۸، ۲۸	۳۲، ۱۰، ۳۲	۴۸، ۱۵، ۳۷	۴۶، ۱۴، ۳۵
۸	۲۴، ۶، ۲۵	۳۵، ۱۰، ۳۱	۴۱، ۱۰، ۳۵	۴۴، ۱۲، ۳۶
۹	۳۲، ۶، ۲۵	۳۹، ۱۰، ۳۲	۴۰، ۹، ۳۳	۵۰، ۱۶، ۳۷
۱۰	۳۰، ۵، ۲۶	۳۶، ۷، ۲۸	۴۷، ۱۴، ۳۴	۴۱، ۱۰، ۳۳

در نهایت هزینه حمل منابع اضطراری و تعداد وسایل نقلیه در دسترس در هر مرکز به صورت جدول ۵ است.

جدول ۵. هزینه حمل و نقل و منابع در دسترس

ماشین	هلی کوپتر	قایق	
۵	۷	۶	چادر
۲	۳	۳	آب
۱	۲	۲	غذا
۹	۲	۶	مرکز ۱
۱۲	۱	۵	مرکز ۲

هزینه حمل و

نقل

تعداد منابع در

دسترس

۴. بیان یافته‌ها

همانطور که اشاره شد، مدل سه هدفه فوق به یک مدل تک هدفه تبدیل شده و حل گردید که جواب‌های بهینه مساله به صورت جدول ۶ است. این نتایج به ازای وزن برابر برای اهداف حاصل شده است.

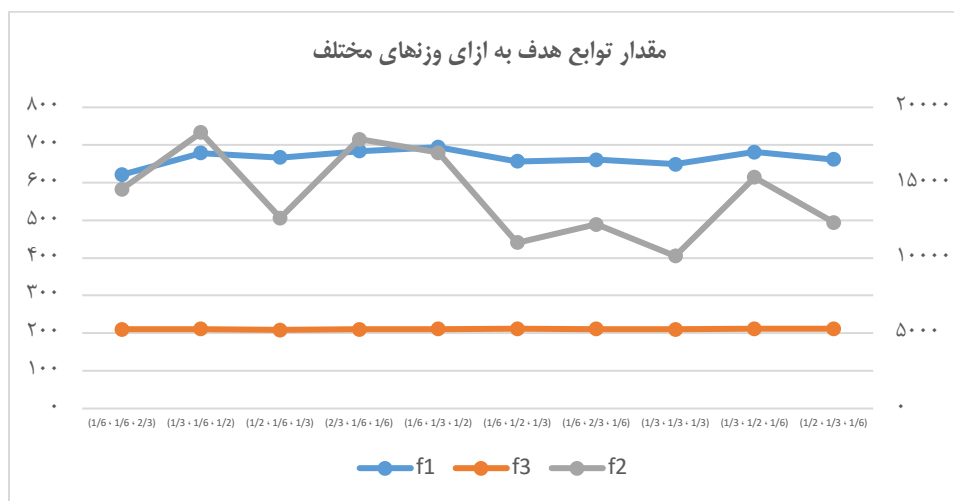
جدول ۶. جواب بهینه پاره‌تو

مقدار توابع برای جواب بهینه پارتو	زمان حمل و نقل (ساعت)	هزینه حمل و نقل (میلیون ریال)	تقاضای برآورده نشده (تعداد)
مقدار بهینه	۶۲۵/۱۲	۱۰۱۲۷/۴۳	۲۲۱/۱۶

برای بررسی تأثیر عدم قطعیت در تقاضا و احتمال وقوع سناریوها بر عملکرد مدل، تحلیل حساسیت روی این دو پارامتر کلیدی انجام شد. ابتدا، تقاضای منابع P_{jl}^{ξ} و P^{ω} به میزان ۲۰ درصد افزایش یافت تا سناریوهای شدیدتر شبیه‌سازی شوند. نتایج نشان داد که با این افزایش، زمان حمل و نقل کل ۵.۳ درصد (از ۶۲۵.۱۲ به ۶۵۸.۳۸ دقیقه) و تقاضای تأمین نشده ۷.۱ درصد (از ۲۲۱.۱۶ به ۲۳۶.۸۷ واحد) افزایش می‌یابد، اما هزینه‌ها تنها ۳.۸ درصد تغییر می‌کند که پایداری نسبی مدل را تأیید می‌کند. سپس، احتمال وقوع سناریوهای ثانویه (P^{ω}) به میزان ۱۰ درصد افزایش یافت (از میانگین ۰.۲ به ۰.۲۲). در این حالت، زمان حمل و نقل ۴.۶ درصد (به ۶۵۳.۸۷ دقیقه) و تقاضای تأمین نشده ۳.۲ درصد (به ۲۲۸.۲۴ واحد) افزایش یافت. این نتایج نشان می‌دهد که مدل در برابر تغییرات تقاضا حساس‌تر است تا تغییرات احتمال سناریوها، اما در هر دو حالت، نرخ تأمین منابع از سطح حداقل امنیتی (جدول ۳) پایین‌تر نمی‌رود، که انعطاف‌پذیری و کارایی رویکرد سناریومحور را تأیید می‌کند.

همچنین برای بررسی عملکرد مدل در مقیاس‌های بزرگ‌تر، یک سناریوی فرضی با ۵۰ نقطه بحران، ۵ مرکز ذخیره‌سازی، و ۱۰۰ سناریو طراحی شد که نشان‌دهنده یک بحران منطقه‌ای گسترده‌تر است. در این شبیه‌سازی، تقاضای منابع به‌طور میانگین ۲۰ درصد افزایش یافت و تعداد وسایل نقلیه در هر مرکز ذخیره‌سازی دو برابر شد. با استفاده از روش تقریبی دومرحله‌ای، زمان حل مسئله از ۱۴۵ دقیقه در حالت کامل به ۴۸ دقیقه کاهش یافت، در حالی که نرخ تأمین منابع تنها ۲.۹ درصد (از ۶۰.۲ درصد به ۵۷.۳ درصد) کاهش یافت و تقاضای تأمین نشده در حد ۲۳۵ واحد باقی ماند. این نتایج نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی قابلیت تعمیم به مقیاس‌های بزرگ‌تر را دارد و با افزایش تعداد نقاط و سناریوها، همچنان کارایی خود را حفظ می‌کند. با این حال، برای مقیاس‌های بسیار بزرگ‌تر (مانند بحران‌های ملی)، استفاده از الگوریتم‌های موازی یا خوشه‌بندی پیشرفته‌تر توصیه می‌شود.

وزن‌های هر یک از اهداف می‌تواند بر نتایج تأثیر گذارد. برای بهینه‌سازی چندهدفه، نیاز است به دقت بین اهداف متناقض مانند هدف اول (f_1) و دوم (f_2) مصالحه صورت گیرد. در اینجا، f_2 بیشترین حساسیت را به تغییرات وزنی نشان می‌دهد، درحالی‌که f_1 و f_3 پایدار هستند. شکل ۲ مقدار توابع هدف به ازای حالت‌های گوناگون برای وزن اهداف را نشان می‌دهد.



شکل ۲. مقدار توابع هدف به ازای وزنهای مختلف

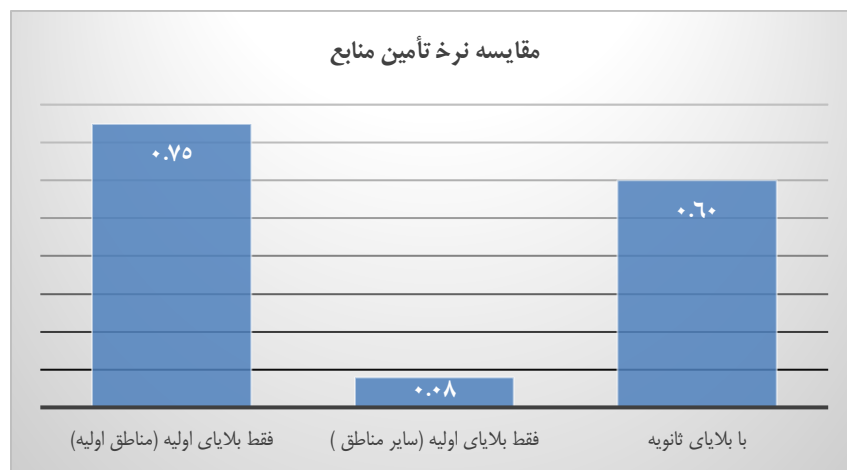
این وزن‌ها به صورت ترکیب سه تایی نمایش داده شده‌اند که سهم هر هدف را در فرآیند بهینه‌سازی مشخص می‌کنند. محورهای عمودی به دو بخش تقسیم شده‌اند؛ محور عمودی چپ مقادیر تابع‌های $f1$ و $f3$ را نمایش می‌دهد و محور عمودی راست مربوط به مقادیر $f2$ است. در این نمودار، رفتار سه تابع هدف به وضوح متفاوت است. تابع $f1$ ، که با خط آبی نشان داده شده، تقریباً در تمامی ترکیب‌های وزنی مقدار ثابتی دارد و نوسانات کمی بین ۶۲۰ تا ۶۹۰ دارد. این موضوع بیانگر آن است که این تابع نسبت به تغییرات وزن حساسیت کمی دارد و نقش آن در بهینه‌سازی چندهدفه تحت تأثیر تغییرات وزنی چندان تغییر نمی‌کند. کمترین مقدار این تابع در وزن $(\frac{1}{3}, \frac{1}{6}, \frac{1}{6})$ و بیشترین مقدار این تابع در وزن $(\frac{1}{6}, \frac{1}{6}, \frac{2}{3})$ رخ داده است. این امر بیانگر اینست که این نشان می‌دهد که زمانی که وزن تابع سوم (تقاضای برآورده نشده) بیشتر باشد، زمان حمل و نقل کاهش می‌یابد و بالعکس.

از طرف دیگر، تابع $f2$ ، که با خط خاکستری نشان داده شده، تغییرات قابل ملاحظه‌ای را از خود نشان می‌دهد. مقدار این تابع در ترکیب‌های مختلف وزنی از حدود ۱۰ هزار تا ۱۸ هزار متغیر است. این نوسانات شدید حاکی از حساسیت بالای $f2$ به تغییرات وزنی است و نشان می‌دهد که این تابع در تضاد با سایر توابع هدف قرار دارد و تغییر وزن‌ها می‌تواند تأثیر عمده‌ای بر عملکرد آن داشته باشد. کمترین مقدار این تابع در وزن $(\frac{1}{3}, \frac{1}{6}, \frac{1}{6})$ و بیشترین مقدار این تابع در وزن $(\frac{1}{6}, \frac{1}{6}, \frac{2}{3})$ رخ داده است. به‌طور کلی، زمانی که وزن‌های کمتری به این تابع اختصاص داده می‌شود، هزینه حمل و نقل کاهش می‌یابد. تابع $f3$ که با خط قرمز نشان داده شده است، تقریباً ثابت باقی می‌ماند و مقدار آن در حدود ۲۱۰ است. این رفتار پایدار نشان‌دهنده آن است که $f3$ به تغییرات وزنی واکنش نشان نمی‌دهد و احتمالاً دارای ماهیتی است که تغییرات وزن تأثیری بر مقدار آن ندارد.

کمترین مقدار این تابع در وزن $(\frac{1}{3}, \frac{1}{6}, \frac{1}{6})$ و بیشترین مقدار این تابع در وزن $(\frac{1}{6}, \frac{1}{6}, \frac{2}{3})$ رخ داده است. به‌طور کلی، زمانی که وزن‌های کمتری به این تابع اختصاص داده می‌شود، هزینه حمل و نقل کاهش می‌یابد. تحلیل تأثیر بلایای ثانویه نشان می‌دهد که در نظر گرفتن این بلایا می‌تواند نقش قابل توجهی در بهبود برنامه‌ریزی و تخصیص منابع امدادی داشته باشد. در این مطالعه، نتایج زمانی که بلایای ثانویه لحاظ شده‌اند، با شرایطی که تنها بلایای اولیه مورد توجه قرار گرفته‌اند، مقایسه شده است.

در مدلی که بلایای ثانویه در نظر گرفته شده‌اند، نرخ تأمین منابعی مانند چادر، آب آشامیدنی و غذا در هر منطقه، از سطح حداقل امنیتی پایین‌تر نمی‌رود. این امر موجب توزیع عادلانه‌تر منابع در تمامی نقاط آسیب‌دیده می‌شود. در مقابل، در مدلی که تنها به بلایای اولیه پرداخته شده است، تفاوت قابل ملاحظه‌ای میان میزان تأمین منابع در مناطق مختلف مشاهده می‌شود. به‌طور مشخص، در سناریویی که فقط بلایای اولیه لحاظ شده‌اند، نرخ تأمین منابع در مناطق با بلایای اولیه به‌طور میانگین بیش از ۷۵٪ است. اما پس از تخصیص منابع به این مناطق، تنها ۹۰ چادر، ۱۵۰۰ واحد آب آشامیدنی، و ۳۰۰ وعده غذایی باقی می‌ماند. کمبود منابع باقیمانده باعث می‌شود که نرخ تأمین در سایر مناطق به‌طور میانگین به حدود ۸٪ کاهش پیدا کند.

برای ارائه بصری بهتر یافته‌ها، نرخ تأمین منابع در حالت‌های مختلف در شکل ۳ مقایسه شده است. این شکل نشان می‌دهد که در نظر گرفتن بلایای ثانویه، نرخ تأمین منابع را از ۸٪ (در حالت سنتی برای سایر مناطق) به میانگین ۶۰٪ در همه مناطق بهبود داده است، که توزیع عادلانه‌تر منابع را تأیید می‌کند.



شکل ۳. نرخ تأمین منابع

در مقابل، زمانی که بلایای ثانویه نیز در مدل لحاظ می‌شوند، میانگین تأمین منابع در همه مناطق، از جمله غذا، آب و چادر، به شکل قابل توجهی بهبود می‌یابد. این نتایج اهمیت در نظر گرفتن بلایای ثانویه در طراحی برنامه‌های امدادی را برجسته می‌کند. برای دستیابی به امدادسانی پایدار و مؤثر، ضروری است که منابع کافی برای سناریوهای متعدد بلایا تأمین شوند. در نظر گرفتن بلایای ثانویه می‌تواند به ایجاد یک برنامه توزیع منابع قابل اعتمادتر کمک کند و نقش حیاتی در بهبود پاسخگویی به بلایا ایفا کند.

با توجه به تمرکز مدل بر بحران‌های همزمان، تقاضای منابع در بحران ثانویه و هزینه حمل‌ونقل در این مرحله تحلیل شدند. جدول ۷ تأثیر تغییرات تقاضای منابع (چادر، آب، غذا) در بحران ثانویه (طوفان) را بر هزینه کل و تقاضای تأمین‌نشده را نشان می‌دهد. که افزایش ۲۰٪ تقاضای بحران ثانویه، هزینه را ۱۳٪ و تقاضای تأمین‌نشده را ۲۰٪ بالا می‌برد، که بیانگر اهمیت پیش‌بینی دقیق بحران ثانویه است.

جدول ۷. تأثیر تغییرات تقاضای منابع (چادر، آب، غذا) در بحران ثانویه (طوفان) بر هزینه کل و تقاضای تأمین‌نشده

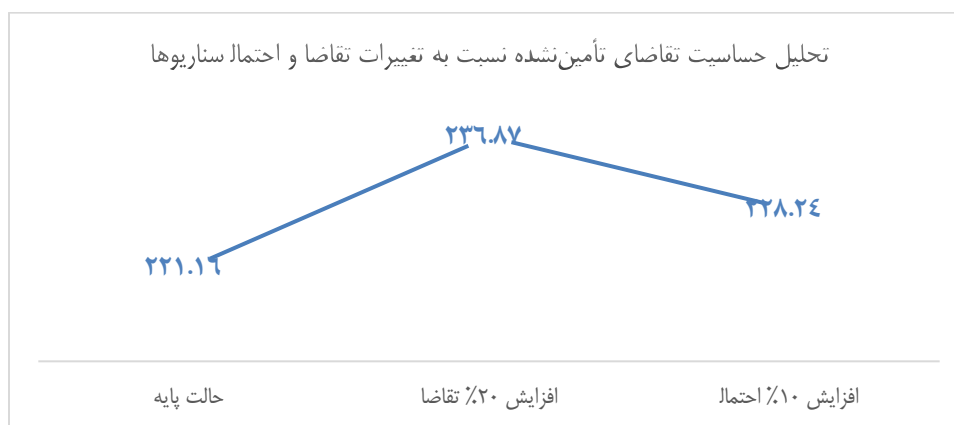
سناریو تقاضا	تقاضای کل چادر (ثانویه)	تقاضای کل آب (ثانویه)	تقاضای کل غذا (ثانویه)	هزینه کل (میلیون ریال)	تقاضای تأمین‌نشده (واحد)
افزایش ۲۰٪	۵۵	۱۵۱	۱۸۸	۱۱۵۰۰	۲۶۵
کاهش ۲۰٪	۳۷	۱۰۱	۱۲۶	۹۲۰۰	۱۹۰

جدول ۸ نشان می‌دهد که افزایش ۲۰٪ در هزینه‌های حمل‌ونقل در مرحله بحران ثانویه (طوفان)، هزینه کل را به میزان ۱۰٪ افزایش می‌دهد، اما زمان حمل‌ونقل را به‌طور اندک بهبود می‌بخشد. این بهبود جزئی در زمان احتمالاً ناشی از افزایش استفاده از روش‌های حمل‌ونقل سریع‌تر، مانند هلیکوپتر، در پاسخ به هزینه‌های بالاتر است. این تحلیل‌ها حساسیت مدل پیشنهادی به پارامترهای مرتبط با بحران ثانویه را تأیید می‌کند و بر ضرورت برنامه‌ریزی دقیق و جامع برای مدیریت اثرات طوفان، به‌عنوان یک بحران ثانویه، تأکید دارد.

جدول ۸. تأثیر تغییرات هزینه حمل‌ونقل (ماشین، هلیکوپتر، قایق) در بحران ثانویه را بر هزینه کل و زمان حمل‌ونقل

سناریو هزینه حمل	هزینه ماشین (ریال/واحد)	هزینه هلیکوپتر (ریال/واحد)	هزینه قایق (ریال/واحد)	هزینه کل (میلیون ریال)	زمان حمل‌ونقل (دقیقه)
افزایش ۲۰٪	۶	۸٫۴	۷٫۲	۱۱۲۰۰	۶۲۰
کاهش ۲۰٪	۴	۵٫۶	۴٫۸	۹۱۰۰	۶۲۸

در نهایت، تحلیل حساسیت تقاضای تأمین‌نشده در شکل ۴ ارائه شده است. این شکل نشان می‌دهد که افزایش ۲۰٪ تقاضا، تقاضای تأمین‌نشده را ۷/۱٪ (از ۲۲۱/۱۶ به ۲۳۶/۸۷) و افزایش ۱۰٪ احتمال سناریوها، آن را ۳/۲٪ (به ۲۲۸/۲۴) افزایش داده است. این نتایج پایداری مدل را در برابر تغییرات تأیید می‌کند.



شکل ۴. نرخ تحلیل حساسیت تقاضای تأمین‌نشده نسبت به تغییرات تقاضا و احتمال سناریوها

۵. نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات

عرضه به‌موقع و پایدار منابع اضطراری از مهم‌ترین عوامل موفقیت در مدیریت بحران‌های طبیعی محسوب می‌شود. در این تحقیق، مدلی برنامه‌ریزی‌شده برای شرایط عدم قطعیت ارائه شده است که به‌طور خاص برای مدیریت توزیع منابع در هنگام وقوع بلا یا طراحی شده است. این مدل برنامه‌ریزی تصادفی سه مرحله‌ای چندهدفه با هدف کاهش زمان و هزینه حمل‌ونقل و نیز کاهش تقاضای تأمین‌نشده توسعه داده شده است. نکته حائز اهمیت این است که مدل علاوه بر بلایای اولیه، تأثیر بلایای ثانویه را نیز در فرآیند تصمیم‌گیری در نظر می‌گیرد. برای تسهیل حل این مدل پیچیده، از یک رویکرد تک‌هدفه جایگزین استفاده شده و همچنین یک روش تقریبی برنامه‌ریزی تصادفی دومارحله‌ای پیشنهاد شده است که حل مسئله را در سناریوهای بزرگ مقیاس تسریع می‌کند.

تحلیل نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی توانسته است کارایی بالایی در تخصیص بهینه منابع اضطراری داشته باشد. به طور خاص، بررسی داده‌های مربوط به استان خراسان شمالی نشان داده است که این مدل در مقایسه با روش‌های سنتی، توزیع منابع را به نحوی بهینه‌تر و متناسب‌تر با شرایط بحرانی ارائه داده است. نتایج نشان داد که در سناریوهای ترکیبی سیل و طوفان، نرخ تأمین منابع (چادر، آب آشامیدنی، و غذا) در تمامی نقاط بحران‌زده از میانگین ۸ درصد در حالت سنتی (تنها با در نظر گرفتن بلایای اولیه) به بیش از ۶۰ درصد افزایش یافت (جدول ۶). این بهبود، به‌ویژه با لحاظ کردن بلایای ثانویه، پایداری فرآیند امدادرسانی را تقویت کرد و از کمبود منابع در مناطق ثانویه جلوگیری نمود. تحلیل حساسیت نیز تأیید کرد که مدل در برابر تغییرات ۲۰ درصدی تقاضا و ۱۰ درصدی احتمال وقوع سناریوها همچنان نرخ تأمین را بالای سطح حداقل امنیتی (جدول ۳) حفظ می‌کند. علاوه بر این، روش تقریبی دوم‌مرحله‌ای پیشنهادی زمان حل مسئله را در مقیاس کوچک از ۱۴۵ دقیقه به ۴۸ دقیقه کاهش داد و در مقیاس بزرگ‌تر (۵۰ نقطه بحران) نیز کارایی خود را با افت تنها ۲/۹ درصدی در نرخ تأمین حفظ کرد. این یافته‌ها نشان‌دهنده برتری مدل پیشنهادی نسبت به روش‌های سنتی در توزیع عادلانه و سریع منابع تحت شرایط پیچیده است.

روش تقریبی پیشنهادی با کاهش زمان حل (۶۷٪ بهبود)، امکان تصمیم‌گیری سریع‌تر را در شرایط بحرانی فراهم می‌کند، که در بحران‌های واقعی (مانند سیل ۱۳۹۵) حیاتی‌تر از دقت مطلق است. افت ۲/۹ درصدی نرخ تأمین منابع (از ۶۰٪ به ۵۷/۱٪) با توجه به داده‌های تاریخی و نظرات کارشناسان محلی تأثیر قابل توجهی بر مدیریت بحران ندارد، زیرا منابع تخصیص‌یافته همچنان نیازهای اولیه را پوشش می‌دهند. برای ایجاد تعادل بین سرعت و دقت، می‌توان مکانیزم تکمیلی برای مدیریت بهینه این چالش طراحی کرد. در سطح اول، یک سیستم هشدار چندلایه طراحی کرد که به صورت پویا مناطق با ریسک بالای محرومیت از منابع را شناسایی و اولویت‌بندی کند. این سیستم با بهره‌گیری از شاخص‌های ترکیبی (شامل تراکم جمعیت، شدت خسارات و آسیب‌پذیری زیرساختی) عمل می‌نماید. در سطح دوم، شبکه ذخایر استراتژیک سیار به گونه‌ای سازماندهی شوند که بتوانند کمبودهای موضعی ناشی از خطای مدل را در کوتاه‌ترین زمان ممکن پوشش دهند. این ذخایر با قابلیت جابه‌جایی سریع و توزیع هوشمند، به عنوان ضربه‌گیر سیستمی عمل می‌کنند.

بطور کلی می‌توان گفت که یکی از یافته‌های کلیدی تحقیق این است که در نظر گرفتن بلایای ثانویه تأثیر قابل توجهی در افزایش پایداری و کارایی فرآیند توزیع منابع داشته و توانسته است از وقوع بحران‌های جدید در نتیجه عدم تأمین منابع جلوگیری کند. روش تقریبی ارائه‌شده توانسته است زمان حل مسئله را کاهش دهد و با در نظر گرفتن سناریوهای بدترین حالت، کمترین میزان تقاضای تأمین‌نشده را ایجاد کند. به طور کلی، نتایج این تحقیق نشان داده است که در نظر گرفتن شرایط پیچیده‌تر و واقع‌گرایانه‌تر، مانند بلایای ثانویه، می‌تواند به بهبود قابل توجه فرآیند امدادرسانی منجر شود.

در مقایسه با پژوهش‌های پیشین، این مطالعه نسبت به ژانگ و همکاران (۲۰۲۳) که تنها تقاضای تأمین‌نشده را در اپیدمی‌ها هدف قرار داد، با افزودن بلایای ثانویه و زمان پاسخگویی، جامعیت بیشتری دارد. برخلاف رانسریکاربوم و میسون (۲۰۲۲) که بر بازسازی شبکه پس از طوفان تمرکز داشتند، مدل حاضر به تخصیص منابع در مراحل اولیه و ثانویه بحران می‌پردازد. همچنین، در برابر خو و همکاران (۲۰۲۴) که سناریوهای فرضی را بررسی کردند، این پژوهش با داده‌های واقعی سیل ۱۳۹۵، کاربرد عملی بیشتری نشان می‌دهد. این تمایزها، ارزش افزوده مدل پیشنهادی را در مدیریت بحران‌های چندلایه و مقیاس‌پذیر برجسته می‌کند. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی، اثرات تغییرات زیرساختی و همکاری بین‌سازمانی نیز مدل‌سازی شود.

با این حال، تحقیق حاضر به موضوعاتی خاص محدود شده است و چندین پیشنهاد برای ادامه تحقیقات در این زمینه مطرح می‌شود. نخست آن‌که این تحقیق تنها به توزیع منابع در یک دوره زمانی ثابت پرداخته است، در حالی که در دنیای واقعی شرایط اضطراری اغلب پویا و چنددوره‌ای هستند. بنابراین، گسترش مدل به سمت توزیع منابع اضطراری پویا و چنددوره‌ای می‌تواند به ارائه نتایجی دقیق‌تر و کاربردی‌تر کمک کند. دوم آن‌که استفاده از فناوری‌های جدید مانند اینترنت اشیا و سیستم‌های هوشمند می‌تواند در بهبود فرآیند تخصیص دینامیک منابع در طول بحران مؤثر باشد.

علاوه بر این، توسعه روش‌های علمی برای تعیین احتمال وقوع سناریوهای مختلف از طریق تحقیقات میان‌رشته‌ای و تحلیل داده‌های تاریخی نیز می‌تواند دقت و کاربرد مدل را افزایش دهد. در نهایت، بررسی ابعاد انسانی و اجتماعی در فرآیند توزیع منابع، مانند رفتار افراد در شرایط بحران و نیازهای خاص فرهنگی و اجتماعی، می‌تواند به ارتقای جامعیت مدل کمک شایانی کند. علاوه بر این، مدل فعلی هزینه‌های غیرمستقیم مانند هزینه‌های اجتماعی و روانی ناشی از تأخیر یا کمبود منابع را در نظر نگرفته است. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی، این هزینه‌ها با تعریف توابع هدف مرتبط (مانند حداقل‌سازی هزینه محرومیت اجتماعی) مدل‌سازی شوند تا اثرات بلندمدت بحران بر جامعه نیز در تصمیم‌گیری لحاظ گردد. این کار نیازمند جمع‌آوری داده‌های کیفی و کمی از آسیب‌دیدگان و تحلیل‌های میان‌رشته‌ای با علوم اجتماعی است که می‌تواند جامعیت مدل را افزایش دهد. همچنین برای ایجاد تعادل بین سرعت و دقت الگوریتم، دو مسیر پژوهشی اساسی پیشنهاد می‌گردد: نخست، ادغام روش حاضر با الگوریتم‌های پیشرفته یادگیری ماشین جهت افزایش دقت پیش‌بینی سناریوهای پرریسک و کاهش خطای تخمین‌ها. این ادغام می‌تواند با استفاده از تکنیک‌هایی مانند شبکه‌های عصبی گرافی یا مدل‌های ترکیبی انجام پذیرد. دوم، توسعه یک مکانیزم فداشونده هوشمند که به صورت انتخابی دقت محاسباتی را در مناطق حیاتی و حساس (نظیر مراکز درمانی، مدارس و پایگاه‌های امدادی) حفظ نموده، در حالی که در سایر مناطق از روش‌های سریع‌تر استفاده می‌کند. این رویکرد ترکیبی می‌تواند همزمان مزایای سرعت و دقت را در سطوح مختلف سیستم تأمین نماید.

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

منابع

1. Afshar, A., & Haghani, A. (2012). Dynamic emergency supply chain network design with consideration of demand urgency and transportation time. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(4), 834–848.
2. Alinaghian, M., Aghaie, M., & Sabbagh, M. S. (2019). A mathematical model for location of temporary relief centers and dynamic routing of aerial rescue vehicles. *Computers & Industrial Engineering*, 131, 227–241.
3. Arasteh, K., Ghousi, R. and Makui, A. (2024). A Review of Articles on the Location of Humanitarian Logistics Facilities. *Journal of Industrial Management Perspective*, 14(1), 57–90.
4. Barbarosoğlu, G., & Arda, Y. (2004). A two-stage stochastic programming framework for transportation planning in disaster response. *Journal of the Operational Research Society*, 55(1), 43–53.
5. Barbarosoğlu, G., Özdamar, L., & Cevik, A. (2002). An interactive approach for hierarchical analysis of helicopter logistics in disaster relief operations. *European Journal of Operational Research*, 140(1), 118–133.
6. Barzinpour, F., & Esmaeili, V. (2014). A multi-objective relief chain location distribution model for urban disaster management. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70(5-8), 1291–1302.
7. Baumol, W. J., & Wolfe, P. (1958). A warehouse-location problem. *Operations Research*, 6(2), 252–263.
8. Bayraktar, O. B., Günnec, D., Salman, F. S., & Yücel, E. (2022). Relief aid provision to en route refugees: Multi-period mobile facility location with mobile demand. *European Journal of Operational Research*, 300(2), 618–634.
9. Bozorgi Amiri, A., Mansoori, S. and Pishvaei, M. S. (2017). Multi-objective Relief Chain Network Design for Earthquake Response under Uncertainties. *Journal of Industrial Management Perspective*, 7(1), 9–36.
10. Bozorgi-Amiri, A., Jabalameli, M. S., & Al-e-Hashem, S. M. J. M. (2013). A multi-objective robust stochastic programming model for disaster relief logistics under uncertainty, *OR Spectrum*, 35(4), 905–933.

11. Fan, Y., Shao, J., Wang, X., & Liang, L. (2024). Contract design between relief organisations and private-sector vendors: A humanitarian logistics framework. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 182, Article 103395.
12. Ghadimi, S. and Seifbarghy, M. (2024). Designing a Bi-objective Post-Disaster Relief Logistics Model Considering Cost and Time of Utilizing Helicopters and Chance-Constraint Programming. *Journal of Industrial Management Perspective*, 14(4), 142-164.
13. Ghasemi, A., & Babaeinami, E. (2020). Fire station resource simulation considering machine breakdown time for efficient dispatching of emergency calls. *International Journal of Operational Research*, 39(1), 1-18.
14. Hu, X., Zhang, X., & Yang, Z. (2017). Humanitarian logistics optimization with equity considerations. *European Journal of Operational Research*, 256(2), 598-610.
15. Hu, Z. H., Sheu, J. B., Yin, Y. Q., & Wei, C. (2017). Post-disaster relief operations considering psychological costs of waiting for evacuation and relief resources. *Transportmetrica*, 13(2), 108-138.
16. Huang, C. J., Lee, C. H., & Lin, H. H. (2010). Dynamic location planning in large-scale emergency networks. *Computers & Operations Research*, 37(11), 1946-1955.
17. Iqbal, M., Malik, M. S., & Mian, M. I. (2018). A statistical model for location and distribution of relief items in disaster management. *Computers & Industrial Engineering*, 115, 555-563.
18. Li, Q., Chen, Y., & Xu, Y. (2018). Humanitarian supply chain management with fairness and equity goals. *Computers & Operations Research*, 92, 54-64.
19. Li, Q., Zhang, Y., & Yang, Z. (2020). A three-layer stochastic programming model for analyzing the relationship between primary and secondary disasters under uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*, 141, 106313.
20. Liu, Z., Zhang, J., & Li, H. (2019). Emergency medical service station location and demand distribution under uncertainty. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 37, 101134.
21. Lu, L., & Sheu, J. B. (2013). P-center model for emergency relief distribution. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 55, 17-34.
22. Moreno, P., Angelides, M. C., & Ioannou, P. A. (2018). Mathematical model for location, transportation, and fleet size optimization in disaster response operations.
23. Najafi, B., Sadeghi, M., & Gholamian, M. (2014). Supply chain management for dispatching relief items to disaster-stricken areas and transferring casualties to hospitals. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 19(3), 290-318.
24. Özdamar, L., Demir, S., & Çetinkaya, C. (2011). A dynamic vehicle routing problem for disaster relief with multiple objectives. *Computers & Industrial Engineering*, 61(1), 73-81.
25. Perez-Rodríguez, J. A., & Holguín-Veras, J. (2013). A multi-criteria decision approach to humanitarian logistics and disaster relief. *European Journal of Operational Research*, 228(1), 1-12.
26. Pradhananga, N., Chien, S., & Wei, C. (2016). A model for integrated resource allocation and distribution in disaster response.
27. Ransikarbum, K., & Mason, S. J. (2022). A multi objective optimization model in an integrated network for humanitarian logistics operations. *European Journal of Operational Research*, 298(1), 213-227.
28. Rezaei-Malek, M., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2014). A multi-objective MILP model for humanitarian supply chain network design. *Computers & Industrial Engineering*, 74, 154-168.
29. Rivera-Royero, C., Yufeng, H., & Wang, Y. (2016). A mixed integer-programming model for humanitarian relief logistics with time-varying demand. *Computers & Industrial Engineering*,
30. Sakiani, M., & Sadeghi, M. (2019). Post-disaster allocation and distribution of relief items: A rolling horizon approach. *Computers & Industrial Engineering*, 128, 641-653.
31. Tavana, M., Santos-Arteaga, F. J., & Samaniego, M. (2017). Humanitarian supply chain planning: A multi-objective optimization approach. *Journal of the Operational Research Society*, 68(12), 1593-1608.

32. Tirkolaee, E. B., Goli, A., & Ghasemi, P. (2022). Designing a sustainable closed-loop supply chain network of face masks during the COVID-19 pandemic: Pareto-based algorithms. *Journal of Cleaner Production*, 333, Article 130056.
33. Wacker, J. G. (1998). A definition of theory: Research guidelines for different theory-building research methods in operations management. *Journal of Operations Management*, 16(4), 361-385.
34. Walter, M., & Gutjahr, W. (2014). A model for routing and location in disaster relief operations.
35. Wang, Q., Liu, Z., Jiang, P., & Luo, L. (2022). A stochastic programming model for emergency supplies pre-positioning, transshipment and procurement in a regional healthcare coalition. *Omega*, 111, Article 102654.
36. Wei, C., Zhang, Z., & Huang, R. (2020). Multiple-resource and multiple-depot emergency response problem considering secondary disasters. *Expert Systems with Applications*, 39(12), 11066-11071.
37. Wei, X., Qiu, H., Wang, D., Duan, J., Wang, Y., & Cheng, T. C. E. (2020). An integrated location-routing problem with post-disaster relief distribution. *Computers & Industrial Engineering*, 147, 106632.
38. Xu, F., Ma, Y., Liu, C., & Ji, Y. (2024). Emergency logistics facilities location dual-objective modeling in uncertain environments. *Annals of Operations Research*, 339(3), 789-810.
39. Yun, J., Zhao, G., Fang, T., Liu, S., Huang, C., & Wang, C. (2012). A swarm-based dynamic evacuation simulation model under the background of secondary disasters. *Systems Engineering Procedia*, 5, 61-67.
40. Yun, W., Li, M., & Liu, Z. (2012). A dynamic group-based simulation model for primary and secondary disaster evacuations. *Disasters*, 36(3), 438-461.
41. Zanganeh, A., Ranjbar, M., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2019). A two-objective model for post-disaster relief item distribution under rolling horizon approach. *Computers & Industrial Engineering*, 136, 931-945.
42. Zhang, J., Huang, J., Wang, T., & Zhao, J. (2023). Dynamic optimization of emergency logistics for major epidemic considering demand urgency. *Systems*, 11(6), Article 303.
43. Zhang, J., Li, J., & Liu, Z. (2012). Multiple-resource and multiple-depot emergency response problem considering secondary disasters. *Expert Systems with Applications*, 39(12), 11066-11071.
44. Zhang, X., Li, L., & Yang, Z. (2012). Emergency response in multiple warehouse and resource allocation under secondary disasters. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2(3), 191-203.
45. Zhang, Y., He, Y., & Chen, Y. (2014). A two-stage model for emergency resource distribution minimizing the maximum relief time under secondary disaster conditions. *Computers & Industrial Engineering*, 72, 125-135.
46. Zhang, Y., Liu, H., & Li, L. (2019). Emergency resource allocation with primary and secondary disasters for improving sustainable rescue capability. *European Journal of Operational Research*, 277(2), 665-679.