E-ISSN: 2676-6159 | P-ISSN: 2538-5079

Journal of Decisions and Operations Research

www.journal-dmor.ir

J. Decis. Oper. Res. Vol. 8, No. 3 (2023) 578–608.

Paper Type: Original Article

Provide a Reliable Location-Allocation Model in the Humanitarian Supply Chain Network Using Combined Transport and the Application of Feasibility-Robust Planning

Alireza Hamidieh[1,*], Maryam Besharatmeimandi[1]

[1] Department of Industrial Engineering, Payame Noor University (PNU), Tehran, Iran; hamidieh@pnu.ac.ir; maryambesharat501@yahoo.com.

Citation:

Hamidieh, A., & Besharatmeimandi, M. (2023). Provide a reliable location-allocation model in the humanitarian supply chain network using combined transport and the application of feasibility-robust planning. *Journal of decisions and operations research, 8*(3), 578-608.

Received: 18/01/2022 Reviewed: 21/02/2022 Revised: 11/03/2022 Accepted: 14/04/2022

Abstract

Purpose: The main challenge in devastating events such as the Kermanshah earthquake is the optimal location of humanitarian distribution centers, which plays an effective role in allocating relief shipments to demand centers. Therefore, balancing the complexity of the issue and the uncertainty with the constraints on aid scheduling and resource management is critical. In this regard, the location-allocation model has been developed by considering the reliability of the distribution hub set, which provides the possibility of dealing with impending disruptions after the crisis. The proposed model divides the affected area into several layers and simultaneously considers the capacity of the relief fleet. Also, a combined approach of fuzzy programming with chance constraints and robust programming has been developed to deal with parametric uncertainty.

Methodology: With the thorough assessment of the disaster areas of Iran, a comprehensive model of the relief network was designed including strategic and temporary distribution hubs along with a wide range of factors and effective parameters. Subsequently, mathematical modeling was distributed by considering the reliability of the earthquake crisis distribution hub and relief according to the topography of the study area. Next, the Epsilon constraint method was applied to cover the multi-objective optimization problem and to determine non-dominant Pareto optimal solutions, and the mathematical combination of possibilistic-robust programming was used to deal with uncertainty.

Findings: The results show that the management of relief distribution and the development of strategic and operational levels of distribution based on the geographical classification of the affected area in critical conditions are effective in reducing network costs. The reliability policy used in the distribution hub set has improved the confidence capability of the humanitarian distribution network. Finally, the output results of the case study show the application and effectiveness of the extended relief network model.

Originality/Value: The present study, as a decision support system, facilitates relief in the regions of the country in the event of a crisis. Predicting a reliable distribution hub set with a combined transportation approach appropriate to the topography of the region ensures the optimal implementation of relief operations. Also, the developed model is operational in the areas at risk of the country.

Keywords: Humanitarian relief, Logistics, Network allocation, Robust-fuzzy planning, Temporary distribution centers.

Corresponding Author: hamidieh@pnu.ac.ir

http://dorl.net/dor/20.1001.1.25385097.1402.8.3.2.8

Licensee. **Journal of Decisions and Operations Research**. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Journal of Decisions and Operations Research

تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات

دوره ۸، شماره (۳)، (۱۴۰۲)، ۶۰۸-۵۷۸

www.journal-dmor.ir

نوع مقاله: پژوهشی

ارایه یک مدل مکان‌یابی-تخصیص پایا در شبکه زنجیره تامین بشردوستانه با استفاده از حمل‌ونقل ترکیبی و به‌کارگیری برنامه‌ریزی امکانی- استوار

علیرضا حمیدیه[1،*]، مریم بشارت میمندی[1]

[1]گروه مهندسی صنایع، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

چکیده

هدف: چالش اصلی در حوادث بحرانی مانند زلزله کرمانشاه مکان‌یابی بهینه مراکز توزیع اقلام بشردوستانه است که بر تخصیص بسته‌های امدادی به مراکز تقاضا نقش موثری ایفا می‌کند. از این‌رو ایجاد تعادل بین پیچیدگی مساله عدم قطعیت با محدودیت‌های زمان‌بندی ارسال کمک‌ها و میزان منابع امری حیاتی است. در این راستا یک مدل مکان‌یابی تخصیص با درنظر گرفتن پایایی مجموعه هاب‌های توزیع توسعه یافته است که با اختلالات پیش‌رو بعد از وقوع بحران نیز مقابله می‌کند. مدل پیشنهادی منطقه آسیب‌دیده را به چندلایه تقسیم کرده و هم‌زمان به ظرفیت ناوگان امدادی توجه کرده و ترکیبی از برنامه‌ریزی فازی با محدودیت شانس و برنامه‌ریزی استوار را برای مقابله با عدم قطعیت پارامتری ارایه می‌نماید.

روش‌شناسی پژوهش: با ارزیابی دقیق مناطق حادثه‌خیز ایران، مدلی جامع از شبکه امدادی شامل هاب‌های توزیع استراتژیک و موقت همراه با طیف وسیعی از فاکتورها و پارامترهای موثر طراحی شد. سپس مدل‌سازی ریاضی با درنظر گرفتن پایایی هاب توزیع مساله بحران زلزله و امدادرسانی با توجه به توپوگرافی منطقه موردمطالعه توسعه یافت. در ادامه روش محدودیت اپسیلون جهت پوشش مساله بهینه‌سازی چندهدفه و تعیین راه‌حل‌های بهینه پارتو اعمال گردید و ترکیب ریاضی برنامه‌ریزی امکانی-استوار جهت مواجه با عدم قطعیت به‌کار گرفته شد.

یافته‌ها: نتایج نشان می‌دهد که مدیریت توزیع امداد و توسعه سطوح استراتژیک و عملیاتی توزیع بر اساس طبقه‌بندی جغرافیایی منطقه آسیب‌دیده در شرایط بحرانی در کاهش هزینه‌های شبکه موثر است. سیاست پایایی به‌کار گرفته‌شده در مجموعه هاب توزیع قابلیت اطمینان شبکه توزیع امدادی را ارتقا داده است و درنهایت، نتایج خروجی مطالعه موردی کاربرد و اثربخشی مدل شبکه امداد گسترده را نشان می‌دهد.

اصالت/ارزش‌افزوده علمی: پژوهش حاضر، به‌عنوان یک سیستم پشتیبان تصمیم، امدادرسانی در مناطق کشور را در شرایط وقوع بحران تسهیل می‌نماید. پیش‌بینی مجموعه هاب توزیع پایا با رویکرد حمل‌ونقل ترکیبی متناسب با توپوگرافی منطقه اجرای بهینه عملیات کمک‌رسانی را تضمین می‌کند. هم‌چنین مدل توسعه‌یافته با اندکی تغییرات در مناطق در معرض حادثه کشور قابلیت عملیاتی دارد.

کلیدواژه‌ها: امدادرسانی بشردوستانه، برنامه‌ریزی استوار فازی، پایای لجستیک، تخصیص شبکه، مراکز توزیع موقت.

۱- مقدمه

امروزه فجایع طبیعی و انسانی غیر قابل‌پیش‌بینی مانند زمین‌لرزه، سیل، رانش زمین، فوران آتش‌فشان، حملات تروریستی، کودتا و ... به‌طور مستمر در سرتاسر جهان رخ می‌دهد. از آن‌جا که شدت و ابعاد وقوع حوادث وسیع می‌باشد، حجم تقاضای ایجادشده برای عملیات امداد و نجات نیز بسیار زیاد است و باید در سریع‌ترین زمان ممکن عملیات صورت گیرد. با انتقال سازماندهی‌شده کمک‌های امدادی به مناطق آسیب‌دیده در کوتاه‌ترین زمان ممکن، قادر به کاهش شدت خسارات تا حد قابل‌قبول و پاسخ موثر به بحران، خواهیم بود. برای

* نویسنده مسئول

hamidieh@pnu.ac.ir

http://dorl.net/dor/20.1001.1.25385097.1402.8.3.2.8

تحقق بخشیدن به این امر در مساله بحران، می‌توان از انبارهای توزیع موقت که از قابلیت تسریع کمک‌رسانی به افراد آسیب‌دیده برخوردار است، بهره برد [1]؛ بنابراین، مکان‌یابی مراکز توزیع و مناطق آسیب‌دیده ازجمله مهم‌ترین اقدامات قبل از وقوع حادثه است.

مستقر کردن مراکز توزیع موقت[1] ازجمله نخستین تصمیمات مهمی است که مدیران و برنامه‌ریزان عملیات بشردوستانه باید پس از یک فاجعه ناگهانی اتخاذ کنند. مشاهدات مربوط به زلزله ۲۰۱۵ نپال و زلزله اکوادور ۲۰۱۶ و زلزله کرمانشاه ۲۰۱۷ تایید می‌کند که انبارها و مراکز توزیعی که از قبل مستقر شده‌اند، اغلب تحت‌فشار محموله‌های ورودی قرار می‌گیرند به همین علت برای دسترسی به نقاط تقاضای پراکنده مناسب نیستند [2] و نیازمند کمک سازمان‌های کمک‌رسان بشردوستانه هستند. برای مقابله با این چالش‌ها که فعالیت‌های لجستیکی را در پاسخ‌های بشردوستانه هماهنگ می‌کند، پیاده‌سازی مراکز توزیع موقت یکی از مهم‌ترین راه‌کارهای توزیع می‌باشد [3]. ازآن‌جا که محل *TDCs* باید در آغاز عملیات تعیین شود، آن‌ها در مرحله پاسخ فوری قرار می‌گیرند. به‌طورکلی، مرحله واکنش فوری اولین مرحله مدیریت بحران بعد از یک فاجعه است. مدت‌زمان آن به پیچیدگی پاسخ و سطح تخریب بستگی دارد. مرحله امداد، زمان پس از پاسخ فوری تا بهبودی اولیه را پوشش می‌دهد. در این مرحله، به‌عنوان یک ارزیابی سریع؛ نیازها، تقاضاها و ذینفعان در اولویت قرار دارند و از این‌رو، ساختارهای امدادی، بیش‌تر سازمان یافته‌اند و مراکز توزیع موقت در مرحله واکنش فوری برای حوادث ناگهانی آغاز به کار می‌نمایند [4].

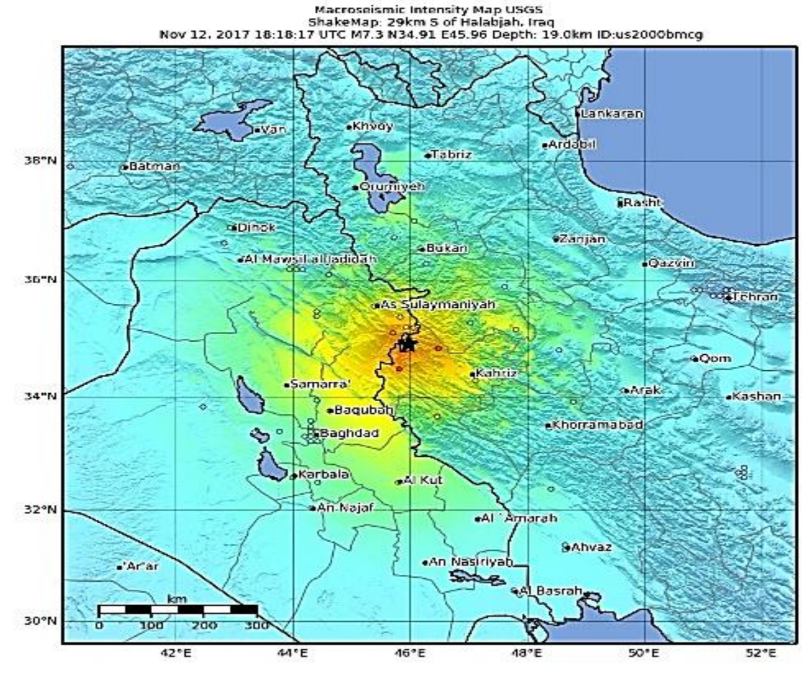
شبکه زنجیره‌تامین بررسی‌شده در این پژوهش مبتنی بر مطالعه موردی مربوط به زلزله کرمانشاه در سال ۱۳۹۶ است. زمین‌لرزه سرپل ذهاب با بزرگی ۷٫۳ ریشتر در بیست و یکم آبان ماه ۱۳۹۶ در نزدیکی شهر ازگله در استان کرمانشاه واقع در شمال غرب ایران به وقوع پیوست. این زلزله منجر به تخریب بخش‌های وسیعی از شهر سرپل ذهاب و بسیاری از شهرها و روستاهای استان کرمانشاه گردید. قدرت زلزله به‌قدری زیاد بود که تا صدها کیلومتر از کانون زلزله (حتی در تهران) لرزش‌های آن احساس شد. زلزله سرپل ذهاب یکی از مخرب‌ترین زلزله‌های دهه اخیر کشور محسوب می‌شود که منجر به ویرانی گسترده شهر سرپل ذهاب و تعداد زیادی از روستاهای منطقه گردید و تلفات و مصدومان فراوانی را برجای گذاشت. بلافاصله پس از وقوع زلزله و با مشخص شدن ابعاد این بحران، باید با استفاده از انبارهای پشتیبانی و امکانات در اختیار، سازمان‌های امدادی نسبت به ارسال اقلام اولیه موردنیاز مردم به منطقه آسیب‌دیده اقدام کنند. گروه‌های شناسایی در حوزه مدیریت خطرپذیری و بحران به‌منظور پایش و بررسی روند اجرای اقدامات مرتبط با مدیریت بحران، بازدیدهایی را در دو مرحله (یکی بلافاصله بعد از رخداد زلزله و دومی به فاصله ۱۳ روز بعد) از مناطق آسیب‌دیده انجام دادند [5]. هم‌چنین برخی مستندات موجود و گزارش‌های منتشرشده و منابع رسانه‌ای نیز در این بازه زمانی موردبررسی قرار گرفتند. نتایج جمع‌بندی اولیه فرایند مدیریت بحران بر اساس این بررسی‌ها در ادامه ارایه شده است. در اثر زلزله سرپل ذهاب حداقل هشت شهر (قصر شیرین، ازگله، ثلاث باباجانی، گیلان غرب، سرپل ذهاب، دالاهو، اسلام‌آباد غرب و جوانرود) و ۱۹۳۰ روستا دچار آسیب شدند. طبق آمار ارایه شده توسط پزشکی قانونی تا ۹۶/۹/۱۸ بالغ‌بر ۵۷۹ نفر در اثر زلزله کشته شدند و هزاران نفر نیز مصدوم گردیدند. از این تعداد شهرستان، سرپل ذهاب با ۵۱۸ کشته بیش‌ترین تلفات را داشته و بعدازآن شهرستان‌های ثلاث باباجانی با ۲۳ تن، کرند (دالاهو) با ۱۹ تن، قصر شیرین با ۱۶ تن، اسلام‌آباد غرب با ۱ تن و کرمانشاه با ۱ تن در جایگاه بعدی قرار دارند (شهر یک نفر از جان‌باختگان به دلیل مجهول‌الهویه بودن مشخص نشده است). علی‌رغم این‌که تلفات این زلزله در مقایسه با زلزله‌های بزرگ سه دهه اخیر کشور (نظیر زلزله ۱۳۶۹ منجیل رودبار و زلزله ۱۳۸۲ بم) نسبتا محدود می‌باشد، لیکن در این رویداد آمار دقیقی از تعداد تلفات و مصدومان زلزله و پراکندگی آن‌ها در روستاها و شهرستان‌های مختلف وجود ندارد و منابع مختلف ارقام متفاوتی را در زمان‌های مختلف بعد از رخداد زلزله در این رابطه ارایه نموده‌اند که ارزیابی دقیق صحت این آمار در حال‌حاضر چندان میسر نیست. یکی از مهم‌ترین علل این مشکل نبود زیرساخت‌های موردنیاز برای جمع‌آوری و انتقال سریع اطلاعات به مراجع ذی‌ربط به سبب نبود برنامه قبلی و بروز مشکلات در شبکه‌های مخابراتی است [6]. این مشکلات باعث شد تا ساعت‌ها بعد از وقوع زلزله، ابعاد حادثه و تعداد قربانیان مشخص نباشد. خبرگزاری‌ها درحالی‌که کانون زلزله را ابتدا شهر حلبچه در عراق اعلام می‌داشتند، به نقل از رییس سازمان مدیریت بحران کشور، صدمات جانی زلزله را دقایقی بعد از رخداد آن محدود به تعدادی مجروح زیر آوار در قصر شیرین اعلام نمودند. به‌تدریج اخبار مربوط به آمار تلفات و مصدومیت‌ها در ساعات بعد افزایش یافت. طبعا برآورد دست پایین تلفات و مصدومان

[1] Temporary Distribution Center (TDC)

زلزله باعث تاخیر در تهیه امکانات موردنیاز در منطقه آسیب‌دیده خواهد شد و زمان طلایی برای نجات جان قربانیان از دست خواهد رفت [7].

با توجه به اهمیت زمان در هنگام وقوع بحران، در این پژوهش، ما یک مدل تخصیص موقعیت سناریومحور را برای توزیع موقت امداد ارایه خواهیم داد. به‌عبارت‌دیگر، مکان‌های منتخب که نزدیک به محل وقوع بحران است درنظر گرفته می‌شوند تا مراکز توزیع موقت برای کمک‌رسانی هر چه سریع‌تر برپا شوند. این مطالعه به ارایه یک مدل بهینه‌سازی و حل آن با بهینه‌یاب می‌پردازد. این پژوهش درنظر دارد با ایجاد یک مدل که چندین مرحله زمانی را درنظر می‌گیرد و محدودیت زمانی را رعایت می‌کند، عدم اطمینان را پوشش دهد. این روش تصمیم‌گیرندگان را قادر می‌سازد تا تغییرات احتمالی پارامترها را به دلیل عدم قطعیت موردبررسی قرار دهند. جهت دستیابی به این اهداف، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی با رویکرد برنامه‌ریزی امکانی-استوار به‌منظور پوشش نقاط آسیب‌دیده و نقاط انتقال با هدف کمینه‌سازی زمان پاسخگویی ارایه خواهد شد.

بنابرآن‌چه گفته شد، زلزله به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مباحث روز، با توجه به گستردگی خسارات ناشی از آن در شهرها ازجمله مهم‌ترین دغدغه‌های برنامه‌ریزان و پژوهشگران عرصه‌ی مطالعات شهری است. افزایش هشت برابری جمعیت شهرنشینی در سال‌های اخیر و قرارگیری شهرها بر پهنه‌های پرخطر، اهمیتی ویژه پیدا کرده است و در این شرایط اهمیت بخش‌ها و عناصر مختلف مدیریت بحران به‌خوبی آشکار می‌شود؛ اما آن‌چه در این میان باید موردتوجه جدی قرار گیرد، آمادگی شهرها پس از بروز زلزله است. براین‌اساس، مدیریت شهری باید بتواند پس از بروز حوادثی نظیر زلزله، موقعیت جغرافیایی وقوع زلزله را به‌طور دقیق شناسایی کرده و با سازمان‌دهی منطقه‌ای هرچه سریع‌تر اوضاع را تحت کنترل درآورد و از ایجاد بی‌نظمی‌های بیش‌تر جلوگیری کند. **شکل ۱** موقعیت جغرافیایی دقیق زلزله کرمانشاه را نشان می‌دهد. یکی از راهبردهای موثر در این زمینه اندیشیدن در زمینه سایت‌های اسکان موقت است که در این پژوهش موردبررسی قرار گرفته است. اسکان موقت یکی از مراحل مهم و اساسی مدیریت بحران پس از بروز بحران به شمار می‌آید.



شکل ۱- محل وقوع زلزله ۱۳۹۶ کرمانشاه.

Figure 1- The location of the 1396 Kermanshah earthquake.

این مطالعه با هدف ایجاد یک رویکرد برای مکان‌یابی مراکز توزیع موقت امداد که به محدودیت‌ها و مشخصات یک فاجعه توجه می‌کند می‌پردازد. در این مقاله با درنظر گرفتن پایا بودن برخی مراکز هاب لجستیک، دو سناریو تعریف می‌شود. سناریو اول بدون ایجاد اختلال در سیستم کمک‌رسانی و سناریو دوم در صورت ایجاد اختلال در سیستم که تنها مراکز هاب پایا در سناریو دوم فعال هستند. این رویکرد با چندلایه درنظر گرفتن نقاط تقاضا بر اساس فاصله نقطه تقاضا از هاب اصلی از پیچیدگی‌های مساله می‌کاهد.

ادامه مقاله به‌صورت ذیل سازمان‌دهی شده است: مبانی نظری و پیشینه تحقیق جامعی در خصوص طراحی و مدیریت شبکه زنجیره‌تامین بشردوستانه و امدادی به همراه جدول پیشینه تحقیقات شاخص حوزه فوق ارایه شده است و چارچوب کاملی از مساله تحقیق حاضر تبیین گردید. بعدازآن ساختار و مدل جامع مساله تحقیق در قالب روش تحقیق ارایه شده است. سپس رویکردهای حل مساله و مواجه با عدم قطعیت شامل محدودیت اپسیلون و بهینه‌سازی امکانی-استوار به تفسیر تبیین شد و درنهایت تحلیل حساسیت و اعتبارسنجی مدل ارایه شده است.

۲- مبانی نظری و پیشینه پژوهش

عدم اطمینان خاصیت ذاتی بلایا است، بسیاری از مطالعات در مورد مکان‌یابی تاسیسات اضطراری عدم قطعیت‌های مختلفی را در بردارد. چندین مطالعه، عدم قطعیت را در برخی از صفات کمیتی مانند کمیت تقاضا، در دسترس بودن عرضه یا ظرفیت حمل‌ونقل و ... را درنظر گرفته‌اند. بیش‌تر این مطالعات برای مقابله با این عدم قطعیت‌ها از روش‌های مبتنی بر سناریو استفاده می‌کنند. برای مثال، راولز و ترنکویست [8]، مورالی و همکاران [9] و دواین و همکاران [10] که به ترتیب عدم اطمینان در خواسته و تقاضا، حمل‌ونقل و تقاضا در این سه تحقیق درنظر گرفته شده است. هم‌چنین بزرگی امیری و همکاران [11] با درنظر گرفتن عدم اطمینان درمورد تقاضا، تجهیزات و هزینه حمل‌ونقل در هنگام کمک به بلایا، یک رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی استوار چندهدفه را برای تعیین مکان مراکز توزیع امداد پیشنهاد کردند.

اگرچه در بیش‌تر مطالعات از برنامه‌ریزی تصادفی برای مقابله با عدم اطمینان استفاده می‌شود، اما برخی مطالعات نیز بر بهینه‌سازی استوار تمرکز دارند. به‌عنوان‌مثال، پاول و هرهران [12] مساله تخصیص و مکان‌یابی انبارها را برای مواجه با بلایا مطالعه کردند. در این مطالعه یک مدل بهینه‌سازی استوار ارایه شده بود تا حداکثر خسارات ناشی از عدم اطمینان سناریوها را حداقل سازد. هم‌چنین بزرگی‌امیری و همکاران [11] با درنظر گرفتن عدم قطعیت در تقاضا و هزینه حمل‌ونقل در هنگام وقوع بلایا، یک رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی استوار چندهدفه را برای مکان‌یابی مراکز توزیع امدادی پیشنهاد کردند. در مطالعه صفاری و همکاران [13] یک مساله چندهدفه مکان‌یابی-تخصیص مستعد ازدحام را با استفاده از روش محدودیت اپسیلون تعمیم‌یافته مورد ارزیابی قرار دادند.

احتمال خرابی در تاسیسات و وجود عدم اطمینان در مسایل مکان‌یابی تحت شرایط اضطراری موضوعی جدی است. بسیاری از پژوهش‌ها مسایل موقعیت مکانی تسهیلات را با این فرض که اختلال فقط در تاسیسات رخ می‌دهد، موردمطالعه قرار دادند. به‌عنوان‌مثال: اشنایدر و داسکین [14] با فرض این‌که تسهیلات احتمال شکست یکسانی دارند، مدل‌های مکان‌یابی تصادفی را ارایه دادند. هم‌چنین آلباردا-سامبولا و همکاران [15] و کوی و همکاران [16] نیز رویکرد فوق را در پیش گرفتند. فضلی خلف و همکاران [17]مدلی ریاضی برای طراحی پایای شبکه زنجیره‌تامین حلقه بسته توسعه دادند که در آن یک رویکرد پایا با تمرکز بر ذخیره اطمینان چندسطحی معرفی کردند. مدل پیشنهادی علاوه بر این‌که مجموع هزینه‌ها را کمینه می‌کرد، شبکه‌ای مقاوم تحت اختلالات مختلف را توسعه می‌داد.

با این‌حال، فرض وقوع اختلال در تاسیسات مستقل همیشه واقع‌بینانه نیست. از این‌رو، برخی از مطالعات تلاش کردند تا اختلالات مربوط به تسهیلات را رفع نمایند. به‌عنوان‌مثال مطالعه لی و همکاران [18] یک مدل ایستگاه پشتیبان را برای مساله طراحی مکان‌یابی پایا تحت اختلالات با همبستگی مثبت پیشنهاد دادند. لو و شو [19] برای یافتن مراکز توزیع فوری امداد، یک مدل استوار ارایه دادند در مدل پیشنهادی، از فواصل ثابت به‌جای توزیع احتمال، برای نشان دادن زمان‌های سفر نامشخص استفاده شده است. پژوهش‌های دیگری دراین‌باره صورت گرفته مانند زی و همکاران [20]، زی و همکاران [21] و یحیایی و بزرگی‌امیری [22] که مساله پایایی طراحی شبکه امداد بشردوستانه را موردبررسی قراردادند و مدل‌های متفاوتی برای مقابله با عدم اطمینان اختلال مراکز ارایه دادند. تعداد کمی از کارها مساله مکان‌یابی تسهیلات را با این فرض که اختلالات در پیوندهای شبکه رخ می‌دهد، مطالعه کردند. احمدی و همکاران [23] برای مکان‌یابی انبارهای محلی با احتمال تخریب جاده یک مدل مسیریابی پیشنهاد کردند و سلمان و یوسل [24] یک مدل تصادفی برای مساله مکان‌یابی مرکز واکنش سریع فرموله کردند. هم‌چنین هاسین و همکاران [25] با فرض نوع متفاوتی از تصحیح خرابی که در سطوح شبکه رخ می‌دهد، مساله مکان‌یابی تسهیلات را مطالعه کردند. هم‌چنین قمی و همکاران [26] زنجیره‌تامین حلقه بسته‌ای درنظر گرفتند که برخی سطوح زنجیره در اثر بلایای طبیعی یا مخاطرات دیگر مختل می‌شوند و برای حل این مشکل از روش منبع‌یابی ریسک اختلال برای توسعه شبکه زنجیره‌تامین منعطف استفاده کردند.

حمیدیه و میمندی / تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات، دوره ۸، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۲، صفحه: ۶۰۸-۵۷۸

مطالعات کمی برای بهینه‌سازی عملیات تحویل هوایی ازنظر موقعیت‌یابی و مرحله‌بندی موجودی مرکز توزیع انجام شده است. برای مثال، مدل پیشنهادی در مطالعه اورتنو و همکاران [27] که با هدف به حداقل رساندن متوسط فاصله از نزدیک‌ترین انبار تا یک فرد بی‌خانمان پیش‌بینی شده است و یا سالمرون و آپته [28] که یک مدل بهینه‌سازی تصادفی دومرحله‌ای را با هدف به حداقل رساندن تلفات با تعیین مکان و تصمیمات توسعه ساختارها مانند انبارها و پناهگاه‌ها در مرحله اول و سپس تعیین بهترین تصمیمات پشتیبانی لجستیک در مرحله دوم توسعه دادند. حتی مطالعات کمی از روش‌های بهینه‌سازی چندمعیاره برای بهبود عملیات تحویل *HA/DR* و برنامه‌ریزی لجستیک استفاده کرده‌اند. به‌عنوان یک استثنا پارک [29] یک مدل تصمیم‌گیری چندهدفه را معرفی می‌کند که مبادلات ارزشی تصمیم‌گیرنده(ها) را در مساله تخصیص منابع امدادرسانی به حوزه‌های در معرض بلایا درنظر می‌گیرد. در مطالعات محدودی از تقسیم‌بندی توپوگرافی استفاده شده است. برای مثال بهارمند و همکاران [2] برای دسترسی سریع‌تر به نقاط آسیب‌دیده توپوگرافی منطقه را به چندلایه تقسیم کردند. محققان بسیاری رویکرد بهینه‌سازی استوار را موردتوجه قرار داده که چند نمونه در ادامه ذکر می‌شود؛ حمیدیه و همکاران [30] ترکیب جدید برنامه‌ریزی امکانی پایا-استوار را برای طراحی شبکه زنجیره‌تامین حلقه بسته چندمحصولی تحت شرایط عدم قطعیت توسعه داده است. در مطالعه کلانتری و پیشوایی [31] یک مدل جدید برنامه‌ریزی امکانی استوار که قدرت تنظیم درجه استواری تصمیمات خروجی در برابر عدم قطعیت پارامترها را دارد، توسعه داده شده است. هم‌چنین فرخ و همکاران [32] درصدد توسعه یک رویکرد برنامه‌ریزی فازی استوار برای مساله طراحی شبکه زنجیره‌تامین حلقه بسته تحت شرایط عدم قطعیت برآمدند. مدل پیشنهادی ویژگی‌هایی برحسب مقدار میانگین امکانی، تغییرپذیری امکانی تابع هدف و تخطی از محدودیت‌های امکانی دارد. مطالعه قسمتی و همکاران [33] یک مدل جدید برنامه‌ریزی فازی-احتمالی استوار برای طراحی یک شبکه زنجیره‌تامین چنددوره‌ای ارایه می‌دهد که به‌طور هم‌زمان به وقوع اختلالات احتمالی و آسیب‌های ناشی از آن و از سوی دیگر ماهیت غیرقطعی پارامترهای معمول کسب‌وکار پرداخته است. خلاصه‌ای از مطالعات انجام شده در **جدول ۱** قابل مشاهده است.

مطالعه فعلی اولین مدل زنجیره‌تامین بشردوستانه پایا به‌صورت سناریومحور است که با تقسیم‌بندی توپوگرافی منطقه به ۳ لایه باعث دسترسی سریع‌تر و آسان‌تر به نقاط بحران‌زده شده است. ساختار شبکه به این صورت است که اقلام امدادی از نقاط ورودی اصلی وارد کشور شده و به هاب‌های لجستیک برای ذخیره منتقل می‌شوند که این هاب‌ها به دودسته هاب پایا و غیر پایا طبقه‌بندی می‌شوند که هاب پایا با اصلی مزایای قابل‌توجهی نسبت به هاب‌های غیر پایا دارد و در صورت بروز اختلال در شبکه مقاوم است. در صورت بروز بحران، مراکز توزیع موقت *TDC* در محل‌های نزدیک به نقاط بحران‌زده برپا می‌شوند و اقلام امدادی از هاب‌ها به *TDCs* توسط حمل‌ونقل زمینی منتقل‌شده و پس‌از آن با توجه به توپوگرافی منطقه از *TDCs* به نقاط تقاضا با حمل‌ونقل زمینی یا هوایی منتقل می‌شود. در قسمت مرتبط با حمل‌ونقل، فاصله مراکز، زمان موردنیاز برای انتقال بین نقاط، انواع و تعداد وسایل حمل‌ونقل در هر مرکز و ظرفیت هر حمل‌ونقل درنظر گرفته شده است.

تقسیم‌بندی توپوگرافی منطقه در مطالعه بهارمند و همکاران [2] درنظر گرفته شده است، تفاوت مطالعه فعلی با مقاله ذکرشده، درنظرگیری اختلال احتمالی در شبکه و پایا بودن زنجیره‌تامین بشردوستانه است. سطوح ساختار شبکه به این صورت است که آخرین سطح از این شبکه زنجیره‌تامین شامل نقاط آسیب‌دیده (نقاط تقاضا *DP*) هستند که مقدار تقاضا مشخص می‌کند چه مقدار کالا باید به این مراکز منتقل شود به عبارتی میزان تقاضای کالای امدادی موردنیاز را مشخص می‌کند. سطح بعدی مراکز توزیع موقت *TDC* هستند که با توجه به ظرفیت و مکان و فاصله آن‌ها نسبت به *DPs* مشخص می‌شود که به کدام *DP* کمک‌رسانی می‌کنند. دومین سطح هاب‌های لجستیک *H* هستند که با توجه به ظرفیت آن‌ها مشخص می‌کند چه مقدار کالا از نقاط ورودی اصلی به هاب منتقل و ذخیره شود و چه مقدار از کالای ذخیره‌شده باید برای تامین تقاضای نقاط آسیب‌دیده به *TDCs* منتقل شود و در اولین سطح، ورودی‌های اصلی کالا مثل بندرها و فرودگاه‌ها را داریم که اقلام امدادی از این نقاط وارد چرخه زنجیره‌تامین می‌شوند. در شبکه زنجیره‌تامین امدادی بشردوستانه ما، تابع هدف هزینه‌ها شامل تسهیلات، کارگر، ساخت و تجهیز مراکز هاب و مراکز موقت توزیع، هزینه ذخیره‌سازی و انتقال، جریمه خواسته‌های برآورده نشده، حمل‌ونقل، مواد اولیه و موجودی‌ها می‌باشد. در این پژوهش شبکه زنجیره‌تامین کمک‌رسانی بشردوستانه در مواجهه با بلایای طبیعی موردمطالعه قرار می‌گیرد که یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در طراحی شبکه زنجیره‌تامین، اختلال و ریسک‌های همراه آن است. این اختلال و ریسک توازن بین پاسخ‌گویی و کارایی در شبکه‌های زنجیره‌تامین را از بین می‌برد. اختلالات، ناشی از ریسک‌های داخلی و خارجی هستند که بر سطوح سرویس‌دهی و پاسخ‌گویی سیستم تاثیری مخرب دارد؛ بنابراین استراتژی پایایی می‌تواند شدت اختلالات را در سطح شبکه زنجیره‌تامین کنترل نماید. خرابی‌های زنجیره‌تامین وقایع برنامه‌ریزی‌نشده و غیر قابل‌پیش‌بینی است که جریان نرمال کالاها و مواد را در زنجیره‌تامین مختل می‌کند و درنتیجه مراکز درون زنجیره‌تامین را در معرض ریسک‌های مالی و عملیاتی قرار می‌دهد. به‌طورکلی اکثر

خرابی‌های زنجیره‌تامین می‌توانند در سه دسته طبقه‌بندی شوند: ۱- مرتبط با عرضه، ۲- مرتبط با تقاضا و ۳- ریسک‌های متفرقه. اختلالات تامین هنگامی رخ می‌دهند که تامین‌کننده قادر به برآورده کردن سفارش‌ها در موقع مناسب نباشد. به‌طور بالقوه این ریسک‌ها می‌توانند موجب مختل شدن تامین محصول و یا سرویسی که زنجیره‌تامین به مشتریان خود پیشنهاد می‌دهد، شوند. اختلالات تقاضا ممکن است به دلیل افت و یا افزایش ناگهانی سفارش‌های مشتریان باشد. ریسک‌های مربوط به تقاضا می‌توانند به‌طور بالقوه منجر به مختل شدن عملیات انتقال شوند و در توانایی برای در دسترس ساختن اقلام برای مشتریان تاثیر بگذارد. ریسک‌های متفرقه ریسک‌هایی هستند که به‌طور بالقوه بر هزینه انجام کار و تجارت تاثیر می‌گذارند؛ مانند تغییرات ناگهانی در هزینه‌های خرید، نرخ بهره، نرخ ارز جاری، قوانین ایمنی توسط آژانس‌های دولتی. با توجه به اهمیت بحث اختلالات در تامین‌کنندگان و احتمال بروز اختلال در سطح شبکه، تابع هدفی تحت عنوان قابلیت اطمینان برای پایا بودن مدل پیشنهادی درنظر گرفتیم که در شرایط بحرانی و اختلال در شبکه پاسخ‌گویی موثری داشته باشد. حال برای تبیین شکاف تحقیقاتی و نوآوری مدل توسعه‌یافته طبقه‌بندی دقیق‌تری در **جدول ۱** ارایه می‌شود.

جدول ۱- مطالعات انجام‌شده در زمینه مکان‌یابی و مدل‌سازی ریاضی کمک در بلایا.
Table 1- Studies conducted in the field of location and mathematical modeling of disaster relief.

مشخصات مقاله	اجزای شبکه			محدودیت‌ها				نوع تصمیم‌گیری			تابع هدف			نوع مثال	
نویسنده	نقاط آسیب‌دیده یا مشتری	مراکز توزیع یا انتقال	بیمارستان یا پناهگاه	تعداد مراکز	ظرفیت مراکز	ایجاد اختلال در شبکه	تلفات یا تقاضا برآورده نشده	بهینه و پایایی	مکان‌یابی	تخصیص	حداقل سازی زمان	حداقل سازی فاصله	حداقل سازی هزینه	مثال عددی	مطالعه موردی
ارتونو و همکاران [27]	✓	✓			✓				✓	✓	✓				
ابوناصر و همکاران [34]	✓	✓		✓			✓		✓	✓	✓	✓		✓	
سلمان و یوسل [24]	✓		✓	✓					✓			✓			✓
راولز و ترنکویست [8]	✓	✓			✓				✓	✓			✓		✓
بونمی و همکاران [4]		✓	✓	✓	✓				✓						
هاسین و همکاران [25]	✓	✓		✓		✓			✓				✓		
زی و همکاران [21]	✓			✓		✓		✓	✓	✓			✓		✓
بهارمند و همکاران [2]	✓	✓		✓	✓				✓	✓	✓		✓		✓
فضلی‌خلف و همکاران [35]	✓	✓		✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓		✓		✓
گونای و همکاران [36]	✓	✓		✓	✓			✓	✓				✓	✓	
حمیدیه و همکاران [37]	✓	✓		✓	✓			✓	✓	✓			✓	✓	
کلانتری و پیشوایی [31]	✓	✓		✓	✓			✓	✓				✓	✓	
فرخ و همکاران [32]	✓	✓		✓	✓			✓	✓	✓			✓		✓
قسمتی و همکاران [33]	✓	✓			✓			✓	✓	✓			✓		✓
قمی و همکاران [26]	✓	✓		✓	✓	✓			✓	✓			✓		
فتاحی و همکاران [38]	✓	✓			✓				✓	✓			✓	✓	
یحیایی و بزرگی‌امیری [22]	✓	✓			✓	✓		✓	✓	✓			✓	✓	
قاسمی و همکاران [39]	✓		✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓			✓		✓
روح الفدا و حسن‌زاده [40]	✓		✓	✓	✓				✓	✓			✓	✓	
صفاری و همکاران [13]	✓	✓		✓					✓	✓	✓			✓	
تقی پور و همکاران [5]	✓		✓	✓	✓				✓	✓		✓			✓
امامی و همکاران [41]	✓	✓		✓	✓			✓	✓	✓			✓	✓	
آصفی و همکاران [42]	✓	✓		✓	✓				✓	✓	✓				✓
مطالعه فعلی	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓

در این مطالعه رویکرد ترکیبی امکانی-استوار برای مواجه با عدم قطعیت بکار گرفته شد. با توجه به این‌که مدل پیشنهادی دوهدفه است، ابتدا با استفاده از محدودیت اپسیلون مدل را تک‌هدفه کردیم که در این روش تابع هدف اول به‌عنوان تابع هدف اصلی مساله برای روش محدودیت اپسیلون انتخاب شده است و سپس با استفاده از روش امکانی-استوار به حل مدل پرداختیم. به‌منظور نمایش کاربردی بودن

و ارزیابی کارایی مدل برنامه‌ریزی فازی امکانی استوار از داده‌های زلزله کرمانشاه سال ۱۳۹۶ استفاده می‌کنیم و سپس تحلیل حساسیت برای ارزیابی عملکرد مدل روی استواری بهینگی صورت می‌گیرد. در این راستا وجه تمایز و نوآوری مقاله حاضر با پژوهش‌های قبلی انجام‌شده به شرح زیر است:

۱. مدل‌سازی عملیاتی بحرانی ملی متناسب با شرایط جغرافیایی و تسهیلات منطقه‌ای باقابلیت توسعه به سایر بحران‌ها.
۲. برنامه‌ریزی تصمیمات حمل‌ونقل با لایه‌بندی توپوگرافی منطقه بحرانی.
۳. توسعه استراتژی پیش‌گیرانه در مقابل اختلالات با به‌کارگیری رویکرد پایایی در هاب لجستیک منطقه بحرانی.
۴. برنامه‌ریزی تصمیمات مکان‌یابی/تخصیص متناسب با ساختار منطقه‌ای و هاب‌های لجستیک پایا و غیر پایا.
۵. به‌کارگیری رویکرد ترکیبی برنامه‌ریزی امکانی-استوار برای مواجه با عدم قطعیت شبکه.

۳- روش پژوهش

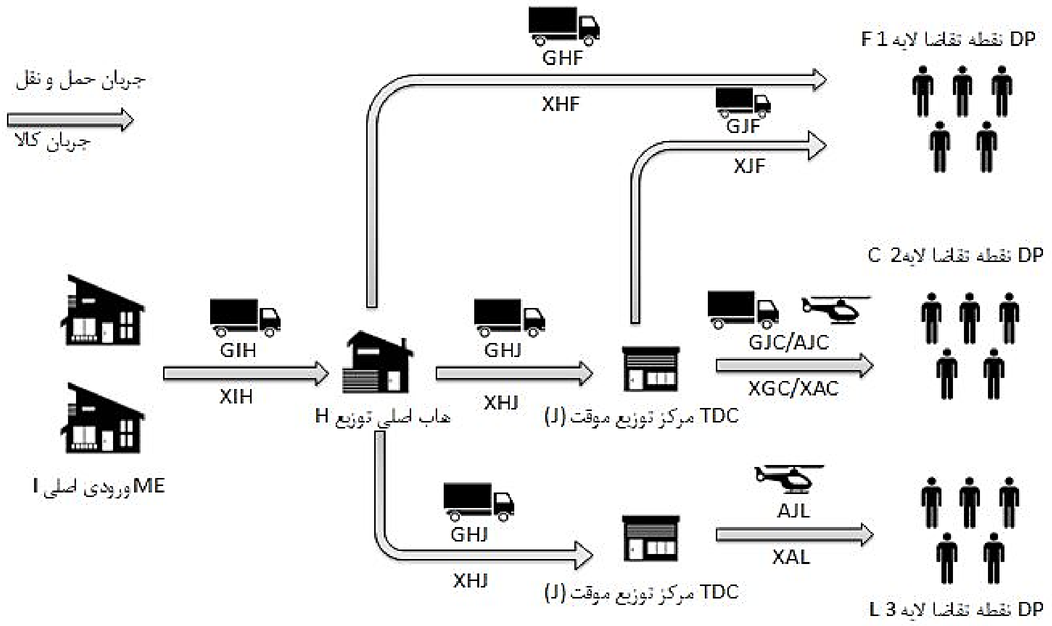
پژوهش حاضر به لحاظ هدف از نوع کاربردی است و در پی پاسخ به این سوال است که چگونه می‌توان با ارایه یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی، تصمیمات استراتژیک و عملیاتی بهینه‌ای برای توزیع بسته‌های امدادی در افق زمانی محدود اتخاذ کرد. در این پژوهش ابتدا عوامل و پارامترهای موثر در مکان‌یابی مراکز امدادرسانی در هنگام وقوع بحران شناسایی شد. مدل شبکه زنجیره‌تامین بشردوستانه با رویکرد امکانی-استوار پایا و درنظرگرفتن دو سناریوی خوش‌بینانه و بدبینانه و مکان‌یابی مراکز توزیع موقت جهت امدادرسانی در کم‌ترین زمان و هزینه توسعه یافت. درنهایت مدل نوین فوق در برنامه *GAMS* کد شده و نتایج محاسبانی مورد ارزیابی قرار گرفت. درنهایت یک مطالعه موردی واقعی (زلزله کرمانشاه) بررسی شد و نتایج عددی و مدیریتی آن تحلیل گردید.

شکل ۲ شبکه توزیع در منطقه آسیب‌دیده را در هنگام پاسخ فوری نشان می‌دهد. پس از فاجعه، اقلام امدادی به‌طورمعمول از طریق ورودی‌های اصلی (*ME*) مانند فرودگاه‌های بین‌المللی، مرزها یا بندرها دریافت می‌شود و برای ذخیره به هاب‌های لجستیک منتقل می‌شود. برای تسهیل توزیع اقلام دریافتی، کارشناسان باید محل استقرار مراکز توزیع موقت *TDC* را تعیین کرده و درباره تخصیص منابع به آن‌ها تصمیم بگیرند. *TDC* معمولا به‌عنوان یک مکان موقتی در نزدیک منطقه آسیب‌دیده به‌عنوان انبارهای پیش‌ساخته و به‌منظور سازمان‌دهی (مرتب‌سازی، تلفیق و ادغام) و توزیع اقلام امدادی تعریف می‌گردند. نقاط بحران‌زده یا نقاط تقاضا تحت عناوین *L*، *C*، *F* تعریف شده‌اند که در ادامه توضیح خواهیم داد. در **شکل ۲** جریان حمل‌ونقل کالاها با وسایل حمل‌ونقل زمینی و هوایی ارایه شده است (*AJL*، *AJC*، *GJC*، *GHF*، *GHJ*، *GIH*). هم‌چنین جریان کالا بین مراکز (*XIH*، *XHJ*، *XHF*، *XJF*، *XGC*، *XAC*، *XAL*) نیز تخصیص یافته است.

بسته به توپوگرافی منطقه آسیب‌دیده، مکان‌های موجود در شبکه توزیع امداد را می‌توان به سه لایه تقسیم کرد:

۱. مکان‌هایی که از طریق بزرگراه‌ها یا جاده‌های اصلی به‌عنوان ورودی‌های اصلی قابل‌دسترس باقی می‌مانند. اقلام امدادی معمولا توسط کامیون‌ها و یا تریلرهای با ظرفیت بالا به این مکان‌ها ارسال می‌شوند. این مکان‌ها تحت عنوان لایه اول (*F*) نام‌برده می‌شوند.
۲. مکان‌هایی که از طریق بزرگراه‌ها یا جاده اصلی در دسترس نیستند. با استفاده از کامیون‌های کوچک‌تر (مثلا تراکتور) می‌توان از مکان‌های موجود در لایه ۱ به این مکان‌ها دسترسی پیدا کرد. در صورت لزوم، از حمل‌ونقل هوایی نیز می‌توان برای دسترسی به این مکان‌ها استفاده کرد که با عنوان لایه دوم (*C*) شناخته شده‌اند.
۳. مکان‌هایی از راه دور و صعب‌العبور که حمل‌ونقل زمینی غیرممکن یا بسیار خطرناک است. این مکان‌ها را با عنوان لایه سوم (*L*) می‌شناسیم و تنها روش دستیابی به ذینفعان در این مکان‌ها از طریق حمل‌ونقل هوایی، باربرها یا ترکیبی از *TDCs* در لایه ۱ است.

حمیدیه و میمندی / تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات، دوره ۸، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۲، صفحه: ۶۰۸-۵۷۸



شکل ۲- شبکه لجستیک بشردوستانه.
Figure 2- Humanitarian logistics network.

لازم به ذکر است که اگر اختلالی در یک لایه از شبکه روی دهد، می‌تواند ظرفیت کمک‌رسانی مراکز را به‌طور جزیی یا کامل از بین برد. در چنین شرایطی می‌توان استراتژی‌های مختلفی به‌کار برد. یکی از بهترین راه‌کارهای تقویت شبکه‌های زنجیره‌تامین در برابر اختلالات، درنظر گرفتن ظرفیت پردازش اضافی در شبکه است. این می‌تواند از طریق ظرفیت پردازش اضافی موجود در شبکه، به پوشش ظرفیت ازدست‌رفته مراکز غیر پایا کمک کند؛ بنابراین، تقاضای مشتریان با کم‌ترین تاخیر و هزینه ممکن در وضعیت اخلال‌ها پوشش داده خواهد شد.

مراکز هاب لجستیک و مراکز توزیع موقت دارای محدودیت‌های پوشش تقاضای مبتنی بر فاصله هستند. این بدان معناست که مراکز فقط در صورتی می‌توانند تقاضای نقاط آسیب‌دیده را تامین کنند که فاصله آن‌ها از شعاع پوشش مراکز کم‌تر باشد. براین‌اساس، احتمال نارضایتی نسبی یا کامل تقاضای هر منطقه آسیب‌دیده از طریق متحمل شدن هزینه‌های جریمه وجود دارد؛ بنابراین، اگر در برنامه اولیه، بخشی از تقاضای منطقه آسیب‌دیده (یا تمام آن) برای تامین شدن برنامه‌ریزی شده باشد، مطمئنا حتی در وضعیت ایجاد اختلالات سیستمی نیز باید تامین شود. در این راستا موارد زیر درنظر گرفته شده‌اند:

۱. در این مدل دو سناریو یا برنامه درنظر گرفته شده است: برنامه اولیه (سناریو اول یا وضعیت عادی) و برنامه پشتیبان (سناریو دوم یا وضعیت اختلال). برنامه اولیه، برنامه کمک‌رسانی در شرایط عادی سیستم توزیع و حمل‌ونقل است. برنامه پشتیبان در صورتی ایجاد می‌شود که در یکی از اجزای سیستم طراحی‌شده اختلالی رخ دهد و باعث کاهش کارایی سیستم شود. برنامه پشتیبان هزینه بیش‌تری نسبت به برنامه اولیه صرف می‌کند اما تضمین می‌دهد که در صورت بروز اختلال سیستم، امدادرسانی به‌طور کامل انجام می‌شود.
۲. محدودیت‌های پوشش برای مراکز هاب باید فقط در شرایط عادی رعایت شود یعنی تنها در برنامه اولیه.
۳. در وضعیت ایجاد اختلالات، محدودیت‌های پوشش برای جبران ظرفیت از دست رفته در طرح پشتیبان آزاد می‌شود.
٤. مقدار خواسته‌های برآورده نشده در برنامه‌های اصلی و پشتیبان باید برابر باشد؛ به این معنا که در صورت بروز اختلال سیستم نباید در تامین تقاضای نقاط آسیب‌دیده کاستی دیده شود.

به‌عنوان یکی از عملکردهای مدل می‌توان گفت که استراتژی قابلیت اطمینان برای حداکثر پوشش مراکز هاب به همراه حداقل هزینه‌های ذخیره و انتقال و هزینه‌های جریمه تقاضاهای برآورده نشده درنظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که تفاوت بین مراکز هاب پایا و غیر پایا در این است که مراکز هاب غیر پایا در معرض ایجاد اختلال قرار دارند. با این‌حال، مراکز هاب پایا باید در برابر اختلالات غیرمنتظره محافظت شوند. برای این منظور، هزینه‌های اضافی باید صرف تقویت این مکان‌ها شود. اول از همه، ساختار تاسیسات پایا باید به‌گونه‌ای طراحی شود که بتواند در برابر زلزله‌های شدید مقاومت کند. در این راستا، برای داشتن یک ساختمان مقاوم در برابر زلزله، باید سرمایه‌گذاری بیش‌تری در زمینه طراحی و اجرای یک بنیاد و سازه مقاوم‌تر از ساختمان معمولی انجام شود. هم‌چنین، در فرآیند ساخت مرکز هاب پایا باید از مواد بیش‌تر و بهتری استفاده شود.

برای بهبود پاسخ‌گویی شبکه و افزایش رضایت نقاط تقاضا، کمک‌ها باید بدون تاخیر به مناطق تقاضا تحویل داده شوند. خرابی ماشین‌آلات و توقف فعالیت‌های پردازشی در تاسیسات مختلف می‌تواند به‌عنوان مانعی باعث توقف جریان محصولات در شبکه شود. برای به حداکثر رساندن قابلیت اطمینان تحویل شبکه، یک تابع احتمال نمایی اعمال می‌شود. با استفاده از تابع احتمال نمایی، می‌توان احتمال خرابی تاسیسات در طول دوره برنامه‌ریزی را محاسبه کرد. فرض کنید حداقل طول هر دوره برنامه‌ریزی T باشد و x زمان موردنیاز برای تامین نیاز نقاط تقاضا؛ انتظار می‌رود که هر مرکز در دوره برنامه‌ریزی کار کند. هم‌چنین، فرض کنید که میزان خرابی تاسیسات پردازش در طول دوره برنامه‌ریزی از توزیع احتمال نمایی با نرخ λ پیروی می‌کند. قابلیت اطمینان تاسیسات فرآوری در طول دوره برنامه‌ریزی به شرح زیر محاسبه می‌شود:

$$P(x > T) = \int_{T}^{+\infty} \lambda . e^{-\lambda x} \, dx = e^{-\lambda . T}. \qquad (1)$$

به‌عبارت‌دیگر، معادله بالا احتمال عملکرد بی‌وقفه یک تاسیسات را در طول دوره برنامه‌ریزی نشان می‌دهد. ضرب قابلیت اطمینان یک تسهیلات در مقدار محصولات تولیدشده در تاسیسات، مقدار مورد انتظار محصول به‌موقع تحویل داده‌شده را می‌دهد. در این راستا، با ذخیره محصولات بیش‌تر در چنین امکاناتی، قابلیت اطمینان شبکه به حداکثر می‌رسد. براین‌اساس، مقدار کل کالا با کم‌ترین کمبود تحویل داده می‌شود. سرانجام با حل مدل، تعداد محصولات منتقل‌شده بین مراکز پی‌درپی شبکه و نوع مطلوب وسیله انتقالی به دست می‌آید. مدل پیشنهادی چندهدفه با هدف به حداقل رساندن کل هزینه‌ها و زمان و هم‌چنین به حداکثر رساندن قابلیت اطمینان شبکه می‌باشد.

برای توسعه مدل ریاضی خود، بر اساس مشاهده‌های خود در این زمینه، فرضیات زیر را ارایه دادیم.

هر نقطه تقاضا حداقل به یک TDC دسترسی دارد. نقطه تقاضا در لایه اول و دوم باید در زمانی کم‌تر یا مساوی با حداکثر زمان پوشش (زمان لازم برای رسیدن به یک مکان خاص) پوشش داده شود. ما فرض می‌کنیم که این حداکثر زمان پوشش به زمان دسترسی توسط کامیون‌ها اشاره دارد. نقطه تقاضا در لایه سوم باید توسط $TDCs$ در فاصله کم‌تر از حداکثر شعاع رسیدن قابل‌دسترسی باشد.

انتقال اقلام از یک TDC به TDC دیگر در پاسخ فوری مجاز نیست. تنها جریان ممکن مواد از ورودی‌های اصلی (ME) به DP (فقط در لایه اول)، از ME به TDC، یا از TDC به DP (در همه لایه‌ها) است.

۱. فرض بر این است که نیاز مراکز تقاضا اندازه‌گیری شده است و تعداد افراد بر اساس آخرین گزارش سرشماری قبل از فاجعه مشخص است.
۲. حالت حمل‌ونقل زمینی و هوایی برای حمل‌ونقل اقلام امدادی درنظر گرفته شده است.
۳. فرض بر این است که ناوگان زمینی به هر TDC به‌صورت محدود تخصیص می‌یابد. بالگردها می‌توانند از هر TDC به DP در لایه‌های ۲ و ۳ سفر کنند اما تعداد کل بالگردها در منطقه و تورهای روزانه آن‌ها محدود است.
۴. تمام حالت‌های حمل‌ونقل موجود در هر TDC می‌توانند در همان روز حرکت کرده و به مقصد برسند. روز بعد، همین تعداد وسیله برای بهره‌برداری در دسترس است.
۵. فرض بر این است که افق زمانی عملیات را می‌توان به چند مرحله زمانی مانند روزها، هفته‌ها یا ماه‌ها تقسیم کرد. با این‌حال، کوتاه‌ترین مرحله زمانی می‌تواند یک روز باشد.
۶. فرض می‌کنیم انبارهای مراکز توزیع موقت (TDC) الگوی رفتاری پایایی را دنبال می‌کند؛ به این معنا که همواره کالای امدادی در این مراکز موجود است و سیستم دچار کمبود منابع در مراکز توزیع موقت نمی‌شود.

فرض می‌کنیم زمان سفر کمک‌رسانی (سیستم حمل‌ونقل) از زمان وقوع حادثه تا زمان ارسال موردتوجه قرار می‌گیرد و کالاهای امدادی در زمان موردنیاز مشتری (افراد در نقاط آسیب‌دیده و بحران‌زده) به مقصد خواهند رسید. به این معنا که مدت‌زمان حمل‌ونقل و انتقال کالا اهمیت دارد و نباید از حداکثر زمان درنظر گرفته شده عبور کند.

مجموعه‌ها/شناساگرها

I: مجموعه‌ای از نقاط ورودی اصلی.

J: مجموعه‌ای از نقاط دارای پتانسیل برای مستقر کردن مراکز توزیع موقت.

حمیدیه و میمندی/ تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات، دوره ۸، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۲، صفحه: ۶۰۸-۵۷۸

H: مجموعه‌های اصلی توزیع.

F: مجموعه‌ای از نقاط تقاضا لایه ۱.

C: مجموعه‌ای از نقاط تقاضا لایه ۲.

L: مجموعه‌ای از نقاط تقاضا لایه ۳.

T: مجموعه مراحل زمانی.

M: مجموعه‌ای از انواع کالاهای امدادی.

G: مجموعه‌ای از انواع حمل‌ونقل زمینی موجود در منطقه.

A: مجموعه‌ای از انواع حمل‌ونقل هوایی موجود در منطقه.

S: مجموعه سناریوهای ممکن (سناریو اولیه[1] و سناریو پشتیبان[2]).

پارامترها

$DISIH_{ih}$: فاصله از *ME ith* به *hth* هاب *H* (برحسب *Km*).

$DISHJ_{hj}$: فاصله از *hth* هاب *H* به *TDC jth* (برحسب *Km*).

$DISHF_{hf}$: فاصله از *hth* هاب *H* به *DP fth* در لایه ۱ (برحسب *Km*).

$DISJF_{jf}$: فاصله از *TDC jth* به *DP fth* در لایه ۱ (برحسب *Km*).

$DISJC_{jc}$: فاصله از *TDC jth* به *DP cth* در لایه ۲ (برحسب *Km*).

$DISJL_{jl}$: فاصله از *TDC jth* به *DP lth* در لایه ۳ (برحسب *Km*).

TIH_{ih}: زمان انتقال از *ME ith* به *hth* هاب *H*.

THJ_{hj}: زمان انتقال زمینی از *hth* هاب *H* به *TDC jth* (برحسب *min*).

THF_{hf}: زمان انتقال زمینی از *hth* هاب *H* به *DP fth* در لایه ۱ (برحسب *min*).

TJF_{jf}: زمان انتقال زمینی از *TDC jth* به *DP fth* در لایه ۱ (برحسب *min*).

TGC_{jc}: زمان انتقال زمینی از *TDC jth* به *DP cth* در لایه ۲ (برحسب *min*).

TAC_{jc}: زمان انتقال هوایی از *TDC jth* به *DP cth* در لایه ۲ (برحسب *min*).

---

[1] Primary Scenario (PS)

[2] Backup Scenario (BS)

TAL_{jl}: زمان انتقال هوایی از $TDC\ jth$ به $DP\ lth$ در لایه ۳ (برحسب min).

CEA_s: برآورد هزینه‌های حمل‌ونقل هوایی در سناریو S.

CEG_s: برآورد هزینه‌های حمل‌ونقل زمینی در سناریو S.

CEB_s: برآورد هزینه‌های منابع انسانی در طول عملیات در سناریو S.

CEK_s: برآورد هزینه‌های تکراری ازجمله هزینه‌های اجاره، تجهیزات، خدمات و لوازم موردنیاز هر TDC در حین کار در سناریو S.

$CEER_s$: برآورد هزینه‌های ایجاد هاب پایا در سناریو S.

$CESR_s$: برآورد هزینه‌های ذخیره‌سازی هاب پایا در سناریو S.

$CEEU_s$: برآورد هزینه‌های ایجاد هاب غیر پایا در سناریو S.

$CESU_s$: برآورد هزینه‌های ذخیره‌سازی هاب غیر پایا در سناریو S.

CEP_s: برآورد هزینه‌های جریمه (در صورت برآورده نشدن تقاضای کالای موردنیاز DPs) در سناریو S.

$DEMLM_m$: تقاضا mth کالای M در لایه ۳ (برحسب ton).

$DEMCM_m$: تقاضا mth کالای M در لایه ۲ (برحسب ton).

$DEMFM_m$: تقاضا mth کالای M در لایه ۱ (برحسب ton).

NJ: حداکثر تعداد ممکن TDC که می‌توانند ایجاد شوند.

SET_{jt}: زمان موردنیاز برای راه‌اندازی $TDC\ jth$ در زمان T.

CAJ_{jm}: ظرفیت $TDC\ jth$ به ازای کالای M.

CAI_{im}: ظرفیت $ME\ ith$ به ازای کالای M.

CAH_{hm}: ظرفیت hth هاب به ازای کالای M.

CAA_m: ظرفیت وزن یک حمل‌ونقل هوایی به ازای کالای M.

CAG_m: ظرفیت وزن یک حمل‌ونقل زمینی به ازای کالای M.

DRJ_j: میزان خرابی ایجادشده برای TDC.

DRH_h: میزان خرابی ایجادشده برای هاب H.

NVA_j: تعداد بالگردهای موجود در jth واحد TDC.

NVG_j: تعداد کامیون موجود در jth واحد TDC.

حمیدیه و میمندی/ تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات، دوره ۸، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۲، صفحه: ۶۰۸-۵۷۸

NVI_i: تعداد کامیون موجود در *ith* واحد *ME*.

NVH_h: تعداد کامیون موجود در *hth* واحد هاب اصلی.

CRH_h: شعاع تحت پوشش در *hth* هاب اصلی (H).

CRJ_j: شعاع تحت پوشش در *TDC jth*.

MT: حداکثر زمان مجاز رانندگی یک وسیله نقلیه زمینی برحسب دقیقه.

MD: حداکثر مسافت مجاز برای هر سفر بالگرد.

LW_m: وزن کالای *mth* به *ton*.

D_t: زمان مورد انتظار T برای برآورده شدن تقاضا برای نقطه تقاضا.

E: یک عدد خیلی بزرگ.

متغیرهای دودویی

OP_{jts}: اگر *jth* کاندید *TDC* در دوره t و سناریو s باز باشد یک، در غیر این صورت صفر.

OPI_{its}: اگر *ith* کاندید *ME* در دوره t و سناریو s باز باشد یک، در غیر این صورت صفر.

OPU_{hts}/OPR_{hts}: اگر هاب اصلی H (پایا یا غیر پایا) در دوره t و سناریو s باز باشد یک، در غیر این صورت صفر.

YIH_{hi}^{tms}: اگر حمل‌ونقل زمینی بین *ME ith* و *hth* هاب H جهت انتقال کالای m در سناریو s در دوره زمانی t برقرار باشد یک در غیر این صورت صفر.

YF_{hf}^{tms}: اگر حمل‌ونقل زمینی بین *hth* هاب H و *DP fth* در لایه اول جهت انتقال کالای m در سناریو s در دوره زمانی t برقرار باشد یک، در غیر این صورت صفر.

YJ_{hj}^{tms}: اگر حمل‌ونقل زمینی بین *hth* هاب H و *TDC jth* جهت انتقال کالای m در سناریو s در دوره زمانی t برقرار باشد یک، در غیر این صورت صفر.

YJF_{jf}^{tms}: اگر حمل‌ونقل زمینی بین *TDC jth* و *DP fth* در لایه اول جهت انتقال کالای m در سناریو s در دوره زمانی t برقرار باشد یک، درغیر این‌صورت صفر.

YGC_{jc}^{tms}: اگر حمل‌ونقل زمینی بین *TDC jth* و *DP cth* در لایه دوم جهت انتقال کالای m در سناریو s در دوره زمانی t برقرار باشد یک، در غیر این‌صورت صفر.

YAC_{jc}^{tms}: اگر حمل‌ونقل هوایی بین *TDC jth* و *DP cth* در لایه دوم جهت انتقال کالای m در سناریو s در دوره زمانی t برقرار باشد یک، در غیر این‌صورت صفر.

YAL_{jl}^{tms}: اگر حمل‌ونقل هوایی بین *TDC jth* و *DP lth* در لایه سوم جهت انتقال کالای m در سناریو s در دوره زمانی t برقرار باشد یک، در غیر این‌صورت صفر.

QT_{ts}: اگر عملیاتی در مرحله زمانی tth و سناریو s وجود داشته باشد یک، در غیر این صورت صفر.

PT_{ts}: اگر حداقل یک TDC در مرحله زمانی tth و سناریو s ایجادشده باشد یک، در غیر این صورت صفر.

متغیرهای پیوسته

XIH_{ih}^{tms}: تعداد محصول کالای نوع m که باید در دوره t از $ME\ ith$ به hth هاب H در سناریو s با حمل‌ونقل زمینی منتقل شود.

XHF_{hf}^{tms}: تعداد محصول کالای نوع m که باید در دوره t از hth هاب H به $DP\ fth$ در لایه اول در سناریو s با حمل‌ونقل زمینی منتقل شود.

XHJ_{hj}^{tms}: تعداد محصول کالای نوع m که باید در دوره t از hth هاب H به $TDC\ jth$ در سناریو s با حمل‌ونقل زمینی منتقل شود.

XJF_{jf}^{tms}: تعداد محصول کالای نوع m که باید در دوره t از $TDC\ jth$ به $DP\ fth$ در لایه اول در سناریو s با حمل‌ونقل زمینی منتقل شود.

XGC_{jc}^{tms}: تعداد محصول کالای نوع m که باید در دوره t از $TDC\ jth$ به $DP\ cth$ در لایه دوم در سناریو s با حمل‌ونقل زمینی منتقل شود.

XAC_{jc}^{tms}: تعداد محصول کالای نوع m که باید در دوره t از $TDC\ jth$ به $DP\ cth$ در لایه دوم در سناریو s با حمل‌ونقل هوایی منتقل شود.

XL_{jl}^{tms}: تعداد محصول کالای نوع m که باید در دوره t از $TDC\ jth$ به $DP\ lth$ در لایه سوم در سناریو s با حمل‌ونقل هوایی منتقل شود.

XUF_{f}^{tms}: تعداد محصول کالای نوع m در دوره t از نقاط تقاضا لایه اول F در سناریو s که برآورده نمی‌شود.

XUC_{c}^{tms}: تعداد محصول کالای نوع m در دوره t از نقاط تقاضا لایه دوم C در سناریو s که برآورده نمی‌شود.

XUL_{l}^{tms}: تعداد محصول کالای نوع m در دوره t از نقاط تقاضا لایه سوم L در سناریو s که برآورده نمی‌شود.

RI_{jts}: موجودی کالا در $TDC\ \ jth$ در انتهای عملیات در سناریو s در دوره زمانی t.

متغیرهای عدد صحیح

NUM_{js}: تعداد $TDCs$ (j) در tth واحد زمان در اعداد صحیح در سناریو s.

GIH_{ih}^{ts}: تعداد حمل‌ونقل‌های زمینی از $ME\ ith$ به hth هاب H در سناریو s در دوره زمانی t که باید انجام شود.

GHJ_{hj}^{ts}: تعداد حمل‌ونقل‌های زمینی از hth هاب H به $TDC\ jth$ در سناریو s در دوره زمانی t که باید انجام شود.

GHF_{hf}^{ts}: تعداد حمل‌ونقل‌های زمینی از hth هاب H به $DP\ fth$ در لایه اول در سناریو s در دوره زمانی t که باید انجام شود.

GJF_{jf}^{ts}: تعداد حمل‌ونقل‌های زمینی از $TDC\ jth$ به $DP\ fth$ در لایه اول در سناریو s در دوره زمانی t که باید انجام شود.

GJC_{jc}^{ts}: تعداد حمل‌ونقل‌های زمینی از $TDC\ jth$ به $DP\ cth$ در لایه دوم در سناریو s در دوره زمانی t که باید انجام شود.

AJC_{jc}^{ts}: تعداد حمل‌ونقل‌های هوایی از $TDC\ jth$ به $DP\ cth$ در لایه دوم در سناریو s در دوره زمانی t که باید انجام شود.

AJL_{jl}^{ts}: تعداد حمل‌ونقل‌های هوایی از $TDC\ jth$ به $DP\ lth$ در لایه سوم در سناریو s در دوره زمانی t که باید انجام شود.

حمیدیه و میبندی / تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات، دوره ۸، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۲، صفحه: ۶۰۸-۵۷۸

به حداقل رساندن هزینه‌های تدارکات اولین هدفی است که شامل هزینه حمل‌ونقل زمینی، هزینه حمل‌ونقل هوایی، هزینه‌های مکرر و منابع انسانی است. هزینه حمل‌ونقل زمینی که توسط **معادله (۱)** نشان داده شده است. قسمت اول **معادله (۲)**، شامل هزینه از *ME* به *H*، *H* به *TDC*، از *H* به *DP* در لایه ۱ و از *TDC* به *DP* در لایه‌های ۱ و ۲. هزینه حمل‌ونقل هوایی، به‌عنوان‌مثال، قسمت دوم **معادله (۲)** شامل هزینه‌های مربوط به حمل اقلام از *TDC* به *DP* در سطح ۲ و ۳ از طریق ناوگان هوایی است. هزینه‌های مکرر و منابع انسانی برای هر مکان تخمین تقریبی برای مدت‌زمان اجرای پروژه است و از طریق معادلات در تابع هدف مدل قسمت سوم و چهارم **معادله (۲)** گنجانده شده است. لازم به ذکر است که تفاوت بین مراکز هاب پایا و غیر پایا در این است که مراکز هاب غیر پایا در معرض ایجاد اخلال قرار دارند. با این‌حال، مراکز هاب پایا باید در برابر اختلالات غیرمنتظره محافظت شوند. برای این منظور، هزینه‌های اضافی باید صرف تقویت این مکان‌ها شود. اول از همه، ساختار تاسیسات پایا باید به‌گونه‌ای طراحی شود که بتواند در برابر زلزله‌های شدید مقاومت کند. در این راستا، برای داشتن یک ساختمان مقاوم در برابر زلزله، باید سرمایه‌گذاری بیش‌تری در زمینه طراحی و اجرای یک بنیاد و سازه مقاوم‌تر از ساختمان معمولی انجام شود. هم‌چنین، در فرآیند ساخت مرکز هاب پایا باید از مواد بیش‌تر و بهتری استفاده شود؛ پس به‌طورکلی هزینه ایجاد و ذخیره کالا در مراکز پایا بیش‌تر از مراکز غیر پایا خواهد بود که در قسمت پنجم **معادله (۲)** گنجانده شده است.

تابع هدف اول:

$$
\begin{aligned}
&MIN\ Z1 \\
&= \sum_{g=1}^{G}\sum_{s=1}^{S} CEG_s \Bigg(\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{I}\sum_{h=1}^{H}\sum_{s=1}^{S} GIH_{hi}^{ts}.\,DISIH_{ih} + \sum_{t=1}^{T}\sum_{h=1}^{H}\sum_{j=1}^{J}\sum_{s=1}^{S} GHJ_{hj}^{ts}.\,DISHJ_{hj} \\
&+ \sum_{t=1}^{T}\sum_{h=1}^{H}\sum_{f=1}^{F}\sum_{s=1}^{S} GHF_{hf}^{ts}.\,DISHF_{hf} + \sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{J}\sum_{f=1}^{F}\sum_{s=1}^{S} GJF_{jf}^{ts}.\,DISJF_{jf} \\
&+ \sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{J}\sum_{c=1}^{C}\sum_{s=1}^{S} GJC_{jc}^{ts}.\,DISJC_{jc} \Bigg), \\
&\sum_{a=1}^{A}\sum_{s=1}^{S} CEA_s \Bigg(\sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{J}\sum_{c=1}^{C}\sum_{s=1}^{S} AJC_{jc}^{ts} + \sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{J}\sum_{l=1}^{L}\sum_{s=1}^{S} AJL_{jl}^{ts} \Bigg), \\
&\sum_{s=1}^{S} CEK_s \sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{J}\sum_{s=1}^{S} NUM_{tjs}, \\
&\sum_{s=1}^{S} CEB_s \sum_{t=1}^{T}\sum_{h=1}^{H}\sum_{s=1}^{S}\sum_{j=1}^{J} OP_{jts} + OPU_{hts} + OPR_{hts}, \\
&\sum_{t=1}^{T}\sum_{h=1}^{H}\sum_{s=1}^{S} CEER_s \left(OPR_{hts} - OPR_{h(t-1)s}\right) \\
&+ \sum_{t=1}^{T}\sum_{h=1}^{H}\sum_{s=1}^{S} CEEU_s \left(OPU_{hts} - OPU_{h(t-1)s}\right) \\
&+ \sum_{h=1}^{H}\sum_{j=1}^{J}\sum_{s=1}^{S}\sum_{m=1}^{M}\sum_{t=1}^{T}\sum_{g=1}^{G} \left(CESU_s + CEG_s.\,DISHJ_{hj}\right).\,XHJ_{hj}^{tms} \\
&+ \sum_{h=1}^{H}\sum_{j=1}^{J}\sum_{s=1}^{S}\sum_{m=1}^{M}\sum_{t=1}^{T}\sum_{g=1}^{G} \left(CESR_s + CEG_s.\,DISHJ_{hj}\right).\,XHJ_{hj}^{tms}, \\
&\sum_{h=1}^{H}\sum_{f=1}^{f}\sum_{=1}^{M}\sum_{t=1}^{T}\sum_{s=1}^{S} XUF_f^{tms}.\,CEP_s + \sum_{h=1}^{H}\sum_{c=1}^{C}\sum_{m=1}^{M}\sum_{t=1}^{T}\sum_{s=1}^{S} XUC_c^{tms}.\,CEP_s \\
&+ \sum_{h=1}^{H}\sum_{l=1}^{l}\sum_{m=1}^{M}\sum_{t=1}^{T}\sum_{s=1}^{S} XUL_l^{tms}.\,CEP_s.
\end{aligned}
\qquad (۲)
$$

تابع هدف دوم: تابع هدف دوم این مدل، ذخیره‌سازی محصول بیش‌تر در مراکز پایا برای افزایش قابلیت اطمینان مدل است. با افزایش قابلیت اطمینان مدل می‌توان از وجود همیشگی کالا در انبارها اطمینان حاصل کرد.

$$\begin{aligned} MAX\ Z2 = &\sum_{h=1}^{H}\sum_{f=1}^{F}\sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{M}\sum_{s=1}^{S} DEMFM_m . e^{-DRH.D_T} . XHF_{hf}^{tms} \\ &+ \sum_{j=1}^{J}\sum_{f=1}^{F}\sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{M}\sum_{s=1}^{S} DEMFM_m . e^{-DRJ.D_T} . XJF_{jf}^{tms} \\ &+ \sum_{j=1}^{J}\sum_{c=1}^{C}\sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{M}\sum_{s=1}^{S} DEMCM_m . e^{-DRJ.D_T} . XGC_{jc}^{tms} \\ &+ \sum_{j=1}^{J}\sum_{c=1}^{C}\sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{M}\sum_{s=1}^{S} DEMCM_m . e^{-DRJ.D_T} . XAC_{jc}^{tms} \\ &+ \sum_{j=1}^{J}\sum_{l=1}^{L}\sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{M}\sum_{s=1}^{S} DEMLM_m . e^{-DRJ.D_T} . XL_{jl}^{tms} \\ &+ \sum_{h=1}^{H}\sum_{j=1}^{J}\sum_{f=1}^{F}\sum_{c=1}^{C}\sum_{l=1}^{L}\sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{M}\sum_{s=1}^{S} (DEMFM_m + DEMCM_m \\ &+ DEMLM_m) . e^{-DRJ.D_T} . XIH_{ih}^{tms} \\ &+ \sum_{h=1}^{H}\sum_{j=1}^{J}\sum_{f=1}^{F}\sum_{c=1}^{C}\sum_{l=1}^{L}\sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{M}\sum_{s=1}^{S} (DEMFM_m + DEMCM_m \\ &+ DEMLM_m) . e^{-DRJ.D_T} . XHJ_{hj}^{tms}, \end{aligned} \quad (۳)$$

$$OPI_{it-1s} \leq OPI_{its} \qquad for\ all\ t \in T\ , i \in I, s \in S. \quad (۴)$$

$$OPR_{h(t-1)s} \leq OPR_{hts} \qquad for\ all\ t \in T, h \in H, s \in S. \quad (۵)$$

$$OPU_{h(t-1)s} \leq OPU_{hts} \qquad for\ all\ t \in T\ , h \in H, s \in S. \quad (۶)$$

محدودیت (۴) تا **محدودیت (۶)** بیان می‌دارد اگر یک *ME* و یک هاب پایا و یک هاب غیر پایا در یک دوره زمانی *T* باز باشد، باید در دوره‌های بعدی زمان‌بندی هم باز باشند.

$$\sum_{h=1}^{H}\sum_{m=1}^{M} YIH_{hi}^{tms} \leq OPI_{its} \qquad for\ all\ t \in T\ , i \in I, s \in S. \quad (۷)$$

محدودیت (۷) بیانگر این است که در صورتی ارتباط بین *ME* و هاب برقرار است که *ME* باز باشد.

$$\sum_{h=1}^{T}\sum_{s=1}^{S} OPR_{hts} \geq 1 \qquad for\ all\ \ t \in T. \quad (۸)$$

محدودیت (۸) تضمین می‌کند حداقل یک مرکز هاب پایا باید در هر دوره در شبکه باشد.

$$\sum_{f=1}^{F}\sum_{m=1}^{M} DISHF_{hf} . YF_{hf}^{tms} \leq CRH_h . OPR_{hts} \qquad for\ all\ t \in T\ \ , h \in H, s \in S. \quad (۹)$$

$$\sum_{m=1}^{M}\sum_{j=1}^{J} DISHJ_{hj} . YJ_{hj}^{tms} \leq CRH_h . OPR_{hts} \qquad for\ all\ t \in T\ \ , h \in H, s \in S. \quad (۱۰)$$

محدودیت‌های (۹) و **(۱۰)** تضمین می‌کند در برنامه سناریو پشتیبانی محدودیت پوشش منطقه‌ای نداریم (به این معنا که هر هاب پایا می‌توانند بدون محدودیت به نقطه تقاضا لایه اول و *TDCs* کمک بفرستد).

$$\sum_{m=1}^{M}\sum_{f=1}^{F} DISJF_{jf} . YJF_{jf}^{tms} \leq E . OP_{jts} \qquad for\ all\ j \in J\ , t \in T, s \in S. \quad (۱۱)$$

$$\sum_{m=1}^{M}\sum_{c=1}^{C} DISJC_{jc} . YGC_{jc}^{tms} \leq E . OP_{jts} \qquad for\ all\ j \in J\ , t \in T, s \in S. \quad (۱۲)$$

$$\sum_{m=1}^{M}\sum_{c=1}^{C} DISJC_{jc} . YAC_{jc}^{tms} \leq E . OP_{jts} \qquad for\ all\ j \in J\ , t \in T, s \in S. \quad (۱۳)$$

$$\sum_{m=1}^{M}\sum_{l=1}^{L} DISJC_{jc} . YAL_{jl}^{tms} \leq E . OP_{jts} \qquad for\ all\ j \in J\ , t \in T, s \in S. \quad (۱۴)$$

$$\sum_{m=1}^{M}\sum_{f=1}^{F} DISHF_{hf} . YF_{hf}^{tms} \leq E . OPR_{hts} \qquad for\ all\ h \in H\ , t \in T, s \in S. \quad (۱۵)$$

محدودیت‌های (۱۴) و **(۱۵)** تضمین می‌کند تقاضای مشتریان باید بدون درنظر گرفتن محدودیت پوشش و فاصله در سناریو پشتیبان برآورده شود.

$$\sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{M}\sum_{s=1}^{S}\sum_{h=1}^{H}\sum_{i=1}^{I} YIH_{hi}^{tms} \geq 1, \qquad (۱۶)$$

محدودیت (۱۶) تضمین می‌کند ارتباط بین ME و هاب حتما برقرار خواهد بود.

$$XIH_{hi}^{tms} \geq YIH_{hi}^{tms} \quad for\ all\ t \in T\ , m \in M\ , i \in I\ , h \in H, s \in S. \qquad (۱۷)$$

$$XHJ_{jh}^{tms} \geq YJ_{hj}^{tms} \quad for\ all\ t \in T\ , m \in M\ , h \in H\ , j \in J\ s \in S. \qquad (۱۸)$$

$$XHF_{hf}^{tms} \geq YF_{hf}^{tms} \quad for\ all\ t \in T\ , m \in M\ , h \in H\ , f \in F\ s \in S. \qquad (۱۹)$$

محدودیت (۱۷) تا **محدودیت (۱۹)** تضمین می‌کند که اقلام امدادی در صورتی از ME به H و از H به DP در لایه اول و TDC منتقل می‌شوند که ME و H به این مکان‌ها متصل باشد.

$$XIH_{ih}^{tms}.LW_m \leq GHJ_{hj}^{ts}.CAG_m \quad for\ all\ t \in T\ , m \in M\ , i \in I\ , h \in H, s \in S. \qquad (۲۰)$$

محدودیت (۲۰) بیانگر محدودیت وزنی برای انتقال از ME به H است.

$$\sum_{t=1}^{T}\sum_{s=1}^{S}\sum_{i=1}^{I}\sum_{h=1}^{H} LW_m.XIH_{ih}^{tms} \geq DEMFM_m + DEMCM_m + DEMLM_m\ for\ all\ m \in M. \qquad (۲۱)$$

محدودیت (۲۱) تضمین می‌کند مقدار کالای جابه‌جاشده از ME بتواند تقاضای نقاط آسیب‌دیده را تامین کند.

$$\sum_{h=1}^{H}\sum_{m=1}^{M} YJ_{hj}^{tms} \geq OP_{Jts} \quad for\ all\ t \in T\ , j \in J, s \in S. \qquad (۲۲)$$

محدودیت (۲۲) اطمینان می‌دهد که H در صورتی می‌تواند به TDC متصل شود که TDC در آن مکان ایجاد شود.

$$\sum_{f=1}^{F} XJF_{jf}^{tms} + \sum_{c=1}^{C} XGC_{jc}^{tms} + \sum_{c=1}^{C} XAC_{jc}^{tms} + \sum_{l=1}^{L} XL_{jl}^{tms} \leq RI_{jts} \quad for\ all\ t \in T\ , j \in J, s \in S. \qquad (۲۳)$$

محدودیت (۲۳) نشان می‌دهد که میزان کمک‌های امدادی منتقل‌شده از $TDCs$ تاسیس‌شده کم‌تر یا برابر حداکثر موجودی کالا در $TDCs$ در یک مرحله زمانی مشخص است.

$$XJF_{jf}^{tms} \geq YJF_{jf}^{tms} \leq RI_{jts} \quad for\ all\ t \in T\ , m \in M\ , j \in J\ , f \in F\ , s \in S. \qquad (۲۴)$$

$$XGC_{jc}^{tms} \geq YGC_{jc}^{tms} \quad for\ all\ t \in T\ , m \in M, j \in J\ , c \in C, s \in S. \qquad (۲۵)$$

$$XAC_{jc}^{tms} \geq YAC_{jc}^{tms} \quad for\ all\ t \in T\ , m \in M, j \in J\ , c \in C, s \in S. \qquad (۲۶)$$

$$XL_{jl}^{tms} \geq YAL_{jl}^{tms} \quad for\ all\ t \in T\ , m \in M\ , j \in J\ , l \in L, s \in S. \qquad (۲۷)$$

محدودیت (۲۴) تا **محدودیت (۲۷)** اطمینان می‌دهد که اقلام امدادی فقط در صورتی از $TDCs$ به نقاط تقاضا منتقل می‌شوند که باهم در ارتباط باشند.

$$\sum_{m=1}^{M}\sum_{=1}^{F} YJF_{jf}^{tms} \leq OP_{jts} \quad for\ all\ j \in J\ , t \in T\ \ s \in S. \qquad (۲۸)$$

$$\sum_{m=1}^{M}\sum_{c=1}^{C} YGC_{jc}^{tms} \leq OP_{jts} \quad for\ all\ j \in J\ , t \in T\ \ s \in S. \qquad (۲۹)$$

$$\sum_{m=1}^{M}\sum_{c=1}^{C} YAC_{jc}^{tms} \leq OP_{jts} \quad for\ all\ j \in J\ , t \in T\ \ s \in S. \qquad (۳۰)$$

$$\sum_{m=1}^{M}\sum_{l=1}^{L} YAL_{jl}^{tms} \leq OP_{jts} \quad for\ all\ j \in J\ , t \in T\ s \in S. \qquad (۳۱)$$

محدودیت (۲۸) تا **محدودیت (۳۱)** تضمین می‌کنند که TDC تنها در صورت ایجاد می‌تواند به DPs متصل شود.

$$RI_{t-1,js} + \sum_{m=1}^{M}\sum_{h=1}^{H} XHJ_{hj}^{tms} \leq \sum_{m=1}^{M} CAJ_{jm}.NUM_{tjs} \quad for\ all\ t \in T\ , j \in J\ , s \in S. \qquad (۳۲)$$

$$RI_{t-1,js} + \sum_{m=1}^{M}\sum_{h=1}^{H} XHJ_{hj}^{tms} - \sum_{m=1}^{M}\sum_{f=1}^{F} XJF_{jf}^{tms} - \sum_{m=1}^{M}\sum_{c=1}^{C} XGC_{jc}^{tms} - \sum_{m=1}^{M}\sum_{c=1}^{C} XAC_{jc}^{tms} - \sum_{m=1}^{M}\sum_{l=1}^{L} XL_{jl}^{tms} \leq RI_{t,js} \quad for\ all\ t \in T, j \in J\ \ , s \in S \qquad (۳۳)$$

محدودیت‌های (۳۲) و **(۳۳)** اطمینان می‌دهد که موجودی کالا در TDC بیش از ظرفیت ذخیره‌سازی نیست.

$$\sum_{h=1}^{H}\sum_{j=1}^{J}\sum_{t=1}^{T}\sum_{s=1}^{S} XJF_{jf}^{tms} + XHF_{hf}^{tms} + XUF_{f}^{tms} \ge DEMFM_m \quad for\ all\ m \in M\ , f \in F. \tag{۳۴}$$

$$\sum_{j=1}^{J}\sum_{t=1}^{T}\sum_{s=1}^{S} XGC_{jc}^{tms} + XAC_{jc}^{tms} + XUC_{c}^{tms} \ge DEMCM_m \quad for\ all\ m \in M, c \in C. \tag{۳۵}$$

$$\sum_{j=1}^{J}\sum_{t=1}^{T}\sum_{s=1}^{S} XL_{jl}^{tms} + XUL_{l}^{tms} \ge DEMLM_m \quad for\ all\ m \in M, l \in L. \tag{۳۶}$$

محدودیت (۳۴) تا **محدودیت (۳۶)** تضمین می‌کند که تقاضای هر مشتری باید برابر با مجموع تقاضای برآورده نشده و محصولات خواسته‌شده در دوره زمانی T توسط DP از TDC باشد.

$$\sum_{f=1}^{F} XJF_{jf}^{tms} + \sum_{c=1}^{C} XGC_{jc}^{tms} + \sum_{c=1}^{C} XAC_{jc}^{tms} + \sum_{l=1}^{L} XL_{jl}^{tms} \le \sum_{h=1}^{H} XHJ_{jh}^{tms}\ for\ all\ m \in M\ , j \in J\ , t \in T\ , s \in S. \tag{۳۷}$$

محدودیت (۳۷) تضمین می‌کند که بین اقلام تحویلی به DPs و اقلام عرضه‌شده به $TDCs$ تعادل برقرار است.

$$\sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{M}\sum_{j=1}^{J}\sum_{f=1}^{F}\sum_{h=1}^{H}\sum_{s=1}^{S} YJF_{jf}^{tms} + YF_{hf}^{tms} \ \ge 1. \tag{۳۸}$$

$$\sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{M}\sum_{j=1}^{J}\sum_{c=1}^{C}\sum_{s=1}^{S} YGC_{jc}^{tms} + YAC_{jc}^{tms} \ge 1. \tag{۳۹}$$

$$\sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{M}\sum_{j=1}^{J}\sum_{l=1}^{L}\sum_{s=1}^{S} YAL_{jl}^{tms} \ge 1. \tag{۴۰}$$

محدودیت (۳۸) تا **محدودیت (۴۰)** اطمینان می‌دهد که نقاط تقاضا در لایه‌های ۱ تا ۳ حداقل توسط یک TDC پوشش داده شوند.

$$\sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{M}\sum_{h=1}^{H}\sum_{j=1}^{J}\sum_{s=1}^{S} YJ_{hj}^{tms}\,.\,THJ_{hj} \le MT. \tag{۴۱}$$

محدودیت (۴۱) اطمینان می‌دهد که H از $TDCs$ پشتیبانی می‌کند که می‌تواند در زمان مشخصی به آن‌ها دسترسی پیدا کند.

$$\sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{M}\sum_{h=1}^{H}\sum_{i=1}^{I}\sum_{s=1}^{S} YIH_{hi}^{tms}\,.\,TIH_{ih} \le MT. \tag{۴۲}$$

محدودیت (۴۲) تضمین می‌کند که هاب اصلی توزیع H در زمان مشخصی توسط ME با حمل‌ونقل زمینی تامین می‌شود.

$$\sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{M}\sum_{j=1}^{J}\sum_{f=1}^{F}\sum_{s=1}^{S} YJF_{jf}^{tms}\,.\,TJF_{jf} \le MT. \tag{۴۳}$$

$$\sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{M}\sum_{h=1}^{H}\sum_{f=1}^{F}\sum_{s=1}^{S} YF_{hf}^{tms}\,.\,THF_{hf} \le MT. \tag{۴۴}$$

محدودیت‌های (۴۳) و **(۴۴)** تضمین می‌کند که DPs در لایه اول می‌تواند توسط هر TDC و H با کامیون در زمان مشخصی پشتیبانی شود.

$$\sum_{t=1}\sum_{m=1}^{M}\sum_{j=1}^{J}\sum_{c=1}^{C}\sum_{s=1}^{S} YGC_{jc}^{tms}\,TGC_{jc} \le MT. \tag{۴۵}$$

محدودیت (۴۵) اطمینان می‌دهد زمان سفر بین $TDCs$ بالقوه و DPs اختصاص داده‌شده به آن‌ها در لایه ۲ برای حمل‌ونقل زمینی با کامیون کم‌تر از زمان MT است.

$$\sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{M}\sum_{j=1}^{J}\sum_{c=1}^{C}\sum_{s=1}^{S} YAC_{jc}^{tms}\,.\,DISJC_{jc} \le MD. \tag{۴۶}$$

$$\sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{M}\sum_{j=1}^{J}\sum_{l=1}^{L}\sum_{s=1}^{S} YAL_{jL}^{tms}\,.\,DISJL_{jl} \le MD. \tag{۴۷}$$

محدودیت‌های (۴۶) و **(۴۷)** اطمینان می‌دهد که حمل‌ونقل هوایی فقط برای انتقال کالای امدادی به DPs است که در یک فاصله خاص اختصاص یافته‌اند.

حمیدیه و میمندی / تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات، دوره ۸، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۲، صفحه: ۶۰۸-۵۷۸

$$NUM_{tjs} \le OP_{jts}.NJ \quad for\ all\ t \in T, j \in J, s \in S. \qquad (۴۸)$$

محدودیت (۴۸) تعداد *TDCs* را به تعداد محدود می‌کند. بعضی‌اوقات نمی‌توان به تعداد دلخواه *TDC* ایجاد کرد.

$$NUM_{tjs} \ge OP_{jts} \quad for\ all\ t \in T, j \in J, s \in S. \qquad (۴۹)$$

محدودیت (۴۹) اطمینان می‌دهد که تعداد کل *TDCs* پیشنهادی کم‌تر از *TDCs* موجود برای عملیات است.

$$XHJ_{jh}^{tms}.LW_m \le \sum_{g=1}^{G} GHJ_{hj}^{ts}.CAG_m \quad for\ all\ t \in T, h \in H, j \in J, m \in M, s \in S. \qquad (۵۰)$$

$$XHF_{hf}^{tms}.LW_m \le \sum_{g=1}^{G} GHF_{hf}^{ts}.CAG_m \quad for\ all\ t \in T, h \in H, j \in J, m \in M, s \in S. \qquad (۵۱)$$

$$XJF_{jf}^{tms}.LW_m \le \sum_{g=1}^{G} GJF_{jf}^{ts}.CAG_m \quad for\ all\ t \in T, f \in F, j \in J, m \in M, s \in S. \qquad (۵۲)$$

$$XGC_{jc}^{tms}.LW_m \le \sum_{g=1}^{G} GJC_{jc}^{ts}.CAG_m \quad for\ all\ t \in T, c \in C, j \in J, m \in M, s \in S. \qquad (۵۳)$$

محدودیت (۵۰) تا **محدودیت (۵۳)** تضمین می‌کند که اقلام حمل شده با توجه به محدودیت وزنی از ظرفیت حمل‌ونقل زمینی فراتر نمی‌روند.

$$XAC_{jc}^{tms}.LW_m \le \sum_{a=1}^{A} AJC_{jc}^{ts}.CAA_m \quad for\ all\ t \in T, c \in C, j \in J, m \in M, s \in S. \qquad (۵۴)$$

$$XL_{jl}^{tms}.LW_m \le \sum_{a=1}^{A} AJL_{jl}^{ts}.CAA_m \quad for\ all\ t \in T, l \in L, j \in J, m \in M, s \in S. \qquad (۵۵)$$

محدودیت‌های (۵۴) و **(۵۵)** همانند روش مشابه حمل‌ونقل زمینی محدودیت ظرفیت وزنی را برای سیستم‌های حمل‌ونقل هوایی بیان می‌کند.

$$\sum_{h=1}^{H} GIH_{hi}^{ts} \le NVI_I.QT_{ts} \quad for\ all\ t \in T, i \in I. \qquad (۵۶)$$

$$\sum_{j=1}^{J} GHJ_{hj}^{ts} + \sum_{f=1}^{F} GHF_{hf}^{ts} \le NVH_h.QT_{ts} \quad for\ all\ t \in T, h \in H, s \in S. \qquad (۵۷)$$

$$\sum_{f=1}^{F} GJF_{jf}^{ts} + \sum_{c=1}^{C} GJC_{jc}^{ts} \le NVG_j.QT_{ts} \quad for\ all\ t \in T, j \in J, s \in S. \qquad (۵۸)$$

$$\sum_{c=1}^{C} AJC_{jc}^{ts} + \sum_{l=1}^{L} AJL_{jl}^{jc} \le NVA_j.QT_{ts} \quad for\ all\ t \in T, j \in J, s \in S. \qquad (۵۹)$$

محدودیت (۵۶) تا **محدودیت (۵۹)** اطمینان می‌دهد که تعداد حمل‌ونقل بین مراکز *ME*، *H*، *TDC* و *DP* در هر مرحله از تعداد وسایل حمل‌ونقل موجود بیش‌تر نیست. هم‌چنین این محدودیت‌ها اطمینان می‌دهد که هر زمان که جابه‌جایی محموله‌ای در شبکه در مرحله *t* انجام شود، شمارنده *QT* مرحله زمان را به‌عنوان یک روز عملیاتی درنظر می‌گیرد.

$$GIH_{hi}^{ts} \ge \sum_{m=1}^{M} YIH_{hi}^{tms} \quad for\ all\ t \in T, i \in I, h \in H, s \in S. \qquad (۶۰)$$

$$GHF_{hf}^{ts} \ge \textstyle\sum_{m=1}^{M} YF_{hf}^{tms} \quad for\ all\ t \in T, f \in F, h \in H, s \in S. \qquad (۶۱)$$

$$GHJ_{hj}^{ts} \ge \sum_{m=1}^{M} YJ_{hj}^{tms} \quad for\ all\ t \in T, h \in H, j \in J, s \in S. \qquad (۶۲)$$

$$GJF_{jf}^{ts} \ge \sum_{m=1}^{M} YJF_{jf}^{tms} \quad for\ all\ t \in T, j \in J, f \in F, s \in S. \qquad (۶۳)$$

$$GJC_{jc}^{ts} \ge \sum_{m=1}^{M} YGC_{jc}^{tms} \quad for\ all\ t \in T, j \in J, c \in C, s \in S. \qquad (۶۴)$$

$$AJC_{Jc}^{ts} \ge \sum_{m=1}^{M} YAC_{jc}^{tms} \quad for\ all\ t \in T, j \in J,, c \in C, s \in S. \qquad (۶۵)$$

$$AJL_{Jl}^{ts} \ge \sum_{m=1}^{M} YAL_{jl}^{tms} \quad for\ al\ t \in T, j \in J, l \in L, s \in S. \qquad (۶۶)$$

حمیدیه و میبندی / تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات، دوره ۸، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۲، صفحه: ۵۷۸-۶۰۸

محدودیت (۶۰) تا **محدودیت (۶۶)** اطمینان می‌دهد که حمل‌ونقل بین دو مکان فقط در صورت اتصال این دو صورت می‌گیرد.

$$\begin{aligned}\sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{M}\sum_{h=1}^{H}\sum_{i=1}^{I}\sum_{s=1}^{S} YIH_{hi}^{tms}\,.\,TIH_{ih} + \sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{M}\sum_{h=1}^{H}\sum_{j=1}^{J}\sum_{s=1}^{S} YJ_{hj}^{tms}\,.\,THJ_{hj}\\ + \sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{M}\sum_{h=1}^{H}\sum_{f=1}^{F}\sum_{s=1}^{S} YF_{hf}^{tms}\,.\,THF_{hf}\\ + \sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{M}\sum_{j=1}^{J}\sum_{f=1}^{F}\sum_{s=1}^{S} YJF_{jf}^{tms}\,.\,TJF_{jf}\\ + \sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{M}\sum_{j=1}^{J}\sum_{c=1}^{C}\sum_{s=1}^{S} YGC_{jc}^{tms}\,.\,TGC_{jc}\\ + \sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{M}\sum_{j=1}^{J}\sum_{c=1}^{C}\sum_{s=1}^{S} YAC_{jc}^{tms}\,.\,TAC_{jc}\\ + \sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{M}\sum_{j=1}^{J}\sum_{l=1}^{L}\sum_{s=1}^{S} YAL_{jl}^{tms}\,.\,TAL_{jl} \le D_t.\end{aligned} \tag{۶۷}$$

محدودیت (۶۷) تضمین می‌کند تقاضای مشتریان در هر دوره زمانی باید در زمان مورد انتظار مشتری برآورده شود.

$$\sum_{i=1}^{I} XIH_{ih}^{tms} \ge \sum_{f=1}^{F} XHF_{hf}^{tms} + \sum_{j=1}^{J} XHJ_{jh}^{tms} \quad for\ all\ h \in H, t \in T, m \in M, s \in S. \tag{۶۸}$$

محدودیت (۶۸) تضمین می‌کند که مقدار کالایی که از ME به هاب اصلی می‌رود بیش‌تر از مقدار کالایی است که از H به TDC و DP منتقل می‌شود.

$$CAI_{im}.\,YIH_{hi}^{tms} \ge XIH_{ih}^{tms} \quad for\ all\ h \in H, t \in T, m \in M, s \in S, i \in I. \tag{۶۹}$$

$$CAH_{hm}.\left(YJ_{hj}^{tms} + YF_{hf}^{tms}\right) \ge XHF_{hf}^{tms} + XHJ_{jh}^{tms} \quad for\ all\ h \in H, t \in T, m \in M, s \in S, f \in F, j \in J. \tag{۷۰}$$

محدودیت‌های (۶۹) و **(۷۰)** تضمین می‌کند که حمل‌ونقل از ME و H انجام خواهد شد.

$$\sum_{m=1}^{M}\sum_{h=1}^{H} DISIH_{ih}.\,YIH_{hi}^{tms} \le E * OPI_{its} \quad for\ all\ t \in T\ , i \in I, s \in S. \tag{۷۱}$$

محدودیت (۷۱) تضمین می‌کند که در سناریو دوم ME بدون درنظر گرفتن فاصله به هاب کالای امدادی برساند.

$$NUM_{t-1,js} \le NUM_{tjs}\ for\ all\ t \in T\ , i \in I, s \in S. \tag{۷۲}$$

محدودیت (۷۲) تضمین می‌کند که تعداد $TDCs$ باز در هر مرحله از مرحله قبلی بیش‌تر است.

$$\sum_{h=1}^{H}\sum_{j=1}^{J}\sum_{t=1}^{T}\sum_{s=1}^{S}\sum_{m=1}^{M}\sum_{f=1}^{F} XJF_{jf}^{tms} + XHF_{hf}^{tms} \ge 1. \tag{۷۳}$$

$$\sum_{j=1}^{J}\sum_{t=1}^{T}\sum_{s=1}^{S}\sum_{m=1}^{M}\sum_{c=1}^{C} XGC_{jc}^{tms} + XAC_{jc}^{tms} \ge 1. \tag{۷۴}$$

$$\sum_{j=1}^{J}\sum_{t=1}^{T}\sum_{s=1}^{S}\sum_{m=1}^{M}\sum_{l=1}^{L} XL_{jl}^{tms} \ge 1. \tag{۷۵}$$

محدودیت (۷۳) تا **محدودیت (۷۵)** تضمین می‌کند حمل کالا به نقاط تقاضا انجام شود.

$$OP_{jts} \le \sum_{m=1}^{M}\sum_{h=1}^{H}\sum_{c=1}^{C}\sum_{f=1}^{F}\sum_{l=1}^{L} YJ_{hj}^{tms} + YJF_{jf}^{tms} + YGC_{jc}^{tms} + YAC_{jc}^{tms} + YAL_{jl}^{tms} \quad for\ all\ t \in T\ , i \in I, s \in S. \tag{۷۶}$$

$$OPI_{its} \le \sum_{m=1}^{M}\sum_{S=1}^{S} YIH_{hi}^{tms} \quad for\ all\ t \in T\ , i \in I, s \in S. \tag{۷۷}$$

$$OPU_{hts} \le \sum_{m=1}^{M}\sum_{S=1}^{S} YIH_{hi}^{tms} + YJ_{hj}^{tms} + YF_{hf}^{tms} \quad for\ all\ t \in T\ , h \in H, s \in S. \tag{۷۸}$$

$$OPR_{hts} \le \sum_{m=1}^{M}\sum_{S=1}^{S} YIH_{hi}^{tms} + YJ_{hj}^{tms} + YF_{hf}^{tms} \quad for\ all\ t \in T\ , h \in H, s \in S. \tag{۷۹}$$

محدودیت مربوط به متغیرهای نامنفی و صفر و یک، توسط محدودیت‌های بالا اعمال شده است.

محدودیت اپسیلون: در روش محدودیت اپسیلون[1]، ابتدا یکی از توابع هدف را بهینه می‌کنیم و سایر توابع هدف را به‌عنوان محدودیت مساله درنظر می‌گیریم. سپس با تغییر تدریجی مقادیر محدودیت درنظر گرفته شده، می‌توان تمام نقاط نامطلوب را تعیین کرد. ایده اصلی این روش این است که در هر زمان یکی از توابع هدف بهینه شود و سایر توابع در یک حدی با سطوح قابل تخصیص ε محدود نگه داشته شوند. با ایجاد تغییر در مقادیر ε راه‌حل‌های نامغلوب مساله به دست می‌آید. در این روش، ابتدا یکی از توابع هدف را بهینه می‌کنیم و سایر توابع هدف را به‌عنوان محدودیت مساله درنظر می‌گیریم. سپس با تغییر تدریجی مقادیر محدودیت درنظر گرفته شده، می‌توان تمام نقاط غیر مغلوب را تعیین کرد [40]. فرمول این روش مطابق ذیل می‌باشد:

$$Z = min\left(F_j(x)\right), \quad s.t. \quad F_i(x) \le \varepsilon_i, \quad for\ i = 1, \dots, k\ \&\ i \neq j. \qquad (۸۰)$$

در محدودیت فوق پارامتر تعیین‌کننده مقادیر بهینه توابع هدف $f_i(x)$ می‌باشد که نباید از آن مقدار بیش‌تر شوند. از آن‌جایی که در هر تکرار فقط یک جواب نامطلوب مشخص می‌شود؛ لذا به‌منظور اطمینان از تعیین همه جواب‌های نامطلوب لازم است مقدار به‌اندازه کافی دقیق و کوچک انتخاب شود. البته انتخاب مقادیر خیلی کم برای این پارامتر موجب طولانی شدن زمان حل خواهد شد. در عمل توابع هدفی که از اهمیت بالایی برخوردار هستند در محدودیت قرار می‌گیرند. ضمنا چنان‌چه تابع هدفی که در محدودیت قرار می‌گیرد دامنه تغییر کم‌تری داشته باشد موجب کوتاه شدن زمان حل نیز خواهد شد. محدوده تابع اپسیلون از طریق زیر محاسبه می‌شود:

ابتدا مقدار کمینه و بیشینه تابع هدف اول را طبق فرمول زیر محاسبه می‌کنیم:

$$r_i = f_i^{max} - f_i^{min}. \qquad (۸۱)$$

محدوده به‌دست‌آمده در فرمول بالا به تعداد q_i واحد تقسیم می‌شود و محدوده اپسیلون طی رابطه زیر به دست خواهد آمد.

$$\varepsilon_i^p = f_i^{max} - \left(\frac{r_i}{q_i}\right) \times p. \quad p = 0, \dots, qi, \quad i = 2, \dots, k. \qquad (۸۲)$$

با قرار دادن محدوده اپسیلون در مقادیر تابع هدف منتقل‌شده به محدودیت جواب‌های نامطلوب (در صورت وجود) به دست می‌آیند.

برنامه‌ریزی امکانی-استوار مدل با رویکرد محدودیت اعتبار: استواری مدل، یکی از مباحث بسیار مهمی است که در مدل‌سازی و تحقیق در عملیات مطرح می‌باشد. در حقیقت، اگر مدل‌ها استوار باشند، خطر به‌کارگیری اشتباه یا استفاده غلط از آن‌ها بسیار کم‌تر خواهد شد. استواری به این معنی است که خروجی مدل نباید حساسیت بالا به مقادیر دقیق پارامترها و ورودی‌های مدل داشته باشد. بهینه‌سازی استوار به مدل‌سازی مسایل مربوط به بهینه‌سازی در شرایطی اطلاق می‌گردد که عدم اطمینان داده‌ها مطرح باشد و به جوابی برسیم که در مورد همه یا اکثر پارامترهای نامطمئن، خوب باشد. بهینه‌سازی استوار می‌تواند به‌عنوان یک گزینه مکمل برای تحلیل حساسیت و برنامه‌ریزی احتمالی مطرح باشد [31].

همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، عدم قطعیت انواع مختلفی دارد؛ دسته اول مربوط به تغییرپذیری موجود در مقدار توابع هدف و محدودیت‌ها می‌باشد. به این معنی که حدود مقادیر غیرقطعی و مبهم هستند. دسته دوم مربوط به عدم قطعیت مرتبط به فقدان اطلاعات و داده درباره مقدار دقیق پارامترهای تعریف‌شده می‌باشد که رویکرد برنامه‌ریزی امکانی با این نوع از عدم قطعیت مواجه می‌شود. لازم به ذکر است که پارامترهای غیرقطعی توسط توابع امکانی مقتضی مانند تابع امکانی مثلثی و یا ذوزنقه‌ای، بر اساس داده‌های ناکافی موجود و یا دانش و تجربه تصمیم‌گیرندگان قابل مدل‌سازی می‌باشند. برنامه‌ریزی امکانی و بهینه‌سازی استوار دو رویکرد برخورد با عدم قطعیت می‌باشند و برنامه‌ریزی امکانی استوار یک رویکرد ترکیبی برخورد با عدم قطعیت می‌باشد [33]. دلیل ترکیب رویکردهای برنامه‌ریزی امکانی و بهینه‌سازی استوار مربوط به اشکالات احتمالی و چالش‌های مدل امکانی می‌باشد که در ادامه به آن می‌پردازیم.

فرموله‌سازی مدل برنامه‌ریزی امکانی: به‌منظور سهولت در فرموله نمودن مدل برنامه‌ریزی امکانی و برنامه‌ریزی امکانی استوار، فرم فشرده‌شده‌ی مدل برنامه‌ریزی اصلی توزیع کالاهای امدادی به‌صورت زیر ارایه می‌گردد:

[1] Epsilon constraint

$$
\begin{gathered}
minz1 = G.D + A.E + K.N + B.O + R.S + U.P, \\
s.t. \\
coz2{:}\, F(eh.xhf + ej.xjf) + C(ej(xgc + xac)) + L(ej.xl) + (F + C + L)(ej(xih + xhj) < \varepsilon = 61000, \\
co20{:}\, w > F + C + L, \\
co31{:}\, R.xhj < X.N, \\
co33{:}\, xf > F, \\
co34{:}\, xc > C, \\
co35{:}\, xl > L, \qquad R, O, N \in \{0{,}1\}, xjf, xgc, xac, xih, xhj, xf, xc, xl, U \geq 0.
\end{gathered}
\tag{۸۳}
$$

محدودیت‌های دیگر نیز به‌صورت قبل هستند.

در مدل فشرده‌شده، بردارهای P، S، B، K، A و G به ترتیب مرتبط با هزینه‌های حمل‌ونقل زمینی و هوایی، هزینه‌های تکراری، هزینه‌های منابع انسانی، هزینه‌های ذخیره و هزینه‌های جریمه است. بردارهای L، C و F مربوط به میزان تقاضاهای لایه‌های اول و دوم و سوم می‌باشد. بردارهای $xjf, xgc, xac, xih, xhj, xf, xc, xl, U$ نشان‌دهنده جریان انتقالی مقدار کالا بین دو نقطه هستند. بردارهای R, O, N متغیرهای ۰ و ۱ هستند. بردارهای E و D متغیرهای عدد صحیح و بردار U متغیر پیوسته مربوط به کمبود کالاهای امدادی است. بردارهای X، L، C و F پارامترهای غیرقطعی در مدل فشرده هستند که به‌منظور مدل نمودن این پارامترها از تابع امکانی مثلثی استفاده شده است.

اگر عدد حقیقی r و عدد فازی $\tilde{a} = (a1, a2, a3)$ را درنظر بگیریم، در این صورت خواهیم داشت:

$$
Cr\{\tilde{a} \leq r\} = \frac{1}{2}(Pos\{\tilde{a} \leq r\} + Nes\{\tilde{a} \leq r\}). \tag{۸۴}
$$

با توجه به **معادله (۸۴)** معیار اعتبار پارامتر فازی به‌صورت میانگین معیارهای الزام و امکان تعریف می‌شود و در این صورت معیارهای الزام و امکان به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$
Pos(\tilde{a} \leq r) = \begin{Bmatrix} 0, & r \leq a1, \\ \frac{r-a1}{a2-a1}, & a1 \leq r \leq a2, \\ 1, & r \geq a2. \end{Bmatrix} \tag{۸۵}
$$

$$
Nes(\tilde{a} \leq r) = \begin{Bmatrix} 0, & r \leq a2, \\ \frac{r-a2}{a3-a2}, & a2 \leq r \leq a3, \\ 1, & r \geq a3. \end{Bmatrix} \tag{۸۶}
$$

هم‌چنین بر اساس روابط بالا درجه اعتبار پارامتر فازی به این صورت تعریف می‌شود:

$$
Cr(\tilde{a} \leq r) = \begin{Bmatrix} 1 & r \leq a1, \\ \frac{r-a1}{2(a2-a1)}, & a1 \leq r \leq a2, \\ \frac{a3-a2+r}{2(a3-a2)}, & a2 \leq r \leq a3, \\ 0, & r \geq a3. \end{Bmatrix} \tag{۸۷}
$$

$$
Cr(\tilde{a} \geq r) = \begin{Bmatrix} 1, & r \leq a1, \\ \frac{2a2-r-a1}{2(a2-a1)}, & a1 \leq r \leq a2, \\ \frac{a2-r}{2(a2-a3)}, & a2 \leq r \leq a3, \\ 0, & r \geq a3. \end{Bmatrix} \tag{۸۸}
$$

هم‌چنین برای عدد فازی a در سطح اطمینان $1 \leq \alpha \leq 0.5$ خواهیم داشت:

$$
Cr(\tilde{a} \leq r) \geq \alpha \rightarrow \frac{a3-2a2+r}{2(a3-a2)} \geq \alpha \rightarrow W_a = (2\alpha - 1)a3 - (2\alpha + 2)a2 \leq r\,. \tag{۸۹}
$$

$$
Cr(\tilde{a} \geq r) \geq \alpha \rightarrow \frac{2a2-r-a1}{2(a2-a1)} \geq \alpha \rightarrow W_a = a1(2\alpha - 1) + 2a2(1 - \alpha) \geq r. \tag{۹۰}
$$

در این صورت ارزش مورد انتظار پارامتر فازی $\tilde{a}$ بر اساس معیار اعتبار به‌صورت زیر تبیین می‌شود.

$$
E[\tilde{a}] = \int_0^{\infty} Cr(\tilde{a} \geq r)dr - \int_0^{\infty} Cr(\tilde{a} \leq r)dr = \left(\frac{a1+2a2+a3}{a4}\right). \tag{۹۱}
$$

ترکیب کلی مساله طبق روابط بالا به‌صورت زیر است:

(پارامترهای فازی X، L، C و F به‌صورت $\tilde{a} \leq r$ و پارامتر N به‌صورت $\tilde{a} \geq r$ درنظر گرفته می‌شود).

در مدل فوق αX، αL، αC و αF سطح اطمینان تصمیم‌گیرندگان برای تامین محدودیت‌های امکانی را نشان می‌دهند. منطقا محدودیت‌ها باید با سطح اطمینان بزرگ‌تر از ۰/۵ ارضا شوند، یعنی $\alpha F, \alpha C, \alpha L, \alpha X > 0.5$ باشد. در این نوع رویکرد، مقدار نهایی به‌صورت ذهنی و تجربی حاصل می‌شود که رویکرد را با چالش‌هایی روبه‌رو می‌کند که عبارت‌اند از:

حمیدیه و میبدی/ تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات، دوره ۸، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۲، صفحه: ۶۰۸-۵۷۸

- افزایش تعداد محدودیت‌هایی که دربرگیرنده پارامترهای غیرقطعی هستند که سبب افزایش تعداد آزمایش‌های موردنیاز برای دستیابی به سطوح اطمینان مناسب می‌گردد.
- در پی بروز مشکل اول، زمان مصرفی برای پیدا کردن مقدار مطلوب سطوح اطمینان نیز افزایش می‌یابد. البته که هیچ تضمینی وجود ندارد که سطوح اطمینان نهایی انتخاب‌شده بهینه باشند.

مدل پیشنهادی نسبت به انحرافات و خطاهای تابع هدف از مقدار مورد انتظار حساس نیست و ریسک زیادی ایجاد می‌کند.

$$minz1 = G.D + A.E + K.N + B.O + R.S + U.P, \quad (۹۲)$$

$$s.t.$$

$$coz2: (\frac{f1+2f2+f3}{4})(eh.xhf + ej.xjf) + (\frac{c1+2c2+c3}{4})(ej(xgc + xac)) + (\frac{l1+2l2+l3}{4})(ej.xl) + (\frac{f1+2f2+f3}{4} + \frac{c1+2c2+c3}{4} + \frac{l1+2l2+l3}{4})(ej(xih + xhj) < \varepsilon = 61000,$$

$$co20: w > (((2\alpha F - 1)F3 - (2\alpha F + 2)F2) + ((2\alpha C - 1)C3 - (2\alpha C + 2)C2) + ((2\alpha L - 1)L3 - (2\alpha L + 2)L2)),$$

$$co31: R.xhj < \left((2\alpha X - 1)X1 + (2 - 2\alpha X)X2\right).N,$$

$$co33: xf > \left((2\alpha F - 1)F3 - (2\alpha F + 2)F2\right),$$

$$co34: xc > \left((2\alpha C - 1)C3 - (2\alpha C + 2)C2\right),$$

$$co35: xl > \left((2\alpha L - 1)L3 - (2\alpha L + 2)L2\right), \quad R, O, N \in \{0,1\}, xjf, xgc, xac, xih, xhj, xf, xc, xl, U \geq 0.$$

محدودیت‌های دیگر نیز به‌صورت قبل هستند.

فرموله‌سازی مدل برنامه‌ریزی استوار: یک جواب برای یک مساله بهینه‌سازی، در صورتی یک جواب استوار است که دارای استواری شدنی بودن و استواری بهینگی باشد. استواری شدنی بودن به این معناست که جواب باید برای تمام یا بیش‌تر حالات ممکن پارامترهای دارای عدم قطعیت، شدنی باقی بماند. استواری بهینگی نیز یعنی این‌که مقدار تابع هدف به ازای جواب استوار باید برای تمام یا بیش‌تر پارامترهای دارای عدم قطعیت، نزدیک به مقدار بهینه باشد یا حداقل انحراف را از مقدار بهینه خود داشته باشد. برای رفع مشکلات ذکرشده در قسمت قبل، مفهوم بهینه‌سازی استوار معرفی‌شده که درجه ریسک‌گریزی در شرایط عدم قطعیت را افزایش می‌دهد. مدل به این صورت ارایه می‌گردد:

$$MinE[Z] = G.D + A.E + K.N + B.O + R.S + U.P, \quad (۹۳)$$

$$+\tau\left(\left((F2 - (2 - 2\alpha F)F2 - (2\alpha F - 1)F3) + (C2 - (2 - 2\alpha C)C2 - (2\alpha C - 1)C3) + (L2 - (2 - 2\alpha L)L2 - (2\alpha L - 1)L3)\right)\right),$$

$$+\omega\left((2\alpha X - 1)X1 + (2 - 2\alpha X)X2 - X1\right).N,$$

$$+\varphi F(F2 - (2 - 2\alpha F)F2 - (2\alpha F - 1)F3)$$

$$+\varphi C(C2 - (2 - 2\alpha C)C2 - (2\alpha C - 1)C3)$$

$$+\varphi L(L2 - (2 - 2\alpha L)L2 - (2\alpha L - 1)L3),$$

$$coz2: (\frac{f1+2f2+f3}{4})(eh.xhf + ej.xjf) + (\frac{c1+2c2+c3}{4})(ej(xgc + xac)) + (\frac{l1+2l2+l3}{4})(ej.xl) + (\frac{f1+2f2+f3}{4} + \frac{c1+2c2+c3}{4} + \frac{l1+2l2+l3}{4})(ej(xih + xhj) < \varepsilon = 61000,$$

$$o20: w > (2\alpha F - 1)F3 - (2\alpha F + 2)F2 + (2\alpha C - 1)C3 - (2\alpha C + 2)C2 + (2\alpha L - 1)L3 - (2\alpha L + 2)L2$$

$$co31: R.xhj < \left((2\alpha X - 1)X1 + (2 - 2\alpha X)X2\right).N,$$

$$co33: xf > \left((2\alpha F - 1)F3 - (2\alpha F + 2)F2\right),$$

$$co34: xc > \left((2\alpha C - 1)C3 - (2\alpha C + 2)C2\right),$$

$$co35: xl > \left((2\alpha L - 1)L3 - (2\alpha L + 2)L2\right),$$

$$op, m, o \in \{0,1\}, xjf, xgc, xac, xih, xhj, xf, xc, xl, q \geq 0.$$

محدودیت‌های دیگر نیز به‌صورت قبل هستند.

عبارت اول مدل ارایه شده تابع هدف میانگین مورد انتظار هزینه کل را نشان می‌دهد. عبارت دوم تابع هدف استواری بهینگی را تبیین می‌کند که اختلاف بین حداکثر مقدار ممکن تابع هدف و متوسط مقدار آن را با ضریب اهمیت μ حداقل می‌سازد. درواقع این عبارت تغییرپذیری امکانی تعریف می‌شود. کاهش مقدار تغییرپذیری که با افزایش ضریب تغییرپذیری μ صورت می‌گیرد استواری بهینگی را افزایش می‌دهد. این مدل تضمین می‌کند که تابع هدف فقط به انحرافات مثبت (یعنی انحراف مربوط به مقادیر تابع هدف بیش‌تر از

مقدار متوسط آن) حساس است، بدون آن‌که انحرافات منفی را محدود کند، زیرا تحقق هزینه کل کم‌تر از مقدار متوسط آن برای تصمیم‌گیرنده مطلوب است. عبارات بعدی تابع هدف نیز استواری‌شدنی بودن جواب را کنترل می‌کنند. در این مدل برای محدودیت‌هایی که شامل یک یا چند پارامتر غیرقطعی باشند، متغیری تعریف می‌شود که مقدار تجاوز شده از مرز محدودیت را نشان می‌دهد. این عبور از حد محدودیت به علت عدم قطعیت پارامترهاست که مقادیر $\varphi f, \varphi c, \varphi l, \tau, \omega$ جریمه هر واحد نقض ممکن محدودیت‌های شانسی است که با توجه به مساله تعیین می‌شوند.

همان‌طور که در مدل‌بالا می‌بینیم ضرایب L، C و F در عبارت سوم و N در عبارت آخر دارای عدم قطعیت فازی بوده و مدل را به مدل غیرقطعی تبدیل می‌نمایند؛ لذا با تعریف متغیر جدید و اضافه نمودن به مدل، رویکرد برنامه‌ریزی خطی را پیش می‌بریم. به همین منظور متغیر زیر ارایه می‌شوند:

$$v = \alpha X.N. \qquad (94)$$

مدل معادله خطی مساله به‌صورت زیر است:

$$
\begin{gathered}
MinE[Z] = G.D + A.E + K.N + B.O + R.S + U.P, \qquad (95)\\
+\tau\Big(\big((F2 - (2 - 2\alpha F)F2 - (2\alpha F - 1)F3) + (C2 - (2 - 2\alpha C)C2 - (2\alpha C - 1)C3) + (L2 -\\
(2 - 2\alpha L)L2 - (2\alpha L - 1)L3)\big)\Big),\\
+\omega\big((2v - N)X1 + (2N - 2v)X2 - X1.N\big),\\
+\varphi F(F2 - (2 - 2\alpha F)F2 - (2\alpha F - 1)F3)\\
+ \varphi C(C2 - (2 - 2\alpha C)C2 - (2\alpha C - 1)C3)\\
+\varphi L(L2 - (2 - 2\alpha L)L2 - (2\alpha L - 1)L3),\\
\text{s.t. } coz2: (\tfrac{f1+2f2+f3}{4})(eh.xhf + ej.xjf) + (\tfrac{c1+2c2+c3}{4})(ej(xgc + xac)\,) + (\tfrac{l1+2l2+l3}{4})(ej.xl) + (\tfrac{f1+2f2+f3}{4} +\\
\tfrac{c1+2c2+c3}{4} + \tfrac{l1+2l2+l3}{4})(ej(xih + xhj) < \varepsilon = 61000,\\
co20: w > (((2\alpha F - 1)F3 - (2\alpha F + 2)F2) + ((2\alpha C - 1)C3\\
-(2\alpha C + 2)C2) + ((2\alpha L - 1)L3 - (2\alpha L + 2)L2)),\\
co31: R.xhj < \big((2V - N)X1 + (2N - 2V)X2 - X1.N\big),\\
co33: xf > \big((2\alpha F - 1)F3 - (2\alpha F + 2)F2\big),\\
co34: xc > \big((2\alpha C - 1)C3 - (2\alpha C + 2)C2\big),\\
co35: xl > \big((2\alpha L - 1)L3 - (2\alpha L + 2)L2\big),\\
new1: v \le E.N,\\
new2: v \le \alpha X,\\
new3: v \le E(N - 1) + \alpha X,\\
op, m, o \in \{0,1\}, xjf, xgc, xac, xih, xhj, xf, xc, xl, q \ge 0.
\end{gathered}
$$

محدودیت‌های دیگر نیز به‌صورت قبل هستند.

۴- یافته‌های پژوهش

در این بخش به‌منظور نمایش کاربردی بودن و ارزیابی کارایی مدل برنامه‌ریزی فازی احتمالی استوار از داده‌های زلزله کرمانشاه سال ۱۳۹۶ استفاده می‌کنیم. در شامگاه ۲۱ آبان سال ۱۳۹۶ در استان کرمانشاه زلزله ۷/۳ ریشتری به وقوع پیوست. در جریان این زلزله حدود ۶۰۰ نفر از هم‌وطنانمان جان خود را از دست دادند، قریب ۱۰۰۰ نفر مجروح و حدود ۷۰۰۰۰ نفر بی‌خانمان شدند. بیش‌ترین آمار کشته‌ها و زخمی‌ها از شهرهای قصر شیرین، سرپل ذهاب و ثلاث باباجانی گزارش شده‌اند. برای ارزیابی بهتر مدل و بررسی عملکرد آن در بحران‌های واقعی به شرایط زلزله کرمانشاه توجه کرده و از مقادیر پارامترهای نسبتا واقعی در مدل استفاده می‌شود. دو مورد از بندرها تجاری کشور، بندر عسلویه و بندر انزلی، به‌عنوان نقاط اصلی ورودی (ME) کمک‌های اولیه درنظر گرفته شدند. در کل ۳ هاب اصلی در کشور شامل کرمانشاه، همدان و تهران درنظر گرفته شد که هاب موجود در تهران قابلیت پایایی دارد.

حمیدیه و میبندی / تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات، دوره ۸، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۲، صفحه: ۵۷۸-۶۰۸

جدول ۲- تعداد وسایل حمل‌ونقل موجود در MEs.

Table 2- The number of means of transport available in MEs.

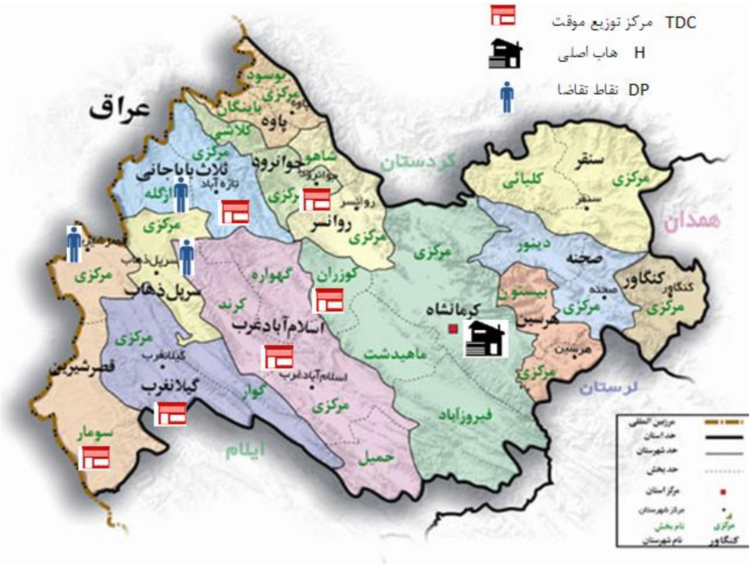
ME	بندر انزلی	بندر عسلویه
تعداد کامیون موجود در واحد ME	100	150

جدول ۳- معرفی مراکز هاب لجستیک منتخب.

Table 3- Introduction of selected logistics hub centers.

H	فاصله از بندر انزلی	فاصله از بندر عسلویه	تعداد کامیون موجود در واحد H	شعاع تحت پوشش هر هاب	ظرفیت ذخیره هر هاب
هاب تهران	۴۰۰ کیلومتر ۴ ساعت	۱۲۵۰ کیلومتر ۱۲/۵ ساعت	40	۶۰۰۰ کیلومتر	۱۵۰۰۰ تن
هاب همدان	۴۵۰ کیلومتر ۴/۵ ساعت	۱۳۰۰ کیلومتر ۱۳ ساعت	30	۴۰۰۰ کیلومتر	۱۳۰۰۰ تن
هاب کرمانشاه	۶۰۰ کیلومتر ۶ ساعت	۱۱۷۲ کیلومتر ۱/۵ ساعت	15	۲۰۰۰ کیلومتر	۱۰۰۰۰ تن

فاصله هر هاب از *MEs* و تعداد وسایل نقلیه موجود در هر هاب، هم‌چنین شعاع پوشش هر هاب و ظرفیت ذخیره‌سازی آن در **جدول‌های ۲** و **۳** آمده است. مکان‌های منتخب برای استقرار مراکز توزیع موقت حداکثر ۶ کاندید شامل سومار، گیلان غرب، اسلام‌آباد غرب، تازه‌آباد، جوانرود و کوزران می‌باشد. نقاط تقاضای منتخب برای مدل ما شامل سه لایه هستند: لایه اول کرند-لایه دوم سرپل ذهاب-لایه سوم قصر شیرین.



شکل ۳- نقاط منتخب برای برپایی مراکز توزیع موقت.

Figure 3- Selected points for establishing temporary distribution centers.

حل مدل ریاضی: برای حل مساله خطی عدد صحیح دوهدفه خطی، ابتدا برای تک‌هدفه کردن مدل، از الگوریتم محدودیت اپسیلون استفاده کردیم. این الگوریتم برای ارایه مجموعه‌ای از راه‌حل‌های بهینه پارتو در مسایل چندمنظوره مختلط چندهدفه در مقایسه با روش‌های جایگزین در ادبیات بسیار کارآمد است. نسخه آماده استفاده آن در بستر بهینه‌سازی *GAMS* موجود است. محدودیت اپسیلون بر اساس روش محدودیت شناخته‌شده ایجاد شده است که یکی از توابع هدف را با استفاده از توابع هدف باقی‌مانده به‌عنوان محدودیت و تغییر دادن سمت راست آن‌ها بهینه می‌کند. روش محدودیت اپسیلون شامل دو مرحله است: تولید جدول بازده و استفاده از محدوده‌های جدول بازده برای اعمال روش. بعدازآن تک‌هدفه کردن مدل از برنامه‌ریزی امکانی و بعدازآن استوار برای کاهش عدم قطعیت و بهینه‌سازی مدل استفاده کردیم. در پژوهش حاضر، مدل ریاضی *MILP* در شرایط عملیاتی و با استفاده از مجموعه‌ای از داده‌های واقعی بر روی رایانه‌ای با پردازنده *Core i3-2.4 GH* و *RAM 6GB* حل گردید. مدل برنامه‌ریزی امکانی-استوار متغیرهای تصمیم و سطوح تصمیم بیش‌تری به مدل اضافه کرد که پیچیدگی مدل را افزایش می‌داد اما خروجی‌ها نشان می‌دهد که مدل توسعه‌یافته

در زمان معقولی توسط نرم‌افزار بهینه‌سازی نسخه ۲۳/۰/۲ *GAMS* و حل‌کننده *CPLEX* حل گردید. به‌عبارت‌دیگر، زمان حل (*CPU Time*) مدل *MILP-Reliable* در ۰/۷۸ ثانیه و مدل برنامه‌ریزی امکانی-استوار در ۰/۸۱ ثانیه گزارش‌گیری شد. نتایج تایید می‌کند که مدل برنامه‌ریزی امکانی-استوار به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا تصمیمات ریسک‌گریز را اتخاذ نموده و سطح ریسک‌گریزی تصمیمات خروجی را بر اساس ترجیح خود تنظیم کنند. درنهایت مدل توسعه‌یافته برای موقعیت‌های بحرانی پیچیده جهت مقابله با ریسک‌های اختلال و تغییر الگوهای تقاضا کارا و موثر است. مدل حاوی ۴۷۸ خط معادله می‌باشد که شامل ۱۱ مجموعه، ۴۵ پارامتر، ۱۳ متغیر دودویی، ۱۱ متغیر پیوسته، ۸ متغیر عدد صحیح، ۲ تابع هدف و ۷۶ محدودیت است.

اعتبارسنجی مدل پیشنهادی: به‌منظور ارزیابی مدل و عملکرد و استوار بودن مدل و جواب‌های حاصله از آن، پارامترهای غیرقطعی مدل ۵ بار به‌طور تصادفی تولید می‌شوند و جواب‌های به‌دست‌آمده بررسی‌شده و مقدار انحراف استاندارد آن‌ها ارزیابی می‌شود. به‌منظور شبیه‌سازی شرایط واقعی، عدد فازی تصادفی را فرض کنید که پارامتر $\tilde{a} = (a_1, a_2, a_3)$ یک پارامتر غیرقطعی با تابع امکانی مثلثی است که برای واقعی‌سازی باید یک عدد تصادفی انتخاب‌شده و بین حد بالا و پایین قرار بگیرد ($a_{real} = [a_1, a_3]$). سپس متغیرهای مدل حاصل‌شده تحت هر سری از داده‌های تصادفی قرار داده می‌شوند. نتایج مدل برنامه‌ریزی امکانی[1] با مدل برنامه‌ریزی استوار[2] به‌همراه میانگین و انحراف استاندارد مقادیر تابع هدف اول به‌دست‌آمده از داده‌های تصادفی مقایسه می‌شود.

در مدل پیشنهادی، تقاضاها و ظرفیت *TDC* و هزینه‌های تاسیس *TDC* متغیرهایی هستند که تحت تولید تصادفی قرار می‌گیرند. نتایج این مدل تحت دو سطح اطمینان (۰/۵ و ۱) در مدل پیشنهادی اولیه و ضرایب بهینگی (۰/۵ و ۵ و ۱۰) در مدل استوار بررسی می‌شود که در **جدول‌های ۴** و **۵** ارایه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل با ضرایب بهینگی ۱۰ دارای حداقل انحراف استاندارد و هم‌زمان دارای یک میانگین قابل‌قبول در مقایسه با سایر مدل‌هاست. نتایج نشان می‌دهد که مدل استوار برتری مشخصی به مدل امکانی اولیه دارد و می‌تواند زنجیره‌تامین پایا را کنترل کند.

جدول ۴- مقادیر تصادفی پارامترهای غیرقطعی تحت ۵ بار آزمایش تصادفی.

Table 4- Random values of non-deterministic parameters under 5 times of random testing.

شماره آزمایش	پارامترهای غیرقطعی			
	F	**C**	**L**	**X**
1	8	20	10	4
2	10	15	12	1
3	20	30	24	2
4	30	50	45	3
5	100	150	120	6

جدول ۵- عملکرد مدل FP و RP تحت ۵ بار آزمایش و مقدار تابع هدف اول (مجموع هزینه‌ها).

Table 5- FP and RP model performance under 5 times of testing and the value of the first objective function (total costs).

آزمایش‌ها	**FP** αF, αC, αL, αX =0.75	**FP** αF, αC, αL, αX =1	**RP** φf, φc, φl, τ, ω = 0.5	**RP** φf, φc, φl, τ, ω = 5	**RP** φf, φc, φl, τ, ω = 10
1	2, 253, 321, 000	2, 086, 602, 000	1, 242, 191, 000	1, 244,293, 000	1, 168, 235, 000
2	2, 237, 650, 000	1, 973, 203, 000	1, 040, 345, 000	1, 064, 748, 000	1, 140, 263, 000
3	2, 375, 100, 000	2, 702, 200, 000	1, 332, 095, 000	1, 384, 660, 000	1, 304, 798, 000
4	2, 538, 250, 000	2, 258, 402, 000	1, 320, 857, 000	1, 176, 421, 000	1, 321, 003, 000
5	2, 253, 321, 000	2, 086, 602, 000	1, 241, 764, 000	1, 240, 016, 000	1, 159, 681, 000
متوسط هزینه	2, 331, 528, 400	2, 221, 401, 800	1, 235, 450, 400	1, 221, 967, 600	1, 218, 796, 000
انحراف استاندارد	128138843.7	287437184.6	117031919.1	116310896.5	86690606.31

برای بررسی بهتر عملکرد مدل، مراکز باز و قابل‌استفاده را در ۵ سطح اطمینان پارامترهای غیرقطعی بررسی می‌کنیم. همان‌طور که در **جدول ۶** مشخص است، با افزایش سطح اطمینان تعداد مراکز هاب و مراکز توزیع موقت باز و در دسترس برای کمک‌رسانی افزایش می‌یابد و توان کلی سیستم بالا می‌رود؛ به‌عبارتی با افزایش سطح اطمینان می‌توان از ظرفیت بیش‌تری از سیستم استفاده کرد.

[1] Feasibility Planning (FP)

[2] Robust Planning (RP)

جدول ۶- امکانات و مراکز بازشده شبکه تحت سطح اطمینان متفاوت.

Table 6- Opened network facilities and centers under different confidence levels.

سطوح اطمینان	تعداد ME باز		تعداد H باز		تعداد TDC باز	
	سناریو اول	سناریو دوم	سناریو اول	سناریو دوم	سناریو اول	سناریو دوم
αF, αC, αL, αJ=0.55	2	2	1	0	1	0
αF, αC, αL, αJ=0.65	2	2	1	0	1	1
αF, αC, αL, αJ=0.75	2	2	1	1	2	0
αF, αC, αL, αJ=0.85	2	2	2	1	2	1
αF, αC, αL, αJ=0.95	2	2	2	2	2	1

با توجه به **جدول ۷** مشاهده می‌کنیم که میزان تابع هدف اول در مدل امکانی نسبت به مدل اولیه بهینه‌تر و کاهش چشمگیری داشته و در مدل امکانی استواری مقدار تابع هدف در بهینه‌ترین حالت ممکن است. پس می‌توان نتیجه گرفت که مدل امکانی استوار در این مدل کارایی بیش‌تری از مدل امکانی و مدل اولیه دارد. در ادامه این بخش با تغییرات پارامترهای مختلف به بررسی میزان استواری بهینگی این مدل می‌پردازیم.

جدول ۷- بررسی عملکرد مدل اولیه، مدل امکانی،مدل امکانی-استوار.

Table 7- Checking the performance of the initial model, possible model, and possible model–stable.

	مدل اولیه	مدل امکانی	مدل امکانی استوار
		αF, αC, αL, αX=0.75	τ, ω, φF, φC, φL = 2
تابع هدف اول	452, 040, 000	2, 253, 321, 000	2, 217, 021, 000

جدول ۸ تحلیل حساسیت پارامتر تقاضا لایه اول بر روی مدل امکانی استوار را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، با افزایش میزان تقاضا در نقطه بحران‌زده لایه اول تابع هدف امکانی استوار افزایش می‌یابد؛ این افزایش در مدل اولیه بسیار محسوس‌تر از مدل امکانی استوار است به‌طوری‌که در مدل اولیه بین بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار تقاضای ممکن حدود ٪۰٫۰۰۴۲ افزایش هزینه داریم ولی این مقدار در مدل استوار به ٪۰٫۰۰۰۳۴ می‌رسد که نشان‌دهنده بهینگی و کارایی بالا مدل استوار در تغییرات است.

جدول ۸- تحلیل حساسیت پارامتر تقاضا لایه اول بر روی مدل امکانی استوار.

Table 8- Sensitivity analysis of the demand parameter of the first layer based on the probabilistic model.

میزان تقاضا لایه اول = (a_1, a_2, a_3)	(100, 400, 1000)	(300, 700, 1300)	(500, 900, 1500)	(1000, 1400, 1900)
تابع هدف اول امکانی استوار	9E+1.168421	9E+1.168422	9E+1.168423	9E+1.168424
تابع هدف اول مدل اولیه	9E+2.377500	9E+2.307553	9E+2.377504	9E+2.37751

جدول ۹ به بررسی تحلیل حساسیت ظرفیت *TDC* بر روی مدل امکانی استوار و مقایسه آن با مدل اولیه می‌پردازد. در این جدول مشاهده می‌کنیم که در هر دو مدل هم‌زمان با افزایش ظرفیت‌ها با کاهش مقدار تابع هدف مواجه هستیم. شایان‌ذکر است که برخلاف سه پارامتر قبلی که بررسی شد و مدل استوار کارکرد بهتری از خود نشان داد، در برابر این پارامتر تابع هدف اولیه کارکرد بهتری دارد و مدل امکانی استوار با کاهش کم‌تر هزینه‌ها روبه‌رو است.

جدول ۹- تحلیل حساسیت پارامتر ظرفیت TDC بر روی مدل امکانی استوار.

Table 9- Sensitivity analysis of TDC capacity parameter based on the probabilistic model.

ظرفیت TDC= (a_1, a_2, a_3)	(40, 200, 400)	(400, 2000, 4000)	(40000, 200000, 400000)
تابع هدف اول امکانی استوار	9E+1.171647	9E+1.168423	9E+0.168051
تابع هدف اول مدل اولیه	9E+2.664700	9E+2.375100	9E+2.101104

جدول ۱۰ به تحلیل حساسیت پارامتر حداکثر تعداد *TDC* ممکن می‌پردازد. در مدل استوار مشاهده می‌کنیم که با افزایش تعداد *TDCs*، برخلاف انتظار ما هزینه‌ها کاهش می‌یابد که می‌تواند به دلیل کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل از *TDCs* به نقاط تقاضا و کاهش فاصله حمل‌ونقل بین مراکز می‌شود؛ اما در مدل اولیه شاهد افزایش هزینه‌ها هستیم. این افزایش هزینه در مدل اولیه و کاهش هزینه در مدل استوار بیان می‌کند که مدل استوار نسبت به هزینه‌های ذخیره و ایجاد *TDCs* پایداری و کارایی بیش‌تری دارد و تغییرات این پارامتر در مدل اولیه به‌شدت باعث افزایش هزینه‌ها می‌شود.

جدول ۱۰- تحلیل حساسیت پارامتر حداکثر تعداد ممکن TDC.

Table 10- Parameter sensitivity analysis of the maximum possible number of TDC.

حداکثر تعداد TDC	2	3	4	5	6
تابع هدف اول امکانی استوار	000, 375, 200, 1	000, 407, 184, 1	000, 407, 176, 1	000, 407, 176, 1	000, 423, 168, 1
تابع هدف اول مدل اولیه	000, 721, 174, 2	000, 900, 251, 2	000, 327, 265, 2	000, 741, 554, 2	000, 500, 377, 2

۵- بحث و نتیجه‌گیری

در طول سال‌های اخیر، وقوع بحران‌ها و اتفاقات غیرمترقبه و مقابله با آن‌ها چالشی بزرگ برای مدیران و برنامه‌ریزان بحران بود و به همین علت طراحی شبکه‌های زنجیره‌تامین می‌تواند باعث به‌وجود آمدن نتایج مثبت بلندمدت و بروز تصمیمات باکیفیت بیش‌تر و کارایی بالاتر شود. برای مواجهه با این مشکل، یک مدل امکانی استوار پایا مبتنی بر سناریو در این مقاله ارایه شده است. پژوهش حاضر به لحاظ هدف از نوع کاربردی است که با استفاده از روش توصیفی تحلیلی صورت گرفته است. در این پژوهش ابتدا با استفاده از مطالعات کتابخانه‌ای و بهره‌گیری از نظرات کارشناسان و متخصصین امر در زمینه مدیریت بحران، عوامل و پارامترهای موثر در مکان‌یابی مراکز امدادرسانی در هنگام وقوع بحران شناسایی شد. سپس مدل‌سازی ریاضی مساله بحران زلزله و امدادرسانی با توجه به اطلاعات موجود نوشته شد و مدل امکانی-استوار در برنامه *GAMS* وارد و نتایج محاسباتی به‌دست آمد. سپس با تحلیل نتایج میزان کارآمد بودن نتایج بررسی شد. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، این مدل‌سازی، اولین مدل زنجیره‌تامین بشردوستانه پایا به‌صورت سناریومحور است که با تقسیم‌بندی توپوگرافی منطقه به ۳ لایه باعث دسترسی سریع‌تر و آسان‌تر به نقاط بحران‌زده شده است. ساختار شبکه به این صورت است که اقلام امدادی از نقاط ورودی اصلی *ME* وارد کشور شده و به هاب‌های لجستیک برای ذخیره منتقل می‌شوند که این هاب‌ها به دو دسته هاب پایا و غیر پایا طبقه‌بندی می‌شوند. هاب پایا یا اصلی مزایای قابل‌توجهی نسبت به هاب‌های غیر پایا دارد و در صورت بروز اختلال در شبکه مقاوم است؛ هاب پایا با هزینه تاسیس و ذخیره بیش‌تر ساخته می‌شود اما در هنگام بروز اختلال در شبکه به هر دلیلی، زنجیره‌تامین را حفظ می‌کند و سبب می‌شود در انتقال کالا خللی به‌وجود نیاید. در صورت بروز بحران، مراکز توزیع موقت *TDC* در محل‌های نزدیک به نقاط بحران‌زده برپا می‌شوند و اقلام امدادی از هاب‌ها به *TDCs* توسط حمل‌ونقل زمینی منتقل‌شده و پس‌ازآن با توجه به توپوگرافی منطقه از *TDCs* به نقاط تقاضا با حمل‌ونقل زمینی یا هوایی منتقل می‌شود. در قسمت مرتبط با حمل‌ونقل، فاصله مراکز، زمان موردنیاز برای انتقال بین نقاط، انواع و تعداد وسایل حمل‌ونقل در هر مرکز و ظرفیت هر حمل‌ونقل درنظر گرفته شده است. بسته به توپوگرافی منطقه آسیب‌دیده، مکان‌های موجود در شبکه توزیع امداد برای دسترسی راحت‌تر و سریع‌تر به سه لایه تقسیم شد؛ لایه اول که توسط *TDC* و هاب‌ها از راه حمل‌ونقل زمینی قابل‌دسترسی است، لایه دوم که تقاضای آن توسط *TDCs* از راه حمل‌ونقل زمینی و هوایی تامین می‌شود و لایه سوم که به دلیل صعب‌العبور بودن مسیر تنها با حمل‌ونقل هوایی از *TDCs* می‌توان به آن رسید. در شبکه زنجیره‌تامین امدادی بشردوستانه پایای این مقاله، تابع هدف اول مربوط به هزینه‌ها است که شامل تسهیلات، کارگر، ساخت و تجهیز مراکز هاب و مراکز موقت توزیع، هزینه ذخیره‌سازی و انتقال، جریمه خواسته‌های برآورده نشده، حمل‌ونقل، مواد اولیه و موجودی‌ها می‌باشد. این مطالعه به مکان‌یابی مراکز توزیع موقت امداد با درنظرگرفتن محدودیت‌ها و مشخصات جغرافیایی فاجعه می‌پردازد. در این مقاله با درنظر گرفتن پایا بودن برخی مراکز هاب لجستیک دو سناریو تعریف می‌شود. سناریو اول قبل از ایجاد اختلال در سیستم کمک‌رسانی و سناریو دوم بعد از ایجاد اختلال در سیستم که تنها مراکز هاب پایا در سناریو دوم فعال هستند. این رویکرد با چندلایه درنظر گرفتن نقاط تقاضا بر اساس فاصله نقطه تقاضا از هاب اصلی از پیچیدگی‌های مساله می‌کاهد. هم‌چنین با توجه به اهمیت بحث اختلالات در تامین‌کنندگان و احتمال بروز اختلال در سطح شبکه، تابع هدفی تحت عنوان قابلیت اطمینان برای پایا بودن مدل پیشنهادی درنظر گرفتیم که در شرایط بحرانی و اختلال در شبکه پاسخگویی موثری داشته باشد. بعد از توابع هدف ذکرشده به بررسی بیش‌تر محدودیت‌های ظرفیت، فاصله، زمان، حمل‌ونقل، پایایی و... پرداخته شده است و بعدازآن از روش حل امکانی-استوار استفاده شده است. با توجه به این‌که مدل پیشنهادی دوهدفه است، ابتدا با استفاده از محدودیت اپسیلون مدل را تک تابع هدفه کردیم که در این روش تابع هدف اول به‌عنوان تابع هدف اصلی مساله برای روش محدودیت اپسیلون انتخاب شده است، سپس با استفاده از روش امکانی-استوار به حل مدل پرداختیم و بعدازآن تحلیل حساسیت‌های لازم روی مدل اجرا شد. تابع هدف هزینه، اولین و مهم‌ترین تابع هدف مدل‌سازی این مطالعه است که به بررسی تحلیل‌های انجام‌شده دراین‌باره می‌پردازیم. بر اساس تحلیل حساسیت‌ها مقدار تابع هدف اول نسبت به ضرایب سطح اطمینان روند کاهشی داشته است اما نسبت به ضرایب استوار بهینگی تغییرات نامنظمی داشته است به‌طوری‌که ابتدا با افزایش ضرایب سطح اطمینان، مقدار تابع هدف در بازه ۰ تا ۱ کاهش داشته، بعد در نقطه یک و نیم افزایش ناگهانی تابع هدف اول همراه با افزایش ضرایب استوار بهینگی را خواهیم داشت و دوباره در بازه یک و نیم تا ۲ کاهش و

در ۶ دوباره افزایش ناگهانی و به همین منوال شاهد کاهش و افزایش متوالی هستیم. بر اساس تحلیل حساسیت‌های انجام‌شده مقادیر سطح اطمینان با مقدار ۰٫۷۵، ضرایب استوار بهینگی با مقدار ۲، تعداد ۲ هاب لجستیک در منطقه، حداکثر تعداد *TDC* باز ۶ عدد و با توجه به مقادیر اعلام‌شده و درنهایت میانگین هزینه برای کمک‌رسانی به مناطق آسیب‌دیده برابر با ۱۱۶۸۴۰۷۰۰۰ می‌باشد که مقدار قابل‌توجهی است. با بررسی‌های انجام‌شده و تحلیل‌های حساسیت، ظرفیت ورودی اصلی حدود ۵۰۰ تن ظرفیت هاب ۲۵۰ تن و ظرفیت *TDCs* به ترتیب از *TDC* شماره ۱ تا ۶ به این صورت است: ۶٫۵، ۱۰، ۱۰، ۱۰، ۵ و ۲۰ تن. نتایج به‌دست‌آمده از حل مدل ارایه‌شده در **جدول ۱۱** قابل مشاهده است.

جدول ۱۱- تعداد مراکز توزیع و ذخیره باز در حین عملیات.

Table 11- The number of open distribution and storage centers during operation.

	سناریو اول	سناریو دوم
تعداد TDCs باز	1 J4	2 J5, J4
تعداد MEs مورداستفاده	2	2
تعداد هاب‌های پایا	2	2
تعداد هاب‌های غیر پایا	0	0

در **جدول ۱۲** نتایج جریان‌های بین مراکز و نقاط تقاضا را می‌بینیم. در سناریو اول جریان کالا از نقطه ورودی اول یعنی بندر انزلی به هاب شماره ۲ و ۱ برقرار است. جریان کلا بین هاب دوم یعنی هاب کرمانشاه و نقطه تقاضا لایه اول (*F*) برقرار است. جریان بین *TDC* شماره ۴ که باز است با هاب شماره یک برقرار بوده و تامین کالای *TDC* از این هاب انجام می‌شود. جریان بین *TDC* و نقطه تقاضا لایه اول دیگر صورت نمی‌گیرد چراکه این مکان بحران‌زده از طریق هاب شماره دو تامین می‌شود. هم‌چنین جریان زمینی بین *TDC* و نقطه تقاضا لایه دوم برقرار نیست چراکه این جریان از طریق حمل‌ونقل هوایی به‌صرفه‌تر است و از آن طریق انجام می‌شود. در آخر جریان بین مرکز توزیع موقت شماره ۴ و نقطه آسیب‌دیده لایه سوم به‌صورت حمل‌ونقل هوایی برقرار خواهد بود. در سناریو دوم یا همان بدبینانه اعداد متفاوت است. جریان کالا بین *ME* و هاب از ورودی شماره ۱ به هاب شماره ۲ خواهد بود و ورودی شماره ۲ و هاب شماره ۱ فعالیتی در این سناریو نخواهند داشت. جریان کالا از هاب فقط به دو *TDC* می‌رسد و نقطه تقاضا لایه اول فقط از طریق مراکز توزیع موقت تامین کالا می‌کند. جریان کالا به نقطه تقاضا لایه دوم به‌صورت زمینی و از مرکز توزیع شماره ۴ صورت می‌گیرد. هم‌چنین نقطه تقاضا لایه سوم به‌صورت هوایی از مرکز توزیع موقت شماره ۵ تامین می‌شود.

جدول ۱۲- بررسی جریان‌های بین مراکز و نقاط تقاضا.

Table 12- Review of flows between centers and demand points.

	سناریو اول	سناریو دوم
برقراری جریان کالا بین ME و H	از I1 به H2 از I2 به H1	از I1 به H2
برقراری جریان کالا بین H و لایه اول	از H2 به F	
برقراری جریان کالا بین H و TDC	از H1 به J4	از H2 به J5,J4
برقراری جریان کالا بین TDC و لایه اول به‌صورت زمینی		از J4 به F از J5 به F
برقراری جریان کالا بین TDC و لایه دوم به‌صورت زمینی		از J4 به C
برقراری جریان کالا بین TDC و لایه دوم به‌صورت هوایی	از J4 به C	
برقراری جریان کالا بین TDCو لایه سوم به‌صورت هوایی	از J4 به L	ازJ5 به L

نتایج موجودی کالا در مراکز و مقدار کالای انتقال‌یافته از مراکز را در **جدول ۱۳** مشاهده می‌کنیم. سناریو اول به این صورت است که موجودی کالا در مراکز توزیع موقت در انتهای عملیات امدادرسانی برابر ۴ تن است. مقدار کالای انتقالی از *ME* به هاب لجستیک به این صورت است که نقطه ورودی اول (انزلی) به هاب شماره دو (کرمانشاه) ۹۰۰ تن کالا انتقال می‌دهد و نقطه ورودی اصلی شماره ۲ (بندرعباس) به هاب شماره ۱ تهران نیز ۹۰۰ تن کالا منتقل می‌کند. هاب شماره یک به *TDC* شماره چهار، ۴ تن کالا و هاب شماره دو ۸ تن کالا انتقال می‌دهد. هم‌چنین هر دو هاب مقدار ۲ تن کالا را برای نقطه تقاضا شماره ۱ تامین می‌کند. به این صورت هیچ انتقالی از مرکز توزیع موقت به‌صورت زمینی به نقطه تقاضا لایه اول و دوم نخواهیم داشت و بعدازآن مرکز توزیع موقت با حمل‌ونقل هوایی

مقدار ۶ و ۷ تن کالا به نقطه آسیب‌دیده لایه دوم و سوم حمل می‌کند. در سناریو دوم موجودی کالا در انتهای عملیات ۴ تن و کالای انتقالی از ورودی‌های اصلی ۱۰۰۰ تن از ورودی اول به هاب دوم و ۵۰۰ تن از ورودی دوم به هاب اول خواهد بود. هم‌چنین هاب شماره ۱ ۴ تن کالا به هرکدام از مراکز توزیع موقت باز ارسال می‌کند و هاب شماره ۲ به هرکدام ۸ تن کالا می‌فرستد. در این سناریو انتقال کالا از هاب به نقطه تقاضا لایه اول نخواهیم داشت پس لایه اول توسط مراکز شماره ۴ و ۵ به ترتیب با ۲ و ۱ تن کالا تامین شده و کالای موردتقاضا لایه دوم از طریق حمل‌ونقل زمینی توسط مرکز توزیع موقت شماره ۴ ارسال می‌شود. لایه سوم با حمل‌ونقل هوایی از مرکز توزیع شماره ۵ تامین می‌شود. در هر دو سناریو مقدار کالای تامین نشده هر سه لایه برابر صفر خواهد بود، به این معنا که هم در سناریو خوش‌بینانه و هم در سناریو بدبینانه تقاضا نقاط بحران برآورده می‌شود.

حمیدیه و میمندی/ تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات، دوره ۸، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۲، صفحه: ۶۰۸-۵۷۸

جدول ۱۳- بررسی موجودی کالا و مقدار کالای انتقالی مراکز.
Table 13- Checking the stock of goods and the amount of transferred goods of the centers.

	سناریو اول	سناریو دوم
موجودی کالا در TDC در انتهای عملیات	J4=2	J5,J4=4
مقدار کالای انتقالی از ME به H	از I1 به H2=900 از I2 به H1=900	از I1 به H2=1000 از I2 به H1=500
مقدار کالای انتقالی از H به TDC	h1.j4=4 h2.j4=8	h1.j5=4 h1.j4=4 h2.j5=8 h2.j4=8
مقدار کالای انتقالی از H به لایه اول	2.000	
مقدار کالای انتقالی از TDC به لایه اول به‌صورت زمینی		J5.f1=2.000 j4.f1=1.000
مقدار کالای انتقالی از TDC به لایه دوم به‌صورت زمینی		j4.c1=6.000
مقدار کالای انتقالی از TDC به لایه دوم به‌صورت هوایی	j4.c1=6.000	
مقدار کالای انتقالی از TDC به لایه سوم به‌صورت هوایی	j4.l1=7.000	J5.l1= 7.000
مقدار کالای تامین نشده لایه اول	0	0
مقدار کالای تامین نشده لایه دوم	0	0
مقدار کالای تامین نشده لایه سوم	0	0

نتایج مربوط به حمل‌ونقل بین مراکز و گره‌ها در **جدول ۱۴** ارایه شده است. در سناریو اول تعداد حمل‌ونقل از نقطه ورودی اصلی به هاب‌ها به این صورت است که از ورودی شماره ۱ به هاب شماره ۲ حدود ۲۲ جابه‌جایی و از ورودی شماره ۲ به هاب شماره یک ۸ جابه‌جایی داریم. تعداد حمل‌ونقل از هاب شماره ۱ و ۲ به مرکز توزیع موقت فعال به ترتیب ۴ و ۸ خواهد بود. هاب شماره ۲ دارای ۲ حمل‌ونقل به نقطه تقاضا لایه اول جهت تامین کالا خواهد داشت و مرکز توزیع موقت حمل‌ونقلی به لایه اول و دوم ندارد. حمل‌ونقل هوایی از مرکز توزیع موقت به لایه دوم و سوم به ترتیب به تعداد ۴ و ۱ انجام می‌گیرد. در سناریو دوم مشاهده می‌کنیم که انتقال کالا از نقطه ورودی اصلی به هاب شماره ۲ توسط ۳۱ حمل‌ونقل انجام‌شده و هاب شماره ۲ به هر مرکز توزیع موقت فعال ۸ حمل‌ونقل انجام می‌دهد. مراکز توزیع موقت ۴ و ۵ به ترتیب دارای ۱ و ۲ حمل‌ونقل به لایه اول خواهند بود و تامین کالای لایه دوم به‌صورت زمینی با ۱ حمل‌ونقل از مرکز توزیع موقت شماره ۵ و ۲ حمل‌ونقل از مرکز توزیع موقت شماره ۴ صورت می‌گیرد. هم‌چنین در حمل‌ونقل هوایی تامین کالای لایه سوم هر مرکز یک پرواز به لایه سوم خواهند داشت.

جدول ۱۴- تعداد حمل‌ونقل بین مراکز و نقاط تقاضا.
Table 14- Number of transportation between centers and demand points.

	سناریو اول	سناریو دوم
تعداد حمل‌ونقل ME به H	I1.h2=22 I2.h1=8	I1.h2=31
تعداد حمل‌ونقل H به TDC	H1.j4=4 H2.j4=8	H2.j5=8 H2.j4=8
تعداد حمل‌ونقل از H به لایه اول	H2.f=2	
تعداد حمل‌ونقل از TDC به لایه اول به‌صورت زمینی		J5.f=2 j4.f=1
تعداد حمل‌ونقل از TDC به لایه دوم به‌صورت زمینی		J5.c=1 j4.c=2
تعداد حمل‌ونقل از TDC به لایه دوم به‌صورت هوایی	j4.c=4	
تعداد حمل‌ونقل از TDC به لایه سوم به‌صورت هوایی	j4.l=1	J5.l=1 j4.l=1

نتایج این مطالعه نشان داد که تصمیمات مکان‌یابی مراکز توزیع امدادی تاثیر زیادی بر کارایی و پاسخ به‌هنگام به تقاضای کمک دارد. ایجاد موازنه بین زمان پاسخ و هزینه‌های لجستیک مستلزم تجزیه‌وتحلیل دقیق مبادله اقلام به دلیل ماهیت متناقض اهداف مدل است. مدل پژوهش حاضر می‌تواند علاوه بر این‌که عملکرد عملیات امدادی قبلی را بررسی کند، به‌عنوان یک سیستم پشتیبان تصمیم در بحران‌های آینده به کار گرفته شود.

منابع

[1] Bastian, N. D., Griffin, P. M., Spero, E., & Fulton, L. V. (2016). Multi-criteria logistics modeling for military humanitarian assistance and disaster relief aerial delivery operations. *Optimization letters*, *10*, 921–953.

[2] Baharmand, H., Comes, T., & Lauras, M. (2019). Bi-objective multi-layer location--allocation model for the immediate aftermath of sudden-onset disasters. *Transportation research part E: logistics and transportation review*, *127*, 86–110.

[3] Yu, W. (2020). Reachability guarantee based model for pre-positioning of emergency facilities under uncertain disaster damages. *International journal of disaster risk reduction*, *42*, 101335. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212420919305783

[4] Boonmee, C., Arimura, M., & Asada, T. (2017). Facility location optimization model for emergency humanitarian logistics. *International journal of disaster risk reduction*, *24*, 485–498.

[5] Taghipour, Z., Tashemi, F., & Jabal Ameli, M. S. (2019). Presenting the humanitarian supply chain location-allocation model for the evacuation of crisis victims. *The 12th international conference of the Iranian association for operations research*. Babolsar, Iran. Civilica. (**In Persian**). https://civilica.com/doc/923491

[6] Weiss Moradi, F., & Yazdani, M. H. (2020). An analysis of the most effective indicators of locating temporary housing in a case study of kermanshah city. *The second conference of urban management, and urban planning and architecture with the approach of economics and urban development*. Tabriz, Iran. Civilica. (**In Persian**). https://civilica.com/doc/1114984

[7] Faraji Sabokbar, H. A., Mahdi, M., Aghataher, R., Taghizadeh Ghalejuqi, S., & Rahimi, S. (2016). Designing an emergency response system for managing the natural disasters (earthquakes) using telegeoinformatics. *Scientific-research quarterly of geographical data*, *25*(97), 15-28. (**In Persian**). DOI: 10.22131/sepehr.2016.20133

[8] Rawls, C. G., & Turnquist, M. A. (2010). Pre-positioning of emergency supplies for disaster response. *Transportation research part B: methodological*, *44*(4), 521–534.

[9] Murali, P., Ordóñez, F., & Dessouky, M. M. (2012). Facility location under demand uncertainty: response to a large-scale bio-terror attack. *Socio-economic planning sciences*, *46*(1), 78–87.

[10] Döyen, A., Aras, N., & Barbarosouglu, G. (2012). A two-echelon stochastic facility location model for humanitarian relief logistics. *Optimization letters*, *6*, 1123–1145.

[11] Bozorgi Amiri, A., Jabalameli, M. S., & Mirzapour Al-Hashem, S. M. J. (2013). A multi-objective robust stochastic programming model for disaster relief logistics under uncertainty. *OR spectrum*, *35*, 905–933.

[12] Paul, J. A., & Hariharan, G. (2012). Location-allocation planning of stockpiles for effective disaster mitigation. *Annals of operations research*, *196*, 469–490.

[13] Saffari, D., Aghaie, A., & Roghanian, E. (2018). Multi-layer location-allocation model within queuing networks framework. *Journal of industrial engineering research in production systems*, *6*(12), 49-61. (**In Persian**). DOI: 10.22084/ier.2018.13378.1606

[14] Snyder, L. V, & Daskin, M. S. (2005). Reliability models for facility location: the expected failure cost case. *Transportation science*, *39*(3), 400–416.

[15] Albareda Sambola, M., Landete, M., Monge, J. F., & Sainz Pardo, J. L. (2017). Introducing capacities in the location of unreliable facilities. *European journal of operational research*, *259*(1), 175–188.

[16] Cui, T., Ouyang, Y., & Shen, Z.-J. M. (2010). Reliable facility location design under the risk of disruptions. *Operations research*, *58*(4-part-1), 998–1011.

[17] Fazli Khalaf, M., Chaharsooghi, S. K., & Pishvaee, M. S. (2015). A reliable closed-loop supply chain network design under uncertainty: A case study of a lead-acid battery manufacturer. *Journal of modeling in engineering*, *12*(39), 45-60. (**In Persian**). https://modelling.semnan.ac.ir/article_1690.html

[18] Li, X., Ouyang, Y., & Peng, F. (2013). A supporting station model for reliable infrastructure location design under interdependent disruptions. *Procedia-social and behavioral sciences*, *80*, 25-40.

[19] Lu, C. C., & Sheu, J. B. (2013). Robust vertex p-center model for locating urgent relief distribution centers. *Computers & operations research*, *40*(8), 2128–2137.

[20] Xie, S., Li, X., & Ouyang, Y. (2015). Decomposition of general facility disruption correlations via augmentation of virtual supporting stations. *Transportation research part b: methodological*, *80*, 64–81.

[21] Xie, S., An, K., & Ouyang, Y. (2019). Planning facility location under generally correlated facility disruptions: Use of supporting stations and quasi-probabilities. *Transportation research part B: methodological*, *122*, 115–139.

[22] Yahyaei, M., & Bozorgi Amiri, A. (2019). Robust reliable humanitarian relief network design: an integration of shelter and supply facility location. *Annals of operations research*, *283*(1–2), 897–916.

[23] Ahmadi, M., Seifi, A., & Tootooni, B. (2015). A humanitarian logistics model for disaster relief operation considering network failure and standard relief time: A case study on San Francisco district. *Transportation research part E: logistics and transportation review*, *75*, 145–163.

[24] Salman, F. S., & Yücel, E. (2015). Emergency facility location under random network damage: Insights from the Istanbul case. *Computers & operations research*, *62*, 266–281.

[25] Hassin, R., Ravi, R., & Salman, F. S. (2017). Multiple facility location on a network with linear reliability order of edges. *Journal of combinatorial optimization*, *34*, 931–955.

[26] Ghomi, M., Jalalinaeeni, S. G., Tavakoli Moghadam, R., & Jabbarzadeh, A. (2016). Closed loop supply chain network design under disturbance and uncertainty conditions considering quality and resilience strategy. *Journal of quality engineering and management*, *6*(2), 133-145. (**In Persian**). https://www.pqprc.ir/article_55873.html

[27] Ortuño, M. T., Cristóbal, P., Ferrer, J. M., Martin-Campo, F. J., Muñoz, S., Tirado, G., & Vitoriano, B. (2013). Decision aid models and systems for humanitarian logistics. A survey. In *Decision aid models for disaster management and emergencies* (pp. 17–44). Springer. https://doi.org/10.2991/978-94-91216-74-9_2

[28] Salmerón, J., & Apte, A. (2010). Stochastic optimization for natural disaster asset prepositioning. *Production and operations management*, *19*(5), 561–574.

[29] Park, S. (2007). *A multi-objective decision-making model for resources allocation in humanitarian relief* (Master Thesis, Air University of Korea). https://scholar.afit.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4089&context=etd

[30] Hamidieh, A., Arshadi Khamseh, A., & Naderi, B. (2018). A new combination of robust-possibilistic mathematical programming for resilient supply chain network under disruptions and uncertainty: a real supply chain (research note). *International journal of engineering*, *31*(4), 612-621. (**In Persian**). https://www.sid.ir/paper/515677/fa

[31] Kalantari, M., & Pishvaee, M. S. (2016). A robust possibilistic programming approach to drug supply chain master planning. *Journal of industrial engineering research in production systems*, *4*(7), 49-67. (**In Persian**). DOI: 10.22084/ier.2016.1568

[32] Farrokh, M., Azar, A., & Jandaghi, G. (2016). A novel robust fuzzy programming approach for closed loop supply chain design. *Modern research in decision making*, *1*(3), 131-160. (**In Persian**). https://journal.saim.ir/article_22024.html?lang=en

[33] Ghesmati, R., Ghazanfari, M., & Pishvaee, M. S. (2015). A robust fuzzy-probabilistic programming model for a reliable supply chain network design problem. *Advances in industrial engineering*, *50*(1), 53–68.

[34] Abounacer, R., Rekik, M., & Renaud, J. (2014). An exact solution approach for multi-objective location--transportation problem for disaster response. *Computers & operations research*, *41*, 83–93.

[35] Fazli-Khalaf, M., Naderi, B., Mohammadi, M., & Pishvaee, M. S. (2020). Design of a sustainable and reliable hydrogen supply chain network under mixed uncertainties: A case study. *International journal of hydrogen energy*, *45*(59), 34503–34531.

[36] Günay, E. E., Kremer, G. E. O., & Zarindast, A. (2021). A multi-objective robust possibilistic programming approach to sustainable public transportation network design. *Fuzzy sets and systems*, *422*, 106–129.

[37] Farbod, E., & Hamidieh, A. (2022). Investigating the impact of green supply chain on economic performance: neural network models and structural equations approach. *Journal of decisions & operations research*, *7*(2), 316-338. (**In Persian**). https://www.journal-dmor.ir/article_145038.html

[38] Fattahi, P., Masoomi, M., & Behnamian, J. (2017). Presenting a hybrid algorithm for solving multi-commodity routing location problem considering transshipment systems in supply chain. *Industrial management studies*, *15*(46), 97-134. (**In Persian**). https://doi.org/10.22054/jims.2017.7990

[39] Ghasemi, P., Khalili Damghani, K., Hafezalkotob, A., & Raissi, S. (2018). Multi-objective mathematical model for location, allocation and distribution of relief commodities under uncertainty. *Industrial management studies*, *16*(51), 107-144. (**In Persian**). https://doi.org/10.22054/jims.2018.23532.1805

[40] Rooh al-Feda, S., & Hassanzadeh, R. (1397). Modeling and solving the multi-objective problem of allocation and location in relief and crisis logistics, taking into account the maximization of the coverage percentage of the injured. *The second international conference on new research achievements in management sciences, accounting and industrial engineering*. Sari, Iran. Civilica. (**In Persian**). https://civilica.com/doc/842190

[41] Emami, I., Kamran Rad, R., & Jokar, E. (2019). Locating and assigning projects in the multi-level supply chain network using the simultaneous multi-objective method using the mopso algorithm (case study: EPC projects of substation construction in tep company). *The 5th international conference on industrial and systems engineering (ICISE 2019)*. Mashhad, Iran. Civilica. (**In Persian**). https://civilica.com/doc/932465

[42] Asefi, A. H, Bozorgi-Amiri, A., & Ghezavati, V. (2020). Location-routing problem in humanitarian relief chain considering the reliability of road network. *Emergency management*, *9*(1), 29-41. (**In Persian**). https://www.joem.ir/article_45861.html