



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 Besharatmeimandi¹

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>).



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

علیرضا حمیدیه^{۱*}، مریم بشارت میمندی^۱

^۱گروه 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 این رو 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 در نظر گرفتن پایایی مجموعه‌های 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 در نظر گرفتن پایایی هاب توزیع مساله بحران زلزله و امدادسانی با توجه به توپوگرافی منطقه مورد مطالعه توسعه یافت. در ادامه روش محدودیت اسپیلون جهت پوشش مساله بهینه‌سازی چندهدفه و تعیین راه‌حل‌های بهینه پارتو اعمال گردید و ترکیب ریاضی برنامه‌ریزی امکانی-استوار جهت مواجهه 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 گرفته شده در مجموعه هاب توزیع قابلیت اطمینان شبکه توزیع امدادی را ارتقا داده است و در نهایت، نتایج خروجی مطالعه موردی کاربرد و اثربخشی مدل شبکه امداد گسترده را نشان می‌دهد. **اصالت/ارزش‌افزوده علمی:** پژوهش حاضر، به‌عنوان یک سیستم پشتیبان تصمیم، امدادسانی 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: امدادسانی بشردوستانه، برنامه‌ریزی استوار فازی، پایایی 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 سازماندهی شده 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، می توان از انبارهای توزیع موقت که از قابلیت تسریع کمک رسانی به افراد آسیب دیده برخوردار است، بهره برد [1]؛ بنابراین، مکان یابی مراکز توزیع و مناطق آسیب دیده از جمله مهم ترین اقدامات قبل از وقوع حادثه است.



مستقر کردن مراکز توزیع موقت^۱ از جمله نخستین تصمیمات مهمی است که مدیران و برنامه ریزان 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 می کند که انبارها و مراکز توزیعی که از قبل مستقر شده اند، اغلب تحت فشار محموله های ورودی قرار می گیرند به همین علت برای دسترسی به نقاط تقاضای پراکنده مناسب نیستند [2] و نیازمند کمک سازمان های کمک رسان بشردوستانه هستند. برای مقابله با این چالش ها که فعالیت های لجستیکی را در پاسخ های بشردوستانه هماهنگ می کند، پیاده سازی مراکز توزیع موقت یکی از مهم ترین راه کارهای توزیع می باشد [3]. از آن جا که محل TDCs باید در آغاز عملیات تعیین شود، آن ها در مرحله پاسخ فوری قرار می گیرند. به طور کلی، مرحله واکنش فوری اولین مرحله مدیریت بحران بعد از یک فاجعه است. مدت زمان آن به پیچیدگی پاسخ و سطح تخریب بستگی دارد. مرحله امداد، زمان پس از پاسخ فوری تا بهبودی اولیه را پوشش می دهد. در این مرحله، به عنوان یک ارزیابی سریع؛ نیازها، تقاضاها و ذینفعان در اولویت قرار دارند و از این رو، ساختارهای امدادی، بیش تر سازمان یافته اند و مراکز توزیع موقت در مرحله واکنش فوری برای حوادث ناگهانی آغاز به کار می نمایند [4].

شبکه زنجیره تامین بررسی شده در این پژوهش مبتنی بر مطالعه موردی مربوط به زلزله کرمانشاه در سال ۱۳۹۶ است. زمین لرزه 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 بخش های وسیعی از شهر سرپل ذهاب و بسیاری از شهرها و روستاهای استان کرمانشاه گردید. قدرت زلزله به قدری زیاد بود که تا صدها کیلومتر از کانون زلزله (حتی در تهران) لرزش های آن احساس شد. زلزله سرپل ذهاب یکی از مخرب ترین زلزله های دهه اخیر کشور محسوب می شود 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، سازمان های امدادی نسبت به ارسال اقلام اولیه مورد نیاز مردم به منطقه آسیب دیده اقدام کنند. گروه های شناسایی در حوزه مدیریت خطرپذیری و بحران به منظور 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 آسیب دیده انجام دادند [5]. هم چنین برخی مستندات موجود و گزارش های منتشر شده و منابع رسانه ای نیز در این بازه زمانی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج جمع بندی اولیه فرایند مدیریت بحران بر اساس این بررسی ها در ادامه ارائه شده است. در اثر زلزله سرپل ذهاب حداقل هشت شهر (قصر شیرین، ازگله، ثلاث باباجانی، گیلان غرب، سرپل ذهاب، دالاهو، اسلام آباد غرب و جوانرود) و ۱۹۳۰ روستا دچار آسیب شدند. طبق آمار ارائه شده توسط پزشکی قانونی تا ۹۶/۹/۱۸ بالغ بر ۵۷۹ نفر در اثر زلزله کشته شدند و هزاران نفر نیز مصدوم گردیدند. از این تعداد شهرستان، سرپل ذهاب با ۵۱۸ کشته بیش ترین تلفات را داشته و بعد از آن شهرستان های ثلاث باباجانی با ۲۳ تن، کرند (دالاهو) با ۱۹ تن، قصر شیرین با ۱۶ تن، اسلام آباد غرب با ۱ تن و کرمانشاه با ۱ تن در جایگاه بعدی قرار دارند (شهر یک نفر از جان باختگان به دلیل مجهول الهویه بودن مشخص نشده است). علی رغم این که تلفات این زلزله در مقایسه با زلزله های بزرگ سه دهه اخیر کشور (نظیر زلزله ۱۳۶۹ منجیل رودبار و زلزله ۱۳۸۲ بم) نسبتا محدود می باشد، لیکن در این رویداد آمار دقیقی از تعداد تلفات و مصدومان زلزله و پراکندگی آن ها در روستاها و شهرستان های مختلف وجود ندارد و منابع مختلف ارقام متفاوتی را در زمان های مختلف بعد از رخداد زلزله در این رابطه ارائه نموده اند که ارزیابی دقیق صحت این آمار در حال حاضر چندان میسر نیست. یکی از مهم ترین علل این مشکل نبود زیرساخت های مورد نیاز برای جمع آوری و انتقال سریع اطلاعات به مراجع ذی ربط به سبب نبود برنامه قبلی و بروز مشکلات در شبکه های مخابراتی است [6]. این مشکلات باعث شد تا ساعت ها بعد از وقوع زلزله، ابعاد حادثه و تعداد قربانیان مشخص نباشد. خبرگزاری ها در حالی که کانون زلزله را ابتدا شهر حلبچه در عراق اعلام می داشتند، به نقل از رییس سازمان مدیریت بحران کشور، صدمات جانی زلزله را دقیقی بعد از رخداد آن محدود به تعدادی مجروح زیر آوار در قصر شیرین اعلام نمودند. به تدریج اخبار مربوط به آمار تلفات و مصدومیت ها در ساعات بعد افزایش یافت. طبعاً برآورد دست پایین تلفات و مصدومان

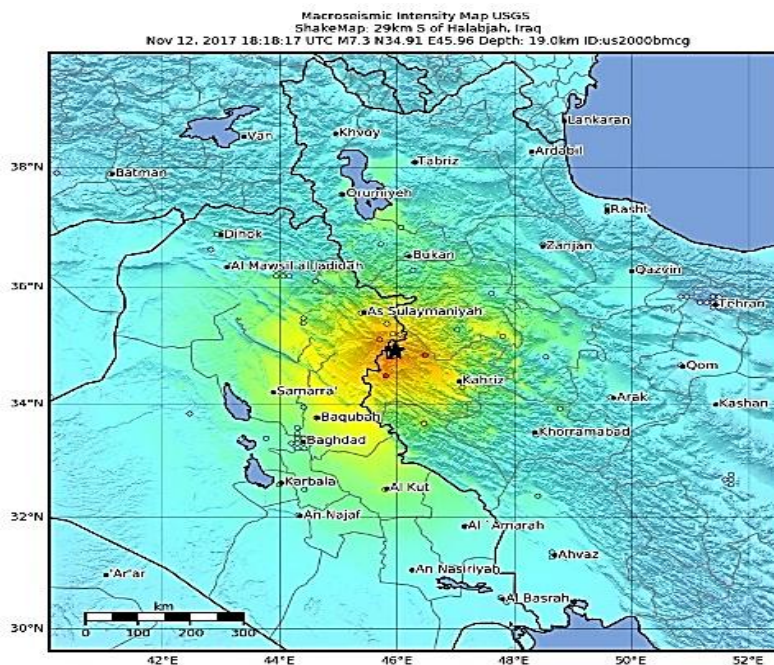
¹ Temporary Distribution Center (TDC)

زلزله باعث تاخیر در تهیه امکانات موردنیاز در منطقه آسیب دیده 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 ارائه خواهیم داد. به عبارت دیگر، مکان های منتخب که نزدیک به محل وقوع بحران است در نظر گرفته می شوند تا مراکز توزیع موقت برای کمک رسانی هر چه سریع تر برپا شوند. این مطالعه به ارائه یک مدل بهینه سازی و حل آن با بهینه یاب می پردازد. این پژوهش در نظر دارد با ایجاد یک مدل که چندین مرحله زمانی را در نظر می گیرد و محدودیت زمانی را رعایت می کند، عدم اطمینان را پوشش دهد. این روش تصمیم گیرندگان را قادر می سازد تا تغییرات احتمالی پارامترها را به دلیل عدم قطعیت مورد بررسی قرار دهند. جهت دستیابی به این اهداف، یک مدل برنامه ریزی ریاضی با رویکرد برنامه ریزی امکانی-استوار به منظور پوشش نقاط آسیب دیده و نقاط انتقال با هدف کمینه سازی زمان پاسخگویی ارائه خواهد شد.

بنابراین چه گفته شد، زلزله به عنوان یکی از مهم ترین مباحث روز، با توجه به گستردگی خسارات ناشی از آن در شهرها از جمله مهم ترین دغدغه های برنامه ریزان و پژوهشگران عرصه مطالعات شهری است. افزایش هشت برابری جمعیت شهرنشینی در سال های اخیر و قرارگیری شهرها بر پهنه های پرخطر، اهمیتی ویژه پیدا کرده است و در این شرایط اهمیت بخش ها و عناصر مختلف مدیریت بحران به خوبی آشکار می شود؛ اما آن چه در این میان باید مورد توجه جدی قرار گیرد، آمادگی شهرها پس از بروز زلزله است. بر این اساس، مدیریت شهری باید بتواند پس از بروز حوادثی نظیر زلزله، موقعیت جغرافیایی وقوع زلزله را به طور دقیق شناسایی کرده و با سازمان دهی منطقه ای هر چه سریع تر اوضاع را تحت کنترل در آورد و از ایجاد بی نظمی های بیش تر جلوگیری کند. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی دقیق زلزله کرمانشاه را نشان می دهد. یکی از راهبردهای موثر در این زمینه اندیشیدن در زمینه سایت های اسکان موقت است که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است. اسکان موقت یکی از مراحل مهم و اساسی مدیریت بحران پس از بروز بحران به شمار می آید.



شکل ۱- محل وقوع زلزله ۱۳۹۶ کرمانشاه.

Figure 1- The location of the 1396 Kermanshah earthquake.

این مطالعه با هدف ایجاد یک رویکرد برای مکان یابی مراکز توزیع موقت امداد که به محدودیت ها و مشخصات یک فاجعه توجه می کند می پردازد. در این مقاله با در نظر گرفتن پایا بودن برخی مراکز هاب لجستیک، دو سناریو تعریف می شود. سناریو اول بدون ایجاد اختلال در سیستم کمک رسانی و سناریو دوم در صورت ایجاد اختلال در سیستم که تنها مراکز هاب پایا در سناریو دوم فعال هستند. این رویکرد با چندلایه در نظر گرفتن نقاط تقاضا بر اساس فاصله نقطه تقاضا از هاب اصلی از پیچیدگی های مساله می کاهد.



۲- مبانی نظری و پیشینه پژوهش

ادامه مقاله به صورت ذیل سازمان دهی شده است: مبانی نظری و پیشینه تحقیق جامعی در خصوص طراحی و مدیریت شبکه زنجیره تامین بشردوستانه و امدادی به همراه جدول پیشینه تحقیقات شاخص حوزه فوق ارائه شده است و چارچوب کاملی از مساله تحقیق حاضر تبیین گردید. بعدازآن ساختار و مدل جامع مساله تحقیق در قالب روش تحقیق ارائه شده است. سپس رویکردهای حل مساله و مواجهه با عدم قطعیت شامل محدودیت اپسیلون و بهینه سازی امکانی-استوار به تفسیر تبیین شد و در نهایت تحلیل حساسیت و اعتبارسنجی مدل ارائه شده است.

عدم اطمینان خاصیت ذاتی بلایا است، بسیاری از مطالعات در مورد مکان یابی تاسیسات اضطراری عدم قطعیت های مختلفی را در بردارد. چندین مطالعه، عدم قطعیت را در برخی از صفات کمی مانند کمیت تقاضا، در دسترس بودن عرضه یا ظرفیت حمل و نقل و ... را در نظر گرفته اند. بیش تر این مطالعات برای مقابله با این عدم قطعیت ها از روش های مبتنی بر سناریو استفاده می کنند. برای مثال، راولز و ترنکوویست [8]، مورالی و همکاران [9] و دواوین و همکاران [10] که به ترتیب عدم اطمینان در خواسته و تقاضا، حمل و نقل و تقاضا در این سه تحقیق در نظر گرفته شده است. هم چنین بزرگی امیری و همکاران [11] با در نظر گرفتن عدم اطمینان در مورد تقاضا، تجهیزات و هزینه حمل و نقل در هنگام کمک به بلایا، یک رویکرد برنامه ریزی تصادفی استوار چندهدفه را برای تعیین مکان مراکز توزیع امداد پیشنهاد کردند.

اگرچه در بیش تر مطالعات از برنامه ریزی تصادفی برای مقابله با عدم اطمینان استفاده می شود، اما برخی مطالعات نیز بر بهینه سازی استوار تمرکز دارند. به عنوان مثال، پاول و هرهران [12] مساله تخصیص و مکان یابی انبارها را برای مواجهه با بلایا مطالعه کردند. در این مطالعه یک مدل بهینه سازی استوار ارائه شده بود تا حداکثر خسارات ناشی از عدم اطمینان سناریوها را حداقل سازد. هم چنین بزرگی امیری و همکاران [11] با در نظر گرفتن عدم قطعیت در تقاضا و هزینه حمل و نقل در هنگام وقوع بلایا، یک رویکرد برنامه ریزی تصادفی استوار چندهدفه را برای مکان یابی مراکز توزیع امدادی پیشنهاد کردند. در مطالعه صفاری و همکاران [13] یک مساله چندهدفه مکان یابی-تخصیص مستعد ازدحام را با استفاده از روش محدودیت اپسیلون تعمیم یافته مورد ارزیابی قرار دادند.

احتمال خرابی در تاسیسات و وجود عدم اطمینان در مسایل مکان یابی تحت شرایط اضطراری موضوعی جدی است. بسیاری از پژوهش ها مسایل موقعیت مکانی تسهیلات را با این فرض که اختلال فقط در تاسیسات رخ می دهد، مورد مطالعه قرار دادند. به عنوان مثال: اشناپدر و داسکین [14] با فرض این که تسهیلات احتمال شکست یکسانی دارند، مدل های مکان یابی تصادفی را ارائه دادند. هم چنین 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 زنجیره تامین حلقه بسته توسعه دادند که در آن یک رویکرد پایا با تمرکز بر ذخیره اطمینان چندسطحی معرفی کردند. مدل پیشنهادی علاوه بر این که مجموع هزینه ها را کمینه می کرد، شبکه ای مقاوم تحت اختلالات مختلف را توسعه می داد.

با این حال، فرض وقوع اختلال در تاسیسات مستقل همیشه واقع بینانه نیست. از این رو، برخی از مطالعات تلاش کردند تا اختلالات مربوط به تسهیلات را رفع نمایند. به عنوان مثال مطالعه لی و همکاران [18] یک مدل ایستگاه پشتیبان را برای مساله طراحی مکان یابی پایا تحت اختلالات با همبستگی مثبت پیشنهاد دادند. لو و شو [19] برای یافتن مراکز توزیع فوری امداد، یک مدل استوار ارائه دادند در مدل پیشنهادی، از فواصل ثابت به جای توزیع احتمال، برای نشان دادن زمان های سفر نامشخص استفاده شده است. پژوهش های دیگری در این باره صورت گرفته مانند زی و همکاران [20]، زی و همکاران [21] و یحیایی و بزرگی امیری [22] که مساله پایایی طراحی شبکه امداد بشردوستانه را مورد بررسی قرار دادند و مدل های متفاوتی برای مقابله با عدم اطمینان اختلال مراکز ارائه دادند. تعداد کمی از کارها مساله مکان یابی تسهیلات را با این فرض که اختلالات در پیوندهای شبکه رخ می دهد، مطالعه کردند. احمدی و همکاران [23] برای مکان یابی انبارهای محلی با احتمال تخریب جاده یک مدل مسیریابی پیشنهاد کردند و سلمان و یوسل [24] یک مدل تصادفی برای مساله مکان یابی مرکز واکنش سریع فرموله کردند. هم چنین هاسین و همکاران [25] با فرض نوع متفاوتی از تصحیح خرابی که در سطوح شبکه رخ می دهد، مساله مکان یابی تسهیلات را مطالعه کردند. هم چنین قمی و همکاران [26] زنجیره تامین حلقه بسته ای در نظر گرفتند که برخی سطوح زنجیره در اثر بلایای طبیعی یا مخاطرات دیگر مختل می شوند و برای حل این مشکل از روش منبع پایایی ریسک اختلال برای توسعه شبکه زنجیره تامین منعطف استفاده کردند.



مطالعات کمی برای بهینه‌سازی عملیات تحویل هوایی از نظر موقعیت‌یابی و مرحله‌بندی موجودی مرکز توزیع انجام شده است. برای مثال، مدل پیشنهادی در مطالعه اورتو و همکاران [27] که با هدف به حداقل رساندن متوسط فاصله از نزدیک‌ترین انبار تا یک فرد بی‌خانمان پیش‌بینی شده است و یا سالمون 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 امدادسانی به حوزه‌های در معرض بلایا در نظر 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 مورد توجه 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 کلاتری 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 ارائه 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 یا اصلی مزایای قابل توجهی 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 منتقل شده و پس از 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 در نظر گرفته شده است.

تقسیم‌بندی توپوگرافی منطقه در مطالعه بهارمند و همکاران [2] در نظر گرفته شده است، تفاوت مطالعه فعلی با مقاله ذکرشده، در نظرگیری 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 مورد مطالعه 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 تأثیری 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 در نتیجه مراکز درون زنجیره‌تامین را در معرض ریسک‌های مالی و عملیاتی قرار می‌دهد. به‌طور کلی 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 در نظر 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 ارائه 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.

نوع مثال	تابع هدف	نوع تصمیم‌گیری							محدودیت‌ها				اجزای شبکه		مشخصات مقاله نویسنده	
		مکان‌یابی	تخصیص	تلفات یا تقاضا برآورده نشده	بهبوده و پایایی	ایجاد اختلال در شبکه	ظرفیت مراکز	تعداد مراکز	بیمارستان یا پناهگاه	مراکز توزیع یا انتقال	نقاط آسیب‌دیده یا مشتری					
																ارتونو و همکاران [27]
	مثال عددی															ابوناصر و همکاران [34]
	حداقل سازی هزینه															سلمان و یوسل [24]
	حداقل سازی فاصله															راولز و ترنکوئیست [8]
	حداقل سازی زمان															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]
																کلاتری 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]
																روح‌الفدا و حسن‌زاده [40]
																صفاری و همکاران [13]
																تقی‌پور و همکاران [5]
																امامی و همکاران [41]
																آصفی و همکاران [42]
																مطالعه فعلی

در این مطالعه رویکرد ترکیبی امکانی-استوار برای مواجهه 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 با قابلیت 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 مواجهه با عدم قطعیت شبکه.

۳- روش پژوهش

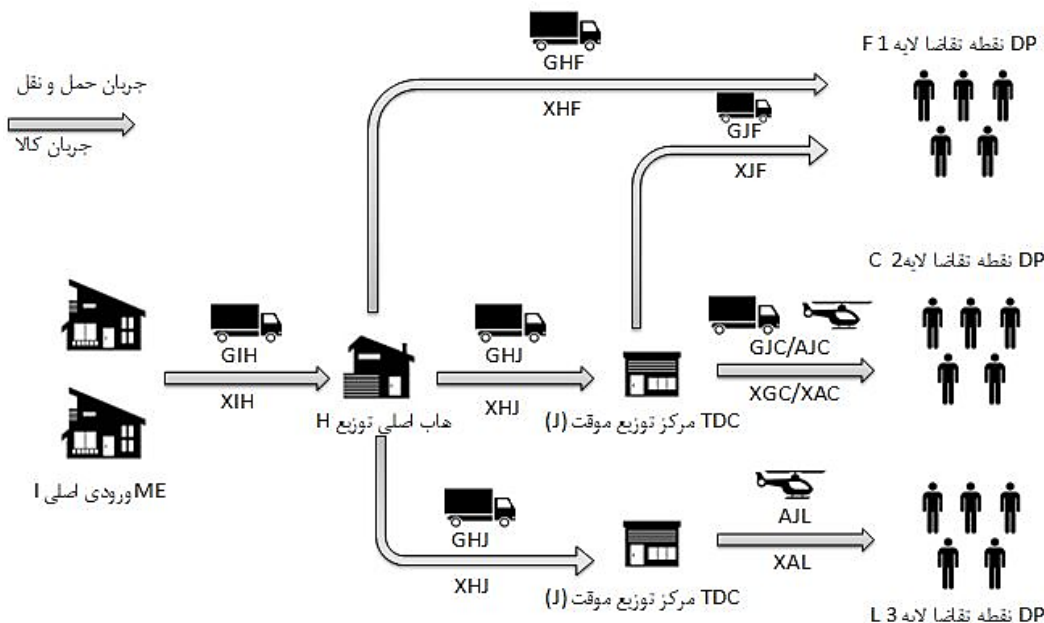
پژوهش حاضر به لحاظ هدف از نوع کاربردی است و در پی پاسخ به این سوال است که چگونه می‌توان با ارایه یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی، تصمیمات استراتژیک و عملیاتی بهینه‌ای برای توزیع بسته‌های امدادی در افق زمانی محدود اتخاذ کرد. در این پژوهش ابتدا عوامل و پارامترهای موثر در مکان‌یابی مراکز امداد رسانی در هنگام وقوع بحران شناسایی شد. مدل شبکه زنجیره‌تامین بشردوستانه با رویکرد امکانی-استوار پایا و در نظر گرفتن دو سناریوی خوش‌بینانه و بدبینانه و مکان‌یابی مراکز توزیع موقت جهت امداد رسانی در کم‌ترین زمان و هزینه توسعه یافت. در نهایت مدل نوین فوق در برنامه *GAMS* کد شده و نتایج محاسباتی مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت 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 به‌طور معمول 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* معمولاً به‌عنوان یک مکان موقتی در نزدیکی 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 F, C, L ، تعریف شده‌اند که در ادامه توضیح خواهیم داد. در شکل ۲ جریان حمل‌ونقل کالاها با وسایل حمل‌ونقل زمینی و هوایی ارایه شده است (*AJC, AJL, GHF, GHJ, GHI, GJC*). هم‌چنین جریان کالا بین مراکز (*XAL, XAC, XGC, XJF, XHF, XHJ, XIH*) 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 قابل دسترس باقی می‌مانند. اقلام امدادی معمولاً 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 (مثلاً 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.





شکل ۲- شبکه لجستیک بشردوستانه.

Figure 2- Humanitarian logistics network.

لازم به ذکر است که اگر اختلالی در یک لایه از شبکه روی دهد، می تواند ظرفیت کمک رسانی مراکز را به طور جزئی یا کامل از بین برد. در چنین شرایطی می توان استراتژی های مختلفی به کار برد. یکی از بهترین راه کارهای تقویت شبکه های زنجیره تامین در برابر اختلالات، در نظر گرفتن ظرفیت پردازش اضافی در شبکه است. این می تواند از طریق ظرفیت پردازش اضافی موجود در شبکه، به پوشش ظرفیت از دست رفته مراکز غیر پایا کمک کند؛ بنابراین، تقاضای مشتریان با کمترین تاخیر و هزینه ممکن در وضعیت اختلال ها پوشش داده خواهد شد.

مراکز هاب لجستیک و مراکز توزیع موقت دارای محدودیت های پوشش تقاضای مبتنی بر فاصله هستند. این بدان معناست که مراکز فقط در صورتی می تواند تقاضای نقاط آسیب دیده را تامین کنند که فاصله آن ها از شعاع پوشش مراکز کم تر باشد. بر این اساس، احتمال نارضایتی نسبی یا کامل تقاضای هر منطقه آسیب دیده از طریق متحمل شدن هزینه های جریمه وجود دارد؛ بنابراین، اگر در برنامه اولیه، بخشی از تقاضای منطقه آسیب دیده (یا تمام آن) برای تامین شدن برنامه ریزی شده باشد، مطمئناً حتی در وضعیت ایجاد اختلالات سیستمی نیز باید تامین شود. در این راستا موارد زیر در نظر گرفته شده اند:

۱. در این مدل دو سناریو یا برنامه در نظر گرفته شده است: برنامه اولیه (سناریو اول یا وضعیت عادی) و برنامه پشتیبان (سناریو دوم یا وضعیت اختلال). برنامه اولیه، برنامه کمک رسانی در شرایط عادی سیستم توزیع و حمل و نقل است. برنامه پشتیبان در صورتی ایجاد می شود که در یکی از اجزای سیستم طراحی شده اختلالی رخ دهد و باعث کاهش کارایی سیستم شود. برنامه پشتیبان هزینه بیشتری نسبت به برنامه اولیه صرف می کند اما تضمین می دهد که در صورت بروز اختلال سیستم، امداد رسانی به طور کامل انجام می شود.
۲. محدودیت های پوشش برای مراکز هاب باید فقط در شرایط عادی رعایت شود یعنی تنها در برنامه اولیه.
۳. در وضعیت ایجاد اختلالات، محدودیت های پوشش برای جبران ظرفیت از دست رفته در طرح پشتیبان آزاد می شود.
۴. مقدار خواسته های برآورده نشده در برنامه های اصلی و پشتیبان باید برابر باشد؛ به این معنا که در صورت بروز اختلال سیستم نباید در تامین تقاضای نقاط آسیب دیده کاستی دیده شود.

به عنوان یکی از عملکردهای مدل می توان گفت که استراتژی قابلیت اطمینان برای حداکثر پوشش مراکز هاب به همراه حداقل هزینه های ذخیره و انتقال و هزینه های جریمه تقاضاهای برآورده نشده در نظر 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 این حال، مراکز هاب پایا باید در برابر اختلالات غیر منتظره محافظت شوند. برای این منظور، هزینه های اضافی باید صرف تقویت این مکان ها شود. اول از همه، ساختار تاسیسات پایا باید به گونه ای طراحی شود که بتواند در برابر زلزله های شدید مقاومت کند. در این راستا، برای داشتن یک ساختمان مقاوم در برابر زلزله، باید سرمایه گذاری بیشتری در زمینه طراحی و اجرای یک بنیاد و سازه مقاوم تر از ساختمان معمولی انجام شود. هم چنین، 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:

$$P(x > T) = \int_T^{+\infty} \lambda \cdot e^{-\lambda x} dx = e^{-\lambda \cdot T} \quad (1)$$

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. براین اساس، 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 قابل دسترسی 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 حمل و نقل زمینی و هوایی برای حمل و نقل اقلام امدادی در نظر گرفته شده است.
۳. فرض بر این است که ناوگان زمینی به هر TDC به‌صورت محدود تخصیص می‌یابد. بالگردها می‌توانند از هر TDC به لایه‌های ۲ و ۳ سفر کنند اما تعداد کل بالگردها در منطقه و تورهای روزانه آن‌ها محدود است.
۴. تمام حالت‌های حمل و نقل 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 این حال، 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 حمل و نقل) 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 حمل و نقل و انتقال کالا اهمیت دارد و نباید از حداکثر زمان در نظر گرفته شده عبور کند.

مجموعه‌ها / شناساگرها

I : مجموعه‌ای از نقاط ورودی اصلی.

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



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 حمل و نقل زمینی موجود در منطقه.

A : مجموعه‌ای از انواع حمل و نقل هوایی موجود در منطقه.

S : مجموعه سناریوهای ممکن (سناریو اولیه^۱ و سناریو پشتیبان^۲).

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_{jt} : 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 از جمله 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 DP_s) 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 .



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_{ij}^{tms} : اگر حمل و نقل 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 حمل و نقل 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 حمل و نقل 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 حمل و نقل زمینی بین $TDC jth$ 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.

YGC_{jc}^{tms} : اگر حمل و نقل 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 این صورت صفر.

YAC_{jc}^{tms} : اگر حمل و نقل 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 این صورت صفر.

YAL_{jl}^{tms} : اگر حمل و نقل 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 این صورت 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 ایجاد شده 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 حمل و نقل 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 حمل و نقل 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 حمل و نقل 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 حمل و نقل 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 حمل و نقل 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 حمل و نقل 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 حمل و نقل 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 نمی شود.

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

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

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 حمل و نقل های زمینی از ME_{ith} به hth هاب H در سناریو s در دوره زمانی t که باید انجام شود.

GHI_{ij}^{ts} : تعداد حمل و نقل های زمینی از hth هاب H به TDC_{jth} در سناریو s در دوره زمانی t که باید انجام شود.

GHF_{hf}^{ts} : تعداد حمل و نقل های 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 حمل و نقل های 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 حمل و نقل های 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 حمل و نقل های 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 حمل و نقل های هوایی از TDC_{jth} به DP_{lth} در لایه سوم در سناریو s در دوره زمانی t که باید انجام شود.



به حداقل رساندن هزینه‌های تدارکات اولین هدفی است که شامل هزینه حمل و نقل زمینی، هزینه حمل و نقل هوایی، هزینه‌های مکرر و منابع انسانی است. هزینه حمل و نقل 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 حمل و نقل هوایی، به عنوان مثال، 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 مدت زمان 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 اختلال قرار دارند. با این حال، 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 به گونه‌ای 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 به طور کلی 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:

$$\begin{aligned}
 & MIN Z1 \\
 & = \sum_{g=1}^G \sum_{s=1}^S CEG_s \left(\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{h=1}^H \sum_{s=1}^S GIH_{ih}^{ts} \cdot DISIH_{ih} + \sum_{t=1}^T \sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^J \sum_{s=1}^S GHJ_{hj}^{ts} \cdot DISHJ_{hj} \right. \\
 & + \sum_{t=1}^T \sum_{h=1}^H \sum_{f=1}^F \sum_{s=1}^S GHF_{hf}^{ts} \cdot DISHF_{hf} + \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \sum_{f=1}^F \sum_{s=1}^S GJF_{jf}^{ts} \cdot DISJF_{jf} \\
 & \left. + \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \sum_{c=1}^C \sum_{s=1}^S GJC_{jc}^{ts} \cdot DISJC_{jc} \right), \\
 & \sum_{a=1}^A \sum_{s=1}^S CEA_s \left(\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \sum_{c=1}^C \sum_{s=1}^S AJC_{jc}^{ts} + \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \sum_{s=1}^S AJL_{jl}^{ts} \right), \\
 & \sum_{s=1}^S CEK_s \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \sum_{s=1}^S NUM_{tjs}, \\
 & \sum_{s=1}^S CEB_s \sum_{t=1}^T \sum_{h=1}^H \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^J OP_{jts} + OPU_{hts} + OPR_{hts}, \\
 & \sum_{t=1}^T \sum_{h=1}^H \sum_{s=1}^S CEER_s (OPR_{hts} - OPR_{h(t-1)s}) \\
 & + \sum_{t=1}^T \sum_{h=1}^H \sum_{s=1}^S CEEU_s (OPU_{hts} - OPU_{h(t-1)s}) \\
 & + \sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^J \sum_{s=1}^S \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \sum_{g=1}^G (CESU_s + CEG_s \cdot DISHJ_{hj}) \cdot XHJ_{hj}^{tms} \\
 & + \sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^J \sum_{s=1}^S \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \sum_{g=1}^G (CESR_s + CEG_s \cdot DISHJ_{hj}) \cdot XHJ_{hj}^{tms}, \\
 & \sum_{h=1}^H \sum_{f=1}^F \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S XUF_f^{tms} \cdot CEP_s + \sum_{h=1}^H \sum_{c=1}^C \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S XUC_c^{tms} \cdot CEP_s \\
 & + \sum_{h=1}^H \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S XUL_l^{tms} \cdot CEP_s.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

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.

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



$$\begin{aligned}
 \text{MAX } Z2 = & \sum_{h=1}^H \sum_{f=1}^F \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^S \text{DEMFM}_m \cdot e^{-\text{DRH} \cdot D_T} \cdot \text{XHF}_{hf}^{tms} \\
 & + \sum_{j=1}^J \sum_{f=1}^F \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^S \text{DEMFM}_m \cdot e^{-\text{DRJ} \cdot D_T} \cdot \text{XJF}_{jf}^{tms} \\
 & + \sum_{j=1}^J \sum_{c=1}^C \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^S \text{DEMCM}_m \cdot e^{-\text{DRJ} \cdot D_T} \cdot \text{XGC}_{jc}^{tms} \\
 & + \sum_{j=1}^J \sum_{c=1}^C \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^S \text{DEMCM}_m \cdot e^{-\text{DRJ} \cdot D_T} \cdot \text{XAC}_{jc}^{tms} \\
 & + \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^S \text{DEMLM}_m \cdot e^{-\text{DRJ} \cdot D_T} \cdot \text{XL}_{jl}^{tms} \\
 & + \sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^J \sum_{f=1}^F \sum_{c=1}^C \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^S (\text{DEMFM}_m + \text{DEMCM}_m \\
 & + \text{DEMLM}_m) \cdot e^{-\text{DRJ} \cdot D_T} \cdot \text{XIH}_{ih}^{tms} \\
 & + \sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^J \sum_{f=1}^F \sum_{c=1}^C \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^S (\text{DEMFM}_m + \text{DEMCM}_m \\
 & + \text{DEMLM}_m) \cdot e^{-\text{DRJ} \cdot D_T} \cdot \text{XHJ}_{hj}^{tms},
 \end{aligned} \tag{۳}$$

$$\text{OPI}_{it-1s} \leq \text{OPI}_{its} \quad \text{for all } t \in T, i \in I, s \in S. \tag{۴}$$

$$\text{OPR}_{h(t-1)s} \leq \text{OPR}_{hts} \quad \text{for all } t \in T, h \in H, s \in S. \tag{۵}$$

$$\text{OPU}_{h(t-1)s} \leq \text{OPU}_{hts} \quad \text{for all } t \in T, h \in H, s \in S. \tag{۶}$$

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 زمان بندی هم باز باشند.

$$\sum_{h=1}^H \sum_{m=1}^M \text{YIH}_{hi}^{tms} \leq \text{OPI}_{its} \quad \text{for all } t \in T, i \in I, s \in S. \tag{۷}$$

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

$$\sum_{h=1}^H \sum_{s=1}^S \text{OPR}_{hts} \geq 1 \quad \text{for all } t \in T. \tag{۸}$$

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

$$\sum_{f=1}^F \sum_{m=1}^M \text{DISHF}_{hf} \cdot \text{YF}_{hf}^{tms} \leq \text{CRH}_h \cdot \text{OPR}_{hts} \quad \text{for all } t \in T, h \in H, s \in S. \tag{۹}$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J \text{DISHJ}_{hj} \cdot \text{YJ}_{hj}^{tms} \leq \text{CRH}_h \cdot \text{OPR}_{hts} \quad \text{for all } t \in T, h \in H, s \in S. \tag{۱۰}$$

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

$$\sum_{m=1}^M \sum_{f=1}^F \text{DISJF}_{jf} \cdot \text{YJF}_{jf}^{tms} \leq E \cdot \text{OP}_{jts} \quad \text{for all } j \in J, t \in T, s \in S. \tag{۱۱}$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{c=1}^C \text{DISJC}_{jc} \cdot \text{YGC}_{jc}^{tms} \leq E \cdot \text{OP}_{jts} \quad \text{for all } j \in J, t \in T, s \in S. \tag{۱۲}$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{c=1}^C \text{DISJC}_{jc} \cdot \text{YAC}_{jc}^{tms} \leq E \cdot \text{OP}_{jts} \quad \text{for all } j \in J, t \in T, s \in S. \tag{۱۳}$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L \text{DISJC}_{jc} \cdot \text{YAL}_{jl}^{tms} \leq E \cdot \text{OP}_{jts} \quad \text{for all } j \in J, t \in T, s \in S. \tag{۱۴}$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{f=1}^F \text{DISHF}_{hf} \cdot \text{YF}_{hf}^{tms} \leq E \cdot \text{OPR}_{hts} \quad \text{for all } h \in H, t \in T, s \in S. \tag{۱۵}$$

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

$$\sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^S \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^I YIH_{hi}^{tms} \geq 1, \quad (16)$$

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

$$XIH_{hi}^{tms} \geq YIH_{hi}^{tms} \quad \text{for all } t \in T, m \in M, i \in I, h \in H, s \in S. \quad (17)$$

$$XHJ_{hj}^{tms} \geq YJ_{hj}^{tms} \quad \text{for all } t \in T, m \in M, h \in H, j \in J, s \in S. \quad (18)$$

$$XHF_{hf}^{tms} \geq YF_{hf}^{tms} \quad \text{for all } t \in T, m \in M, h \in H, f \in F, s \in S. \quad (19)$$

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.

$$XIH_{hi}^{tms} \cdot LW_m \leq GHJ_{ij}^{ts} \cdot CAG_m \quad \text{for all } t \in T, m \in M, i \in I, h \in H, s \in S. \quad (20)$$

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

$$\sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^I \sum_{h=1}^H LW_m \cdot XIH_{ih}^{tms} \geq DEMFM_m + DEMCM_m + DEMLM_m \quad \text{for all } m \in M. \quad (21)$$

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

$$\sum_{h=1}^H \sum_{m=1}^M YJ_{hj}^{tms} \geq OP_{jts} \quad \text{for all } t \in T, j \in J, s \in S. \quad (22)$$

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

$$\sum_{f=1}^F XJF_{jf}^{tms} + \sum_{c=1}^C XGC_{jc}^{tms} + \sum_{c=1}^C XAC_{jc}^{tms} + \sum_{l=1}^L XL_{jl}^{tms} \leq RI_{jts} \quad \text{for all } t \in T, j \in J, s \in S. \quad (23)$$

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

$$XJF_{jf}^{tms} \geq YJF_{jf}^{tms} \leq RI_{jts} \quad \text{for all } t \in T, m \in M, j \in J, f \in F, s \in S. \quad (24)$$

$$XGC_{jc}^{tms} \geq YGC_{jc}^{tms} \quad \text{for all } t \in T, m \in M, j \in J, c \in C, s \in S. \quad (25)$$

$$XAC_{jc}^{tms} \geq YAC_{jc}^{tms} \quad \text{for all } t \in T, m \in M, j \in J, c \in C, s \in S. \quad (26)$$

$$XL_{jl}^{tms} \geq YAL_{jl}^{tms} \quad \text{for all } t \in T, m \in M, j \in J, l \in L, s \in S. \quad (27)$$

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.

$$\sum_{m=1}^M \sum_{c=1}^C YJF_{jf}^{tms} \leq OP_{jts} \quad \text{for all } j \in J, t \in T, s \in S. \quad (28)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{c=1}^C YGC_{jc}^{tms} \leq OP_{jts} \quad \text{for all } j \in J, t \in T, s \in S. \quad (29)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{c=1}^C YAC_{jc}^{tms} \leq OP_{jts} \quad \text{for all } j \in J, t \in T, s \in S. \quad (30)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L YAL_{jl}^{tms} \leq OP_{jts} \quad \text{for all } j \in J, t \in T, s \in S. \quad (31)$$

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

$$RI_{t-1,js} + \sum_{m=1}^M \sum_{h=1}^H XHJ_{hj}^{tms} \leq \sum_{m=1}^M CAJ_{jm} \cdot NUM_{tjs} \quad \text{for all } t \in T, j \in J, s \in S. \quad (32)$$

$$RI_{t-1,js} + \sum_{m=1}^M \sum_{h=1}^H XHJ_{hj}^{tms} - \sum_{m=1}^M \sum_{f=1}^F XJF_{jf}^{tms} - \sum_{m=1}^M \sum_{c=1}^C XGC_{jc}^{tms} - \sum_{m=1}^M \sum_{c=1}^C XAC_{jc}^{tms} - \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L XL_{jl}^{tms} \leq RI_{t,js} \quad \text{for all } t \in T, j \in J, s \in S. \quad (33)$$



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

$$\sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S XJF_{jf}^{tms} + XHF_{hf}^{tms} + XUF_f^{tms} \geq DEMFM_m \quad \text{for all } m \in M, f \in F. \quad (34)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S XGC_{jc}^{tms} + XAC_{jc}^{tms} + XUC_c^{tms} \geq DEMCM_m \quad \text{for all } m \in M, c \in C. \quad (35)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S XJL_{jl}^{tms} + XUL_l^{tms} \geq DEMLM_m \quad \text{for all } m \in M, l \in L. \quad (36)$$

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

$$\sum_{f=1}^F XJF_{jf}^{tms} + \sum_{c=1}^C XGC_{jc}^{tms} + \sum_{c=1}^C XAC_{jc}^{tms} + \sum_{l=1}^L XJL_{jl}^{tms} \leq \sum_{h=1}^H XHJ_{jh}^{tms} \quad \text{for all } m \in M, j \in J, t \in T, s \in S. \quad (37)$$

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

$$\sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J \sum_{f=1}^F \sum_{h=1}^H \sum_{s=1}^S YJF_{jf}^{tms} + YF_{hf}^{tms} \geq 1. \quad (38)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J \sum_{c=1}^C \sum_{s=1}^S YGC_{jc}^{tms} + YAC_{jc}^{tms} \geq 1. \quad (39)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \sum_{s=1}^S YAL_{jl}^{tms} \geq 1. \quad (40)$$

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

$$\sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^J \sum_{s=1}^S YJ_{hj}^{tms} \cdot THJ_{hj} \leq MT. \quad (41)$$

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

$$\sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^I \sum_{s=1}^S YIH_{hi}^{tms} \cdot TIH_{ih} \leq MT. \quad (42)$$

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

$$\sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J \sum_{f=1}^F \sum_{s=1}^S YJF_{jf}^{tms} \cdot TJF_{jf} \leq MT. \quad (43)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \sum_{h=1}^H \sum_{f=1}^F \sum_{s=1}^S YF_{hf}^{tms} \cdot THF_{hf} \leq MT. \quad (44)$$

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

$$\sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J \sum_{c=1}^C \sum_{s=1}^S YGC_{jc}^{tms} \cdot TGC_{jc} \leq MT. \quad (45)$$

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

$$\sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J \sum_{c=1}^C \sum_{s=1}^S YAC_{jc}^{tms} \cdot DISJC_{jc} \leq MD. \quad (46)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \sum_{s=1}^S YAL_{jl}^{tms} \cdot DISL_{jl} \leq MD. \quad (47)$$

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

$$NUM_{tjs} \leq OP_{jts} \cdot NJ \quad \text{for all } t \in T, j \in J, s \in S. \quad (48)$$

محدودیت (48) تعداد TDCs را به تعداد محدود می کند. بعضی اوقات نمی توان به تعداد دلخواه TDC ایجاد کرد.

$$NUM_{tjs} \geq OP_{jts} \quad \text{for all } t \in T, j \in J, s \in S. \quad (49)$$

محدودیت (49) اطمینان می دهد که تعداد کل TDCs پیشنهادی کم تر از TDCs موجود برای عملیات است.

$$XHJ_{jh}^{tms} \cdot LW_m \leq \sum_{g=1}^G GHJ_{hg}^{ts} \cdot CAG_m \quad \text{for all } t \in T, h \in H, j \in J, m \in M, s \in S. \quad (50)$$

$$XHF_{hf}^{tms} \cdot LW_m \leq \sum_{g=1}^G GHF_{hg}^{ts} \cdot CAG_m \quad \text{for all } t \in T, h \in H, j \in J, m \in M, s \in S. \quad (51)$$

$$XJF_{jf}^{tms} \cdot LW_m \leq \sum_{g=1}^G GJF_{jg}^{ts} \cdot CAG_m \quad \text{for all } t \in T, f \in F, j \in J, m \in M, s \in S. \quad (52)$$

$$XGC_{jc}^{tms} \cdot LW_m \leq \sum_{g=1}^G GJC_{jg}^{ts} \cdot CAG_m \quad \text{for all } t \in T, c \in C, j \in J, m \in M, s \in S. \quad (53)$$

محدودیت (50) تا محدودیت (53) تضمین می کند که اقلام حمل شده با توجه به محدودیت وزنی از ظرفیت حمل و نقل زمینی فراتر نمی روند.

$$XAC_{jc}^{tms} \cdot LW_m \leq \sum_{a=1}^A AJC_{ja}^{ts} \cdot CAA_m \quad \text{for all } t \in T, c \in C, j \in J, m \in M, s \in S. \quad (54)$$

$$XL_{jl}^{tms} \cdot LW_m \leq \sum_{a=1}^A AJL_{ja}^{ts} \cdot CAA_m \quad \text{for all } t \in T, l \in L, j \in J, m \in M, s \in S. \quad (55)$$

محدودیت های (54) و (55) همانند روش مشابه حمل و نقل زمینی محدودیت ظرفیت وزنی را برای سیستم های حمل و نقل هوایی بیان می کند.

$$\sum_{h=1}^H GIH_{hi}^{ts} \leq NVI_i \cdot QT_{ts} \quad \text{for all } t \in T, i \in I. \quad (56)$$

$$\sum_{j=1}^J GHJ_{hj}^{ts} + \sum_{f=1}^F GHF_{hf}^{ts} \leq NVH_h \cdot QT_{ts} \quad \text{for all } t \in T, h \in H, s \in S. \quad (57)$$

$$\sum_{f=1}^F GJF_{jf}^{ts} + \sum_{c=1}^C GJC_{jc}^{ts} \leq NVG_j \cdot QT_{ts} \quad \text{for all } t \in T, j \in J, s \in S. \quad (58)$$

$$\sum_{c=1}^C AJC_{jc}^{ts} + \sum_{l=1}^L AJL_{jl}^{ts} \leq NVA_j \cdot QT_{ts} \quad \text{for all } t \in T, j \in J, s \in S. \quad (59)$$

محدودیت (56) تا محدودیت (59) اطمینان می دهد که تعداد حمل و نقل بین مراکز ME, H, TDC و DP در هر مرحله از تعداد وسایل حمل و نقل موجود بیش تر نیست. همچنین این محدودیت ها اطمینان می دهد که هر زمان که جابه جایی محموله ای در شبکه در مرحله t انجام شود، شمارنده QT مرحله زمان را به عنوان یک روز عملیاتی در نظر می گیرد.

$$GIH_{hi}^{ts} \geq \sum_{m=1}^M YIH_{hi}^{tms} \quad \text{for all } t \in T, i \in I, h \in H, s \in S. \quad (60)$$

$$GHF_{hf}^{ts} \geq \sum_{m=1}^M YF_{hf}^{tms} \quad \text{for all } t \in T, f \in F, h \in H, s \in S. \quad (61)$$

$$GHJ_{hj}^{ts} \geq \sum_{m=1}^M YJ_{hj}^{tms} \quad \text{for all } t \in T, h \in H, j \in J, s \in S. \quad (62)$$

$$GJF_{jf}^{ts} \geq \sum_{m=1}^M YJF_{jf}^{tms} \quad \text{for all } t \in T, j \in J, f \in F, s \in S. \quad (63)$$

$$GJC_{jc}^{ts} \geq \sum_{m=1}^M YGC_{jc}^{tms} \quad \text{for all } t \in T, j \in J, c \in C, s \in S. \quad (64)$$

$$AJC_{jc}^{ts} \geq \sum_{m=1}^M YAC_{jc}^{tms} \quad \text{for all } t \in T, j \in J, c \in C, s \in S. \quad (65)$$

$$AJL_{jl}^{ts} \geq \sum_{m=1}^M YAL_{jl}^{tms} \quad \text{for all } t \in T, j \in J, l \in L, s \in S. \quad (66)$$



محدودیت (۶۰) تا محدودیت (۶۶) اطمینان می دهد که حمل و نقل بین دو مکان فقط در صورت اتصال این دو صورت می گیرد.

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

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

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

محدودیت (۶۸) تضمین می کند که مقدار کالایی که از ME به هاب اصلی می رود بیش تر از مقدار کالایی است که از H به DP و TDC منتقل می شود.

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

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

محدودیت های (۶۹) و (۷۰) تضمین می کند که حمل و نقل از ME و H انجام خواهد شد.

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

محدودیت (۷۱) تضمین می کند که در سناریو دوم ME بدون در نظر گرفتن فاصله به هاب کالای امدادی برساند.

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

محدودیت (۷۲) تضمین می کند که تعداد $TDCs$ باز در هر مرحله از مرحله قبلی بیش تر است.

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

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

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

محدودیت (۷۳) تا محدودیت (۷۵) تضمین می کند حمل کالا به نقاط تقاضا انجام شود.

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

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

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

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

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





محدودیت اپسیلون: در روش محدودیت اپسیلون^۱، ابتدا یکی از توابع هدف را بهینه می‌کنیم و سایر توابع هدف را به‌عنوان محدودیت مساله در نظر می‌گیریم. سپس با تغییر تدریجی مقادیر محدودیت در نظر 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 در نظر می‌گیریم. سپس با تغییر تدریجی مقادیر محدودیت در نظر گرفته شده، می‌توان تمام نقاط غیر مغلوب را تعیین کرد [40]. فرمول این روش مطابق ذیل می‌باشد:

$$Z = \min (F_j(x)),$$

$$s. t.$$

$$F_i(x) \leq \varepsilon_i, \quad \text{for } i = 1, \dots, k \ \& \ i \neq j. \quad (۸۰)$$

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. ضمناً 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:

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

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

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

با قرار دادن محدوده اپسیلون در مقادیر تابع هدف منتقل شده 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 به‌جوابی 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 در باره مقدار دقیق پارامترهای تعریف شده 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 دوزنقه‌ای، 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 ارائه می‌گردد:

¹ Epsilon constraint



$$\begin{aligned} \min z1 &= G.D + A.E + K.N + B.O + R.S + U.P, \\ s.t. \\ \text{coz2: } F(eh.xhf + ej.xjf) + C(ej(xgc + xac)) + L(ej.xl) + (F + C + L)(ej(xih + xhj)) &< \varepsilon = 61000, \\ \text{co20: } w &> F + C + L, \\ \text{co31: } R.xhj &< X.N, \\ \text{co33: } xf &> F, \\ \text{co34: } xc &> C, \\ \text{co35: } xl &> L, \quad R, O, N \in \{0,1\}, xjf, xgc, xac, xih, xhj, xf, xc, xl, U \geq 0. \end{aligned} \tag{۸۳}$$

محدودیت‌های دیگر نیز به صورت قبل هستند.

در مدل فشرده‌شده، بردارهای P, S, B, K, A, G به ترتیب مرتبط با هزینه‌های حمل و نقل زمینی و هوایی، هزینه‌های تکراری، هزینه‌های منابع انسانی، هزینه‌های ذخیره و هزینه‌های جریمه است. بردارهای L, C, F مربوط به میزان تقاضاهای لایه‌های اول و دوم و سوم می‌باشد. بردارهای $U, xl, xc, xf, xhj, xih, xgc, xjf$ نشان‌دهنده جریان انتقالی مقدار کالا بین دو نقطه هستند. بردارهای N, O, R متغیرهای 1 و 0 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 به منظور مدل نمودن این پارامترها از تابع امکانی مثلثی استفاده شده است.

اگر عدد حقیقی r و عدد فازی $\tilde{a} = (a1, a2, a3)$ را در نظر 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 به صورت میانگین معیارهای الزام و امکان تعریف می‌شود و در این صورت معیارهای الزام و امکان به صورت زیر تعریف می‌شود:

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

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

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

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

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

هم‌چنین برای عدد فازی a در سطح اطمینان $0.5 \leq \alpha \leq 1$ 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 به صورت 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 به صورت زیر است:

(پارامترهای فازی X, L, C و F به صورت $\tilde{a} \leq r$ و پارامتر N به صورت $\tilde{a} \geq r$ در نظر گرفته می‌شود).

در مدل فوق aX, aL, aC, aF سطح اطمینان تصمیم‌گیرندگان برای تامین محدودیت‌های امکانی را نشان می‌دهند. منطقاً محدودیت‌ها باید با سطح اطمینان بزرگ‌تر از 0.5 / 0.5 ارضا شوند، یعنی $aX, aC, aL, aF > 0.5$ باشد. در این نوع رویکرد، مقدار نهایی به صورت ذهنی و تجربی حاصل می‌شود که رویکرد را با چالش‌هایی روبه‌رو می‌کند که عبارت‌اند از:

- 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 انتخاب شده بهینه باشند.



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

$$\min z1 = G.D + A.E + K.N + B.O + R.S + U.P, \quad (92)$$

s.t.

$$\begin{aligned} \text{coz2: } & \left(\frac{f1+2f2+f3}{4}\right)(eh.xhf + ej.xjf) + \left(\frac{c1+2c2+c3}{4}\right)(ej(xgc + xac)) + \left(\frac{l1+2l2+l3}{4}\right)(ej.xl) + \left(\frac{f1+2f2+f3}{4}\right) + \\ & \frac{c1+2c2+c3}{4} + \frac{l1+2l2+l3}{4} (ej(xih + xhj)) < \varepsilon = 61000, \\ \text{co20: } & w > (((2\alpha F - 1)F3 - (2\alpha F + 2)F2) \\ & + ((2\alpha C - 1)C3 - (2\alpha C + 2)C2) + ((2\alpha L - 1)L3 - (2\alpha L + 2)L2)), \\ \text{co31: } & R.xhj < ((2\alpha X - 1)X1 + (2 - 2\alpha X)X2).N, \\ \text{co33: } & xf > ((2\alpha F - 1)F3 - (2\alpha F + 2)F2), \\ \text{co34: } & xc > ((2\alpha C - 1)C3 - (2\alpha C + 2)C2), \\ \text{co35: } & xl > ((2\alpha L - 1)L3 - (2\alpha L + 2)L2), \quad R, O, N \in \{0,1\}, xjf, xgc, xac, xih, xhj, xf, xc, xl, U \geq 0. \end{aligned}$$

محدودیت‌های دیگر نیز به صورت 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 معرفی شده که درجه ریسک‌گریزی در شرایط عدم قطعیت را افزایش می‌دهد. مدل به این صورت ارایه می‌گردد:

$$\text{MinE}[Z] = G.D + A.E + K.N + B.O + R.S + U.P, \quad (93)$$

$$\begin{aligned} +\tau & \left(((F2 - (2 - 2\alpha F)F2 - (2\alpha F - 1)F3) + (C2 - (2 - 2\alpha C)C2 - (2\alpha C - 1)C3) + (L2 - \right. \\ & \left. (2 - 2\alpha L)L2 - (2\alpha L - 1)L3) \right), \\ & +\omega((2\alpha X - 1)X1 + (2 - 2\alpha X)X2 - X1).N, \\ & +\varphi F(F2 - (2 - 2\alpha F)F2 - (2\alpha F - 1)F3) \\ & +\varphi C(C2 - (2 - 2\alpha C)C2 - (2\alpha C - 1)C3) \\ & +\varphi L(L2 - (2 - 2\alpha L)L2 - (2\alpha L - 1)L3), \\ \text{coz2: } & \left(\frac{f1+2f2+f3}{4}\right)(eh.xhf + ej.xjf) + \left(\frac{c1+2c2+c3}{4}\right)(ej(xgc + xac)) + \left(\frac{l1+2l2+l3}{4}\right)(ej.xl) + \left(\frac{f1+2f2+f3}{4}\right) + \\ & \frac{c1+2c2+c3}{4} + \frac{l1+2l2+l3}{4} (ej(xih + xhj)) < \varepsilon = 61000, \\ \text{o20: } & w > (2\alpha F - 1)F3 - (2\alpha F + 2)F2 + (2\alpha C - 1)C3 - (2\alpha C + 2)C2 \\ & + (2\alpha L - 1)L3 - (2\alpha L + 2)L2 \\ \text{co31: } & R.xhj < ((2\alpha X - 1)X1 + (2 - 2\alpha X)X2).N, \\ \text{co33: } & xf > ((2\alpha F - 1)F3 - (2\alpha F + 2)F2), \\ \text{co34: } & xc > ((2\alpha C - 1)C3 - (2\alpha C + 2)C2), \\ \text{co35: } & xl > ((2\alpha L - 1)L3 - (2\alpha L + 2)L2), \\ \text{op, m, o} & \in \{0,1\}, xjf, xgc, xac, xih, xhj, xf, xc, xl, q \geq 0. \end{aligned}$$

محدودیت‌های دیگر نیز به صورت 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 مدل بالا 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 ارائه می‌شوند:

$$v = \alpha X. N. \tag{94}$$

مدل معادله خطی مساله به صورت زیر است:

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

محدودیت‌های دیگر نیز به صورت قبل هستند.

۴- یافته‌های پژوهش

در این بخش به منظور 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 نسبتاً واقعی در مدل استفاده می‌شود. دو مورد از بندرها تجاری کشور، بندر عسلویه و بندر انزلی، به‌عنوان نقاط اصلی ورودی (ME) کمک‌های اولیه در نظر گرفته شدند. در کل ۳ هاب اصلی در کشور شامل کرمانشاه، همدان و تهران در نظر گرفته شد که هاب موجود در تهران قابلیت پایایی دارد.

جدول ۲- تعداد وسایل حمل و نقل موجود در MEs.

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

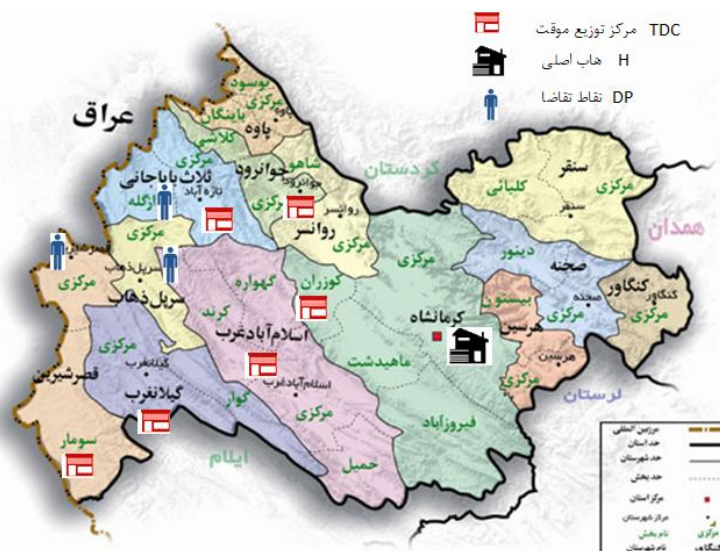
ME	بندر انزلی	بندر عسلویه
تعداد کامیون موجود در واحد ME	100	150

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، هم چنین شعاع پوشش هر هاب و ظرفیت ذخیره سازی آن در جدول های ۲ و ۳ آمده است. مکان های منتخب برای استقرار مراکز توزیع موقت حداکثر ۶ کاندید شامل سومار، گیلان غرب، اسلام آباد غرب، تازه آباد، جوانرود و کوزران می باشد. نقاط تقاضای منتخب برای مدل ما شامل سه لایه هستند: لایه اول کرنه-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 تک هدفه کردن مدل، از الگوریتم محدودیت اسیلون استفاده کردیم. این الگوریتم برای ارایه مجموعه ای از راه حل های بهینه پارتو در مسایل چند منظوره مختلط چند هدفه در مقایسه با روش های جایگزین در ادبیات بسیار کارآمد است. نسخه آماده استفاده آن در بستر بهینه سازی GAMS موجود است. محدودیت اسیلون بر اساس روش محدودیت شناخته شده ایجاد شده است که یکی از توابع هدف را با استفاده از توابع هدف باقی مانده به عنوان محدودیت و تغییر دادن سمت راست آن ها بهینه می کند. روش محدودیت اسیلون شامل دو مرحله است: تولید جدول بازده و استفاده از محدوده های جدول بازده برای اعمال روش. بعد از آن تک هدفه کردن مدل از برنامه ریزی امکانی و بعد از آن استوار برای کاهش عدم قطعیت و بهینه سازی مدل استفاده کردیم. در پژوهش حاضر، مدل ریاضی MILP در شرایط عملیاتی و با استفاده از مجموعه ای از داده های واقعی بر روی رایانه ای با پردازنده Core i3-2.4 GH و RAM 6GB حل گردید. مدل برنامه ریزی امکانی- استوار متغیرهای تصمیم و سطوح تصمیم بیش تری به مدل اضافه کرد که پیچیدگی مدل را افزایش می داد اما خروجی ها نشان می دهد که مدل توسعه یافته





در زمان معقولی توسط نرم‌افزار بهینه‌سازی نسخه ۲/۰/۲۳ GAMS و حل‌کننده CPLEX حل گردید. به عبارت دیگر، 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. در نهایت 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: به منظور ارزیابی مدل و عملکرد و استوار بودن مدل و جواب‌های حاصله از آن، پارامترهای غیرقطعی مدل ۵ بار به طور تصادفی تولید می‌شوند و جواب‌های به‌دست‌آمده بررسی شده و مقدار انحراف استاندارد آن‌ها ارزیابی می‌شود. به منظور شبیه‌سازی شرایط واقعی، عدد فازی تصادفی را فرض کنید که پارامتر $\vec{a} = (a_1, a_2, a_3)$ یک پارامتر غیرقطعی با تابع امکانی مثلثی است که برای واقعی‌سازی باید یک عدد تصادفی انتخاب شده و بین حد بالا و پایین قرار بگیرد $(a_{real} = [a_1, a_3])$. سپس متغیرهای مدل حاصل شده تحت هر سری از داده‌های تصادفی قرار داده می‌شوند. نتایج مدل برنامه‌ریزی امکانی^۱ با مدل برنامه‌ریزی استوار^۲ به همراه 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 ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل با ضرایب بهینگی ۱۰ دارای حداقل انحراف استاندارد و هم‌زمان دارای یک میانگین قابل قبول 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.

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

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	RP $\varphi f, \varphi c, \varphi l, \tau, \omega = 10$	RP $\varphi f, \varphi c, \varphi l, \tau, \omega = 5$	RP $\varphi f, \varphi c, \varphi l, \tau, \omega = 0.5$	FP $\alpha F, \alpha C, \alpha L, \alpha X = 1$	FP $\alpha F, \alpha C, \alpha L, \alpha X = 0.75$
1	1, 168, 235, 000	1, 244,293, 000	1, 242, 191, 000	2, 086, 602, 000	2, 253, 321, 000
2	1, 140, 263, 000	1, 064, 748, 000	1, 040, 345, 000	1, 973, 203, 000	2, 237, 650, 000
3	1, 304, 798, 000	1, 384, 660, 000	1, 332, 095, 000	2, 702, 200, 000	2, 375, 100, 000
4	1, 321, 003, 000	1, 176, 421, 000	1, 320, 857, 000	2, 258, 402, 000	2, 538, 250, 000
5	1, 159, 681, 000	1, 240, 016, 000	1, 241, 764, 000	2, 086, 602, 000	2, 253, 321, 000
متوسط هزینه	1, 218, 796, 000	1, 221, 967, 600	1, 235, 450, 400	2, 221, 401, 800	2, 331, 528, 400
انحراف استاندارد	86690606.31	116310896.5	117031919.1	287437184.6	128138843.7

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؛ به عبارتی 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 باز شده 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
$\alpha F, \alpha C, \alpha L, \alpha J=0.55$	2	2	1	0	1	0
$\alpha F, \alpha C, \alpha L, \alpha J=0.65$	2	2	1	0	1	1
$\alpha F, \alpha C, \alpha L, \alpha J=0.75$	2	2	1	1	2	0
$\alpha F, \alpha C, \alpha L, \alpha J=0.85$	2	2	2	1	2	1
$\alpha F, \alpha C, \alpha L, \alpha J=0.95$	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
تابع هدف اول	452, 040, 000	2, 217, 021, 000
	$\alpha F, \alpha C, \alpha L, \alpha X=0.75$	$\tau, \omega, \varphi F, \varphi C, \varphi L = 2$
	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 بحرانی لایه اول تابع هدف امکانی استوار افزایش می‌یابد؛ این افزایش در مدل اولیه بسیار محسوس‌تر از مدل امکانی استوار است به طوری که در مدل اولیه بین بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار تقاضای ممکن حدود 0.042% افزایش هزینه داریم ولی این مقدار در مدل استوار به 0.034% 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.

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

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.

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

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 به شدت 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.

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



۵- بحث و نتیجه گیری

۶۰۴

در طول سال‌های اخیر، وقوع بحران‌ها و اتفاقات غیر مترقبه و مقابله با آن‌ها چالشی بزرگ برای مدیران و برنامه‌ریزان بحران بود و به همین علت طراحی شبکه‌های زنجیره‌تأمین 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 ارائه 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 امداد رسانی در هنگام وقوع بحران شناسایی شد. سپس مدل‌سازی ریاضی مساله بحران زلزله و امداد رسانی با توجه به اطلاعات موجود نوشته شد و مدل امکانی-استوار در برنامه GAMS وارد و نتایج محاسباتی به دست آمد. سپس با تحلیل نتایج میزان کارآمد بودن نتایج بررسی شد. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، این مدل‌سازی، اولین مدل زنجیره‌تأمین بشردوستانه پایا به صورت سناریو محور 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 قابل توجهی 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، زنجیره‌تأمین را حفظ می‌کند و سبب می‌شود در انتقال کالا خللی به وجود 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 حمل و نقل زمینی منتقل شده و پس از آن با توجه به توپوگرافی منطقه از TDCs به نقاط تقاضا با حمل و نقل زمینی یا هوایی منتقل می‌شود. در قسمت مرتبط با حمل و نقل، فاصله مراکز، زمان مورد نیاز برای انتقال بین نقاط، انواع و تعداد وسایل حمل و نقل در هر مرکز و ظرفیت هر حمل و نقل در نظر 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 حمل و نقل زمینی قابل دسترسی است، لایه دوم که تقاضای آن توسط TDCs از راه حمل و نقل زمینی و هوایی تأمین می‌شود و لایه سوم که به دلیل صعب‌العبور بودن مسیر تنها با حمل و نقل هوایی از TDCs می‌توان به آن رسید. در شبکه زنجیره‌تأمین 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، حمل و نقل، مواد اولیه و موجودی‌ها می‌باشد. این مطالعه به مکان‌یابی مراکز توزیع موقت امداد با در نظر گرفتن محدودیت‌ها و مشخصات جغرافیایی فاجعه می‌پردازد. در این مقاله با در نظر 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 در نظر گرفتن نقاط تقاضا بر اساس فاصله نقطه تقاضا از هاب اصلی از پیچیدگی‌های مساله می‌کاهد. هم‌چنین با توجه به اهمیت بحث اختلالات در تأمین‌کنندگان و احتمال بروز اختلال در سطح شبکه، تابع هدفی تحت عنوان قابلیت اطمینان برای پایا بودن مدل پیشنهادی در نظر گرفتیم که در شرایط بحرانی و اختلال در شبکه پاسخگویی موثری داشته باشد. بعد از توابع هدف ذکر شده به بررسی بیش‌تر محدودیت‌های ظرفیت، فاصله، زمان، حمل و نقل، پایایی و... پرداخته شده است و بعد از آن 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 به عنوان تابع هدف اصلی مساله برای روش محدودیت اپسیلون انتخاب شده است، سپس با استفاده از روش امکانی-استوار به حل مدل پرداختیم و بعد از آن تحلیل حساسیت‌های لازم روی مدل اجرا شد. تابع هدف هزینه، اولین و مهم‌ترین تابع هدف مدل‌سازی این مطالعه است که به بررسی تحلیل‌های انجام شده در این باره 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 نامنتظمی داشته است به طوری که 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 انجام شده 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 اعلام شده و در نهایت میانگین هزینه برای کمک‌رسانی به مناطق آسیب دیده برابر با ۱۱۶۸۴۰۷۰۰۰ می‌باشد که مقدار قابل توجهی است. با بررسی‌های انجام شده 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 به دست آمده از حل مدل ارزیابی شده 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	
1	2	تعداد TDCs باز
J4	J5, J4	تعداد MEs مورد استفاده
2	2	تعداد هاب‌های پایا
0	0	تعداد هاب‌های غیر پایا

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 کالا 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 بحران زده از طریق هاب شماره دو تامین می‌شود. هم چنین جریان زمینی بین TDC و نقطه تقاضا لایه دوم برقرار نیست چراکه این جریان از طریق حمل و نقل هوایی به صورت تر است و از آن طریق انجام می‌شود. در آخر جریان بین مرکز توزیع موقت شماره ۴ و نقطه آسیب دیده لایه سوم به صورت حمل و نقل 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 فعلیتی 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 به صورت زمینی و از مرکز توزیع شماره ۴ صورت می‌گیرد. هم چنین نقطه تقاضا لایه سوم به صورت 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	
از H2 به H1	از H2 به H1	برقراری جریان کالا بین ME و H
از H1 به H2	از H1 به H2	برقراری جریان کالا بین H و لایه اول
از H2 به F	از H2 به F	برقراری جریان کالا بین TDC و H
از H1 به J4	از H1 به J4	برقراری جریان کالا بین TDC و لایه اول به صورت زمینی
از J4 به F	از J4 به F	برقراری جریان کالا بین TDC و لایه دوم به صورت زمینی
از J5 به F	از J5 به F	برقراری جریان کالا بین TDC و لایه دوم به صورت هوایی
از J4 به C	از J4 به C	برقراری جریان کالا بین TDC و لایه سوم به صورت هوایی
از J4 به L	از J4 به L	

نتایج موجودی کالا در مراکز و مقدار کالای انتقال یافته از مراکز را در جدول ۱۳ مشاهده می‌کنیم. سناریو اول به این صورت است که موجودی کالا در مراکز توزیع موقت در انتهای عملیات امداد رسانی 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. هم چنین هر دو هاب مقدار ۲ تن کالا را برای نقطه تقاضا شماره ۱ تامین می‌کند. به این صورت هیچ انتقالی از مرکز توزیع موقت به صورت زمینی به نقطه تقاضا لایه اول و دوم نخواهیم داشت و بعد از آن مرکز توزیع موقت با حمل و نقل 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.

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

نتایج مربوط به حمل‌ونقل بین مراکز و گره‌ها در جدول ۱۴ ارائه 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 انجام شده 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 دوم	سناریو اول	
I1.h2=31	I1.h2=22	تعداد حمل‌ونقل ME به H
H2.j5=8	I2.h1=8	
H2.j4=8	H1.j4=4	تعداد حمل‌ونقل H به TDC
	H2.j4=8	
J5.f=2	H2.f=2	تعداد حمل‌ونقل از H به لایه اول
j4.f=1		تعداد حمل‌ونقل از TDC به لایه اول به‌صورت زمینی
J5.c=1		
j4.c=2		تعداد حمل‌ونقل از TDC به لایه دوم به‌صورت زمینی
	j4.c=4	تعداد حمل‌ونقل از TDC به لایه دوم به‌صورت هوایی
J5.l=1	j4.l=1	تعداد حمل‌ونقل از TDC به لایه سوم به‌صورت هوایی
j4.l=1		

نتایج این مطالعه نشان داد که تصمیمات مکان‌یابی مراکز توزیع امدادی تأثیر 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 این که 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., & Barbarosoglu, 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., & Pishvae, 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] Yahyaee, 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., Jalalinaeni, 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., Martín-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., & Pishvae, 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., & Pishvae, 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., & Pishvae, 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