

طراحی شبکه توزیع اقلام ضروری در شرایط زلزله‌های بزرگ (مطالعه موردی: شهر تهران)

رضا بیرانوند^۱، عبدالله آقایی^{۲*}

۱. کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
۲. استاد گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

خلاصه

جوامع کنونی خود را ملزم می‌دانند برای واکنش مؤثر و کاهش اثرات مخرب فجایع به‌وجود آمده، برنامه‌ریزی‌های لازم را انجام دهند. در این تحقیق، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی تحت عدم قطعیت برای امداد رسانی و واکنش به بحران زلزله توسعه داده شده است. در مدل ارائه شده برای افزایش قابلیت اطمینان، احتمال خرابی تسهیلات با توجه به شدت زلزله در نظر گرفته می‌شود. مراکز توزیع، دو نوع در نظر گرفته می‌شوند، نوع اول مراکز توزیع محلی، که از مراکز عمومی استفاده می‌شود و نزدیک به نقاط حادثه هستند، این نوع مراکز از این جهت که از مراکز عمومی استفاده می‌کنند، احتمال خرابی دارند. نوع دیگر، مراکز توزیع قابل اطمینان هستند که در خارج از منطقه حادثه، احداث می‌شوند و به دلیل صرف هزینه بیشتر برای ساخت آن‌ها احتمال خرابی بسیار کمی دارند. در مدل جدید ارائه شده سعی شده است علاوه بر در نظر گرفتن قابلیت‌های اطمینان، در بحث حمل و نقل نیز با در نظر گرفتن حالت چند سفره در وسایل نقلیه، مدل کامل‌تری برای برنامه‌ریزی ارائه گردد. عدم قطعیت با استفاده از رویکرد احتمال مبتنی بر سناریو مدل‌سازی و یک مطالعه موردی از شهر تهران برای نشان دادن عملکرد مدل پیشنهادی ارائه می‌شود. نتایج حاصل شده از مدل پیشنهادی نشان می‌دهد، امداد رسانی مؤثر و کاراتری از نظر زمان و هزینه انجام می‌پذیرد، از این رو می‌تواند به مدیران بحران در واکنش به بحران به‌وجود آمده در جهت تأمین بودجه مورد نیاز و برنامه‌ریزی لجستیکی مناسب کمک نماید.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۴۰۱/۲/۹

پذیرش ۱۴۰۱/۵/۱

(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:

زنجیره تأمین بشردوستانه

بحران

قابلیت اطمینان

شبکه توزیع امداد

بهینه‌سازی چندهدفه

۱. مقدمه

با این بلایا برای کاهش تلفات و خسارات بیشتر بالا برد. لجستیک امداد و برنامه‌ریزی‌های مربوط به آن، نقش بسیار مهمی در کاهش خسارات و رنج افراد آسیب‌دیده خواهد داشت. لجستیک بشردوستانه به‌عنوان فرآیند برنامه‌ریزی، اجرا و کنترل جریان و ذخیره‌سازی کارآمد، مقرون‌به‌صرفه کالا و مواد و همچنین اطلاعات مربوط به آن از نقطه مبدأ تا نقطه مصرف به‌منظور کاهش درد و رنج افراد آسیب‌پذیر تعریف شده است. مدیریت عملیات لجستیک بشردوستانه به دلیل خطرات و عدم اطمینان همراه با هر فاجعه بسیار پیچیده است. بیشتر محققان با استفاده از مدل‌سازی و بهینه‌سازی، راه‌حلهایی را برای مسائل لجستیک بشردوستانه ارائه می‌دهند. به‌طور کلی دولت‌ها، ارتش، جامعه مدنی و سازمان‌های بشردوستانه مسئول انجام چنین اقدامات امدادی،

در دهه‌های گذشته به دلیل رشد جمعیت، روند جهانی شهرنشینی، استفاده از زمین و فشارهای شدید بر اکوسیستم، میزان و تأثیر بلایای طبیعی به‌طرز چشم‌گیری افزایش یافته است. بر اساس بانک اطلاعات بلایای طبیعی، زلزله در قرن بیستم عامل مرگ بیش از ۱/۸ میلیون نفر و در سال‌های بین ۱۹۹۰-۲۰۱۰ در هر رویداد به‌طور متوسط بر مرگ ۲۰۵۲ نفر تأثیر گذاشته است [۱]. عدم آمادگی کافی در مناطق شهری میزان آسیب‌رسانی زمین لرزه‌های مهلک و مهیب را افزایش داده است. جلوگیری از وقوع این بلایا غیرقابل ممکن است، تنها می‌توان با استفاده از برنامه‌ریزی مناسب، آمادگی خود را جهت مواجهه

* نویسنده مسئول: عبدالله آقایی

تلفن: ۰۲۱-۸۴۰۶۳۳۶۳، پست الکترونیکی: AAghaie@kntu.ac.ir

اضطراری هستند [۲].

هر کدام از این ارگان‌ها باتوجه به مجموعه سازمانی خود، اهداف و روش‌های مختلفی برای امداد رسانی دارند که این اختلافات سبب ناکارآمدی امداد رسانی می‌شود. وجود برنامه‌ریزی مناسب و جامع برای فعالیت‌های لجستیکی، سبب کارایی امداد رسانی و کاهش رنج آسیب‌دیدگان می‌شود. باتوجه به اهمیت این مسأله، در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط، برای امداد رسانی و انتقال کالاهای امدادی به آسیب‌دیده‌گان زلزله، ارائه می‌شود.

در ادامه بخش‌های مختلف مقاله به این‌صورت سازماندهی می‌شوند. در بخش ۲ تحقیقات پیشین بررسی می‌شود. در بخش ۳ مسأله مورد نظر توضیح داده می‌شود در بخش ۴ روش حل مورد استفاده بیان می‌شود. در بخش ۵ مطالعه موردی مورد نظر و نتایج کسب شده از مدل پیشنهادی بیان می‌شود. در بخش ۷ نیز نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی بیان خواهد شد.

۲. مرور ادبیات

شبکه‌های توزیع امدادی کنونی باتوجه به نوع سطح توزیع، نوع افق برنامه‌ریزی، عملکرد مکان‌یابی تسهیلات، تعداد سطوح، انتخاب حالت حمل‌ونقل و وضعیت زیرساخت‌ها متفاوت هستند. در زمینه بحران، شبکه‌های توزیع باید برنامه‌ریزی و سازماندهی شوند حتی اگر آگاهی از وضعیت حداقل باشد. اگرچه هدف از توزیع امداد تأمین نیازهای فوری جمعیت در کوتاه‌ترین زمان و کمترین هزینه ممکن است، اما انعطاف‌پذیری در برخورد با تقاضاهای متغیر یا پویا ممکن است حتی از اهمیت بیشتری برخوردار باشد. چالش‌های موجود در توزیع امداد از عدم اطمینان از عرضه و تقاضا، عدم اطمینان از زمان سفر به دلیل انسداد زیرساخت‌ها، خرابی کانال‌های ارتباطی، مسائل حمل‌ونقل، مسائل امنیتی و منابع محدود ناشی می‌شود [۳]. تحقیقات پیشین در این حوزه را می‌توان در سه دسته بررسی کرد: مکان‌یابی/تخصیص، حمل‌ونقل، ترکیبی از مسائل مکان‌یابی و حمل‌ونقل. در تحقیقات مختلف دیگر نیز تقسیم‌بندی‌هایی به این‌صورت انجام شده که به دنبال بررسی دقیق تحقیقات در این زمینه هستند [۴].

۲-۱. مکان‌یابی/تخصیص

مکان‌یابی تسهیلات یکی از مسائل اصلی در طراحی و برنامه‌ریزی شبکه لجستیک است که در آن تصمیم‌گیری مربوط به محل قرارگیری تسهیلات و تخصیص مشتریان به این مراکز توزیع انجام می‌گیرد. مسأله‌ی مکان‌یابی/تخصیص اولین بار توسط کوپر معرفی و حل شد [۵].

مکان‌یابی تسهیلات در مدیریت بحران، که شامل، شناسایی مکان مناسب پناهگاه‌ها، مراکز درمانی، انبارها، مراکز توزیع، محل‌های آواربرداری و سایر مکان‌ها می‌شود، برای کاهش رنج انسان بسیار مهم است. برای یافتن مراکز ذکر شده قبلی، مطالعه مسائل مکان‌یابی تسهیلات در مدیریت بحران نقش حیاتی دارد. مکان‌یابی تسهیلات را می‌توان بر اساس دو سوال تعریف کرد: کدام منطقه باید برای مکان‌یابی

تجهیزات انتخاب شود، و چه زمانی باید تسهیلات جدید ایجاد شوند یا تسهیلات موجود بازسازی شوند؟

یونمی و همکاران مسأله مکان‌یابی تجهیزات امدادی در شرایط قبل و بعد از فاجعه را در نظر گرفتند. برای آزمایش مدل پیشنهادی، چهار حالت قطعی، تصادفی، پویا و استوار مدل مورد بررسی قرار گرفته است. در شرایط پیش از وقوع فاجعه، مکان‌یابی پناهگاه‌ها و انبارهای امداد رسانی و در وضعیت پس از بحران، مکان‌یابی مراکز توزیع و مراکز درمانی انجام شده است. برای همه این سناریوها، انواع فاجعه، تصمیمات، اهداف، محدودیت‌ها و روش‌های حل در یک مطالعه موردی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد [۶].

کوتس و کانتیلو مدلی از مکان‌یابی تسهیلات مناسب را پیشنهاد کردند که به دنبال به حداقل رساندن هزینه‌های لجستیکی و هزینه‌های محرومیت است. از جمله تصمیمات مهم تعیین میزان هر نوع محصول که برای خدمات‌رسانی به مناطق آسیب‌دیده از یک فاجعه مورد نیاز است، آماده می‌شود. از روش حل دقیق برای حل استفاده شده است [۷].

حقی و همکاران مدلی چندهدفه برای توزیع کالا و انتقال مصدومان بررسی کردند. برای نزدیکتر شدن به حالت واقعی، نویسندگان برخی عدم قطعیت‌ها را در نظر گرفتند و برای رسیدگی به عدم قطعیت‌ها، از یک روش بهینه‌سازی استوار استفاده شد و در نهایت، از روش محدودیت‌اپسیلون برای حل مدل استفاده کردند [۸].

رحمانی و همکاران به مطالعه یک مدل شبکه زنجیره‌تأمین بشردوستانه برای برخورد با ریسک‌های موجود در خرابی تسهیلات بعد از یک فاجعه پرداختند. در این مطالعه از مراکز پشتیبان برای بالا بردن قابلیت اطمینان مدل استفاده کرده‌اند. برای نزدیک شدن به حالت واقعی، آن‌ها با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار، مدل ارائه شده را در شرایط عدم قطعیت توسعه داده‌اند. احتمال وقوع و بزرگی شدت یک حادثه به‌عنوان پارامترهای عدم قطعیت در نظر گرفته شده است. همچنین برای حل مدل از روش لاگرانژ استفاده شده است. برای اعتبارسنجی مدل ارائه شده نیز از یک مطالعه موردی در شهر تهران استفاده کردند [۹].

ثقه‌ئی و همکاران در پژوهش خود بهینه‌سازی دوسطحی چند پیرو برای مسأله مکان‌یابی و تخصیص انبارهای اضطراری در سطوح ملی و منطقه‌ای را بررسی کردند. مسأله به‌صورت عدم همکاری پیروها مدل شده است، باتوجه به پیچیدگی بالای حل، یک رویکرد تکاملی هم‌زمان بر مبنای روش‌های تخصیص ابتکاری و الگوریتم ژنتیک جهت حل مسأله در سایزهای مختلف توسعه داده شده است [۱۰].

۲-۲. حمل‌ونقل

پس از ایجاد شبکه لجستیکی، برنامه تحویل امداد باید ایجاد شود که منجر به مسائل حمل‌ونقل یا توزیع می‌شود. به دلیل تعداد و تنوع پیشنهادات، این موضوع در تحقیقات لجستیک امداد بیشترین محبوبیت را دارد، در واقع مشارکت‌های حمل‌ونقل به چالش‌های خاص توزیع امداد نزدیکتر است [۵].

عالم و همکاران یک مدل جریان شبکه تصادفی دومرحله‌ای را برای تسریع روند توزیع کمک‌های بشردوستانه به قربانیان مناطق آسیب‌دیده از بلایا پیشنهاد کردند. برخی از ویژگی‌های کاربردی مانند تخصیص بودجه، تهیه، تغییر زمان عرضه در افق چنددوره‌ای پویا و اندازه ناوگان وسایل نقلیه چند نوع در این مدل نظر گرفته شده است که به ندرت در مدل‌های جریان شبکه مورد توجه قرار می‌گیرد. در نهایت، نویسنده یک مطالعه موردی در مورد سیل و رانش زمین در ایالت ریودوژانیرو، برزیل ارائه کرده است [۱۳].

بخش خصوصی به‌طور گسترده به‌عنوان یک عنصر مفید در واکنش اضطراری به فجایع در نظر گرفته می‌شود. سازمان‌های بشردوستانه تمایل دارند با بخش خصوصی برای ارسال اقلام ضروری به مناطق آسیب‌دیده و کاهش پیچیدگی فاجعه‌ها همکاری کنند. شکر و همکاران، یک زنجیره امداد کارآمد، تشکیل شده از یک سازمان بشردوستانه و شرکت‌های طرف سوم برای برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری غیرمتمرکز در لجستیک بشردوستانه پیشنهاد می‌کنند. آن‌ها یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای چندهدفه را توسعه دادند و معادل استوار مدل پیشنهادی نیز برای مقابله با عدم قطعیت توسعه یافته است. از الگوریتم تجزیه بندرز نیز برای حل مسائل در مقیاس بزرگ استفاده شده است [۱۴].

در زمینه حمل‌ونقل چندحالتی تحت برخی عدم قطعیت‌ها، مورنو و همکاران یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای را برای توزیع چندمحصولی بررسی کردند. مدل آن‌ها ادغام چند تصمیم مختلف است، یعنی تصمیم‌گیری در مورد مکان‌یابی، حمل‌ونقل و اندازه ناوگان با مفهوم چنددوره‌ای است. یکی از ویژگی‌های خاص این مدل استفاده مجدد از خودرو در یک دوره برای پوشش مسیرهای اضافی است. همچنین آن‌ها از الگوریتم رهاسازی-ثابت‌سازی جهت حل مدل پیشنهادی استفاده کردند [۱۵]. در ادامه و در جدول (۱) مقالات بررسی شده در این تحقیق با توجه به فاکتورهای مختلف مقایسه می‌شوند.

به‌طور کلی مشارکت‌های این تحقیق عبارتند از:

- مراکز توزیع پشتیبان با قابلیت اطمینان برای مراکز آسیب‌دیده جمعیت، برای بهبود قابلیت اطمینان در نظر گرفته شده است.
- ارائه یک مدل ریاضی دوهدفه، برای به حداقل رساندن زمان انتقال کالاهای امدادی و هزینه‌های لجستیکی مربوطه در نظر گرفته می‌شود.
- عدم قطعیت مربوط به احتمال وقوع زلزله، بزرگی زلزله، احتمال تخریب مراکز توزیع با استفاده از رویکرد سناریو محور در نظر گرفته شده است.
- از مراکز و تاسیسات عمومی برای استفاده به‌عنوان مراکز توزیع در نظر گرفته شده است.
- از تهران به‌عنوان مطالعه موردی برای توصیف عملکرد مدل و کاربرد روش توصیف شده استفاده شد.
- حالت استفاده مجدد از وسایل نقلیه در طول افق زمانی و در هر دوره در نظر گرفته شده است.

معمولاً هنگام وقوع بلایی مانند زلزله، سازمان‌های امدادی برای پاسخ‌گویی به تقاضای مناطق آسیب‌دیده از بلایا، با کمبود منابع مواجه هستند. با پرداختن به این مسأله، نجفی و همکاران یک مدل بهینه‌سازی استوار برای توزیع کارآمد منابع محدود پیشنهاد کردند. آن‌ها در مدل چندهدفه خود یک سیستم حمل‌ونقل چندمنظوره برای حمل‌ونقل کالا و تخلیه شدگان در نظر گرفتند. اهداف در نظر گرفته شده در مدل طراحی شده به‌دنبال به حداقل رساندن مجموع وزنی مصدومان رسیدگی نشده، تقاضاهای برآورده نشده و تعداد وسایل نقلیه استفاده شده است. در مدل ارائه شده آن‌ها عناصری از قبیل تقاضای کالا، تعداد مصدومان و عرضه کالا با عدم قطعیت در نظر گرفته شده است [۱۰].

مقبرو و همکاران یک مدل توزیع چندحالتی را بررسی می‌کنند. آن‌ها یک زنجیره سه‌سطحی متشکل از تأمین‌کننده، منطقه عملیات لجستیکی و مناطق آسیب‌دیده را در نظر می‌گیرند. مدل طراحی شده مراحل مختلفی از قبیل شرایط شبکه و زیرساخت، دسترسی به تسهیلات و روش‌های حمل‌ونقل را در نظر می‌گیرد. قسمت اول تابع هدف روی به حداقل رساندن زمان تحویل و قسمت دوم روی به حداقل رساندن کل هزینه‌ها تمرکز دارد [۳].

۲-۳. ترکیبی مکان‌یابی و حمل‌ونقل

طراحی شبکه توزیع در زنجیره تأمین مرحله‌ای اساسی است و بدین منظور باید تصمیمات مختلفی در سه سطح استراتژیک، تاکتیکی و عملیاتی گرفته شود [۴].

مسائل مکان‌یابی و مسائل حمل‌ونقل دو مرحله اصلی در مدیریت توزیع امداد هستند. با بررسی ادبیات این حوزه نیز ثابت می‌شود که تصمیمات مسائل مکان‌یابی تأثیر مستقیمی بر کارایی فعالیت‌های توزیع امداد دارد. انتخاب انبارها و همچنین ظرفیت موردنیاز مراکز، مستقیماً بر تصمیمات توزیع تأثیر می‌گذارد. بنابراین، تکامل طبیعی فرآیند بهینه‌سازی تصمیم، نزدیک شدن به این دو مسأله از منظر یکپارچه است که شامل تجزیه و تحلیل روابط متقابل بین این دو سطح تصمیم‌گیری است [۵]. در ادامه برخی تحقیقات که به‌صورت ترکیبی این دو نوع مسأله را دربر می‌گیرد، بررسی می‌شوند.

توفیقی و همکاران در تحقیق خود، یک مدل جدید دومرحله‌ای برنامه‌ریزی احتمالی-تصادفی مبتنی بر سناریو برای طراحی شبکه لجستیکی بشردوستانه، که توانایی مقابله با عدم اطمینان و اهداف متعدد مسأله تصمیم را به‌طور هم‌زمان دارد، ارائه کردند. در طی مرحله اول، مکان انبارهای اصلی و مراکز توزیع همراه با سطح موجودی پیش‌ساخته برای منابع امدادی تعیین می‌شود. در این مرحله، عدم اطمینان ذاتی در داده‌های عرضه و تقاضا و همچنین سطح دسترسی مسیرهای شبکه حمل‌ونقل پس از زلزله در نظر گرفته می‌شود. در مرحله دوم، یک طرح توزیع امداد بر اساس سناریوهای مختلف فاجعه با هدف به حداقل رساندن کل زمان توزیع، حداکثر زمان توزیع وزنی برای اقلام مهم، هزینه کل موجودی‌های بلااستفاده و هزینه کمبود وزنی تقاضاهای برآورده نشده ارائه می‌شود [۱۲].

جدول (۱): دسته‌بندی مقالات بررسی شده

مطالعه موردی	روش حل			تعداد کالا		دوره		نوع پارامتر		تابع هدف		نویسندگان و سال
	فراابتکاری	ابتکاری	دقیق	تعداد کالا	نوع کالا	دوره زمانی	نوع پارامتر	سایر موارد	تقاضا برآورده نشده (↓)	زمان (↓)	هزینه (↓)	
✓	✓			✓		✓	✓	✓		✓	✓	توفیقی و همکاران [۱۲]
✓	✓				✓	✓	✓	✓			✓	قاسمی و همکاران [۵]
✓		✓		✓		✓		✓		✓	✓	مقفیرو و همکاران [۳]
✓		✓					✓			✓		رحمانی و همکاران [۹]
✓		✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	مورنو و همکاران [۱۵]
✓			✓	✓		✓	✓		✓	✓	✓	تحقیق حاضر

۳. تعریف مسأله

مدل ما شامل اعضای اصلی یک زنجیره تأمین شامل انبار مرکزی (تأمین کننده)، مراکز توزیع و نقاط آسیب‌دیده است. شکل (۱) سطوح این زنجیره تأمین را نشان می‌دهد. هر بخش از زنجیره تأمین ما با بخش بعدی زنجیره تأمین یک یا چند رابطه دارد که بر اساس این موضوع ما کانال‌هایی را در زنجیره تأمین خود خواهیم داشت، تا این روابط را بتوانیم در مدل ریاضی به خوبی نشان دهیم. به طور مثال هر توزیع کننده با همه‌ی انبارهای مرکزی رابطه دارد. کالاهای امدادی از طریق مراکز توزیع ارسال می‌شود و هر کدام از نقاط حادثه نیز با همه‌ی مراکز توزیع رابطه دارند. در مدل پیشنهادی، دو نوع مرکز توزیع در نظر گرفته می‌شود که نوع اول احتمال خرابی دارد و از تأسیسات عمومی استفاده می‌شود. نوع دوم احتمال خرابی ندارد و برای ساخت آن‌ها هزینه بیشتری در نظر گرفته می‌شود. اگر نقاط حادثه به مرکز توزیع نوع اول به عنوان تأمین کننده اصلی تخصیص یابند، می‌بایستی به مرکز توزیع نوع دوم به عنوان پشتیبان هم تخصیص یابند ولی اگر به مرکز توزیع نوع دوم به عنوان مرکز توزیع اصلی تخصیص یابند دیگر نیازی به مرکز توزیع پشتیبان ندارند، چون این مراکز توزیع احتمال خرابی بسیار پایینی دارند. از طرف دیگر در مدل ریاضی محدودیت‌های مربوط به حمل و نقل، نظیر ظرفیت و وسایل نقلیه، تعداد وسایل نقلیه در نظر گرفته می‌شود، همچنین در این تحقیق امکان حالت چند سفره برای وسایل نقلیه وجود دارد [۱۶]. از آنجایی که با استفاده از یک نوع حالت حمل و نقل نمی‌توان اطمینان حاصل کرد که توزیع امداد در زمان قابل قبول انجام شود، حمل و نقل چندحالتی در موقعیت‌های واقعی در هنگام توزیع امداد استفاده می‌شود. در این تحقیق نیز از دو حالت حمل و نقل هوایی و زمینی استفاده می‌شود. در مدل پیشنهادی ارائه شده اهداف به دنبال به حداقل رساندن زمان انتقال کالاها که در مواقع بحرانی بسیار مهم است و به حداقل رساندن هزینه‌های ساخت انبار مرکزی و

مراکز توزیع، هزینه‌های حمل و نقل و هزینه‌های تقاضای برآورده نشده هستند.

۳-۱. مفروضات مدل

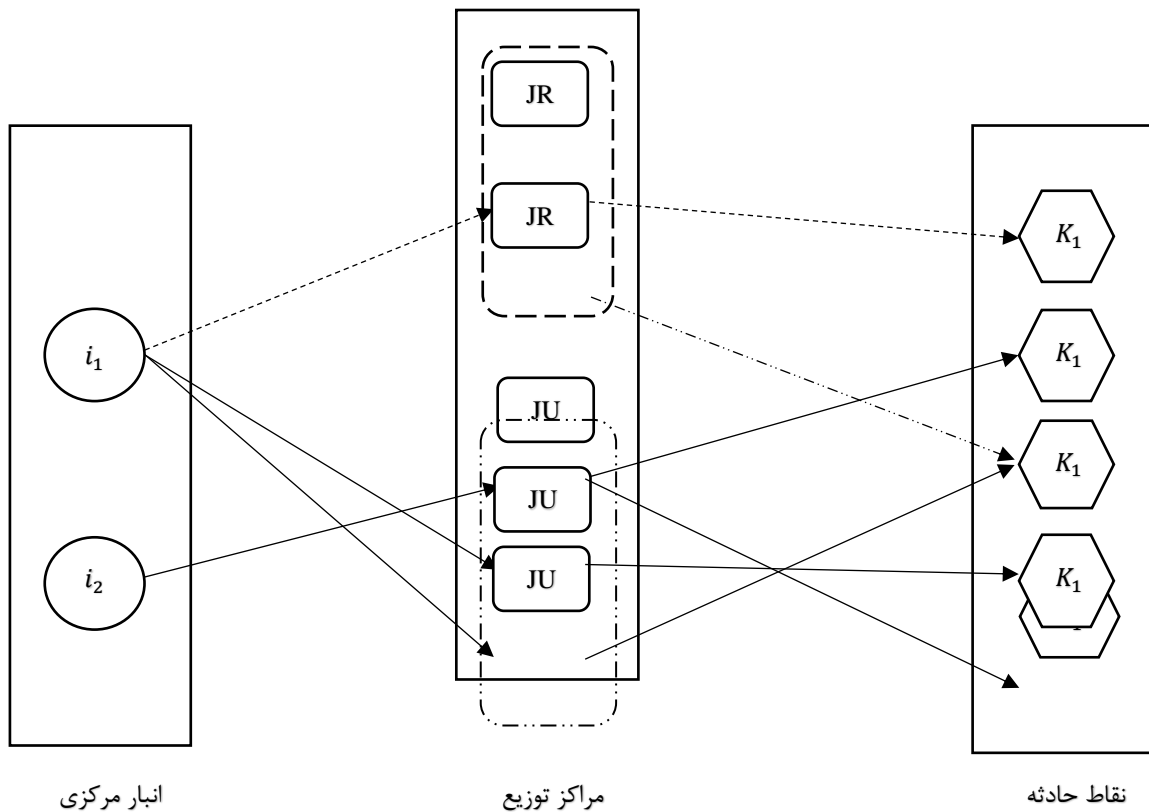
ظرفیت تسهیلات مراکز توزیع و مراکز پشتیبان مشخص است ولی ظرفیت انبارهای مرکزی نامحدود در نظر گرفته می‌شود. عدم قطعیت‌های مدل شامل احتمال وقوع زلزله، احتمال خرابی مراکز توزیع محلی و تقاضا، با استفاده از رویکرد احتمالی مبتنی بر سناریوی مدل‌سازی شده‌اند.

- در صورت عدم امکان تأمین کالاها از طریق مرکز توزیع اصلی، تأمین کالاها از طریق مراکز پشتیبان تأمین می‌شود.
- کالاها دارای اولویت هستند و این اولویت در هزینه کمبود کالا اعمال می‌شود.
- هر وسیله در طول افق زمانی و در هر دوره مجاز به انجام سفرهای متعدد است.
- از دو روش حمل و نقل زمینی و هوایی برای انتقال کالاها استفاده می‌شود.
- در هر روش حمل و نقل، وسایل نقلیه همگن هستند.
- تعداد و مکان مناطق آسیب‌دیده مشخص هستند.
- امکان به وجود آمدن کمبود وجود دارد.
- ظرفیت وسایل نقلیه مشخص است.
- فواصل میان نودها مشخص است.
- چند دوره زمانی داریم.
- چند نوع کالا داریم.

۳-۲. مجموعه‌ها

- I : مجموعه انبارهای مرکزی که با اندیس i نشان داده می‌شود.
 J : مجموعه مکان‌های بالقوه برای احداث مراکز توزیع محلی
 J' : مجموعه مکان‌های بالقوه برای احداث مراکز توزیع قابل

- اطمینان که به‌عنوان پشتیبان هم می‌توانند استفاده شوند.
 : K مجموعه نقاط آسیب‌دیده که با اندیس k نشان داده می‌شوند.
 : M مجموعه انواع وسایل نقلیه که با اندیس m نشان داده می‌شوند.
 : V_m مجموعه وسایل نقلیه نوع m در انبار مرکزی i که با اندیس v نشان داده می‌شود.
 : V_m مجموعه وسایل نقلیه نوع m در مرکز توزیع j که با اندیس v نشان داده می‌شود.
 : N_m مجموعه تعداد سفرهای هر وسیله نقلیه نوع m در هر دوره که با اندیس n نشان داده می‌شود.
 : S مجموعه سناریوها که با اندیس s نشان داده می‌شود.
 : T مجموعه دوره‌ها که با اندیس t نشان داده می‌شود.
 : L مجموعه کالاها که با اندیس l نشان داده می‌شود.



شکل (۱): تصویر شبکه زنجیره توزیع امداد
 نشان‌دهنده انتقال کالاها از انبارهای مرکزی به مراکز توزیع غیرقابل اطمینان
 نشان‌دهنده انتقال کالاها از انبارهای مرکزی به مراکز توزیع قابل اطمینان
 نشان‌دهنده انتقال کالاها از مراکز توزیع غیرقابل اطمینان به نقاط حادثه
 نشان‌دهنده انتقال کالاها از مراکز توزیع قابل اطمینان به نقاط حادثه به عنوان تأمین‌کننده اصلی
 نشان‌دهنده انتقال کالاها از مراکز توزیع قابل اطمینان به نقاط حادثه به عنوان پشتیبان

۳-۳. پارامترهای مدل

- هزینه ثابت احداث انبار مرکزی i : g_i
 هزینه ثابت بازگشایی مرکز توزیع $j \in J \cup J'$: f_j
 اندازه کالا که شامل حجم و وزن کالا می‌شود. : a_l
 تقاضای کالای l توسط نقطه حادثه k در سناریوی s در دوره t : d_{klst}
 ظرفیت مرکز توزیع $j \in J \cup J'$: b_j
 هزینه هر واحد حمل‌ونقل از انبار مرکزی i به مرکز توزیع $j \in J \cup J'$ توسط وسیله نقلیه نوع m : c_{1ijm}
 هزینه هر واحد حمل‌ونقل از مرکز توزیع $j \in J \cup J'$ به مرکز تقاضای k توسط وسیله نقلیه نوع m : c_{2jkm}
 زمان انتقال کالاها از انبار مرکزی i به مرکز توزیع $j \in J \cup J'$ توسط وسیله نقلیه نوع m : $time_{ijm}$
 زمان انتقال کالاها از مرکز توزیع $j \in J \cup J'$ به مرکز تقاضای k توسط وسیله نقلیه نوع m : $time_{jkm}$

در دوره t طی کنیم 1 در غیر این صورت صفر.

۳-۵. مدل‌سازی ریاضی

$$\min Z_1 = \sum_s p_s \cdot \left(\sum_i \sum_{j \in J \cup J'} \sum_l \sum_m \sum_t \sum_{n \in N_m} \sum_{v \in V_{mi}} \text{time}_{ijm} \cdot w_{ijls}^{mn} \right) \quad (1)$$

$$+ \sum_{j \in J \cup J'} \sum_k \sum_l \sum_m \sum_t \sum_{n \in N_m} \sum_{v \in V_{mj}} \text{time}_{jkm} \cdot w_{jklst}^{mnv}$$

$$\min Z_2 = \sum_s p_s \cdot \left[\sum_i \sum_t g_i z_{ist} + 1 \sum_{j \in J \cup J'} \sum_t f_j z_{jst} + \sum_k \sum_l \sum_t h_l B_{klst} \right]$$

$$+ \sum_{j \in J'} \left(\sum_i \sum_l \sum_m \sum_t \sum_{n \in N_m} \sum_{v \in V_{mi}} c1_{ijm} \cdot dis_{ij} \cdot q_{ijlst}^{mnv} \right)$$

$$+ \sum_k \sum_l \sum_m \sum_t \sum_{n \in N_m} \sum_{v \in V_{mj}} c2_{jkm} \cdot dis_{jk} \cdot q_{jklst}^{mnv} \quad (2)$$

$$+ \sum_{j \in J} (1 - p_{js}) \cdot \left(\sum_i \sum_l \sum_m \sum_t \sum_{n \in N_m} \sum_{v \in V_{mi}} c1_{ijm} \cdot dis_{ij} \cdot q_{ijlst}^{mnv} \right)$$

$$+ \sum_k \sum_l \sum_m \sum_t \sum_{n \in N_m} \sum_{v \in V_{mj}} c2_{jkm} \cdot dis_{jk} \cdot q_{jklst}^{mnv} \quad (3)$$

$$+ \sum_{j \in J} p_{js} \cdot \left(\sum_{j' \in J'} \sum_i \sum_l \sum_m \sum_t \sum_{n \in N_m} \sum_{v \in V_{mi}} c1_{ij'm} \cdot dis_{ij} \right)$$

$$+ \sum_k \sum_l \sum_m \sum_t \sum_{n \in N_m} \sum_{v \in V_{mj'}} c2_{j'km} \cdot dis_{j'k} \cdot q_{j'klst}^{mnv} \quad (4)$$

s. t:

$$\sum_i \sum_m \sum_{n \in N_m} \sum_{v \in V_{mi}} q_{ijlst}^{mnv} + \sum_i \sum_m \sum_{n \in N_m} \sum_{v \in V_{mi}} q_{ijlst}^{mnv} \quad \forall j \in J', l, s, t \quad (3)$$

$$= \sum_k \sum_m \sum_{n \in N_m} \sum_{v \in V_{mj}} q_{jklst}^{mnv} \quad \forall j \in J, l, s, t \quad (4)$$

$$\sum_i \sum_m \sum_{n \in N_m} \sum_{v \in V_{mi}} q_{ijlst}^{mnv} = \sum_k \sum_m \sum_{n \in N_m} \sum_{v \in V_{mj}} q_{jklst}^{mnv} \quad \forall j \in J', k, s, l, t \quad (5)$$

$$\leq d_{klst} \cdot x'_{jkst0} \quad \forall j \in J, k, s, l, t \quad (6)$$

$$\sum_i \sum_m \sum_{n \in N_m} \sum_{v \in V_{mi}} q_{ijlst}^{mnv} \leq d_{klst} \cdot x_{jkst0} \quad \forall j \in J', s, l, t \quad (7)$$

$$\leq \sum_k \sum_{j \in J} x_{jkst0} \cdot x'_{j'kst1} \cdot d_{klst} \cdot p_{js}$$

$$B_{klst} = \max(0, d_{klst}$$

نقطه حادثه k توسط وسیله نقلیه نوع m

: p_s احتمال رخ دادن سناریوی s

: p_{js} احتمال تخریب مرکز توزیع $J \in J$ سناریوی s

: h_l هزینه کمبود کالای l

: Q_m ظرفیت وسیله نقلیه نوع m که شامل ظرفیت حجمی و وزنی وسیله نقلیه می‌شود.

: dis_{ij} مسافت انبار مرکزی i تا مرکز توزیع $J \in J \cup J'$

: dis_{jk} مسافت بین مرکز توزیع $J \in J \cup J'$ تا نقطه تقاضای k

: $BigM$ عدد بزرگ مثبت

۳-۴. متغیرهای تصمیم

: z_{ist} اگر انبار مرکزی i در سناریوی s در دوره t انتخاب شود 1 در غیر این صورت صفر

: z_{jst} اگر مرکز توزیع $J \in J \cup J'$ در سناریوی s در دوره t بازگشایی شود 1 در غیر این صورت صفر

: y_{ijst} اگر مرکز توزیع $J \in J \cup J'$ به انبار مرکزی i در سناریوی s در دوره t اختصاص یابد 1 در غیر این صورت صفر

: x_{jkst0} اگر نقطه حادثه k به مرکز توزیع $J \in J$ در سناریوی s در دوره t تخصیص یابد 1 در غیر این صورت صفر

: x'_{jkst0} اگر نقطه حادثه k به مرکز توزیع $J \in J'$ به‌عنوان تأمین‌کننده اصلی در سناریوی s در دوره t تخصیص یابد 1 در غیر این صورت صفر

: x_{jkst1} اگر نقطه تقاضای i به مرکز توزیع $J \in J'$ به‌عنوان تأمین‌کننده پشتیبان در سناریوی s در دوره t تخصیص یابد 1 در غیر این صورت صفر

: q_{ijlst}^{mnv} مقدار کالای l که از انبار مرکزی i به مرکز توزیع $J \in J \cup J'$ توسط وسیله نقلیه نوع m در دور $n \in N_m$ با وسیله نقلیه $v \in V_{mi}$ در سناریوی s در دوره t حمل می‌شود.

: q'_{ijlst}^{mnv} مقدار کالای پشتیبان l که از انبار مرکزی i به مرکز توزیع $J \in J'$ توسط وسیله نقلیه نوع m در دور $n \in N_m$ با وسیله نقلیه $v \in V_{mi}$ در سناریوی s در دوره t حمل می‌شود.

: q_{jklst}^{mnv} مقدار کالای l که از مرکز توزیع $J \in J \cup J'$ به نقطه حادثه k توسط وسیله نقلیه نوع m در دور $n \in N_m$ با وسیله نقلیه $v \in V_{mj}$ در سناریوی s در دوره t حمل می‌شود.

: B_{klst} مقدار کمبود کالای l در نقطه حادثه k در سناریوی s در دوره t .

: w_{jklst}^{mnv} اگر مسیر $J \in J \cup J'$ تا k را با وسیله نقلیه نوع m در دور $n \in N_m$ با وسیله نقلیه $v \in V_{mi}$ در سناریوی s در دوره t طی کنیم 1 در غیر این صورت صفر.

: w_{ijlst}^{mnv} اگر مسیر i تا $J \in J \cup J'$ را با وسیله نقلیه نوع m در دور $n \in N_m$ با وسیله نقلیه $v \in V_{mi}$ در سناریوی s

$$\begin{aligned} x_{jk0st}, x'_{jk1st}, y_{ijst}, z_{ist}, zz_{ist}, \\ w_{ijst}^{mnmv}, w_{jklst}^{mnmv} \in \{0, 1\} \end{aligned} \quad \begin{aligned} \forall i, k, l, j \\ \in J \cup J', j' \\ \in J', s, t \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} q_{ijlst}^{mnmv}, q'_{ijlst}^{mnmv}, q_{jklst}^{mnmv}, B_{klst} \geq 0 \end{aligned} \quad \begin{aligned} \forall i, j \\ \in J \cup J', k, l, s, t \end{aligned} \quad (25)$$

تابع هدف اول (۱) به دنبال به حداقل رساندن کل زمان توزیع میان انبارهای مرکزی و مراکز توزیع و همچنین بین مراکز توزیع و نقاط حادثه است.

تابع هدف دوم (۲) مقدار کل هزینه‌ها را به حداقل می‌رساند و از چند قسمت تشکیل شده است. قسمت اول مربوط به هزینه‌های ساخت انبارهای مرکزی است، قسمت دوم هزینه‌های ساخت مراکز توزیع است، قسمت سوم هزینه‌های مربوط تقاضای برآورده نشده است، قسمت چهارم هزینه حمل‌ونقل انتقال کالاهای امدادی از انبارهای قابل اطمینان به نقاط حادثه است در صورتی که مراکز توزیع قابل اطمینان به‌عنوان تأمین‌کننده اصلی در نظر گرفته شوند، بخش آخر نیز هزینه‌های حمل‌ونقل کالاهای امدادی از مراکز توزیع محلی و مراکز توزیع قابل اطمینان به‌عنوان پشتیبان را شامل می‌شود.

محدودیت (۳) و (۴) محدودیت‌های تعادل در انبارهای توزیع‌کننده هستند. محدودیت (۵) و (۶) محدودیت‌های تقاضا هستند و بیان می‌کنند که کالاهای امدادی ارسالی به نقاط حادثه، حداکثر برابر با میزان تقاضای آن نقاط می‌باشد. محدودیت (۷) تضمین می‌کند که اگر انبار اصلی تخریب شد، تقاضای موردنظر از طریق انبار پشتیبان تأمین گردد. محدودیت (۸) مقدار کمبود کالاهای امدادی در نقاط حادثه را محاسبه می‌کند. محدودیت (۹) و (۱۰) محدودیت‌های مربوط به حداکثر ظرفیت نگهداری کالاهای امدادی در مراکز توزیع می‌باشند. محدودیت (۱۱) و (۱۲) بیان می‌کنند که هر نقطه حادثه به یکی از مراکز قابل اطمینان و مراکز توزیع محلی تخصیص می‌یابد. اگر به مراکز توزیع محلی به‌عنوان تأمین‌کننده اصلی تخصیص یابد باید به یک مرکز توزیع قابل اطمینان نیز به‌عنوان پشتیبان تخصیص یابد. اگر هم به یک مرکز توزیع قابل اطمینان به‌عنوان تأمین‌کننده اصلی تخصیص یابد دیگر نیازی به انبار پشتیبان نیست. محدودیت (۱۳) و (۱۴) تضمین می‌کند که اگر مرکزی بازگشایی نشود و یا تخصیص نیابد از آن مرکز کالایی جابجا نمی‌شود. محدودیت (۱۵) و (۱۶) تضمین می‌کند که اگر نقطه حادثه‌ای به مرکز توزیع تخصیص نیابد، هیچ کالای امدادی از آن مرکز به سمت نقطه حادثه حمل نمی‌شود. محدودیت‌های (۱۷) تا (۱۹) بیانگر حداکثر ظرفیت وسیله نقلیه است. محدودیت‌های (۲۰) تا (۲۳) برای محاسبه اینکه با وسیله نقلیه نوع m سفر انجام شده یا نه استفاده می‌شوند. محدودیت‌های (۲۴) و (۲۵) نوع متغیرها را نشان می‌دهند.

۳-۶. خطی سازی

باتوجه به اینکه محدودیت‌های (۷) و (۸) غیرخطی هستند، با تعریف محدودیت‌های زیر و متغیرهای مربوطه این محدودیت‌ها را خطی می‌کنیم و سپس به جای این دو محدودیت، محدودیت‌های زیر جایگزین می‌شوند.

$$\sum_{j \in J \cup J'} \sum_m \sum_{n \in N_m} \sum_{v \in V_{mj}} q_{jklst}^{mnmv} \leq b_j \quad \forall k, s, l, t \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \sum_i \sum_m \sum_{n \in N_m} \sum_{v \in V_{mi}} q_{ijlst}^{mnmv} \\ + \sum_i \sum_m \sum_{n \in N_m} \sum_{v \in V_{mi}} q'_{ijlst}^{mnmv} \leq b_j \end{aligned} \quad \forall j \in J', s, t \quad (9)$$

$$\sum_i \sum_m \sum_{n \in N_m} \sum_{v \in V_{mi}} q_{ijlst}^{mnmv} \leq b_j \quad \forall j \in J, s, t \quad (10)$$

$$\sum_{j \in J} x_{jkst0} + \sum_{j \in J'} x'_{jkst0} = 1 \quad \forall k, s, t \quad (11)$$

$$\sum_{j \in J'} x_{jkst1} = \sum_{j \in J} x_{jkst0} \quad \forall k, s, t \quad (12)$$

$$\sum_{j \in J \cup J'} y_{ijst} \leq BigM \cdot z_{ist} \quad \forall i, s, t \quad (13)$$

$$\sum_i y_{ijst} \leq zz_{jst} \quad \forall j \in J \cup J', s, t \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \forall i, j \\ \in J \\ \cup J', l, s, t, m, n \\ \in N_m, v \\ \in V_{mi} \end{aligned} \quad q_{ijlst}^{mnmv} \leq BigM \cdot y_{ijst} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \forall i, j \\ \in J', l, s, t, m, n \\ \in N_m, v \in V_{mi} \\ \forall i, j \\ \in J \\ \cup J', s, t, m, n \\ \in N_m, v \in V_{mi} \end{aligned} \quad q'_{ijlst}^{mnmv} \leq BigM \cdot y_{ijst} \quad (16)$$

$$\sum_l a_l q_{ijlst}^{mnmv} \leq Q_m \quad \forall i, j \in J, \cup J', s, t, m, n \in N_m, v \in V_{mi} \quad (17)$$

$$\sum_l a_l q'_{ijlst}^{mnmv} \leq Q_m \quad \forall i, j \in J', s, t, m, n \in N_m, v \in V_{mi} \quad (18)$$

$$\sum_l a_l q_{jklst}^{mnmv} \leq Q_m \quad \forall i, j \in J, \cup J', s, t, m, n \in N_m, v \in V_{mj} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} w_{jklst}^{mnmv} \leq BigM \cdot q_{jklst}^{mnmv} \\ \forall k, j \\ \in J \\ \cup J', l, s, t, m, n \\ \in N_m, v \in V_{mj} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} w_{jklst}^{mnmv} \geq \frac{q_{jklst}^{mnmv}}{BigM} \\ \forall k, j \\ \in J \\ \cup J', l, s, t, m, n \\ \in N_m, v \in V_{mj} \\ \forall i, j \\ \in J \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} w_{ijlst}^{mnmv} \leq BigM \cdot q_{ijlst}^{mnmv} \\ \forall k, j \\ \in J, \cup J', l, s, t, m, n \\ \in N_m, v \in V_{mj} \\ \forall i, j \\ \in J \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} w_{ijst}^{mnmv} \geq \frac{q_{ijlst}^{mnmv}}{BigM} \\ \forall k, j \\ \in J, \cup J', l, s, t, m, n \\ \in N_m, v \in V_{mj} \end{aligned} \quad (23)$$

$$S.t:$$

$$f_2(x) = e_2 + s_2 \quad (34)$$

$$f_3(x) = e_3 + s_3 \quad (35)$$

$$\vdots$$

$$f_p(x) = e_p + s_p \quad (36)$$

$$x \in S \quad (37)$$

$$t'_{jjrkst} : \text{متغیر کمکی صفر و یک برای خطی سازی}$$

$$S^+_{klst} : \text{متغیر کمکی پیوسته برای خطی سازی}$$

$$S^-_{klst} : \text{متغیر کمکی پیوسته برای خطی سازی}$$

$$\theta_{klst} : \text{متغیر کمکی صفر و یک برای خطی سازی}$$

$$t'_{jjrkst} \leq \frac{1}{2}(x_{jk0st} + x_{j'k1st}) \quad \forall j \in J, j' \in J', k, s, t \quad (26)$$

$$t'_{jjrkst} \geq (x_{jk0st} + x_{j'k1st}) - 1 \quad \forall j \in J, j' \in J', k, s, t \quad (27)$$

$$\sum_i \sum_m \sum_{n \in N_m} \sum_{v \in V_{mi}} q_{ijlst}^{mnmv} \quad \forall j \in J', s, l, t \quad (28)$$

$$\leq \sum_k \sum_{j \in J} t'_{jjrkst} \cdot d_{klst} \cdot p_{js}$$

$$B_{klst} = S^+_{klst} \quad \forall k, s, l, t \quad (29)$$

$$S^+_{klst} - S^-_{klst} = d_{klst} \quad \forall k, s, l, t \quad (30)$$

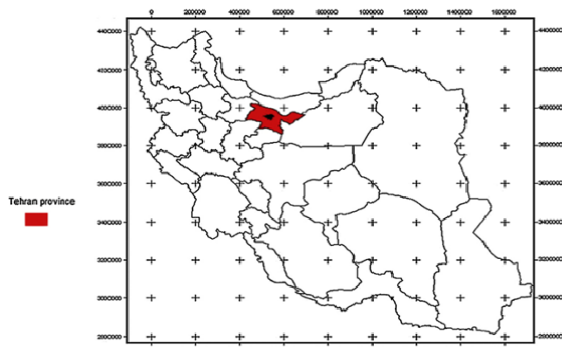
$$- \sum_{j \in J \cup J'} \sum_m \sum_{n \in N_m} \sum_{v \in V_{mj}} q_{jklst}^{mnmv}$$

$$S^+_{klst} \leq \text{BigM} \cdot \theta_{klst} \quad \forall k, s, l, t \quad (31)$$

$$S^-_{klst} \leq \text{BigM} \cdot (1 - \theta_{klst}) \quad \forall k, s, l, t \quad (32)$$

۵. مطالعه موردی

مدل پیشنهادی برای موارد واقعی زلزله در تهران استفاده می‌شود که در طول تاریخ خود تحت تأثیر زمین لرزه‌های شدید قرار گرفته است. تهران، پایتخت ایران، که در شکل (۲) موقعیت جغرافیایی آن در ایران مشخص شده است، دارای پتانسیل لرزه‌ای بالایی با گسل‌های فعال فراوان است [۱۹]. اگرچه تهران در ۱۵۰ سال گذشته به دلیل زمین لرزه آسیب جدی ندیده است، اما چندین زلزله بزرگ را در تاریخ خود ثبت کرده است. به طوری که بین سال‌های ۸۵۵ تا ۱۸۳۰ چهار بار تخریب شده است. آخرین زمین لرزه به بزرگی بالاتر از ۷/۰ در مقیاس ریشتر در سال ۱۸۳۰ رخ داده است [۲۰]. در این حوادث، تهران یک شهر کوچک بود و بنابراین جمعیت آسیب‌دیده محدود بود. اما امروزه تهران به مرکز سیاسی، فرهنگی و تجاری ایران تبدیل شده است و با حدود بیش از ۱۴ میلیون نفر جمعیت، یکی از بزرگترین شهرهای غرب آسیا است و زمین لرزه‌ای در تهران منجر به تلفات بی‌سابقه، بالای یک میلیون نفر خواهد شد که گفته می‌شود بزرگترین فاجعه از نظر تلفات و خسارات در جهان است. اگرچه خسارات ناشی از این حوادث از جهت‌های گوناگونی از جمله از نظر مالی و جانی قابل جبران نیست، ولی با برنامه‌ریزی و اقدامات پیشگیرانه برای ایجاد آمادگی لازم برای مقابله با این حوادث می‌توان خسارات آن‌ها را به حداقل رساند.



شکل (۲): موقعیت شهر تهران [۱۸]

در صورتی که پس از رخداد زلزله و تا ۷۲ ساعت پس از آن امداد رسانی صحیح، با سرعت و دقت کافی صورت نپذیرد آمار تلفات افزایش خواهد یافت. شهر تهران به ۲۲ منطقه تقسیم می‌شود که در آن هر منطقه از ساختمان‌های مسکونی که عمدتاً در برابر زلزله‌های بزرگ مقاومتی نداشته تشکیل شده است. شکل (۳) جمعیت آسیب‌پذیر ۲۲ منطقه را نشان می‌دهد که در آن مناطق ۱ تا ۹ عمدتاً

۴. روش محدودیت اپسیلون تکامل یافته

در روش محدودیت اپسیلون معمولی، بهترین و بدترین مقدار هر تابع هدف به ترتیب با بزرگترین و کوچکترین مقدار در ستون مربوط به آن تابع هدف در جدول عایدات تقریب زده می‌شود [۱۷]. اما نکته قابل توجه آن است که، در شرایط رخداد بهینگی چندگانه در مدل، جواب‌هایی که بدین صورت با بهینه‌سازی تک تک اهداف به دست آمده‌اند ممکن است جواب‌های ناچیره ضعیف برای مسأله باشند. مورتاس برای پوشش ضعف‌های روش محدودیت اپسیلون معمولی و به منظور حصول اطمینان از تولید جواب‌های بهینه پارتو، بهینه‌سازی لکسیکوگرافیک را در ساخت جدول عایدات پیشنهاد داده است. نکته دیگر آن است که جواب مسأله با رویکرد محدودیت اپسیلون معمولی، تنها در صورتی که تمام (p-1) محدودیت مرتبط با اهداف که به فضای شدنی مسأله اضافه شده‌اند، الزام‌آور باشند یک جواب کارا خواهد بود، در غیر این صورت اگر بهینگی چندگانه (که ممکن است حداقل یکی از آن محدودیت‌های مرتبط با اهداف که غیرالزام‌آور هستند را بهبود بخشد رخ دهد؛ بنابراین جواب حاصله با روش محدودیت اپسیلون معمولی، یک جواب ناچیره ضعیف خواهد بود که به منظور رفع این مشکل نیز، مورتاس در روش محدودیت اپسیلون تکامل یافته، پیشنهاد داده است که در آن محدودیت‌های مرتبط با اهداف که به مدل اضافه شده‌اند، با استفاده از متغیرهای مازاد یا کمبود به فرم تساوی تبدیل شوند و آن متغیرهای مازاد یا کمبود به تابع هدف افزوده شوند. فرم نهایی مدل با رویکرد محدودیت اپسیلون تکامل یافته به صورت زیر به دست می‌آید [۱۸]:

$$\max[f_1(x) + \delta \times (\frac{s_2}{r_2} + \frac{s_3}{r_3} + \dots + \frac{s_p}{r_p})] \quad (33)$$

جدول (۴): مشخصات وسایل نقلیه

وسيله نقلیه	ظرفیت وزنی (تن)	ظرفیت حجمی (متر مکعب)	سرعت (کیلومتر بر ساعت)	هزینه (\$)
هلیکوپتر	۲/۴	۳۵	۲۴۰	۱۰
کامیون	۶	۵۳	۸۵	۱

جدول (۵): مشخصات تسهیلات [۹]

مرکز توزیع پشتیبان	انبار مرکزی	مرکز توزیع محلی	ظرفیت
(۲۰۰۰-۴۰۰۰)	(۱۰۰۰-۲۰۰۰)	--	(۱۰۶ دلار)
۰/۹	۰/۲۷	۱/۳	هزینه ساخت

جدول (۶): درصد تخریب مرکز توزیع محلی

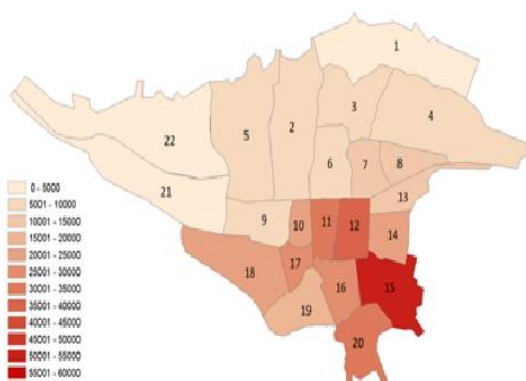
سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳	سناریو ۴	منطقه
۳۱	۱۸	۲۲	۱۸	منطقه ۱۵
۲۴	۱۱	۱۴	۱۲	منطقه ۱۶
۴۱	۲۹	۳۳	۲۷	منطقه ۱۸
۴۱	۱۷	۲۴	۱۷	منطقه ۱۹
۶۸	۴۸	۵۵	۴۸	منطقه ۲۰

جدول (۷): مقدار تقاضا نقاط حادثه

نقاط حادثه	سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳	سناریو ۴
۱	۴۳۳۶	۲۰۹۳	۸۹۷۰	۶۶۲۶
۲	۶۷۴۱	۱۱۹۰	۷۶۱۲	۳۰۴۸
۳	۴۲۲۵	۱۰۸۸	۸۰۸۸	۷۳۳۸
۴	۹۲۱	۴۹۸	۷۶۰۷	۷۰۳۵
۵	۱۳۲۵	۹۴۶	۵۵۵۵	۵۳۱۶

مسئله شماره ۵ مربوط به مطالعه موردی تحقیق می‌شود. در مسئله مطالعه موردی، نتایج حاصل شده از نرم‌افزار به این صورت است که از میان دو انبار مرکزی پیشنهادی تنها یک مورد احداث شده است، از میان پنج مرکز توزیع محلی پیشنهادی، چهار مرکز احداث شده است و از میان سه مرکز توزیع قابل اطمینان پیشنهادی، تنها یک مرکز احداث می‌شود که تنها برای پشتیبانی مراکز توزیع محلی استفاده می‌شود و نقش تأمین‌کننده اصلی نقاط حادثه را ندارد. از آنجایی که در شرایط بحران زمان بسیار مهم‌تر از هزینه است، در روش محدودیت افسیلون بهبود یافته به کار گرفته شده، تابع هدف زمان به‌عنوان هدف اصلی در نظر گرفته می‌شود و تابع هدف مربوط به هزینه به‌عنوان محدودیت قرار داده می‌شود. در نتایج تمام نمونه مسئله‌های تعریف شده و همچنین همان‌طور که در شکل (۴) که مرز پارتو مسئله مطالعه موردی را مشخص می‌کند، واضح است که با افزایش تابع هدف اول تابع هدف دوم کاهش می‌یابد که این نشان‌دهنده تضاد میان اهداف تعریف شده می‌باشد.

با ساختمان‌های مقاوم توسعه یافته‌اند، اما مناطق ۱۰ تا ۲۰ دارای ساختمان‌های قدیمی هستند که مستعد فروپاشی هستند [۲۰].



شکل (۳): جمعیت آسیب‌پذیر ۲۲ مناطق تهران [۱۵]

برای انجام مطالعه موردی ۵ منطقه، ۱۵، ۱۶، ۱۸، ۱۹ و ۲۰ که از مناطق جنوبی شهر و از نظر جمعیت آسیب‌پذیر، نسبت به سایر مناطق متضررتر هستند انتخاب شده‌اند. مسافت و زمان انتقال کالاها میان دو سطح زنجیره امداد از طریق <http://map.tehran.ir/> محاسبه می‌شود. زمین لرزه‌ای که تهران را تحت تأثیر قرار می‌دهد از گسل‌های فعال در نزدیکی شهر رخ می‌دهد. محتمل‌ترین و خطرناک‌ترین این گسل‌ها عبارتند: (۱) گسل مشا، (۲) گسل شمال تهران، (۳) گسل ری. لازم به ذکر است که گسل‌های پنهان ممکن است در زیر لایه‌های رسوبی شهر تهران وجود داشته باشد [۱۳]. در جدول (۲) مشخصات کلی گسل‌ها ارائه می‌شود و در ادامه اطلاعات موردنیاز در ارتباط با پارامترهای مسئله که باتوجه به نظر خبرگان این حوزه، سازمان‌های امدادرسانی شهر تهران، تحقیقات و مطالعات پیشین به‌دست آمده‌اند، ارائه می‌شوند.

مدل پیشنهادی باتوجه به روش حل بیان شده در نرم‌افزار گمز نسخه ۲۴.۱.۲ کدنویسی شده و نتایج حاصل شده از آن توسط حل‌کننده CPLEX بر روی لپ‌تاپی با مشخصات Core™ i7- RAM 8GB و 8550U CPU 1.80GHZ در جدول (۸) ارائه می‌شود.

جدول (۲): مشخصات گسل‌ها و سناریوها تحقیق [۲۱]

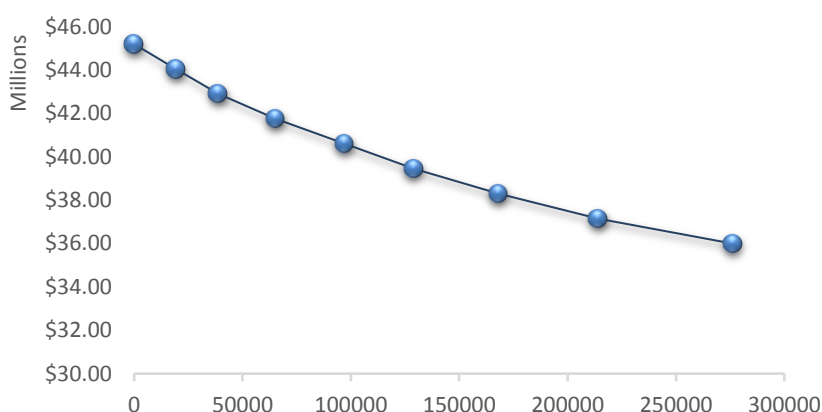
سناریو زلزله	سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳	سناریو ۴
گسل	شمال تهران	مشا	ری	شناور
طول	۵۸	۶۸	۲۶	۱۳
عرض	۲۷	۳۰	۱۶	۱۰
مکان	شمال	شمال شرقی	جنوب	--
شدت وقوع	۷/۲	۷/۲	۶/۷	۶/۴
احتمال وقوع	۰/۳۵	۰/۴۱	۰/۱۶	۰/۱۸

جدول (۳): مشخصات کالاهای امدادی [۲۲]

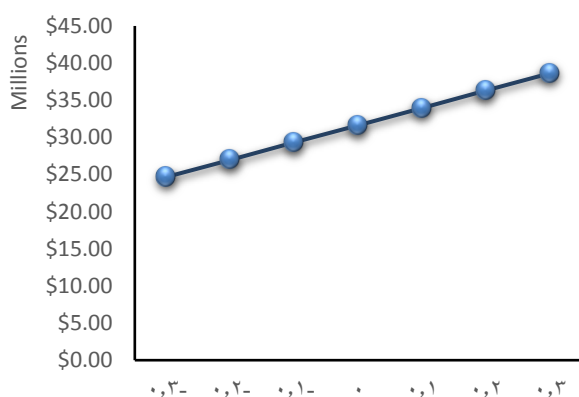
کالا	حجم (مترمکعب)	وزن (کیلوگرم)	هزینه (کمبود \$)	زمان تخلیه/زمان بارگیری (دقیقه)
غیرمصرفی	۰/۳	۴۵	۲۰	۰/۲
مصرفی	۰/۱۳	۳	۸۰	۰/۰۴

جدول (۸): نمونه مسأله‌های تعریف شده

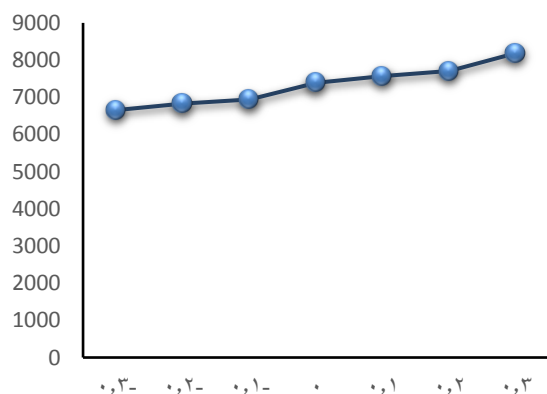
شماره مسأله	تعداد انبارهای مرکزی	تعداد مراکز توزیع محلی	تعداد مراکز توزیع قابل اطمینان	تعداد نقاط حادثه	زمان حل مسأله (ثانیه)	تعداد جواب پارتو
۱	۱	۲	۱	۳	۳۵۶/۱۳۰	۹
۲	۱	۲	۲	۳	۶۵۷/۸۱۳	۹
۳	۲	۳	۱	۴	۶۸۰/۶۱۵	۹
۴	۲	۲	۲	۵	۱۷۱۲/۳۷۴	۹
۵	۲	۵	۳	۵	۱۳۳۰۷/۲۴۸	۸
۶	۲	۶	۳	۷	۱۷۱۲۰/۷۳۴	۶



شکل (۴): جبهه پارتو مربوط به تابع هدف اول و تابع هدف دوم



شکل (۵): تغییرات تابع هدف دوم نسبت به پارامتر تقاضا



شکل (۶): تغییرات تابع هدف اول نسبت به پارامتر تقاضا

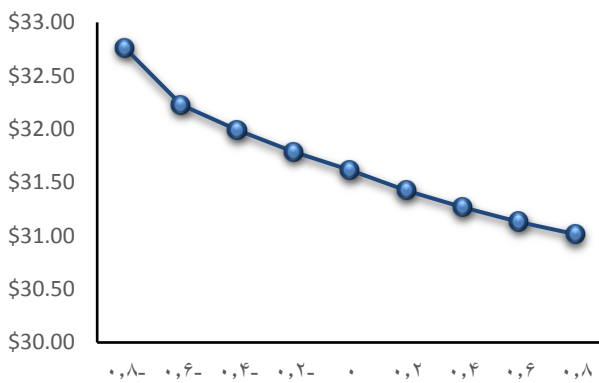
۵-۱. اعتبارسنجی

در این قسمت برای اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، روی چند مورد از پارامترها تحلیل حساسیت انجام می‌دهیم. هدف از این تحلیل حساسیت، تأثیر تغییر پارامترها بر روی جواب بهینه است. برای انجام تحلیل حساسیت تنها پارامتر موردنظر تغییر می‌کند و دیگر پارامترها ثابت در نظر گرفته می‌شوند. در این تحقیق، پارامترهای مهم مسأله از جمله، تقاضا برای کالاهای امدادی، هزینه وسیله نقلیه مورد استفاده، احتمال خرابی مراکز توزیع محلی برای تحلیل حساسیت انتخاب می‌شوند.

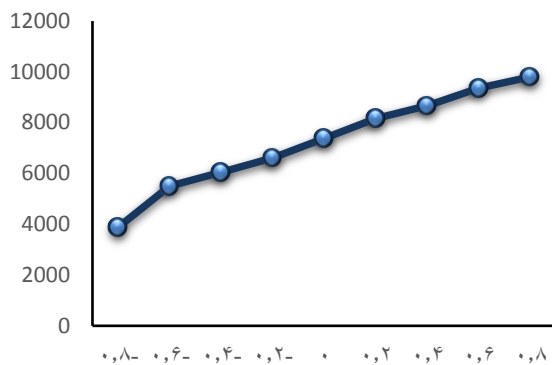
۵-۱-۱. تحلیل حساسیت پارامتر تقاضا

برای پارامتر تقاضا با ثابت فرض شدن دیگر پارامترها، ضرایب متفاوتی در نظر گرفته می‌شود. میزان تغییر هر کدام از توابع هدف نسبت به تغییر پارامتر تقاضا در ادامه نشان داده می‌شود.

در شکل (۵) و (۶) با افزایش تقاضا هر دو تابع هدف افزایش یافته‌اند. تابع هدف دوم که مربوط به هزینه‌ها است، کاملاً منطقی به نظر می‌رسد که با افزایش تقاضا هزینه‌های مربوط به حمل و نقل و در صورت عدم ارضای تقاضا، هزینه کمبودی که به وجود آمده است، منجر به افزایش این تابع هدف می‌شود. در تابع هدف اول نیز با بیشتر شدن تقاضا از وسایل نقلیه بیشتری استفاده می‌شود یا ممکن است تعداد دفعات بیشتری هر وسیله نقلیه رفت و برگشت انجام دهد که هر دو عامل منجر به افزایش زمان توزیع می‌شوند.



شکل (۹): تغییرات تابع هدف دوم نسبت به پارامتر خرابی مراکز توزیع محلی



شکل (۱۰): تغییرات تابع هدف اول نسبت به پارامتر خرابی مراکز توزیع محلی

۶. نتیجه و جمع‌بندی

بسیاری از بحران‌ها و فجایع غیرقابل پیش‌بینی بوده و خسارات جانی و مالی جبران‌ناپذیری بر جای می‌گذارند. تمام تلاش‌ها در برنامه‌ریزی لجستیکی و دیگر فعالیت‌ها برای کاهش رنج و امداد رسانی بهتر به افراد آسیب‌دیده است. در مدل ریاضی ارائه شده با در نظر گرفتن عوامل پیش‌بینی نشده امداد رسانی مؤثرتری صورت می‌پذیرد. از نتایج تحقیق حاضر اطمینان حاصل می‌شود سطح برآورده کردن نیاز افراد آسیب‌دیده، در بالاترین مقدار خود باشد و در صورت شدید بودن زلزله و تخریب زیرساخت‌های موجود، شرایط زنجیره امداد رسانی برقرار باشد. مدل ریاضی ارائه شده هزینه‌های تحمیل شده در جریان امداد رسانی را بررسی می‌کند و به دنبال به حداقل رساندن این هزینه‌ها است. از جمله این اقدامات می‌توان به در نظر گرفتن حالت سفر مجدد وسایل نقلیه در طول امداد رسانی اشاره کرد که سبب کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل در کل دوره زمانی می‌شود. از جنبه مدیریتی، نتایج حاصل شده از مدل می‌تواند برای رسیدن به تخصیص بودجه مناسب برای مقابله با رخ دادن حادثه‌ای مؤثر باشد. در واقع باتوجه به اهداف متضادی که در نظر گرفته شده است، نتایج به برآوردن حداکثری تقاضاهای به‌وجود آمده در کمترین زمان ممکن و بودجه مناسب در مطالعه موردی پیشنهادی ختم می‌شود. باتوجه به دوهدفه بودن مدل

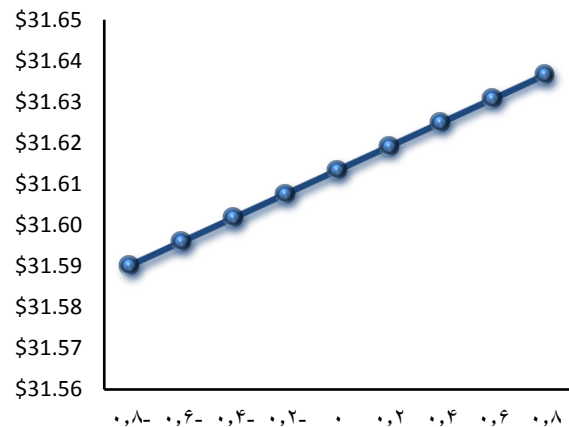
۲-۱-۵. تحلیل حساسیت پارامتر هزینه وسیله نقلیه

باتوجه به شکل (۷) با افزایش پارامتر هزینه وسیله نقلیه مقدار تابع هدف دوم که کل هزینه‌ها را مشخص می‌کند، افزایش می‌یابد. باتوجه به جدول (۸)، مشاهده می‌شود که تغییر پارامتر هزینه وسیله نقلیه روی تابع هدف اول تأثیری ندارد.

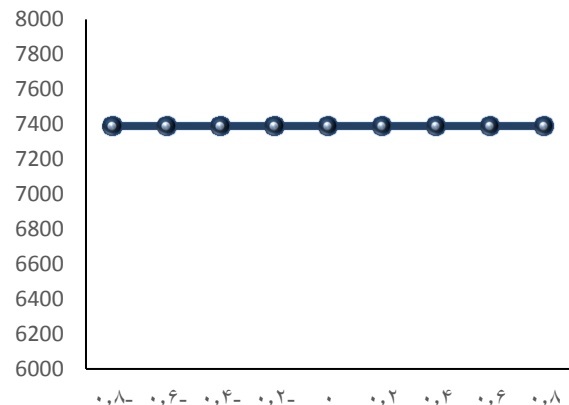
۳-۱-۵. تحلیل حساسیت درصد خرابی مراکز توزیع محلی

میزان تغییر هر کدام از توابع هدف نسبت به تغییر پارامتر درصد خرابی مراکز توزیع محلی در ادامه نشان داده می‌شود.

همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌کنید با افزایش درصد خرابی مراکز توزیع محلی، تابع هدف دوم که مربوط به هزینه‌های مرتبط می‌شود، کاهش می‌یابد دلیل این امر این است که با افزایش احتمال خرابی مراکز توزیع محلی این مراکز ساخته نمی‌شوند و تنها مراکز توزیع قابل اطمینان ساخته خواهند شد که این امر نیز سبب کاهش هزینه‌ها خواهد شد. از طرفی باتوجه به شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که با افزایش درصد خرابی مراکز توزیع محلی تابع هدف اول که زمان انتقال کالاهای امدادی می‌باشد، افزایش یافته است. باتوجه به فاصله بیشتر مراکز توزیع قابل اطمینان به نقاط حادثه نسبت به مراکز توزیع محلی، این امر منطقی به نظر می‌رسد.



شکل (۷): تغییرات تابع هدف دوم نسبت به پارامتر هزینه وسیله نقلیه



شکل (۸): تغییرات تابع هدف اول نسبت به پارامتر هزینه وسیله نقلیه

- in the earthquake response phase. *Transp. Res. Part E Logistic. Transp. Rev.* 49: 217 – 249.
- [12] Tofighi, S., Torabi, S. A., & Mansouri, S. A. (2016). Humanitarian logistics network design under mixed uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 250(1): pp. 239-250.
- [13] Alem, D.; Clark, A.; Moreno, A. (2016). Stochastic network models for logistics planning in disaster relief. *Eur. J. Oper. Res.*, 255: 187 – 206.
- [14] Shokr, I., Jolai, F., & Bozorgi-Amiri, A. (2021). A novel humanitarian and private sector relief chain network design model for disaster response. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 65: 102522.
- [15] Moreno, A.; Alem, D.; Ferreira, D. (2016). Heuristic approaches for the multiperiod location-transportation problem with reuse of vehicles in emergency logistics. *Comput. Oper. Res.* 69: 79 – 96.
- [16] Moreno, A.; Alem, D.; Ferreira, D.; Clark, A. (2018). An effective two-stage stochastic multi-trip location-transportation model with social concerns in relief supply chains. *Eur. J. Oper. Res.*, 269: 1050–1071.
- [17] Mavrotas, G. (2007). "Generation of efficient solutions in multi objective mathematical programming problems using GAMS. Effective implementation of the ϵ -constraint method," Book Generation of efficient solutions in multi objective mathematical programming problems using GAMS.
- [18] Mavrotas, G. (2009). "Effective implementation of the ϵ -constraint method in Multi-Objective Mathematical Programming problems", *Applied Mathematics and Computation*, 213: 455 – 465.
- [19] Tehrani, N. A., & Makhdoom, M. F. (2013). Implementing a spatial model of Urban Carrying Capacity Load Number (UCCLN) to monitor the environmental loads of urban ecosystems. Case study: Tehran metropolis. *Ecological Indicators*, 32: 197 – 211.
- [20] Edrissi, A.; Nourinejad, M.; Matthew, J. (2015). Transportation network reliability in emergency response. *Transportation research part E: logistics and transportation review*, 80: 56-73.
- [21] JICA, C. (2000). "The study on seismic microzoning of the Greater Tehran Area in the Islamic Republic of Iran," Pacific Consultants International Report, OYO Cooperation Japan, pp. 291 – 390.
- [22] Zokaee, sh, Bozorgi-Amiri, A, Sadjadi, J. (2016). A Robust Optimization Model for Humanitarian Relief Chain Design under Uncertainty, *Applied Mathematical Modelling*.
- [23] Al Theeb, N.; Murray, C. (2017). Vehicle routing and resource distribution in postdisaster humanitarian relief operations. *Int. Trans. Oper. Res.* 24: 1253 – 1284.
- [24] Shokr, I., Jolai, F., & Bozorgi-Amiri, A. (2021). A novel humanitarian and private sector relief chain network design model for disaster response. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 65: 102522.
- [25] Chen, Y., Zhao, Q., Huang, K., & Xi, X. (2022). A Bi-objective optimization model for contract design of humanitarian relief goods procurement considering extreme disasters. *Socio-Economic Planning Sciences*, 81, 101214.
- پیشنهادی برای حل مدل از روش حل دقیق روش محدودیت اسپیلون بهبود یافته استفاده شده است. روش محدودیت اسپیلون بهبود یافته از بهترین روش‌ها برای حل مسائل چندهدفه است که در این تحقیق نیز برای حل مدل پیشنهادی به کار گرفته شده است. باتوجه به زمان حل بالای مسأله پیشنهاد می‌شود از یک روش حل فراابتکاری برای حل مسأله در ابعاد بزرگ استفاده شود. همچنین در این تحقیق به مسأله مسیریابی پرداخته نشده است از این رو در نظر گرفتن مسأله مسیریابی و قابلیت اطمینان مسیره‌ها می‌تواند در تحقیقات آینده مورد استفاده قرار گیرد.
- مراجع**
- [1] Doocy, S., Daniels, A., Packer, C., Dick, A., & Kirsch, T. D. (2013). The human impact of earthquakes: a historical review of events 1980-2009 and systematic literature review.
- [2] Safeer, M., Anbuudayasankar, S. P., Balkumar, K., & Ganesh, K. (2014). Analyzing transportation and distribution in emergency humanitarian logistics. *Procedia Engineering*, 97: 2248 – 2258.
- [3] Maghfiroh, M. F., & Hanaoka, S. (2020). Multi-modal relief distribution model for disaster response operations. *Progress in Disaster Science*, 6, 100095: 1–12.
- [4] Anaya-Arenas, A. M., Renaud, J., & Ruiz, A. (2014). Relief distribution networks: a systematic review. *Annals of Operations Research*, 223(1): 53 – 79.
- [5] Ghasemi, P., Khalili-Damghani, K., Hafezalkotob, A. & Raissi, S. (2019). Uncertain multi-objective multi-commodity multi-period multi-vehicle location-allocation model for earthquake evacuation planning. *Applied Mathematics and Computation*, 105 – 132.
- [6] Boonmee, C. M. Arimura, T. Asada. (2017). Facility location optimization model for emergency humanitarian logistics, *Int. J. Disaster Risk Reduct.* 24: 485 – 498.
- [7] Cotes, N.; Cantillo, V. (2019). Including deprivation costs in facility location models for humanitarian relief logistics. *Socioecon. Plann. Sci.*, 65: 89 – 100.
- [8] Hagh, M.; Ghomi, S.M.T.F.; Jolai, F. (2017). Developing a robust multi-objective model for pre/post disaster times under uncertainty in demand and resource. *J. Clean. Prod.* 154: 188 – 202.
- [9] Rahmani, D., Zandi, A., Peyghaleh, E., and Siamakmanesh, N. (2018). A robust model for a humanitarian relief network with backup covering under disruptions: A real world application. *International journal of disaster risk reduction*, 28: 56 – 68.
- [10] ثقه‌ئی، معماریانی، بزرگی امیری. (۲۰۲۱). ارائه رویکرد برنامه‌ریزی دوسطحی چندپیره در حالت عدم همکاری برای موقعیت‌یابی از پیش‌انبارهای اضطراری بحران. نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، ۹(۱۸)، ۸۱-۹۵.
- [11] Najafi, M.; Eshghi, K.; Dullaert, W. (2013). A multi objective robust optimization model for logistics planning



DOI: 10.22084/IER.2023.26656.2094

Design of Distribution Network for Essential Items in Large Earthquake Conditions (Case Study: Tehran)

R. Beiranvand¹, A. Aghaei^{2*}

¹ M. A. in Industrial Engineering, Industrial Engineering, Faculty of Industrial Engineering, Khajeh Nasiruddin Toosi University, Tehran, Iran

² Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial Engineering, Khajeh Nasiruddin Tosi University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2022/05/30

Accepted: 2022/07/23

Keywords:

Humanitarian Supply Chain
Crisis
Reliability
Relief Distribution Network
Multi-Objective Optimization

ABSTRACT

Current societies are obliged to make the necessary plans for effective response and reducing the destructive effects of disasters. In this research, a mathematical planning model under uncertainty has been developed for earthquake relief and response. In the presented model to increase the reliability, the possibility of facility failure is considered according to the intensity of the earthquake. Distribution centers are considered to be of two types, the first type is local distribution centers, which use public centers and are close to the accident points, these types of centers are prone to failure because they use public centers. Another type is the reliable distribution centers that are built outside the accident area and have a very low probability of failure due to spending more money to build them. In the new model presented, in addition to considering the reliability capabilities, it has been tried to provide a more complete model for planning in the transportation issue by considering the multi-trips mode in the vehicles. Uncertainty is presented using the probability approach based on the modeling scenario and a case study from the city of Tehran to show the performance of the proposed model. The results obtained from the proposed model show that effective and efficient aid delivery is done in terms of time and cost, therefore it can help crisis managers in response to the crisis in order to provide the required budget and appropriate logistics planning.

* Corresponding author. A. Aghaei
Tel.: 021-84063363; E-mail address: AAghaie@kntu.ac.ir