

# ارائه‌ی مدل چندهدفه‌ی بهینه‌سازی استوار برای برنامه‌ریزی لجستیکی در واکنش به زلزله با در نظر گرفتن مراکز توزیع و درمان موقت

رضا محمدی (کارشناسی ارشد)

سید محمدتقی فاطمی قمی\* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی صنایع و سیستم‌های مدیریت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

فربرز جولای (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی صنایع و سیستم‌ها، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

مهندسی صنایع و مدیریت شریف، زمستان ۱۳۹۴ (دوره ۱ - شماره ۲/۱)، ص. ۹۳-۱۰۵

پس از وقوع هر بحران یا رویداد طبیعی نظیر زلزله، مهم‌ترین واکنش، حمل‌ونقل افراد آسیب‌دیده و توزیع کالاهاست. در این نوشتار یک مدل چندهدفه، چند پریودی برای برنامه‌ریزی لجستیکی کالا و مصدومان پس از زلزله با در نظر گرفتن مراکز درمانی موقت و مراکز توزیع موقت ارائه شده است. افزون بر این، در این مدل به مکان‌یابی مراکز توزیع موقت و تعیین ظرفیت مراکز درمانی موقت و بیمارستان‌ها نیز توجه شده است. با توجه به ماهیت غیرقطعی پارامترهایی همچون میزان تقاضا، مقدار منابع موجود، تعداد افراد آسیب‌دیده و ظرفیت درمانی منطقه از رویکرد بهینه‌سازی استوار برای مدل‌کردن و برخورد با عدم قطعیت استفاده شده است. مدل ارائه شده به دنبال کمینه‌کردن تعداد افراد سرویس داده نشده، میزان تقاضای برآورده نشده و نیز تعداد کل وسیله‌ی نقلیه‌ی استفاده شده است. برای حل مدل نیز با توجه به متفاوت بودن اهمیت اهداف از رویکرد سلسله‌مراتبی استفاده کرده‌ایم. در نهایت با استفاده از مدل ارائه شده، برنامه‌ریزی لجستیکی کالا و مصدومان را پس از زلزله‌ی فرضی در منطقه ۱۷ شهر تهران مورد مطالعه قرار داده‌ایم.

**واژگان کلیدی:** لجستیک بشردوستانه، امداد بحران، بهینه‌سازی استوار، مراکز توزیع و درمان موقت، واکنش به زلزله.

## ۱. مقدمه

در سال‌های اخیر رویدادهای طبیعی خسارت جانی و مالی زیادی به جوامع بشری وارد کرده‌اند. تحقیقات نشان می‌دهد که این تلفات و خسارت‌ها با گذشت زمان رو به افزایش است؛ «زلزله» یکی از این رویدادهای طبیعی مخرب است. ماهیت غیرقطعی زلزله به‌گونه‌ی است که با وجود پیشرفت‌های علمی، زمان و مکان آن قابل پیش‌بینی نیست. سالانه بیش از ۵۰۰ مورد بالای طبیعی (سیل، زلزله و طوفان) یا حوادث ناشی از رفتارهای انسانی (اتفاقات تروریستی یا آلوده شدن آب‌ها با مواد شیمیایی) کره زمین را تهدید می‌کند و طی آن حدود ۷۵ هزار نفر جان خود را از دست می‌دهند و حدود ۲۰۰ میلیون نفر آسیب می‌بینند.<sup>[۱]</sup> برای مثال، در کشور خودمان زلزله‌ی بم در سال ۱۳۸۲ منجر به کشته شدن نزدیک به ۲۶۰۰۰ نفر شد.

پس از وقوع هر بحران یا بلایای طبیعی مثل زلزله، مهم‌ترین اقدام در واکنش به

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۱۰/۸، اصلاحیه ۱۳۹۳/۴/۶، پذیرش ۱۳۹۳/۴/۱۷

r.mohammadi86ie@gmail.com  
fatemi@aut.ac.ir  
fjolai@ut.ac.ir

آن حمل‌ونقل افراد آسیب‌دیده و کالاهاست. توزیع کالاها از تأمین کنندگان و انبارهای مختلف و انتقال افراد آسیب‌دیده و مصدوم به مراکز درمانی و بیمارستان‌ها از جمله اقداماتی هستند که در دوران طلایی پس از زلزله در نجات جان افراد و کاهش تلفات نقش بسزایی دارند. در برنامه‌ریزی لجستیکی کالا و مصدومان همواره باید محدودیت‌ها و شرایط متعددی را در نظر گرفت.

در سال‌های اخیر ادبیات موضوع به مسئله‌ی لجستیک هم‌زمان کالا و مصدومان پس از زلزله بسیار پرداخته شده است. در آخرین مقاله‌های ارائه شده در این زمینه،<sup>[۲]</sup> برنامه‌ریزی لجستیکی کالا و مصدومان به‌عنوان یک مسئله‌ی دوهدفه‌ی ریاضی پویا، و با هدف کمینه‌کردن تعداد افراد سرویس داده نشده و تعداد تقاضای برآورده نشده، مدل شده است.<sup>[۳]</sup> بدین منظور کالاها مستقیماً از مراکز توزیع به نقاط آسیب‌دیده و افراد مصدوم نیز از نقاط آسیب‌دیده به مراکز درمانی دائمی و بیمارستان‌ها منتقل می‌شوند. همچنین برنامه‌ریزی لجستیکی کالا و مصدومان، با در نظر گرفتن عدم قطعیت در بعضی از پارامترها در قالب یک مدل چندهدفه طراحی شده است.<sup>[۴]</sup> در این مدل نیز توزیع کالاها و امدادسانی به‌صورت یک مسئله‌ی دوسطحی مدل

شده است. در واقع کالاها از مراکز توزیع دائم مستقیماً به نقاط آسیب‌دیده و افراد مصدوم نیز از نقاط آسیب‌دیده به مراکز درمانی منتقل می‌شوند.

در ادبیات موضوع مسئله‌ی لجستیک هم‌زمان کالا و مصدومان پس از زلزله در یک زنجیره‌ی دوسطحی در نظر گرفته شده است. در دنیای واقعی توزیع کالاها به نقاط آسیب‌دیده بیشتر از طریق مراکز توزیع موقت انجام می‌شود. در واقع کالاها را می‌توان از مراکز توزیع دائم به مراکز توزیع موقت، و سپس به نقاط آسیب‌دیده منتقل کرد یا این که آنها را مستقیماً از مراکز توزیع دائم به نقاط آسیب‌دیده فرستاد. در مورد امداد افراد آسیب‌دیده نیز، همیشه پس از وقوع زلزله مراکز درمان موقت احداث می‌شوند تا افراد آسیب‌دیده‌ی سطحی را درمان کنند. ویژگی‌های مطرح شده تاکنون در ادبیات موضوع مطرح نشده است. در نوشتار حاضر مدلی برای برنامه‌ریزی لجستیک کالا و مصدومان به‌طور هم‌زمان، و با در نظر گرفتن مراکز توزیع موقت و مکان‌یابی آنها و مراکز موقت ارائه خواهیم کرد. همچنین در این مدل تعیین ظرفیت درمانی بیمارستان‌ها و مراکز درمانی موقت نیز مورد توجه قرار گرفته است.

در ادامه‌ی این نوشتار، در بخش دوم به مرور ادبیات موضوع می‌پردازیم. در بخش سوم مسئله و مدل‌سازی آن تشریح شده، و بخش چهارم به تشریح راه حل و حل مدل اختصاص یافته است. مطالعه‌ی موردی نیز در بخش پنجم ارائه شده و در پایان نتیجه‌گیری نهایی ارائه شده است.

## ۲. مرور ادبیات

از سال ۲۰۰۵ تاکنون مقالات زیادی در زمینه‌ی زنجیره‌ی امداد بشردوستانه ارائه شده است. حدود ۵۳٪ این مقالات مربوط به کشور آمریکا، ۱۹٪ مربوط به سازمان‌های بین‌المللی و ۲۸٪ مربوط به کشورهای دیگر است.<sup>[۲]</sup> در این زمینه سه مقاله‌ی مروری در سال‌های ۲۰۰۶، ۲۰۱۲، و ۲۰۱۳ ارائه شده است.<sup>[۳-۶]</sup> در سال ۲۰۰۶، کاربرد تحقیق در عملیات و علم مدیریت در مدیریت عملیات بحران مورد بررسی قرار گرفت<sup>[۴]</sup> و طی آن، ضمن مطالعه‌ی حوزه‌هایی از مدیریت عملیات بحران با استفاده از علوم مدیریتی و تحقیق در عملیات، خلاءهای موجود نیز مشخص شده است. در سال ۲۰۱۲ مدل‌های بهینه‌سازی مورد استفاده در بهینه‌سازی لجستیک اضطراری بررسی شد.<sup>[۵]</sup> در این مقاله، کارهای انجام شده در سه دسته مکان‌یابی، توزیع کالاها و حمل افراد آسیب‌دیده بررسی شده است. در سال ۲۰۱۳ نیز مطالعات پیشین در خصوص کاربرد تحقیق در عملیات و علم مدیریت در مدیریت عملیات بحران تکمیل شده است.<sup>[۶]</sup>

عدم قطعیت یکی از ویژگی‌های اصلی مدیریت زنجیره‌ی امداد بشردوستانه است که مدیریت این زنجیره را با چالش‌های اساسی مواجه می‌کند. عدم قطعیت در زنجیره‌ی امداد بشردوستانه در پارامترهایی مانند تقاضا، منابع تأمین، تعداد افراد آسیب‌دیده، مکان سانحه و مسیرهای حمل‌ونقل وجود دارد. چنان‌که اشاره شد، با توجه به دسته‌بندی‌های متفاوت در ادبیات، در این نوشتار مطالعات را به دو دسته‌ی کلی مدل‌های قطعی و مدل‌های غیر قطعی تقسیم‌بندی می‌کنیم. مدل‌های قطعی مدل‌هایی هستند که همه پارامترهای آن‌ها قطعی است. در مدل‌های غیر قطعی حداقل یک پارامتر غیر قطعی وجود دارد. تعدادی از مقالات ارائه شده در این دسته‌بندی را مرور می‌کنیم.

## ۱.۲. مدل‌های قطعی

اولین مدل در این زمینه در سال ۱۹۸۷ ارائه شد<sup>[۷]</sup> و طی آن یک مدل خطی برای

حمل‌ونقل مواد غذایی با هدف کمینه‌کردن هزینه‌ی حمل‌ونقل و بهینه‌سازی غذای تحویل داده شده پیشنهاد شده است. ازدامر و همکارانش<sup>[۸]</sup> یک مدل چندبرابری برای لجستیک کالا پس از بحران ارائه کرده‌اند. در این مدل ابتدا میزان کالایی که بین دو گروه مجاور باید جابه‌جا شود تعیین، و سپس با استفاده از یک الگوریتم دیگر مبدأ و مقصد این کالاها مشخص می‌شود. تی‌زنگ و همکارانش<sup>[۹]</sup> یک مدل چندهدفه برای طراحی سیستم تحویل کالاها ضروری ارائه کردند. اهداف این مدل سه هدفه عبارت است از: کمینه‌کردن هزینه، کمینه‌کردن زمان طی شده، و بهینه‌کردن میزان سطح رضایت.

نولز و همکارانش<sup>[۱۰]</sup> یک مدل چندهدفه برای توزیع اقلام حیاتی پس از زلزله ارائه کرده‌اند. این مدل شامل سه هدف کمینه‌کردن ریسک، بهینه‌کردن تقاضای پوشش داده شده با استفاده از سیستم لجستیک، و کمینه‌کردن زمان سفر است. برای حل مدل از یک روش دو مرحله‌ی استفاده شده است. در مرحله‌ی اول جواب‌های پارتو را با استفاده از الگوریتم ممتیک<sup>۱</sup> تولید می‌کنند. در مرحله‌ی دوم از الگوریتمی برای توسعه و یافتن جواب‌های پارتو، با توجه به جواب‌های فعلی بهره می‌گیرند. لین و همکارانش<sup>[۱۱]</sup> یک مدل چندکالایی، چنددوره‌ی، چندهدفه برای تحویل کالاها اولویت‌بندی شده به نقاط آسیب‌دیده ارائه کرده‌اند. مدل آن‌ها در واقع گونه‌ی از مسائل مسیریابی وسایل نقلیه<sup>۲</sup> با در نظر گرفتن پنجره زمانی نرم<sup>۳</sup> است. این مدل دوهدفه کمینه‌کردن زمان سفر همه‌ی تورها و کمینه‌کردن تقاضای برآورده نشده را شامل می‌شود. برای حل این مدل دو روش ابتکاری پیشنهاد شده است: روش اول گونه‌ی از الگوریتم ژنتیک و روش دوم برپایه‌ی تجزیه‌ی مدل است. افشار و حقانی<sup>[۱۲]</sup> یک مدل ریاضی برای کنترل جریان کالاها از نقاط تأمین تا نقاط آسیب‌دیده ارائه کرده‌اند. این مدل مسیریابی و زمان‌بندی تخلیه و برداشت را در سیستم لجستیک توصیه شده توسط آژانس مدیریت اضطرار فدرال<sup>۴</sup> -- که چندین سطح مختلف تأمین‌کننده و توزیع‌کننده را شامل می‌شود -- مورد بررسی قرار می‌دهد. ژانگ و همکارانش<sup>[۱۳]</sup> یک مدل عدد صحیح برای تخصیص منابع به نقاط تقاضا با در نظر گرفتن محدودیت منابع و سانحه‌ی دوم ارائه کرده‌اند. این مدل هزینه‌ی تخصیص منابع اضطراری را کمینه می‌کند. با توجه به پیچیدگی مدل یک الگوریتم ابتکاری برای حل مدل توسعه داده شده است.

اگرچه اکثر مقالات عنوان‌شده صرفاً به لجستیک کالا یا مصدومان به‌صورت جداگانه پرداخته‌اند، تعدادی از مقالات نیز لجستیک کالا و مصدومان را هم‌زمان مورد بررسی قرار داده‌اند. یی و ازدامر<sup>[۱۴]</sup> یک مدل پویا برای هماهنگ‌سازی توزیع کالا و تخلیه‌ی افراد آسیب‌دیده ارائه کرده‌اند. این مدل مجموع وزن‌دار تقاضای برآورده نشده و تعداد افراد آسیب‌دیده‌ی درمان‌نشده را کمینه می‌کند. در این مدل با وسیله‌ی نقلیه به‌صورت یک متغیر عدد صحیح برخورد شده است. جواب اولیه‌ی مدل مسیره را شامل نمی‌شود و به همین دلیل از یک الگوریتم ساده‌ی مسیریابی برای استخراج مسیره‌ی وسیله‌ی نقلیه استفاده کرده است. آن‌ها همچنین با بررسی مثال‌های متفاوت نشان داده‌اند که این نوع مدل‌سازی از نظر زمان و قابلیت حل بهتر از مسائل مسیریابی وسیله‌ی نقلیه (VRP) است. یی و کومار برای گونه‌ی از مدل ارائه شده<sup>[۱۵]</sup> با استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان<sup>۵</sup> راه حل یک مرحله‌ی ارائه کرده‌اند. ازدامر<sup>[۱۶]</sup> سیستمی ارائه کرده است که شامل یک مدل ریاضی برای انتقال افراد آسیب‌دیده به بیمارستان و توزیع تجهیزات پزشکی با هلی‌کوپتر به نقاط آسیب‌دیده و نیز یک فرایند مدیریت مسیر است. هدف این سیستم کمینه‌کردن زمان کل سفر با هلی‌کوپتر است. ازدامر و دمیر<sup>[۱۷]</sup> یک فرایند خوشه‌بندی و مسیریابی برای هماهنگ‌سازی توزیع کالاها و تخلیه‌ی نقاط آسیب‌دیده

میزان سطح رضایت و کمینه‌کردن تقاضای برآورده نشده. آن‌ها برای مدل کردن عدم قطعیت از رویکرد سناریوسازی استفاده کرده‌اند.

آدیوار و مرت<sup>[۲۳]</sup> سیستم توزیعی را در نظر گرفته‌اند که در آن کالاهای از طریق چند کشور جمع‌آوری می‌شود. در این سیستم ابتدا کالاهای در یک محل جمع‌آوری، و سپس به نقاط آسیب‌دیده منتقل می‌شود؛ مقدار کالای جمع‌آوری شده، هزینه‌ی تهیه‌ی این کالاهای و مدت زمان جمع‌آوری غیر قطعی در نظر گرفته شده است. این مدل چندهدفه اهدافی چون کمینه‌کردن کل هزینه‌ی تأمین و حمل‌ونقل کالاهای و کمینه‌کردن بیشترین تأخیر در زمان تحویل را شامل می‌شود. این مسئله به صورت یک مدل چندهدفه‌ی فازی مدل شده است و برای این که قابل حل باشد به یک مدل برنامه‌ریزی خطی پارامتری تبدیل کرده‌اند.

شو<sup>[۲۴]</sup> یک رویکرد خوشه‌بندی فازی برای بهینه‌کردن جریان کالاهای ضروری در زنجیره‌ی امداد بشر دوستانه سه‌سطحی در ساعات اولیه پس از سانحه ارائه کرده‌اند. در ادامه‌ی همین مدل شو و همکارانش<sup>[۲۵]</sup> مدلی به منظور مدیریت تقاضا برای لجستیک اضطراری در شرایطی که اطلاعات ناقص و سانحه بزرگ است، ارائه کرده‌اند. این مدل از سه مرحله تشکیل شده است: پیش‌بینی تقاضا با استفاده از همجوشی داده‌ها<sup>۸</sup>، دسته‌بندی مناطق آسیب‌دیده به گروه‌های مختلف با استفاده از خوشه‌بندی فازی، رده‌بندی این گروه‌ها با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره.

محققین یک مدل چندهدفه‌ی تصادفی و چند پرودی برای برنامه‌ریزی لجستیک کالاهای و مصدومان پس از زلزله ارائه کرده‌اند.<sup>[۲۶]</sup> در این مدل، برای مدل‌سازی عدم قطعیت از رویکرد بهینه‌سازی استوار استفاده شده است؛ حمل‌ونقل کالاهای نیز فقط در دو سطح از مراکز تأمین دائم به نقاط آسیب‌دیده انجام می‌شود. مدل ارائه شده در نوشتار حاضر مبتنی بر این مدل خواهد بود.

چنان که مطالعه‌ی ادبیات موضوع نشان می‌دهد در بررسی لجستیک هم‌زمان کالاهای و مصدومان، مراکز توزیع موقت و مراکز درمانی موقت لحاظ نشده است.

### ۳. تشریح مسئله و مدل‌سازی آن

مسئله‌ی مورد بررسی عبارت است از توزیع کالاهای حیاتی بین افراد آسیب‌دیده، و نیز انتقال این افراد به مراکز درمانی. این مسئله در حقیقت دو جزء مهم دارد: توزیع کالاهای و انتقال افراد آسیب‌دیده به مراکز درمانی.

در این مسئله کالاهای از مراکز دائمی به مراکز توزیع موقت که پس از زلزله در منطقه‌ی آسیب‌دیده احداث شده منتقل، و از آنجا به نقاط آسیب‌دیده انتقال داده می‌شوند. البته کالاهای را می‌توان مستقیماً از مراکز تأمین دائمی به نقاط آسیب‌دیده منتقل کرد. این مراکز موقت در نقش انبارهای عبوری موقت عمل می‌کنند و در آنها کارهایی مثل دسته‌بندی کالاهای (در صورت نیاز) انجام شود. این مراکز توزیع موقت از بین مکان‌هایی مثل مدارس که فضای زیادی دارند انتخاب می‌شود. تسریع در توزیع کالاهای، علاوه بر دیگر امتیازات ذکر شده در مطالعات موجود،<sup>[۲۶]</sup> از جمله امتیازات آن است. لازم به ذکر است که مکان‌یابی این مراکز توزیع موقت نیز به وسیله‌ی مدل ارائه‌شده انجام خواهد شد. این مراکز از بین مکان‌های از پیش ساخته‌شده‌ی مثل مدارس انتخاب می‌شوند.

بخش دوم مسئله، انتقال افراد آسیب‌دیده به مراکز درمانی است. افراد آسیب‌دیده را با توجه به میزان آسیب‌دیدگی می‌توان به مراکز درمانی دائمی و بیمارستان‌ها یا مراکز درمانی موقت که پس از زلزله احداث شده‌اند منتقل کرد. احداث مراکز درمانی موقت،

ارائه کرده‌اند. این فرایند با استفاده از یک الگوریتم خوشه‌بندی چندسطحی<sup>۶</sup> نقاط تقاضا را به خوشه‌های کوچکی در چندین سطح تقسیم می‌کند و از این طریق مسئله‌ی مسیریابی بین خوشه‌ها را به صورت بهینه حل می‌کند. نجفی و همکارانش<sup>[۲۷]</sup> یک مدل دوهدفه‌ی پویای چنددوره‌ی و چندهدفه برای برنامه‌ریزی لجستیک هم‌زمان کالاهای و مصدومان ارائه کرده‌اند. این مدل دوهدفه کمینه‌کردن میزان تقاضای برآورده نشده و کمینه‌کردن تعداد افراد آسیب‌دیده را دنبال می‌کند. این مدل آخرین مدل ارائه شده در زمینه‌ی لجستیک کالاهای و مصدومان پس از زلزله تاکنون است.

### ۲.۲. مدل‌های غیرقطعی

در زنجیره‌ی امداد بشر دوستانه، در پارامترهایی مانند تقاضا، منابع تأمین، تعداد افراد آسیب‌دیده، مکان سانحه و مسیرهای حمل‌ونقل عدم قطعیت وجود دارد. از میان روش‌های برخورد با عدم قطعیت، برنامه‌ریزی تصادفی بیشترین کاربرد را برای مدل‌کردن عدم قطعیت پارامترها در زنجیره‌ی امداد بشر دوستانه داشته است.

باربارا سوگلو و آردا<sup>[۱۸]</sup> یک مدل تصادفی دومرحله‌ی مکان‌یابی - مسیریابی برای برنامه‌ریزی حمل‌ونقل در زلزله ارائه کرده‌اند. در مرحله‌ی اول تصمیم‌های مربوط به مکان‌یابی با هدف کمینه‌کردن هزینه‌های مورد انتظار حمل‌ونقل بررسی می‌شود. در مرحله‌ی دوم حمل‌ونقل کالاهای از محل انبارها به نقاط تقاضا با هدف کمینه‌کردن جریمی حاصل از برآورده نشدن تقاضا و هزینه‌ی نگه‌داری موجودی‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور به میزان تقاضا و تلفات غیرقطعی توجه ویژه شده است. همچنین ظرفیت کمان‌ها برای نشان دادن دسترسی به مسیرهای تصادفی در نظر گرفته شده‌اند.

مت و زابینسکی مدلی دومرحله‌ی برای تعیین میزان موجودی و بهینه‌کردن سیستم توزیع تجهیزات پزشکی ارائه کرده‌اند.<sup>[۱۹]</sup> در این مدل میزان تقاضا غیرقطعی است. آن‌ها یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته برای تعیین مکان بهینه‌ی انبار تجهیزات پزشکی و تعیین میزان بهینه‌ی موجودی کالاهای با هدف کمینه‌کردن زمان حمل‌ونقل ارائه کردند. عدم قطعیت با استفاده از سناریوسازی مدل شده است. با توجه به سناریوهای میزان تقاضاها و زمان حمل‌ونقل تعیین می‌شود. در مرحله‌ی اول در خصوص مکان انبارها و میزان موجودی کالاهای با هدف کمینه‌سازی هزینه‌ی مورد انتظار تصمیم‌گیری می‌شود. در مرحله‌ی دوم نیز در خصوص تحویل کالاهای به نقاط آسیب‌دیده با هدف کمینه‌سازی زمان حمل‌ونقل تصمیم گرفته می‌شود. مشابه مدل گفته شده، راول و ترانکوویست<sup>[۲۰]</sup> یک مدل دومرحله‌ی تصادفی با امکان در دسترس نبودن بعضی از مسیرها در بعضی از سناریوها ارائه، و برای حل مدل نیز از روش L-Shaped استفاده کرده‌اند.

چانگ و همکارانش<sup>[۲۱]</sup> یک ابزار تصمیم‌گیری برای لجستیک اضطراری سیل، در حالتی که تعداد تلفات غیرقطعی است، ارائه کرده‌اند. برای حل مدل از روش تقریب میانگین نمونه<sup>۷</sup> استفاده کرده‌اند. مدل برنامه‌ریزی تصادفی ارائه شده، برنامه‌ی توزیع منابع حیاتی - شامل تعیین مکان انبارهای ذخیره کالاهای و تخصیص کالاهای با توجه به محدودیت ظرفیت - را تعیین می‌کند. هدف از این مدل کمینه‌کردن مسافت طی شده برای توزیع است.

بزرگی امیری و همکارانش<sup>[۲۲]</sup> یک مدل چندهدفه‌ی تصادفی برای توزیع کالاهای از تأمین‌کننده‌های اصلی به تأمین‌کننده‌های محلی و سپس به نقاط آسیب‌دیده ارائه کرده‌اند. در این مدل علاوه بر تقاضا مقدار منابع نیز غیر قطعی در نظر گرفته شده است. اهداف این مدل عبارت است از: کمینه‌کردن هزینه‌ی مورد انتظار، بیشینه‌کردن

۶. ظرفیت درمانی کل منطقه‌ی آسیب‌دیده بین بیمارستان‌ها و مراکز درمانی موقت تقسیم می‌شود؛ در واقع ظرفیت مراکز درمانی موقت درصدی از ظرفیت درمانی کل است.
  ۷. نقاط کاندید برای مراکز درمانی موقت و مراکز توزیع موقت مشخص و فواصل بین تمام نقاط نیز معلوم است.
  ۸. هزینه‌ی احداث مراکز درمانی موقت و مراکز توزیع موقت، صفر در نظر گرفته می‌شود.
  ۹. کالاها را می‌توان مستقیماً از مراکز توزیع دائم به نقاط آسیب‌دیده حمل کرد، یا از طریق مراکز توزیع موقت به نقاط آسیب‌دیده تحویل داد.
  ۱۰. ظرفیت درمانی کل منطقه‌ی آسیب‌دیده بین بیمارستان‌ها و مراکز درمانی موقت تقسیم می‌شود؛ در واقع ظرفیت مراکز درمانی موقت درصدی از ظرفیت درمانی کل است.
- علاوه بر فرض‌ها کلی و عمومی مدل که برای هر دو حالت قطعی و غیرقطعی برقرار است، فرض‌های حالت قطعی عبارت‌اند از:
- الف) میزان تقاضای نقاط آسیب‌دیده و مصدومان آن‌ها برای طول دوره‌ی برنامه‌ریزی مشخص است.
- ب) ظرفیت اولیه‌ی بیمارستان‌ها و مراکز درمانی موقت و دائم، و نیز مقدار کالاهای موجود در مراکز توزیع برای طول دوره‌ی برنامه‌ریزی مشخص است.

### ۱.۱.۳. مجموعه‌ها

- $T$ : طول دوره‌ی برنامه‌ریزی؛
- $N$ : مجموعه‌ی همه‌ی گره‌های شبکه؛
- $DN$ : مجموعه‌ی گره‌های تقاضا؛
- $SN$ : مجموعه‌ی گره‌های تأمین‌کننده؛
- $PSN$ : مجموعه‌ی گره‌های تأمین‌کننده‌ی دائمی؛
- $TSN$ : مجموعه‌ی گره‌های کاندید برای استقرار مراکز توزیع موقت؛
- $EN$ : مجموعه‌ی گره‌های مراکز درمانی؛
- $HN$ : مجموعه‌ی مراکز درمانی دائمی؛
- $TEN$ : مجموعه‌ی گره‌های کاندید برای استقرار مراکز درمانی موقت؛
- $IN$ : مجموعه‌ی گره‌های میانی به‌جز گره‌های تقاضا، تأمین‌کننده‌های دائمی و موقت، بیمارستان‌ها و مراکز درمانی موقت؛
- $KN$ : مجموعه‌ی همه‌ی گره‌ها به‌جز نقاط تقاضا و توزیع موقت؛
- $NN$ : مجموعه‌ی همه‌ی گره‌ها به‌جز مراکز درمانی؛
- $CS$ : مجموعه‌ی کالاها؛
- $VS$ : مجموعه‌ی وسایل نقلیه؛
- $IS$ : مجموعه‌ی افراد آسیب‌دیده.

### ۲.۱.۳. شمارنده‌ها

- $t, s$ : شمارنده‌ی زمان؛
- $m$ : شمارنده‌ی گره‌های تقاضا  $|DN|$ ؛
- $e$ : شمارنده‌ی گره‌های همه‌ی مراکز درمانی  $|EN|$ ؛
- $q$ : شمارنده‌ی گره‌های شامل مراکز درمانی دائمی  $|HN|$ ؛
- $g$ : شمارنده‌ی گره‌های کاندید برای مراکز درمانی موقت  $|TEN|$ ؛
- $f$ : شمارنده‌ی گره‌های همه‌ی تأمین‌کننده‌ها  $|SN|$ ؛
- $l$ : شمارنده‌ی گره‌های تأمین‌کننده‌ی دائمی  $|PSN|$ ؛

امدادرسانی به افراد آسیب‌دیده را تسریع می‌کند. ظرفیت این مراکز درمانی بخشی از ظرفیت درمانی کل منطقه است. در واقع در دنیای واقعی نیز ظرفیت درمانی کل منطقه بین بیمارستان‌ها و مراکز درمانی موقت تقسیم می‌شود. با استفاده از مدل ارائه‌شده ظرفیت بیمارستان‌ها و ظرفیت مراکز درمانی موقت نیز تعیین خواهد شد. هدف اصلی از این برنامه‌ریزی لجستیکی، با توجه به ماهیت مسئله، کاهش زمان انتظار افراد برای دریافت کالاها و نیز کاهش زمان انتظار افراد مصدوم برای درمان است. در ادبیات، در اکثر نوشتارها این دو هدف مورد استناد بوده است. با توجه به شرایط بحرانی پس از زلزله، تعداد وسایل نقلیه‌ی در دسترس نیز در ساعات اولیه محدود است. بنابراین هم‌زمان با کاهش زمان‌های انتظار مطرح‌شده کاهش تعداد وسایل نقلیه‌ی مورد استفاده نیز یکی از اهداف مدل خواهد بود. بنابراین اهداف مدل ریاضی ارائه شده برای برنامه‌ریزی لجستیکی عبارت است از: کمینه‌سازی زمان انتظار کل افراد آسیب‌دیده برای درمان، کمینه‌سازی زمان انتظار کل افراد برای برآورده‌سازی نیازها، و کمینه‌سازی تعداد وسایل نقلیه‌ی مورد استفاده در کل دوره‌ها. دو تابع هدف اول از نوع بشردوستانه بوده و تابع هدف سوم به دنبال استفاده‌ی بهینه از وسایل نقلیه‌ی موجود برای کاهش هزینه‌ها در صورت امکان است. توابع هدف فوق از نظر درجه‌ی اهمیت یکسان نیستند و توابع هدف بشر دوستانه مهم‌تر از تابع هدف سوم است. البته بین دو تابع هدف بشردوستانه نیز رسیدگی به حال مصدومان از اهمیت بیشتری برخوردار است. به عبارت دیگر از بالا به پایین از اهمیت تابع هدف‌ها کاسته می‌شود. برای حل مدل نیز مبنای اصلی اهمیت اهداف خواهد بود.

از دیگر چالش‌های مهم در مدل‌سازی ریاضی و برنامه‌ریزی لجستیکی پس از زلزله، کمبود اطلاعات و عدم قطعیت در داده‌هاست، اگرچه در مواردی بسته به قدرت، ابعاد، مکان و زمان زلزله عدم قطعیت در داده‌ها ممکن است کم‌تر باشد. در چنین مواردی می‌توان پارامترها را با در نظر گرفتن یک حاشیه‌ی اطمینان قطعی فرض کرد، اما در مواردی که زلزله‌ها قدرت بیشتری دارند و مخرب‌ترند این فرض واقعی نخواهد بود و برآورد نقطه‌ی پارامترها، مسئله‌ی برنامه‌ریزی را در عمل با مشکل مواجه خواهد کرد. برای رفع این مشکل می‌توان از تخمین فاصله‌ی بی‌به‌جای تخمین نقطه‌ی استفاده کرد.

### ۱.۱.۳. مفروضات مسئله

- در مسئله‌ی مورد بررسی، علاوه بر فرض‌های مطرح‌شده در مطالعات پیشین [۲] فرض‌های مورد نظر عبارت‌اند از:
۱. هر وسیله‌ی نقلیه‌ی مجاز می‌تواند از یک یا چند نقطه به یک یا چند نقطه‌ی دیگر کالا یا مصدوم حمل کند.
  ۲. وسایل نقلیه در یک مسیر به‌طور هم‌زمان کالا و مصدوم حمل نمی‌کنند.
  ۳. در سیستم حمل‌ونقل از وسایل نقلیه‌ی متنوعی مثل کامیون، قطار، آمبولانس، و هلیکوپتر استفاده می‌شود که تعداد و ظرفیت آن‌ها در نقاط مختلف مشخص است.
  ۴. هر وسیله‌ی نقلیه با توجه به مشخصاتش مجاز به حمل بعضی از کالاها یا بعضی از مصدوم‌هاست.
  ۵. تقاضای یک مصدوم موقعی برآورده شده محسوب می‌شود که به مراکز درمانی یا بیمارستان تحویل داده شود، زیرا وسایل نقلیه فاقد امکانات لازم برای درمان هستند. به عبارتی صرفاً تخصیص وسیله‌ی نقلیه برای حمل مصدوم به‌معنی برآورده شدن تقاضای وی نیست.

$J$ : شمارنده‌ی گره‌های مراکز توزیع موقت  $J = |TSN|$ ؛  
 $i$ : شمارنده‌ی گره‌های میانی  $I = |IN|$ ؛  
 $k$ : شمارنده‌ی مجموعه‌ی  $K = |KN|$ ؛  
 $n$ : شمارنده‌ی مجموعه‌ی  $R = |N|$ ؛  
 $o, p$ : شمارنده‌ی همه‌ی گره‌های شبکه؛  
 $a$ : شمارنده‌ی کالاها  $A = |CS|$ ؛  
 $v$ : شمارنده‌ی وسایل نقلیه  $V = |VS|$ ؛  
 $h$ : شمارنده‌ی نوع مصدومیت  $H = |IS|$ ؛

$Y_{hopt}^{mv}$ : تعداد افراد آسیب‌دیده‌ی نوع  $h$  که مربوط به گره  $m$  است و با وسیله‌ی نقلیه‌ی نوع  $v$  از گره  $o$  به گره  $p$  در زمان  $t$  جابه‌جا شده است؛  
 $CTE_{hgt}$ : ظرفیت مرکز درمانی موقت گره  $g$  برای درمان افراد آسیب‌دیده‌ی نوع  $h$  در زمان  $t$ ؛  
 $u_j$ : اگر تأمین‌کننده‌ی موقت زام احداث شود برابر ۱، در غیر این صورت برابر صفر؛  
 $avv_{ot}^v$ : تعداد وسیله‌ی نقلیه‌ی نوع  $v$  موجود در گره  $o$  در زمان  $t$ ؛  
 $hsp_{hgt}$ : ظرفیت مرکز درمانی دائمی گره  $q$  برای درمان افراد آسیب‌دیده‌ی نوع  $h$  در زمان  $t$ ؛

با توجه به فرض‌ها و نمادهای مطرح شده‌ی مدل ریاضی برای برنامه‌ریزی لجستیکی کالا و مصدوم در حالتی که پارامترها قطعی و معلوم‌اند عبارت است از:

$$\text{Min} f_1 = \sum_{h=1}^H \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T p_h \cdot dew_{hmt} \quad (1)$$

$$\text{Min} f_2 = \sum_{a=1}^A \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T p_a \cdot dev_{amt} \quad (2)$$

$$\text{Min} f_3 = \sum_{v=1}^V \sum_{o=1}^O \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T Z_{opt}^v \quad (3)$$

s.t :

$$\sum_{v=1}^V \sum_{l=1}^L \sum_{s=1}^t \sum_{o=1}^O X_{aoms}^{lv} \cdot A_{somt}^v - \sum_{v=1}^V \sum_{l=1}^L \sum_{s=1}^t \sum_{o=1}^O X_{amps}^{lv} - \sum_{s=1}^t \tilde{d}_{ams} = surp_{amt} - dev_{amt} \quad (4)$$

$$\forall m \in DN, a \in CS, t \in T$$

$$- \sum_{v=1}^V \sum_{e=1}^E \sum_{s=1}^t \sum_{o=1}^O Y_{hoes}^{mv} \cdot A_{soet}^v + \sum_{v=1}^V \sum_{e=1}^E \sum_{s=1}^t \sum_{p=1}^P Y_{heps}^{mv} + \sum_{s=1}^t \tilde{w}_{hms} = dew_{hmt} \quad \forall m \in DN, h \in IS, t \in T \quad (5)$$

$$\sum_{v=1}^V \sum_{s=1}^t \sum_{p=1}^P X_{alps}^{lv} \leq \sum_{s=1}^t \tilde{s}up_{als} \quad a \in CS, l \in PSN, t \in T \quad (6)$$

$$\sum_{v=1}^V \sum_{s=1}^t \sum_{p=1}^P \sum_{l=1}^L X_{apjs}^{lv} \cdot A_{spjt}^v - \sum_{v=1}^V \sum_{l=1}^L \sum_{s=1}^t \sum_{o=1}^O X_{ajos}^{lv} \leq \sum_{s=1}^t Ctd_{ajt} \cdot u_j \quad a \in CS, j \in TSN, t \in T \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^J u_j = \mu \quad (8)$$

$$X_{ajps}^{lv} \leq B_{big} \cdot u_j \quad \forall j \in TSN \quad (9)$$

$$X_{apjs}^{lv} \leq B_{big} \cdot u_j \quad \forall j \in TSN \quad (10)$$

$$\sum_{v=1}^V \sum_{s=1}^t \sum_{p=1}^P Y_{hmps}^{mv} \leq \sum_{s=1}^t \tilde{w}_{hms} \quad \forall m \in DN, h \in IS, t \in T \quad (11)$$

### ۳.۱.۳. پارامترها

$B_{big}$ : عدد بزرگ مثبت؛

$\tilde{d}_{amt}$ : مقدار تقاضای کالای نوع  $a$  در گره  $m$  در زمان  $t$ ؛

$\tilde{w}_{hmt}$ : تعداد افراد آسیب‌دیده‌ی نوع  $h$  در گره  $m$  در زمان  $t$ ؛

$\tilde{s}up_{als}$ : مقدار کالای موجود نوع  $a$  در گره  $l$  در زمان  $t$ ؛

$surp_{amt}$ : مقدار کالای مازاد نوع  $a$  تخصیص داده شده به گره  $m$  تا زمان  $t$ ؛

$t_{op}^v$ : زمان لازم برای بی‌مودن یال  $(o, p)$  با وسیله‌ی نقلیه‌ی نوع  $v$ ؛

$avv_{ot}^v$ : تعداد وسیله‌ی نقلیه‌ی نوع  $v$  موجود در گره  $o$  در زمان  $t$ ؛

$I\tilde{w}sp_{hgt}$ : ظرفیت درمانی کل منطقه برای مصدوم نوع  $h$  در زمان  $t$ ؛

$Ihsp_{hgt}$ : ظرفیت اولیه‌ی مراکز درمانی دائمی در گره  $q$  برای درمان افراد آسیب‌دیده‌ی نوع  $h$  در زمان  $t$ ؛

$Ctd_{ajt}$ : ظرفیت تأمین‌کننده‌ی موقت گره  $j$  برای ذخیره‌ی کالای نوع  $a$  در زمان  $t$ ؛

$W_a$ : وزن هر واحد کالای نوع  $a$ ؛

$C_a$ : حجم هر واحد کالای نوع  $a$ ؛

$cw^v$ : ظرفیت وزنی وسیله‌ی نقلیه‌ی نوع  $v$ ؛

$cc^v$ : ظرفیت حجمی وسیله‌ی نقلیه‌ی نوع  $v$ ؛

$dv^{vh}$ : ظرفیت وسیله‌ی نقلیه برای حمل مصدوم نوع  $h$ ؛

$\mu$ : تعداد تأمین‌کننده‌ی موقت که باید احداث شود؛

$\rho$ : درصدی از ظرفیت درمان که می‌توان به مراکز درمانی موقت اختصاص داد؛

$\rho'$ : میزان مجاز افزایش ظرفیت مراکز درمانی دائمی ( $\rho' \geq 1$ )؛

$\rho''$ : میزان مجاز کاهش ظرفیت مراکز درمانی دائمی ( $\rho'' \leq 1$ )؛

$p_a$ : اولویت کالای نوع  $a$ ؛

$p_h$ : اولویت افراد آسیب‌دیده‌ی نوع  $h$ ؛

$ac_a^v$ : اگر وسیله‌ی نقلیه‌ی نوع  $v$  بتواند کالای نوع  $a$  را حمل کند برابر ۱، در غیر این صورت برابر صفر؛

$aw_h^v$ : اگر وسیله‌ی نقلیه‌ی نوع  $v$  بتواند افراد آسیب‌دیده‌ی نوع  $h$  را حمل کند برابر ۱، در غیر این صورت برابر صفر؛

$A_{sopt}^v$ : اگر وسیله‌ی نقلیه‌ی نوع  $v$  که در زمان  $s$  گره  $o$  را ترک میکند بتواند قبل از  $t + 1$  به گره  $p$  برسد برابر ۱، در غیر این صورت برابر صفر.

### ۴.۱.۳. متغیرها

$dev_{amt}$ : مقدار تقاضای برآورده نشده‌ی کالای نوع  $a$  در گره  $m$  در زمان  $t$ ؛

$dew_{hmt}$ : تعداد افراد آسیب‌دیده‌ی سرویس داده نشده‌ی نوع  $h$  در گره  $m$  در زمان  $t$ ؛

$Z_{opt}^v$ : تعداد وسیله‌ی نقلیه‌ی نوع  $v$  که در زمان  $t$  از گره  $o$  به گره  $p$  حرکت می‌کنند؛

$X_{aopt}^{lv}$ : مقدار کالای نوع  $a$  مربوط به تأمین‌کننده‌ی  $l$  که با وسیله‌ی نقلیه‌ی نوع  $v$  از گره  $o$  به گره  $p$  در زمان  $t$  جابه‌جا شده است؛

$$Y, Z, dew, avv, CTE \geq 0 \text{ \& Integer} \quad (26)$$

$$X, dev \geq 0 \quad (27)$$

$$u_j \in \{0, 1\} \quad (28)$$

تابع هدف اول به دنبال کمینه‌کردن مجموع وزنی مصدومان سرویس داده نشده در طول دوره‌ی برنامه‌ریزی است. تابع هدف دوم مجموع وزنی تقاضاهای برآورده نشده در طول دوره برنامه‌ریزی را کمینه می‌کند. تابع هدف سوم به کمینه‌کردن تعداد وسایل نقلیه در طول دوره‌ی برنامه‌ریزی می‌پردازد. محدودیت ۴ میزان تقاضای تأمین نشده‌ی هریک از کالاها را در نقاط آسیب‌دیده تعیین می‌کند. محدودیت ۵ تعداد افراد مصدوم رسیدگی نشده را تعیین می‌کند. محدودیت ۶ تضمین می‌کند که میزان کالای ارسالی از تأمین‌کننده‌ی دائمی کم‌تر از کالای موجود برای آن تأمین‌کننده باشد. محدودیت ۷ تضمین می‌کند که میزان کالای دریافتی یک مرکز توزیع موقت بیشتر از میزان ظرفیت آن مرکز توزیع نباشد. محدودیت ۸ تعداد مراکز توزیع موقتی را که باید احداث شوند کنترل می‌کند. محدودیت‌های ۹ و ۱۰ تضمین می‌کنند که ورود و خروج کالا از یک مرکز توزیع موقت تنها در صورت احداث آن مرکز امکان‌پذیر خواهد بود. محدودیت ۱۱ تضمین می‌کند که تعداد مصدومان ارسالی از یک منطقه‌ی آسیب‌دیده در هر دوره از زمان برنامه‌ریزی بیشتر از تعداد افراد مصدوم شناسایی شده نباشد. محدودیت‌های ۱۲ و ۱۳ بیان‌گر تعادل حمل کالاها و مصدومان در نقاط میانی هستند و تضمین می‌کنند که کالا یا مصدومی در نقاط میانی متوقف نشود. محدودیت‌های ۱۴ و ۱۵ مربوط به وسایل نقلیه‌اند و تضمین می‌کنند که کالا یا مصدوم برای حمل به وسیله‌ی نقلیه‌ی تخصیص‌یافته باید که قابلیت حمل آن کالا یا مصدوم را داشته باشد. محدودیت‌های ۱۶ و ۱۷ تضمین می‌کنند که میزان کالای تخصیص یافته به یک وسیله‌ی نقلیه بیش از ظرفیت حجمی و وزنی آن نباشد. محدودیت ۱۸ متضمن عدم تخصیص افراد مصدوم بیش از ظرفیت برای حمل به وسیله‌ی نقلیه‌ی مربوطه است. محدودیت ۱۹ بیان‌گر محدودیت حمل‌ونقل است و تضمین می‌کند که حمل‌ونقل بین دو گره از شبکه فقط در صورت وجود یال مربوطه صورت پذیرد. محدودیت ۲۰ تعادل تعداد وسیله‌ی نقلیه در گره‌های مختلف شبکه را تضمین می‌کند. محدودیت ۲۱ تضمین می‌کند که ظرفیت پذیرش مراکز درمانی موقت بیش از درصد معینی از ظرفیت اولیه‌ی درمان کل منطقه نباشد. محدودیت ۲۲ تضمین می‌کند که مجموع ظرفیت‌های مراکز درمانی موقت و بیمارستان‌ها برابر با ظرفیت اولیه کل باشد. محدودیت ۲۳ تضمین می‌کند که ظرفیت بیمارستان تا حد معینی از ظرفیت اولیه بیشتر یا کم‌تر نباشد. محدودیت‌های ۲۴ و ۲۵ به ترتیب تضمین می‌کنند که تعداد مصدومان باقی‌مانده در بیمارستان‌ها و مراکز درمانی موقت بیش از ظرفیت آنها نباشد. محدودیت‌های ۲۶ تا ۲۸ به تعریف متغیرهای مسئله می‌پردازند.

### ۲.۳. مدل برنامه‌ریزی لجستیکی در حالت عدم قطعیت

چنان‌که اشاره شد یکی از رویکردهای برخورد با عدم قطعیت پارامترها استفاده از برآورد فاصله‌ی به‌جای برآورد نقطه‌ی است. در این رویکرد اگرچه برنامه‌ریزی فقط یک بار و آن هم در ابتدای واکنش رخ می‌دهد، اما چون تخمین‌های انجام‌شده به‌صورت فاصله‌ی از دقت و اطمینان بیشتری برخوردار بوده و می‌توان انتظار داشت که اجرای برنامه با مشکل مواجه نشود.

### ۳.۳. بهینه‌سازی استوار

در بهینه‌سازی استوار عدم قطعیت پارامترها به‌صورت یک بازه و با در نظر گرفتن

$$\sum_{v=1}^V \sum_{o=1}^O \sum_{t=1}^t X_{aoks}^{lv} \cdot A_{sokt}^v - \sum_{v=1}^V \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^t X_{aoks}^{lv} = 0$$

$$\forall k \in KN, a \in CS, l \in PSN, t \in T, k \neq l \quad (12)$$

$$\sum_{v=1}^V \sum_{s=1}^t \sum_{o=1}^O Y_{hons}^{mv} \cdot A_{sont}^v + \sum_{v=1}^V \sum_{s=1}^t \sum_{p=1}^P Y_{hnps}^{mv} = 0$$

$$\forall m \in DN, n \in NN, h \in IS, t \in T, n \neq m \quad (13)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{o=1}^O \sum_{p=1}^P X_{aoks}^{lv} \leq B_{big} \cdot aca^v \quad \forall a \in CS, v \in VS, t \in T \quad (14)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{o=1}^O \sum_{p=1}^P Y_{hopt}^{mv} \leq B_{big} \cdot aw_h^v \quad \forall h \in IS, v \in VS, t \in T \quad (15)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{a=1}^A C_a \cdot X_{aops}^{lv} \leq Z_{opt}^v \cdot cc^v \quad \forall o \in N, p \in N, v \in VS, t \in T \quad (16)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{a=1}^A W_a \cdot X_{aops}^{fv} \leq Z_{opt}^v \cdot cw^v \quad \forall o \in N, p \in N, v \in VS, t \in T \quad (17)$$

$$\sum_{m=1}^M Y_{hopt}^{mv} \leq Z_{opt}^v \cdot dv^{vh} \quad \forall o \in N, p \in N, v \in VS, h \in H, t \in T \quad (18)$$

$$Z_{opt}^v \leq B_{big} \cdot t_{op}^v \quad \forall o \in N, p \in N, v \in VS, t \in T \quad (19)$$

$$\sum_{o=1}^O \sum_{s=1}^t Z_{ops}^v \cdot A_{sopt}^v + \sum_{s=1}^t av_{ps}^v = av_{pt}^v + \sum_{o=1}^O \sum_{s=1}^t Z_{pos}^v$$

$$\forall p \in N, v \in VS, t \in T \quad (20)$$

$$\sum_{g=1}^G \sum_{s=1}^t CTE_{hgs} \leq \rho \sum_{s=1}^t I\tilde{w}sp_{hs} \quad \forall h \in IS, t \in T \quad (21)$$

$$\sum_{q=1}^Q \sum_{s=1}^t hsp_{hqs} + \sum_{g=1}^G \sum_{s=1}^t CTE_{hgs} \leq \sum_{s=1}^t I\tilde{w}sp_{hs}$$

$$\forall h \in IS, t \in T \quad (22)$$

$$\rho'' \cdot Ihsph_{qt} \leq hsp_{hqt} \leq \rho' \cdot Ihsph_{qt} \quad \forall q \in HN, h \in IS, t \in T \quad (23)$$

$$\sum_{v=1}^V \sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^t \sum_{q=1}^Q Y_{hoqs}^{mv} \cdot A_{soqt}^v - \sum_{v=1}^V \sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^t \sum_{p=1}^P Y_{hmps}^{mv}$$

$$\leq \sum_{s=1}^t hsp_{hqs} \quad \forall q \in HN, h \in IS, t \in T \quad (24)$$

$$\sum_{v=1}^V \sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^t \sum_{g=1}^G Y_{hog_s}^{mv} \cdot A_{sogt}^v - \sum_{v=1}^V \sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^t \sum_{p=1}^P Y_{hgps}^{mv}$$

$$\leq \sum_{s=1}^t CTE_{hgs} \quad \forall g \in TEN, h \in IS, t \in T \quad (25)$$

محدودیت (۵) را نیز با توجه به این که تابع هدف اول تعداد افراد آسیب دیده درمان نشده را محاسبه می‌کند، می‌تواند به فرم کم‌تر مساوی نوشت. در نهایت مدل استوار معادل به صورت محدودیت‌های ۳۳ تا ۶۰ خواهد بود.

#### ۴. حل مدل

با توجه به ماهیت مسئله، امداد و نجات افراد آسیب دیده مهم‌تر از سایر اهداف است. توزیع کالاها نیز در درجه‌ی دوم اهمیت قرار دارد و مهم‌تر از کمینه‌کردن تعداد وسایل نقلیه است. بنابراین به خاطر درجه‌ی اهمیت‌های متفاوتی که توابع هدف دارند اهداف را به صورت سلسله‌مراتبی<sup>[۳۱]</sup> بهینه می‌کنیم. با توجه به رویکرد سلسله‌مراتبی استفاده شده،<sup>[۲]</sup> برای حل مدل چندهدفه‌ی ارائه شده باید سه مدل زیر را به ترتیب حل کرد:

$P_0$

Min  $f_t(Z)$

s.t. :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min } f_t(X) \\ \text{s.t. :} \\ \left\{ \begin{array}{l} g_x(X) \leq b_x \\ g_{x,z}(X, Z) \leq b_{x,z} \end{array} \right\} \\ \left\{ \begin{array}{l} \text{Min } f_1(Y) \\ \text{s.t. :} \\ \left\{ \begin{array}{l} g_y(Y) \leq b_y \\ g_{y,z}(Y, Z) \leq b_{y,z} \end{array} \right\} \\ g_z(Z) \leq b_z \\ X \in R^* \\ Y, Z \geq 0 \text{ \& Integer} \end{array} \right\} \end{array} \right.$$

$P_1$

Min  $f_1(Y)$

s.t. :

$$g_y(Y) \leq b_y$$

$$g_{y,z}(Y, Z) \leq b_{y,z}$$

$$g_z(Z) \leq b_z$$

$$Y, Z \geq 0, \text{ \& Integer}$$

$P_t$

Min  $f_t(X)$

s.t. :

$$f_1(Y) \leq f_1^* \quad (I)$$

$$g_x(X) \leq b_x$$

$$g_{x,z}(X, Z) \leq b_{x,z} \quad (II)$$

$$g_y(Y) \leq b_y$$

پیچیدگی محاسباتی مدل استوار بیان می‌شود. این نوع بهینه‌سازی در مواردی که مقادیری از پارامترها نسبت به مقادیر دیگری از پارامترها در بازه، برتری احتمالی خاصی ندارند بسیار مناسب است.<sup>[۲۷]</sup> برخلاف بهینه‌سازی تصادفی در بهینه‌سازی استوار هیچ‌گونه توصیف احتمالی از داده‌ها نداریم.

روش‌های بهینه‌سازی استوار متعددی در ادبیات وجود دارد که بسته به نوع مدل ریاضی از آن‌ها استفاده می‌شود. در اینجا از رویکردی<sup>[۲۸،۲۹]</sup> استفاده شده که پیچیدگی مدل استوار را افزایش نمی‌دهد، و در واقع مدل استوار معادل و مدل قطعی از نظر درجه‌ی پیچیدگی معادل هم هستند. این روش در مسائل زنجیره‌ی تأمین<sup>[۳۰،۳۱]</sup> کاربرد موفقیت‌آمیزی داشته است.

$$\min cx + d$$

$$\text{s.t. } Ax \leq b$$

$$c, d, A, b \in U$$

(۲۹)

$c, d, A, b$  در داخل مجموعه‌ی عدم قطعیت  $U$  قرار دارند و  $U$  به صورت یک بازه بسته تعریف می‌شود:

$$u_{Box} = \{ \xi \in R : |\xi_t - \bar{\xi}_t| \leq \xi G_t, \quad t = 1, \dots, n \}$$

به طوری که در آن  $\bar{\xi}_t$  مقدار اسمی  $\xi_t$  به عنوان  $t$  امین پارامتر بردار  $\xi$  است.  $G_t > 0$  مقیاس عدم قطعیت و  $\xi > 0$  سطح عدم قطعیت است. لازم به ذکر است که در اکثر موارد  $G_t = \bar{\xi}_t$  است. چنانچه به جای  $u_{Box}$  نقطه‌ی گوشه این بازه را استفاده کنیم مدل استوار معادل از نظر پیچیدگی حل مثل مدل قطعی خواهد بود.<sup>[۳۰]</sup> به عنوان مثال در محدودیت نامساوی زیر که در آن  $d_i$  غیر قطعی است:

$$a_i x \geq d_i \quad \forall i \in \{1, \dots, nd\},$$

$$\forall d \in u_{Box}^d \mid u_{Box}^d = \{ d \in R : |d_i - d_i| \leq \varepsilon_d G_t^d, t = 1, \dots, nd \}$$

(۳۰)

در این روش محدودیت ۳۰ با محدودیت ۳۱ جایگزین خواهد شد.

$$a_i x \geq \bar{d}_i + \varepsilon_d G_t^d \forall i \in \{1, \dots, nd\}$$

(۳۱)

پارامترهای غیر قطعی مدل ارائه شده عبارت‌اند از: تعداد افراد آسیب‌دیده، میزان تقاضای اقلام حیاتی، مقدار کالای موجود در نقاط تأمین و ظرفیت درمان کل. با توجه به این که این پارامترهای غیرقطعی مدل پیشنهادی، پارامترهای سمت راست محدودیت‌ها هستند، با استفاده از روش بهینه‌سازی استوار مطرح شده مدل غیرقطعی را ارائه می‌کنیم. لازم به ذکر است که برای استفاده از این روش باید محدودیت‌های مساوی به نامساوی تبدیل شود. چنان که اشاره شد محدودیت‌های ۴ و ۵ شامل پارامترهای غیرقطعی باید به شکل کوچک‌تر یا مساوی باشند. محدودیت‌ها شامل پارامتر غیرقطعی به شکل مساوی هستند. محدودیت ۴ را با حذف پارامتر  $surp_{amt}$  به شکل رابطه‌ی ۳۲ بیان می‌کنیم:

$$\sum_{v=1}^V \sum_{l=1}^L \sum_{s=1}^t \sum_{o=1}^O X_{amps}^{lv} - \sum_{v=1}^V \sum_{l=1}^L \sum_{s=1}^t \sum_{o=1}^O X_{aoms}^{lv} \cdot A_{somt}^v$$

$$-dev_{amt} \leq - \sum_{s=1}^t d_{ams} \quad \forall m \in DN, a \in CS, t \in T$$

(۳۲)

$$\sum_{v=1}^V \sum_{s=1}^t \sum_{p=1}^P Y_{hmps}^{mv} \leq \sum_{s=1}^t w_{hms} + \varepsilon \left| \sum_{s=1}^t w_{hms} \right| \quad (43)$$

$\forall m \in DN, h \in IS, t \in T$

$$\sum_{v=1}^V \sum_{o=1}^O \sum_{t=1}^t X_{aoks}^{lv} \cdot A_{sokt}^v - \sum_{v=1}^V \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^t X_{aoks}^{lv} = 0 \quad (44)$$

$\forall k \in KN, a \in CS, l \in PSN, t \in T, k \neq l$

$$\sum_{v=1}^V \sum_{s=1}^t \sum_{o=1}^O Y_{hons}^{mv} \cdot A_{sont}^v + \sum_{v=1}^V \sum_{s=1}^t \sum_{p=1}^P Y_{hnpst}^{mv} = 0 \quad (45)$$

$\forall m \in DN, n \in NN, h \in IS, t \in T, n \neq m$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{o=1}^O \sum_{p=1}^P X_{aoks}^{lv} \leq B_{big} \cdot a_c^v \quad \forall a \in CS, v \in VS, t \in T \quad (46)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{o=1}^O \sum_{p=1}^P Y_{hopt}^{mv} \leq B_{big} \cdot a_w^v \quad \forall h \in IS, v \in VS, t \in T \quad (47)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{a=1}^A C_a \cdot X_{aops}^{lv} \leq Z_{opt}^v \cdot c_c^v \quad \forall o \in N, p \in N, v \in VS, t \in T \quad (48)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{a=1}^A W_a \cdot X_{aops}^{fv} \leq Z_{opt}^v \cdot c_w^v \quad \forall o \in N, p \in N, v \in VS, t \in T \quad (49)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{h=1}^H Y_{hopt}^{mv} \leq Z_{opt}^v \cdot d_v^v \quad \forall o \in N, p \in N, v \in VS, t \in T \quad (50)$$

$$Z_{opt}^v \leq B_{big} \cdot t_{op}^v \quad \forall o \in N, p \in N, v \in VS, t \in T \quad (51)$$

$$\sum_{o=1}^O \sum_{s=1}^t Z_{ops}^v \cdot A_{sopt}^v + \sum_{s=1}^t a v_{ps}^v = a v_{pt}^v + \sum_{o=1}^O \sum_{s=1}^t Z_{pos}^v \quad (52)$$

$\forall p \in N, v \in VS, t \in T$

$$\sum_{g=1}^G \sum_{s=1}^t CTE_{hgs} \leq \rho \left( \sum_{s=1}^t Iwsp_{hs} - \varepsilon \left| \sum_{s=1}^t Iwsp_{hs} \right| \right) \quad (53)$$

$\forall h \in IS, t \in T$

$$\sum_{q=1}^Q \sum_{s=1}^t hsp_{hgs} + \sum_{g=1}^G \sum_{s=1}^t CTE_{hgs} \leq \sum_{s=1}^t Iwsp_{hs} - \varepsilon \left| \sum_{s=1}^t Iwsp_{hs} \right| \quad (54)$$

$\forall h \in IS, t \in T$

$$\rho'' \cdot Ihsph_{qt} \leq hsp_{hqt} \leq \rho' \cdot Ihsph_{qt} \quad \forall q \in HN, h \in IS, t \in T \quad (55)$$

$$\sum_{v=1}^V \sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^t \sum_{q=1}^Q Y_{hoqs}^{mv} \cdot A_{soqt}^v - \sum_{v=1}^V \sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^t \sum_{p=1}^P Y_{hqpst}^{mv} = 0$$

$$g_{y,z}(Y, Z) \leq b_{y,z} \quad (III)$$

$$g_z(Z) \leq b_z \quad (IV)$$

$$X \in R^+$$

$$Y, Z \geq 0 \text{ \& Integer}$$

$$P_r$$

$$\text{Min } f_r(Z)$$

$$\text{s.t. :}$$

$$g_{x,z}(x^*, Z) \leq b_{x,z}$$

$$g_{y,z}(y^*, Z) \leq b_{y,z}$$

$$g_z(Z) \leq b_z$$

$$Z \geq 0, \text{ \& Integer}$$

$$\text{Min } f_1 = \sum_{h=1}^H \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T p_h \cdot dew_{hmt} \quad (33)$$

$$\text{Min } f_r = \sum_{a=1}^A \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T p_a \cdot dew_{hmt} \quad (34)$$

$$\text{Min } f_r = \sum_{v=1}^V \sum_{o=1}^O \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T Z_{opt}^v \quad (35)$$

$$\text{s.t. :}$$

$$\sum_{v=1}^V \sum_{l=1}^L \sum_{s=1}^t \sum_{o=1}^O X_{amps}^{lv} - \sum_{v=1}^V \sum_{l=1}^L \sum_{s=1}^t \sum_{o=1}^O X_{aoms}^{lv} \cdot A_{somt}^v$$

$$+ dev_{amt} \leq - \sum_{s=1}^t d_{ams} - \varepsilon \left| \sum_{s=1}^t d_{ams} \right| \quad (36)$$

$\forall m \in DN, a \in CS, t \in T$

$$\sum_{v=1}^V \sum_{e=1}^E \sum_{s=1}^t \sum_{o=1}^O Y_{hoes}^{mv} \cdot A_{soet}^v - \sum_{v=1}^V \sum_{e=1}^E \sum_{s=1}^t \sum_{p=1}^P Y_{heps}^{mv}$$

$$- dew_{hmt} \leq - \sum_{s=1}^t w_{hms} - \varepsilon \left| \sum_{s=1}^t w_{hms} \right| \quad (37)$$

$\forall m \in DN, h \in IS, t \in T$

$$\sum_{v=1}^V \sum_{s=1}^t \sum_{p=1}^P X_{alps}^{lv} \leq \sum_{s=1}^t \text{sup}_{als} - \varepsilon \left| \sum_{s=1}^t \text{sup}_{als} \right| \quad (38)$$

$a \in CS, l \in PSN, t \in T$

$$\sum_{v=1}^V \sum_{s=1}^t \sum_{p=1}^P \sum_{l=1}^L X_{apjs}^{lv} \cdot A_{spjt}^v - \sum_{v=1}^V \sum_{l=1}^L \sum_{s=1}^t \sum_{o=1}^O X_{ajos}^{lv}$$

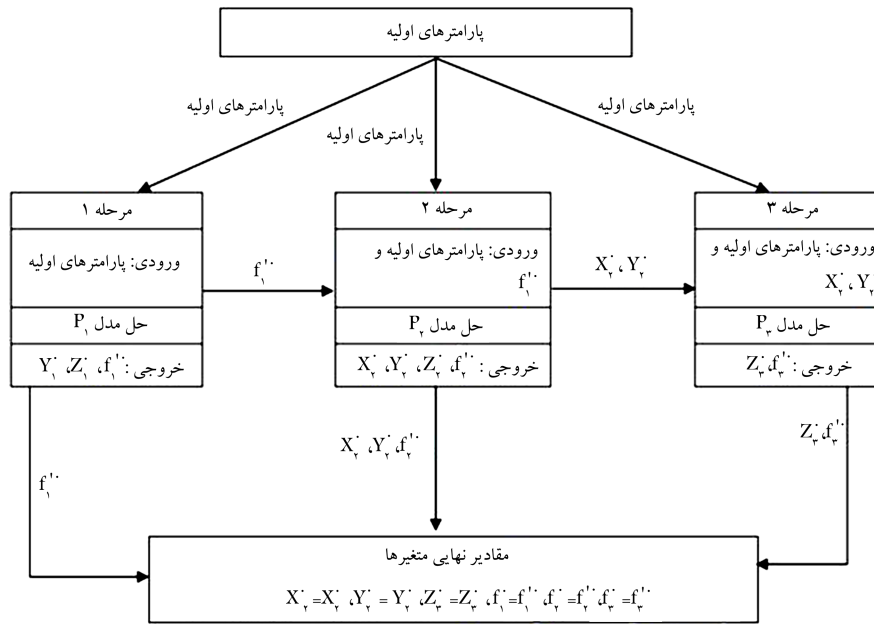
$$\leq \sum_{s=1}^t Ctd_{ajt} \quad a \in CS, j \in TSN, t \in T \quad (39)$$

$$\sum_{j=1}^J u_j = \mu \quad (40)$$

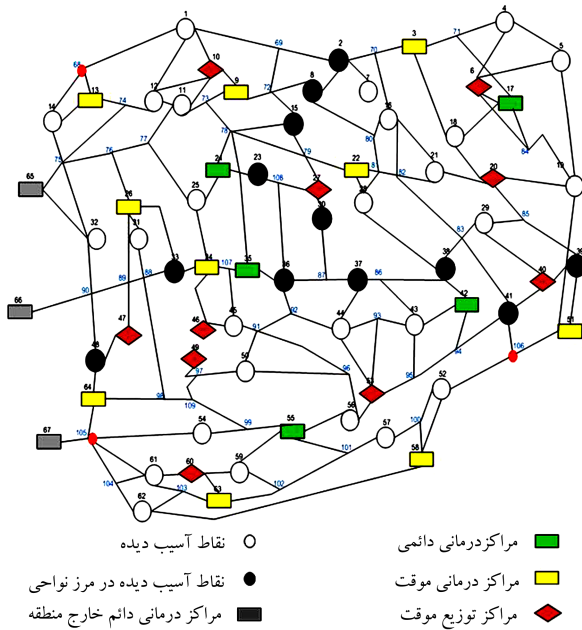
$$X_{ajps}^{lv} \leq B_{big} \cdot u_j \quad \forall j \in TSN \quad (41)$$

$$X_{apjs}^{lv} \leq B_{big} \cdot u_j \quad \forall j \in TSN \quad (42)$$





شکل ۱. روش حل استفاده شده.



شکل ۲. مراکز درمان، توزیع و مسیرهای منطقه ۱۷.

ابتدا شبکه‌ای این منطقه با استفاده از نقشه‌های موجود و با توجه به تراکم جمعیت و سایر اطلاعات، به صورت شکل ۲ تعیین شده است.

افراد مصدوم را در سه دسته در نظر می‌گیریم: دسته‌ی اول افرادی هستند که آسیب‌دیدگی سطحی دارند (H۱)؛ این افراد را می‌توان در مراکز درمان موقت نیز مداوا کرد. دسته‌ی دوم افرادی هستند که آسیب‌دیدگی شدیدتری نسبت به افراد دسته‌ی اول دارند (H۲) و نیاز به درمانگاه یا بیمارستان دارند. دسته‌ی سوم افرادی هستند که اکثراً برای درمان باید به بیمارستان یا درمانگاه مجهز منتقل شوند. در جدول ۱ تعداد نقاط آسیب‌دیده در نواحی مختلف و میانگین تعداد افراد آسیب‌دیده در هرکدام از این گره‌ها ارائه شده است. لازم به ذکر است که تعداد این نقاط با توجه

$$\leq \sum_{s=1}^t hsp_{hqs} \quad \forall q \in HN, h \in IS, t \in T \quad (56)$$

$$\sum_{v=1}^V \sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^t \sum_{g=1}^G Y_{hogs}^{mv} \cdot A_{sog}^v - \sum_{v=1}^V \sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^t \sum_{p=1}^P Y_{hgps}^{mv} \leq \sum_{s=1}^t CTE_{hqs} \quad \forall q \in TEN, h \in IS, t \in T \quad (57)$$

$$Y, Z, dew, avv, TFD, TTD, hsp, CTE \geq 0 \text{ \& Integer} \quad (58)$$

$$X, dev, \geq 0 \quad (59)$$

$$u_j \in \{0, 1\} \quad (60)$$

به طوری که  $f_1^*$  مقدار بهینه‌ی تابع هدف مدل  $P_1$  و  $x_1^*$  و  $y_1^*$  مقادیر بهینه‌ی متغیرهای  $X$  و  $Y$  در مدل  $P_2$  هستند. در مرحله‌ی اول تابع هدف اول بدون در نظر گرفتن سایر توابع هدف و همچنین بدون در نظر گرفتن محدودیت‌های شامل متغیر  $X$  بهینه می‌شود. مقدار بهینه‌ی تابع هدف اول که از مدل  $P_1$  به دست آمده است به عنوان محدودیت در مدل  $P_2$  در نظر گرفته شده و تابع هدف دوم با توجه به متغیرهای  $X$  و  $Y$  بهینه می‌شود. در مدل سوم مقادیر بهینه‌ی به دست آمده برای  $X$  و  $Y$  ثابت نگه داشته شده و مدل سوم با توجه به متغیر  $Z$  بهینه می‌شود. شکل ۱ فرایند حل مدل را با رویکرد سلسله‌مراتبی نشان می‌دهد. مطالعات انجام شده<sup>[۱۲]</sup> نشان می‌دهد که اگر مدل یک جواب بهینه داشته باشد این روش به آن جواب بهینه می‌رسد، در غیر این صورت یکی از جواب‌های بهینه را پیدا می‌کند. شکل ۱ روش حل استفاده شده را نشان می‌دهد.

## ۵. مطالعه‌ی موردی: منطقه‌ی ۱۷ شهر تهران

با استفاده از مدل ارائه شده، لجستیک کالا و مصدومان را در منطقه‌ی ۱۷ شهر تهران با فرض زلزله به بزرگی حدود ۶/۵ ریشتر در شهر تهران مورد بررسی قرار می‌دهیم. لازم به ذکر است که همه‌ی پارامترها با استفاده از نظر کارشناسان تعیین شده است.

جدول ۱. تعداد افراد آسیب‌دیده در دوره‌های زمانی مختلف.

گره	مصدوم			H1				H2				H3			
	تعداد نقاط تقاضا	۲	۴	۶	۱۰	۴	۶	۱۰	۱۷	۱۵	۱۲	۱۰	۷	۴	۱۷
ناحیه ۱	۱۲	۱۳	۲۰	۳۵	۶	۶	۱۰	۱۶	۹	۹	۹	۶	۶	۶	۷
ناحیه ۲	۱۴	۱۱	۱۷	۳۷	۹	۷	۱۱	۱۹	۱۱	۱۱	۱۱	۵	۸	۳	۵
ناحیه ۳	۱۳	۱۴	۲۱	۳۱	۷	۸	۱۱	۱۷	۸	۸	۱۰	۶	۶	۳	۸

جدول ۲. میزان تقاضای کالاها در دوره‌های زمانی مختلف.

گره	نوع کالا			A1				A2				A3		
	تعداد نقاط تقاضا	۶	۸	۱۱	۱۳	۱۷	۳	۷	۱۰	۱۶	۶	۱۱	۱۵	
ناحیه ۱	۱۲	۵۵	۷۰	۷۵	۹۱	۲۴	۷	۵	۷	۸	۳۱	۲۵	۱۶	
ناحیه ۲	۱۴	۷۱	۷۵	۸۰	۹۵	۳۳	۸	۶	۷	۹	۳۹	۳۱	۱۶	
ناحیه ۳	۱۳	۶۷	۷۲	۷۵	۹۳	۳۶	۸	۵	۷	۸	۳۲	۲۸	۱۴	

جدول ۳. میزان موجودی در مراکز تأمین.

گره	زمان			A1				A2				A3		
	۲	۸	۱۲	۳	۷	۱۰	۱۳	۳	۷	۱۰	۱۳	۳	۱۱	۱۵
T1	۳۲۰۰	۲۳۰۰	۲۳۰۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T2	۱۵۰۰	۱۶۰۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۲۵۰۰	۱۳۰۰	۱۱۰۰
T4	-	-	-	۴۵۰	۶۵۰	۵۰۰	۳۵۰	-	-	-	-	-	-	-
T5	۲۰۰۰	۱۷۰۰	۱۸۰۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

جدول ۴. مقادیر تابع هدف.

جمع	$dew_{rmt}$	$dew_{rmt}$	$dew_{1mt}$
۲۵۴٫۷	۷۱٫۱	۸۷٫۲	۹۶٫۴
جمع	$dev_{rmt}$	$dev_{rmt}$	$dev_{1mt}$
۵۲۴٫۸	۹۲٫۶	۴۰٫۴	۳۹۱٫۸
۱۳۲۴			

همین مسئله اتفاق افتاده است. در واقع آب با توجه به ضریب اهمیت بالا کم‌ترین مقدار زمان انتظار را برای برآورده شدن تقاضا دارد. چادر علاوه بر ضریب اهمیت کم، حجم زیادی نیز دارد یعنی به تعداد وسیله‌ی نقلیه‌ی بیشتری برای انتقال آن به نقاط آسیب‌دیده نیاز است.

در انتقال افراد آسیب‌دیده به بیمارستان‌ها و مراکز درمانی مهم‌ترین کمان، کمان ۲۴-۷۸ است. حدود ۱۳٪ از افراد آسیب‌دیده نوع دوم و سوم از این کمان عبور می‌کنند. دومین کمان از نظر اهمیت تردد، کمان ۳۵-۷۸ است که حدود ۱۱٪ افراد آسیب‌دیده نوع دوم و سوم از این مسیر عبور می‌کنند. با توجه به این که گره ۳۵ (بیمارستان ضیاتیان) بیشترین ظرفیت را برای درمان افراد آسیب‌دیده نوع دوم و سوم دارد این امر منطقی به نظر می‌رسد. در این دو کمان انتقال افراد آسیب‌دیده با آمبولانس و اتوبوس آمبولانس صورت گرفته است.

به وسعت و تراکم جمعیت نواحی و تعداد مصدومان تعیین شده است.

غذا (A1)، آب (A2) و چادرهای اسکان (A3) را به‌عنوان کالاهای حیاتی در نظر می‌گیریم که پس از زلزله باید بین افراد توزیع شود. مقدار آب و غذا برای هر نفر طبق استانداردهای موجود<sup>[۲۱]</sup> در نظر گرفته شده است. در جدول ۲ میزان تقاضا و در جدول ۳ میزان موجودی مراکز تأمین ارائه شده است.

برای تمامی پارامترهای غیر قطعی مقدار مقیاس عدم قطعیت برابر مقدار اسمی پارامترها در نظر گرفته شده است. سطح عدم قطعیت را برای تعداد افراد آسیب‌دیده و تقاضای کالاها برابر با ۷٪ و برای ظرفیت درمانی و نقاط تأمین کالاها ۴٪ در نظر می‌گیریم.  $\rho'$  و  $\rho''$  را نیز برابر ۱/۱۵ و ۸۵٪ قرار داده‌ایم.  $\rho$  را نیز برابر با ۳۵٪ در نظر گرفته‌ایم.

مدل ارائه شده را با توجه به پارامترهای موجود و روش حل ارائه شده با استفاده از نرم افزار GAMS در یک رایانه‌ی شخصی با پردازش‌گر ۲/۶ گیگاهرتز و ۴ گیگابایت RAM در محیط ویندوز حل کرده‌ایم. با استفاده از راه حل ارائه شده جواب بهینه برای مدل در زمان حدود ۲۷۶۰ ثانیه به دست آمد.

مقدار تابع هدف اول و دوم به تفکیک در جدول ۴ آمده است. بررسی این جدول نشان می‌دهد که افراد آسیب‌دیده‌ی نوع اول بیشترین زمان انتظار را برای درمان دارند، که این امر می‌تواند ناشی از ضریب اهمیت پایین این دسته افراد نسبت به مصدومان نوع دوم و سوم باشد. درمورد تابع هدف دوم نیز برای آب و غذا و چادر

جدول ۵. مقادیر تابع هدف به ازای سطوح مختلف عدم قطعیت.

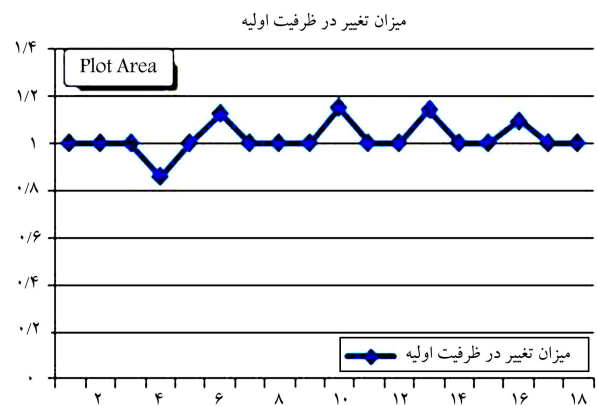
میزان عدم قطعیت	$dew_{1mt}$	$dew_{2mt}$	$dew_{3mt}$	جمع
میزان عدم قطعیت	تابع هدف اول	۷۸٫۶	۷۲٫۱	۵۹٫۸۵
	تابع هدف دوم	۳۵۶٫۷	۳۲٫۴	۷۳٫۵
	تابع هدف سوم	۱۲۷۲		
جمع				۲۱۰٫۵۵
میزان عدم قطعیت	تابع هدف اول	۱۱۸٫۲	۱۰۲٫۴	۸۵٫۲
	تابع هدف دوم	۴۸۹	۵۲٫۴	۱۲۰٫۸
	تابع هدف سوم	۱۳۸۰		
جمع				۳۰۵٫۸
میزان عدم قطعیت	تابع هدف اول	۱۳۶٫۵	۱۱۹٫۵	۱۰۳٫۳
	تابع هدف دوم	۶۱۱٫۸	۶۴٫۳	۱۵۹٫۳
	تابع هدف سوم	۱۴۰۶		
جمع				۳۵۹٫۳
میزان عدم قطعیت	تابع هدف اول	۱۵۲٫۱	۱۳۹٫۲	۱۲۸٫۴
	تابع هدف دوم	۷۸۶٫۶	۷۸٫۸	۲۱۰٫۴
	تابع هدف سوم	۱۴۱۹		
جمع				۴۱۹٫۵

بررسی شکل ۳ نشان می‌دهد که در دوره‌های زمانی ابتدایی به دلیل این که هنوز تقاضای زیادی برای درمان افراد آسیب‌دیده نوع دوم و سوم وجود ندارد، ظرفیت درمانی را برای درمان مصدوم نوع اول افزایش یافته است. در دوره‌های زمانی بالاتر مخصوصاً در مورد دو گره ۲۴ و ۳۵ ظرفیت درمانی تقریباً به بالاترین سطح ممکن برای درمان افراد آسیب‌دیده نوع دوم و سوم می‌رسد. در واقع این گره‌ها از حداکثر

ظرفیت خود با توجه به پارامتر  $\rho'$  برای درمان افراد آسیب‌دیده نوع دوم و سوم استفاده می‌کنند. تعداد مراکز توزیع موقت مجاز برای احداث را برابر ۳ تعیین کرده بودیم. این نقاط در گره‌های ۱۰، ۲۰ و ۵۳ احداث شده‌اند. یکی دیگر از پارامترهای مهم مقدار عدم قطعیت و حساسیت مدل نسبت به پارامترهای غیرقطعی است. جدول زیر مقادیر تابع هدف را به ازای سطوح مختلف عدم قطعیت نشان می‌دهد. در این جدول میزان عدم قطعیت بیان شده، میزان عدم قطعیت برای تقاضا و تعداد افراد آسیب‌دیده است و سطح عدم قطعیت برای ظرفیت درمانی و مقدار کالاها در مراکز تأمین نصف این مقدار در نظر گرفته شده است.

بررسی مقادیر جدول ۵ نشان می‌دهد که با افزایش میزان عدم قطعیت مقادیر توابع هدف نیز بدتر می‌شود. چنان که مشخص است تا جایی که ممکن است با افزایش سطح عدم قطعیت و افزایش تعداد افراد آسیب‌دیده ظرفیت درمانی منطقه صرف درمان افراد آسیب‌دیده نوع دوم و سوم شده و به این ترتیب تعداد افراد سرویس داده نشده‌ی نوع اول افزایش می‌یابد. اما با افزایش سطح عدم قطعیت به حدود ۲۰٪ به نظر می‌رسد با عدم سرویس افراد آسیب‌دیده نوع اول، نمی‌توان افراد آسیب‌دیده نوع دوم و سوم سرویس داده نشده را کاهش داد. در مورد کالاها نیز اتفاق مشابهی برای چادر می‌افتد. با توجه به ضریب اهمیت پایین چادر و حجم بالای آن، تقاضای برآورده نشده آن بیشتر از سایر کالاهاست.

میزان تغییر در ظرفیت اولیه



شکل ۳. مقدار تغییر در ظرفیت درمان مصدومان نوع دوم در گره ۳۵.

## ۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدل چندهدفه تصادفی برای لجستیک همزمان کالا و مصدومان در واکنش به زلزله ارائه شد. در این مدل برای تسهیل لجستیک کالاها مراکز توزیع موقت برای توزیع کالاها در نظر گرفته شد. مکان‌یابی این مراکز نیز در مدل مورد بررسی قرار گرفت. در سیستم بررسی شده کالاها می‌توانند از مراکز توزیع اصلی مستقیماً به مراکز تقاضا ارسال شوند و یا ابتدا به مراکز توزیع منتقل شده و سپس به نقاط آسیب دیده تحویل داده شوند. برای مداوای افراد آسیب‌دیده نیز علاوه بر مراکز درمان اصلی مراکز درمان موقت نیز در نظر گرفته شده است. وجود مراکز درمان موقت که پس از زلزله در مراکز از پیش تعیین شده‌ی احداث می‌شوند، سبب تسریع لجستیک افراد آسیب‌دیده و در

نتیجه درمان آن‌ها می‌شود. علاوه بر این در مدل ارائه شده ظرفیت بهینه بیمارستان‌ها و مراکز درمانی نیز تعیین می‌شود. با توجه به ماهیت مسئله تعدادی از پارامترها نیز غیرقطعی در نظر گرفته شده است که برای برخورد با این پارامترهای غیرقطعی از رویکرد بهینه‌سازی استوار استفاده شده است. با استفاده از مدل ارائه شده برنامه‌ریزی لجستیک برای واکنش به زلزله فرضی، منطقه ۱۷ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه موردی نشان می‌دهد که متغیر در نظر گرفتن ظرفیت مراکز درمانی سبب تسریع و برنامه‌ریزی مناسب برای درمان افراد آسیب‌دیده می‌شود. به این ترتیب که ظرفیت درمانی در دوره‌های مختلف زمانی با توجه به نوع مصدومان موجود تعیین می‌شود. همچنین با استفاده از این مدل توانستیم از شرایط بحرانی مختلف با توجه به شدت زلزله ارزیابی انجام داده و توان درمانی، امدادی و لجستیک منطقه را مورد بررسی قرار دهیم.

## پانوشته‌ها

1. memetic algorithm
2. vehicle routing problem
3. soft time window
4. Federal Emergency Management Agency
5. ant colony algorithm
6. multilevel clustering
7. sample average approximation
8. data fusion

## منابع (References)

7. Knott, R.P. "Vehicle scheduling for emergency relief management: A knowledge-based approach", *Disasters*, **12**(4), pp. 285-293 (1988).
8. Özdamar, L., Ekinçi, E. and Küçükyazıcı, B. "Emergency logistics planning in natural disasters", *Annals of Operations Research*, **129**(1-4), pp. 217-245 (2004).
9. Tzeng, G.H., Cheng, H.J. and Huang, T.D. "Multi-objective optimal planning for designing relief delivery systems", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **43**(6), pp. 673-686 (2007).
10. Nolz, P.C. Semet, F. and Doerner, K.F. "Risk approaches for delivering disaster relief supplies", *Or Spectrum*, **33**(3), pp. 543-569 (2011).
11. Lin, Y.H., Batta, R., Rogerson, P.A., Blatt, A. and Flanigan, M. "A logistics model for emergency supply of critical items in the aftermath of a disaster", *Socio-Economic Planning Sciences*, **45**(4), pp. 132-145 (2011).
12. Afshar, A. and Haghani, A. "Modeling integrated supply chain logistics in real-time large-scale disaster relief operations", *Socio-Economic Planning Sciences*, **46**(4), pp. 327-338 (2012).
13. Zhang, J.H., Li, J. and Liu, Z.P. "Multiple-resource and multiple-depot emergency response problem considering secondary disasters", *Expert Systems with Applications*, **39**(12), pp. 11066-11071 (2012).
14. Yi, W. and Ozdamar, L. "A dynamic logistics coordination model for evacuation and support in disaster response activities", *European Journal of Operational Research*, **179**(3), pp. 1177-1193 (2007).
15. Yi, W. and Kumar, A. "Ant colony optimization for disaster relief, operations", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **43**(6), pp. 660-672 (2007).
16. Ozdamar, L. "Planning helicopter logistics in disaster relief", *OR Spectrum*, **33**, pp. 655-672 (2011).
17. Özdamar, L. and Demir, O. "A hierarchical clustering and routing procedure for large scale disaster relief lo-
1. Aakil, M., Nie, X. and Pokhare, S. "Optimization models in emergency logistics: A literature review", *Socio-Economic Planning Sciences*, **46**, pp. 4-13 (2012).
2. Najafi, M., Eshghi, K. and Dullaert, W. "A multi-objective robust optimization model for logistics planning in the earthquake response phase", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **49**(1), pp. 217-249 (2013).
3. Najafi, M., Eshghi, K. and de Leeuw, S. "A dynamic dispatching and routing model to plan/re-plan logistics activities in response to an earthquake", *OR Spectrum*, **36**(2), pp. 323-356 (2014).
4. Altay, N. and Green III, W. G. "OR/MS research in disaster operations management", *European Journal of Operational Research*, **175**(1), pp. 475-493 (2006).
5. Caunhye, A.M., Nie, X. and Pokharel, S. "Optimization models in emergency logistics: A literature review", *Socio-Economic Planning Sciences*, **46**(1), pp. 4-13 (2012).
6. Galindo, G. and Batta, R. "Review of recent developments in OR/MS research in disaster operations management", *European Journal of Operational Research*, **230**, pp. 201-211 (2013).

- gistics planning”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **48**(3), pp. 591-602 (2012).
18. Barbarosoglu, G. and Arda, Y. “A two-stage stochastic programming framework for transportation planning in disaster response”, *Journal of the Operational Research Society*, **55**(1), pp. 43-53 (2004).
  19. Yi, W. and Ozdamar, L. “A dynamic logistics coordination model for evacuation and support in disaster response activities”, *European Journal of Operational Research*, **179**(3), pp. 1177-1193 (2007).
  20. Yi, W. and Kumar, A. “Ant colony optimization for disaster relief operations”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **43**(6), pp. 660-672 (2007).
  21. Chang, M.S., Tseng, Y.L. and Chen, J.W. “A scenario planning approach for the flood emergency logistics preparation problem under uncertainty”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **43**(6), pp. 737-754 (2007).
  22. Bozorgi-Amiri, A., Jabalameli, M.S. and Al-e-Hashem, S.M. “A multi-objective robust stochastic programming model for disaster relief logistics under uncertainty”, *OR Spectrum*, **35**(4), pp. 905-933 (2013).
  23. Adivar, B. and Mert, A. “International disaster relief planning with fuzzy credibility”, *Fuzzy Optimization and Decision Making*, **9**(4), pp. 413-433 (2010).
  24. Sheu, J.B. “Dynamic relief-demand management for emergency logistics operations under large-scale disasters”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **46**(1), pp. 1-17 (2010).
  25. Sheu, J.B. “Dynamic relief-demand management for emergency logistics operations under large-scale disasters”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **46**(1), pp. 1-17 (2010).
  26. Lin, Y.H., Batta, R., Rogerson, P.A., Blatt, A. and Flanigan, M. “A logistics model for emergency supply of critical items in the aftermath of a disaster”, *Socio-Economic Planning Sciences*, **45**(4), pp. 132-145 (2011).
  27. Nemirovski, A. “Robust convex optimization, math”, *Oper. Res.*, **23**(4), pp. 769-805 (1998).
  28. Ben-Tal, A. and Nemirovski, A. “Robust solutions of uncertain linear programs”, *Operations Research Letters*, **25**(1), pp. 1-13 (1999).
  29. Nemirovski, A. “Robust convex optimization”, *Math. Oper. Res.*, **23**(4), pp. 769-805 (1998).
  30. Pishvaei, M.S., Rabbani, M. and Torabi, S.A. “A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty”, *Applied Mathematical Modelling*, **35**(2), pp. 637-649 (2011).
  31. Marler, R.T. and Arora, J.S. “Review of multi-objective optimization concepts and algorithms for engineering”, University of Iowa Optimal Design Laboratory, Technical Report Number ODL-01.03, Iowa, USA (2003).
  32. The Sphere Project, *The Sphere Project: Humanitarian Charter and Minimum Standards in Disaster Response*, 3rd ed. Geneva, Switzerland: The Sphere Project (2004).