



HUMANITARIAN RELIEF SUPPLY CHAIN NETWORK DESIGN USING INTERVAL ROBUST OPTIMIZATION

Armin Jabbarzadeh* & Shiva Zokaee

Armin Jabbarzadeh, Department of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology

Shiva Zokaee, Department of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology

Keywords

Humanitarian relief supply chain, Robust Optimization, Uncertainty, Interval Data, Earthquake

ABSTRACT

This paper presents a humanitarian relief supply chain network design model including suppliers, relief distribution centers, and affected areas. To capture uncertain natures of demand, supply and cost components, an interval robust optimization is utilized. The proposed model is capable of determining the location and allocation decisions, while minimizing the total supply chain cost. The application of the model is examined using a case study of humanitarian relief supply chain design in Iran to cope with earthquakes.

© 2015 IUST Publication, IJIEPM. Vol. 26, No. 4, All Rights Reserved



طراحی شبکه زنجیره تأمین امداد رسانی با استفاده از رویکرد بهینه سازی استوار داده‌های بازهای

آرمین جبارزاده* و شیوا ذکائی

چکیده:

این مقاله به ارائه یک مدل طراحی شبکه زنجیره تأمین امداد رسانی سه سطحی شامل تأمین‌کنندگان، مراکز توزیع امداد و نقاط آسیب‌دیده (نقاط تقاضا) در شرایط عدم قطعیت پرداخته است. جهت لحاظ نمودن عدم قطعیت موجود در پارامترهای تقاضا، تأمین و مولفه‌های هزینه‌های مسئله، از رویکرد بهینه سازی استوار داده‌های بازهای استفاده شده است. مدل استوار ارائه شده قادر است تا با هدف کمینه نمودن مجموع هزینه های زنجیره تأمین، به صورت همزمان تصمیمات بهینه مکان یابی و تخصیص محصولات امدادی در زنجیره تأمین را تعیین نماید. در نهایت، کارایی مدل استوار با رویکرد عدم قطعیت استوار سناریویی بازهای مقایسه شده است. همچنین با بهره‌گیری از داده‌های حاصل از مطالعه موردی وقوع زلزله در مناطق زلزله‌خیز شمال و جنوب البرز مرکزی، مدل ارائه شده مورد آزمون قرار گرفته و کاربرد پذیری آن در شرایط واقعی نشان داده شده است.

کلمات کلیدی

زنجیره تأمین انسان‌دوستانه^۱،
عدم قطعیت^۲،
بهینه‌سازی استوار^۳،
داده‌های بازهای^۴،
زلزله

۱. مقدمه

حوادث و بلایای طبیعی مانند زلزله، سیل، گردباد، سونامی، فوران آتش‌فشان و بیماری‌های فراگیر همواره جان انسان‌ها را تهدید می‌کنند و منجر به هزینه‌های گزاف و جبران ناپذیر می‌شوند. طبق گزارش منتشر شده توسط سازمان هلال احمر و صلیب سرخ در سال ۲۰۰۹، وقوع ۷۰۰۰ حادثه طبیعی (بدون در نظر گرفتن جنگ‌ها، بیماری‌های همه‌گیر و خشکسالی) بین سالهای ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۸، جان بیش از یک میلیون انسان را در سراسر جهان گرفته است و موجب خسارت مالی بیش از یک تریلیون دلار شده است [۱]. بنا به آمارانجمن ملی مدیریت و کاهش خطر بلایا در فلیپین، طوفان هولناک اخیر در فلیپین (آبان ۱۳۹۲) منجر به کشته شدن ۵۲۳۵ نفر، مجروح شدن ۲۳۵۰۱ نفر و همچنین مفقود شدن ۱۶۱۳ نفر شده است^۵. اگرچه بروز بلایای طبیعی غیر قابل اجتناب است، با طراحی مناسب

زنجیره‌های تأمین امداد رسانی، می‌توان امکان تأمین و توزیع به موقع منابع و کالاهای امدادی را فراهم نمود و اثرات مخرب آن‌ها را به صورت قابل توجهی کاهش داد [۲]. به چنین زنجیره‌های تأمینی که پس از وقوع بلایا و حوادث به افراد آسیب‌دیده خدمات اضطراری و امدادرسانی ارائه می‌دهند، زنجیره‌های تأمین انسان دوستانه اطلاق می‌گردد. این زنجیره‌های تأمین عموماً در مدت زمان کوتاهی پس از وقوع حوادث توسط نهادهای دولتی یا غیر دولتی ایجاد می‌شوند [۳]. با توجه به حساسیت موضوع، مدل‌های طراحی زنجیره تأمین انسان دوستانه از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار هستند. این مدل‌ها عموماً با استفاده از رویکردهای بهینه‌سازی به مکان‌یابی تسهیلات امدادرسانی، تعیین میزان تخصیص کالای امدادی، کنترل موجودی اقلام امدادی و مسیریابی وسایل نقلیه می‌پردازند [۲].

مقالات [۴-۸] مدل‌های طراحی زنجیره تأمین انسان دوستانه موجود در ادبیات را به صورت جامع مرور می‌نمایند و نشان می‌دهند که توسعه هر چه بیشتر مدل‌های بهینه‌سازی در شرایط عدم قطعیت ضروری است. بررسی نتایج این مقالات مروری همچنین گویای این مطلب است که اغلب مدل‌های غیر قطعی موجود در ادبیات با فرض معلوم بودن توزیع احتمالی پارامترهای غیر قطعی، از رویکرد بهینه‌سازی تصادفی^۶ دو مرحله‌ای استفاده

تاریخ وصول: ۹۲/۰۹/۱۶

تاریخ تصویب: ۹۲/۱۲/۰۷

شیوا ذکائی، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران،
shivazokae@ind.iust.ac.ir

*نویسنده مسئول مقاله: دکتر آرمین جبارزاده، دانشکده مهندسی صنایع،
دانشگاه علم و صنعت ایران، arminj@iust.ac.ir

ستونی، این رویکرد استوار را برای ضرائب تکنولوژیکی غیر قطعی یک مسئله برنامه‌ریزی خطی مطرح نمود. در رویکرد توسعه داده شده توسط سویستر [۱۴]، هر ستون از ضرائب تکنولوژیکی مجموعه محدبی را ایجاد می‌کند و در نهایت مقادیر هر مجموعه محدب با کوچکترین کران بالای^{۱۵} اعداد ستونی که به آن متعلق‌اند جایگزین می‌شوند. در نتیجه محافظه‌کارانه‌ترین^{۱۶} یا بدترین^{۱۷} نتایج ممکن بدست خواهند آمد. با توجه به این که در بسیاری از کاربردهای واقعی، استفاده از رویکرد بسیار محافظه‌کارانه چندان مطلوب نمی‌باشد، رویکردهای استوار با سطح محافظه‌کاری کمتر در ادبیات مورد توسعه قرار گرفتند که از آن جمله می‌توان به رویکرد استوار با داده‌های بازه‌ای بنتال و نمیرفسکی [۱۵] اشاره کرد.

در این رویکرد استوار، برنامه‌ریزی خطی تحت مجموعه‌های عدم قطعیت جعبه‌ای و بیضوی^{۱۸} فرمول‌بندی می‌شود. ایشان در استفاده از مجموعه عدم قطعیت بیضوی، پارامتری برای تنظیم عدم قطعیت تعریف نمودند که موجب می‌شود تا پارامترهای غیرقطعی همزمان بدترین مقدارشان را به خود نگیرند. اما زمانی که از مجموعه عدم قطعیت بیضوی استفاده می‌شود پیچیدگی مدل افزایش می‌یابد و مدل برنامه‌ریزی خطی به مدل برنامه‌ریزی مخروطی درجه دوم^{۱۹} تبدیل می‌شود. بارون و میلنر [۱۶] از رویکرد توسعه داده شده توسط بنتال و نمیرفسکی [۱۵] برای مواجهه با عدم قطعیت پارامتر تقاضا در یک مسئله چند دوره‌ای مکان‌یابی تسهیلات استفاده کردند و ادعا کردند که مدل ایشان قابل استفاده در شرایط وقوع بلایا نیز می‌باشد. با در نظر گرفتن مجموعه عدم قطعیت بیضوی، مدل مختلط خطی^{۲۰} قطعی ایشان تبدیل به برنامه‌ریزی مختلط مخروطی^{۲۱} شد که از نظر حل نسبت به مدل خطی مشکل تر است.

جهت دسترسی به جواب‌هایی با سطح محافظه‌کاری کمتر، همچنین، بنتال و نمیرفسکی [۱۷] رویکرد همزاد استوار قابل تنظیم^{۲۲} را مطرح کردند که به پارامتر غیرقطعی اجازه می‌دهد تا بخشی از مقدارش با تحقق پارامتر در طول زمان تعیین شود. این رویکرد برای مواجهه با عدم قطعیت در مسائل برنامه‌ریزی چند دوره‌ای و پویا کاربرد دارد و برای حل آن از برنامه‌ریزی پویا و رویکرد همزاد استوار قابل تنظیم آفین^{۲۳} استفاده می‌شود. رویکرد بنتال و نمیرفسکی [۱۷] دارای این محدودیت است که از نظر محاسباتی بسیار پیچیده^{۲۴} می‌باشد. در ادبیات زنجیره‌های تأمین انسان‌دوستانه، تنگ و همکاران [۱۸] و همچنین بنتال و نمیرفسکی [۳] این رویکرد را به ترتیب برای یک زنجیره تأمین اضطراری و مدل تخصیص ترافیک پویای بهینه^{۲۵} به کار برده‌اند.

رویکرد استوار دیگری که برای داده‌های بازه‌ای توسعه داده شده است، توسط برتسیماس و سیم [۱۹] و با در نظر گرفتن مجموعه عدم قطعیت چندوجهی ارائه شد. این رویکرد محافظه‌کاری روش استوار سویستر [۱۴] و همچنین مشکل محاسباتی رویکرد بنتال و

می‌نمایند و روش‌های بهینه‌سازی استوار^۷ کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. حال آن که در دنیای واقعی، در بسیاری از موارد توزیع احتمالی پارامترهای غیر قطعی مشخص نیستند و استفاده از رویکردهای بهینه‌سازی استوار ضروری به نظر می‌رسد. به علاوه در صورت وجود داده‌های کافی برای تخمین توزیع پارامتر غیرقطعی درجه پیچیدگی مدل‌سازی افزایش می‌یابد و اغلب برای حل مدل‌بندی‌های احتمالی باید به روش‌های فراابتکاری یا ابتکاری روی آورد. شهنقی و قضاوتی [۹] به توسعه یک مدل پوشش جزئی^۸ مکان‌یابی و تخصیص در حالت عدم قطعیت با استفاده از برنامه‌ریزی احتمالی پرداختند که در آن زمان سفر بین مراکز توزیع و مشتریان از توزیع نرمال پیروی می‌کند و به دلیل غیرخطی شدن مدل غیرقطعی از ترکیب شبیه‌سازی و روش فراابتکاری الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله مزبور استفاده نمودند. بابازاده و همکاران [۱۰] نیز به ارائه یک مدل لجستیک معکوس با در نظر گرفتن معیار ارزش در معرض خطر^۹ برای کنترل سطح خطر^{۱۰} پرداختند و به دلیل بالا رفتن پیچیدگی مدل، مثالهایی عددی در ابعاد کوچک را برای آزمون مدل بکار بردند. به همین ترتیب، بشیری و رضایی [۱۱] مدلی برای مکان‌یابی مجدد انبارها در طراحی زنجیره تأمین با در نظر گرفتن برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای^{۱۱} جهت مواجهه با عدم قطعیت پارامترهای هزینه‌ای، ظرفیت انبارها و تقاضا پیشنهاد دادند و به دلیل بالا رفتن پیچیدگی مدل غیرقطعی بدست آمده از ترکیب روش‌های حل تقریب میانگین نمونه^{۱۲} و تفکیک بندرز^{۱۳} استفاده نمودند.

همچنین قابل ذکر است که مدل‌های استوار موجود در ادبیات طراحی زنجیره تأمین انسان دوستانه، عموماً بر اساس روش استوار سناریویی^{۱۴} توسعه یافته‌اند و از آن جا که این رویکرد خود توسعه‌ای بر بهینه‌سازی تصادفی است [۲]، عملکرد آن به شدت تحت تأثیر تشخیص صحیح توزیع احتمالی داده‌های مورد استفاده قرار دارد [۴]، ۵، ۶، ۷ و ۸. به عبارت دیگر، با تغییرات جزئی در مقادیر سناریوها و یا احتمالات متناظر آن‌ها در مسئله، مقادیر بهینه بدست آمده از رویکرد استوار سناریویی به شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرند. نقد دیگری که بر مدل‌های استوار سناریویی وارد است آن است که در صورت افزایش تعداد سناریوها در مسئله، محاسبه جواب‌های بهینه مدل دشوار خواهد شد و سبب می‌شود تا جهت حل مدل ناگزیر از روش‌های تجزیه [۱۲] و غیر دقیق ابتکاری و فراابتکاری استفاده شود [۱۳]. در نتیجه در این مقاله با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار داده‌های بازه‌ای که به کمترین اطلاعات در مورد پارامترهای غیرقطعی نیاز دارد، به مواجهه با عدم قطعیت در زنجیره تأمین انسان دوستانه سه سطحی پرداخته می‌شود. در ادامه مدل‌های استوار مرتبط به صورت خلاصه مرور می‌شوند.

برنامه‌ریزی ریاضی استوار با استفاده از داده‌های بازه‌ای، برای اولین بار توسط سویستر [۱۴] ارائه شد. وی با تعریف عدم قطعیت بصورت

این مقاله از چندین نظر نسبت به تحقیقات موجود در ادبیات طراحی زنجیره تأمین انسان دوستانه متفاوت و دارای نوآوری است. اول آن که برخلاف اکثر مقالات موجود در ادبیات، مدل ارائه شده در این مقاله قادر است تا عدم قطعیت موجود در تقاضا، تأمین و هزینه‌ها را به صورت همزمان لحاظ نماید. همچنین، مدل حاضر با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار مبتنی بر داده‌های بازه‌ای می‌تواند بدون الزام به دانستن توزیع احتمالی پارامترهای غیر قطعی به طراحی شبکه زنجیره تأمین امداد رسانی بپردازد. این امر سبب گردیده است که مدل ریاضی از نظر محاسباتی پیچیدگی کمتری داشته باشد و در زمان کوتاه قابل حل باشد. مدل ارائه شده همچنین دارای این قابلیت است که متناسب با سطح محافظه‌کاری (سطح مخاطره‌پذیری) تصمیم‌گیرنده بتواند به تعیین تصمیمات بهینه طراحی شبکه زنجیره تأمین امداد رسانی بپردازد. در نهایت، این تحقیق مدل استوار طراحی زنجیره تأمین امداد رسانی ارائه شده را جهت مقابله با زلزله احتمالی در نواحی البرز به کار می‌گیرد و کاربرد آن را در مواجهه با مسائل واقعی نشان می‌دهد.

این مقاله در ادامه بدین صورت سازمان دهی شده است. در بخش ۲، به تشریح رویکرد استوار داده‌های بازه‌ای پرداخته می‌شود. بخش ۳ شامل تعریف فرضیات و مدل قطعی زنجیره تأمین انسان دوستانه است. فرمول‌بندی استوار مدل قطعی مورد نظر در بخش ۴ ارائه گردیده است. در بخش ۵ نتایج به کارگیری مدل بر اساس داده‌های مطالعه موردی وقوع زلزله در ناحیه البرز ارائه و یافته‌های آن تحلیل شده است. در نهایت، بخش آخر به نتیجه‌گیری و بیان پیشنهادات برای تحقیقات آتی می‌پردازد.

۲. رویکرد بهینه سازی استوار

در این بخش مروری کوتاه بر رویکرد استوار ارائه شده برتسیماس و سیم [۱۹] صورت می‌پذیرد. برنامه‌ریزی خطی زیر را در نظر بگیرید:

$$\begin{aligned} & \text{Min} \sum_{i,j} c_{ij} x_j \\ & \text{S.t.} \sum_j \tilde{a}_{ij} x_j \geq b_i \quad \forall i \\ & x_j \geq 0 \quad \forall j \end{aligned} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، ضرائب تکنولوژیک عدم قطعیت دارند. رویکرد استوار برتسیماس و سیم [۱۹] سطر محور^{۲۷} است به این معنا که هر سطر ماتریس ضرائب تکنولوژیک به مجموعه محدبی متعلق است. همچنین در این رویکرد پارامتر F_i در هر سطر سطح عدم قطعیت را تنظیم می‌کند و اجباری وجود ندارد تا این پارامتر مقادیر صحیح را اختیار کند. در هر محدودیت، F_i در بازه $[0, |J_i|]$ تغییر می‌کند بطوریکه J_i مجموعه ضرائب غیر قطعی را در محدودیت نام تعریف میکند. همچنین $|J_i|$ بیشینه تعداد پارامترهای غیرقطعی است که

نمیرفسکی [۱۵] را ندارد. فرمولبندی استواری که ایشان مطرح کردند سطح محافظه‌کاری مدل را کنترل می‌کند و پیچیدگی برنامه‌ریزی قطعی خطی، مختلط، نیمه معین و درجه دوم مخروطی^{۲۶} را در پی استوار شدن تغییر نمی‌دهد. نجفی و همکاران [۲۰] رویکرد توسعه داده شده توسط برتسیماس و سیم [۱۹] را تعدیل نمودند و برای پارامترهای تقاضا و تأمین در یک مدل چندهدفه، چند کالایی و چند دوره‌ای تصادفی در زمینه لجستیک امدادی استفاده کردند. همچنین ایشان روش حلی بر مبنای توابع هدف سلسله‌مراتبی بکاربردند. اما مدل ایشان با کمبودهایی که متوجه برنامه‌ریزی تصادفی است مواجه می‌شود و صرفاً پارامترهای تقاضا و ظرفیت تأمین بیمارستان‌ها را به صورت استوار مدل می‌کند. همان‌گونه که مرور ادبیات فوق نشان می‌دهد، تحقیقات محدودی در زمینه مدل‌های استوار، به ویژه مدل‌های استوار با داده‌های بازه‌ای، در حوزه زنجیره‌های امدادی و انسان دوستانه صورت پذیرفته شده است. مدل‌های استوار موجود در ادبیات نیز، عموماً از رویکردهایی استفاده نموده‌اند که همراه با پیچیدگی محاسباتی و سطح محافظه‌کاری بالا هستند و یا عملکرد آن‌ها به شدت وابسته به تعریف صحیح سناریوها و معلوم بودن احتمال وقوع آن‌ها می‌باشد. به منظور حداقل رساندن این محدودیت‌ها و با توجه به این که کشور ایران در معرض خطرات ناشی از حوادث و بلایای طبیعی به خصوص زلزله قرار دارد، در این تحقیق به ارائه یک مدل طراحی زنجیره تأمین امداد رسانی بر مبنای رویکرد استوار داده‌های بازه‌ای پرداخته شده است.

زنجیره تأمین امداد رسانی مورد بررسی در این تحقیق چند محصولی است و شامل سه بخش اصلی می‌باشد که عبارتند از: تأمین‌کنندگان، مراکز توزیع امداد و نقاط آسیب دیده (نقاط تقاضا). در این مسئله مراکز توزیع محصولات امدادی را از تأمین‌کنندگان دریافت می‌نمایند و به نقاط آسیب دیده ارسال می‌کنند. مدل ارائه شده به تعیین تصمیمات بهینه مکان یابی مراکز امداد رسانی و تخصیص آن‌ها به نقاط آسیب دیده با هدف کمینه نمودن مجموع هزینه‌ها (شامل هزینه‌های استقرار مراکز توزیع امداد، هزینه‌های حمل‌ونقل کالاها، امدادی در زنجیره سه سطحی و همچنین هزینه‌های جریمه کمبود کالاها، امدادی در نقاط آسیب‌دیده) می‌پردازد. نکته قابل توجه در مسئله آن است که پارامترهای هزینه، تقاضا و تأمین به صورت غیر قطعی هستند. از آنجایی که رویکرد استوار داده‌های بازه‌ای برتسیماس و سیم [۱۹] تنها عدم قطعیت ضرائب تابع هدف را لحاظ می‌کند و پارامترهای غیر قطعی در سمت راست محدودیت‌ها را نادیده می‌گیرد، جهت مقابله با عدم قطعیت پارامترهای تقاضا و تأمین (که در سمت راست محدودیت‌ها ظاهر می‌شوند)، مدل ارائه شده در این تحقیق از رویکرد توسعه یافته بهینه‌سازی استوار داده‌های بازه‌ای تیل [۲۱] استفاده می‌نماید.

در رابطه (۴)، λ_i و μ_{ij} متغیرهای کمکی دوگان هستند. بنا بر رویکرد برتسیماس و سیم [۱۹]، در صورتی که تعداد پارامترهای غیرقطعی که از مقدار اسمی خود منحرف می‌شوند، کمتر از $|J_i|$ باشد، جواب حاصل قطعاً موجه (شدنی) است. اما در صورت تجاوز تعداد پارامترهای غیر قطعی در محدودیت نام از $|J_i|$ ، مسئله با احتمال زیر موجه خواهد بود:

$$P(\sum_j \tilde{a}_{ij} x_j^* > b_i) \leq 1 - \Phi\left(\Gamma_i - 1/\sqrt{|J_i|}\right) \quad (۵)$$

جایی که $\Phi(\theta)$ تابع توزیع تجمعی متغیر تصادفی با توزیع نرمال استاندارد است. رابطه (۵) احتمال انحراف محدودیت نام نامیده می‌شود.

۳. تشریح مدل قطعی طراحی زنجیره انسان دوستانه

زنجیره انسان دوستانه مورد نظر شامل سه بخش اصلی می‌باشد که عبارتند از: تأمین‌کنندگان، مراکز توزیع کالای امدادی و نقاط آسیب‌دیده (نقاط تقاضا). در این تحقیق فرض می‌شود که چند نوع کالای امدادی در مسئله وجود دارند و مراکز توزیع این کالاها را از تأمین‌کنندگان دریافت می‌کنند و به نقاط آسیب دیده ارسال می‌کنند. در سطح اول زنجیره انسان دوستانه مورد بررسی مراکز تأمین کالاهای امدادی هستند که مکان و ظرفیت تأمین هر یک مشخص است. در سطح دوم، مکان‌های بالقوه‌ای برای برپاسازی مراکز توزیع کالاهای امدادی وجود دارند که استقرار موقتی دارند و مانند انبارها در زنجیره تأمین‌های تجاری و تولیدی دائمی نیستند. مدل پیشنهادی در پی انتخاب تعداد و مکان بهینه مراکز توزیع به نحوی است که با کمترین هزینه ممکن بتوان جریان مناسب کالای امدادی را در زنجیره سه سطحی ایجاد نمود. گنجایش هر یک از این مراکز توزیع، محدود و مشخص است. در سطح سوم زنجیره نیز نقاط آسیب هستند که کمبود هر واحد کالای امدادی در این نقاط جریمه به همراه دارد. سایر فرضیات مدنظر در زنجیره تأمین انسان دوستانه مورد بررسی به شرح زیر می‌باشد:

- (۱) تنها نواحی آسیب‌دیده‌ای در نظر گرفته می‌شوند که امکان دسترسی از طریق شبکه حمل‌ونقل جاری میسر باشد.
 - (۲) ناوگان حمل‌ونقل جهت ارسال کالا محدودیت خاصی ندارد.
 - (۳) تقاضای مردم آسیب دیده برای کالای امدادی در هر منطقه آسیب دیده یکسان فرض شده است.
 - (۴) بین مراکز توزیع جریان کالا وجود ندارد.
 - (۵) بین مراکز تأمین و همین‌طور بین مراکز تأمین و نقاط آسیب دیده نیز جریان کالا وجود ندارد.
- پارامترهای مدل زنجیره تأمین سه سطحی عبارتند از:
- e_j : هزینه برپاسازی مرکز توزیع j .

در محدودیت i هستند. اگر مقدار Γ_i صفر باشد، مدل استوار مانند مدل قطعی عمل خواهد کرد و اگر معادل $|J_i|$ باشد، مدل استوار به محافظه‌کاری مدل استوار سویستر [۱۴] عمل خواهد کرد. برتسیماس و سیم [۱۹] ضرائب غیرقطعی \tilde{a}_{ij} ($j \in J_i$) را به عنوان متغیرهای تصادفی محدود و متقارن^{۲۸} در بازه $[a_{ij} - \hat{a}_{ij}, a_{ij} + \hat{a}_{ij}]$ تعریف کردند. بطوریکه a_{ij} نشان‌گر ارزش اسمی پارامتر غیرقطعی و \hat{a}_{ij} نیز نشان دهنده انحراف هر پارامتر غیر قطعی (\tilde{a}_{ij}) است. شکل غیرخطی مدل استوار بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} & \text{Min } c'x \\ & \text{St: } \sum_j a_{ij} x_j - \max_Q \sum_{j \in S_i} \hat{a}_{ij} x_j + (\Gamma_i - \lfloor \Gamma_i \rfloor) \hat{a}_{ii} x_j \geq b_i \quad \forall i \quad (۲) \\ & x \geq 0 \end{aligned}$$

$\Omega = \{S_i \cup \{t_i\} \mid S_i \subseteq J_i, |S_i| = \lfloor \Gamma_i \rfloor, t_i \in J_i \setminus S_i\}$ مجموعه غیرقطعی را تعریف می‌کند. S_i معرف زیرمجموعه‌ای از پارامترهای غیرقطعی است که از مقدار اسمی نهایتاً \hat{a}_{ij} منحرف می‌شوند و t_i معرف عضوی از مجموعه عدم قطعیت است که به اندازه $(\Gamma_i - \lfloor \Gamma_i \rfloor) \hat{a}_{ij}$ از مقدار اسمی منحرف می‌شود. محدودیت نام بوسیله تابع $\beta_i(x^*, \Gamma_i) = \max_Q \{ \sum_{j \in S_i} \hat{a}_{ij} x_j^* + (\Gamma_i - \lfloor \Gamma_i \rfloor) \hat{a}_{ii} x_j^* \}$ در مقابل عدم قطعیت محافظت می‌شود، به طوریکه x^* معرف حل بهینه مسئله است. تابع محافظت فوق را می‌توان با استفاده از برنامه‌ریزی خطی به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\begin{aligned} \beta_i(x^*, \Gamma_i) &= \max \{ \sum_{j \in J_i} \hat{a}_{ij} x_j^* u_{ij} \} \\ \sum_{j \in J_i} u_{ij} &\leq \Gamma_i \\ 0 &\leq u_{ij} \leq 1 \quad \forall j \in J_i \end{aligned} \quad (۳)$$

شکل خطی تابع محافظت برای تمام پارامترهای $\Gamma_i \in [0, |J_i|]$ موجه و محدود است و در نتیجه طبق خاصیت دوگان قوی، دوگان این برنامه خطی نیز موجه و محدود است. همزاد استوار^{۲۹} برنامه خطی با جایگذاری رابطه (۲) بصورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} & \text{Min } \sum_j c_j x_j \\ & \text{St: } \sum_j a_{ij} x_j - \lambda_i \Gamma_i - \sum_{j \in J_i} \mu_{ij} \geq b_i, \quad \forall i \\ & \lambda_i + \mu_{ij} \geq \hat{a}_{ij} x_j \quad \forall i, j \in J_i \\ & \lambda_i \geq 0, \quad \forall i, j \in J_i \\ & \mu_{ij} \geq 0, \quad \forall i, j \in J_i \\ & \lambda_i \geq 0, \quad \forall i. \\ & x_j \geq 0, \quad \forall j \end{aligned} \quad (۴)$$

$$\sum_i x_{mij} = \sum_k y_{mjk} \quad \forall m, j \quad (10)$$

$$\sum_{m,i} v_m x_{mij} \leq V_j w_j \quad \forall j \quad (11)$$

$$x_{mij} \geq 0, y_{mjk} \geq 0, z_j \in \{0,1\}$$

تابع هدف (۶) به دنبال کمینه‌سازی هزینه‌های برپایی مراکز توزیع، هزینه تخصیص کالاها و همچنین هزینه جریمه کمبود کالاها می‌باشد. محدودیت (۷) بیان‌گر محدودیت حداکثر ظرفیت مراکز تأمین امدادی است. محدودیت (۸) رابطه بین تقاضا، میزان جریان محصولات امدادی و مقدار کمبود در نقاط آسیب دیده را نشان می‌دهد. محدودیت (۹) الزام می‌نماید حداقل به میزان ω_{mk} درصد از تقاضای نقاط آسیب داده بایستی تأمین شود. محدودیت (۱۰) الزام می‌کند مجموع جریان‌های محصولات امدادی بین مراکز تأمین و مراکز توزیع با مجموع جریان بین مراکز توزیع با نقاط آسیب مساوی باشد. محدودیت ظرفیت هر مرکز توزیع در رابطه (۱۱) مطرح شده است.

۴. مدل استوار طراحی زنجیره تأمین انسان دوستانه

در این بخش مدل طراحی زنجیره تأمین انسان دوستانه استوار با استفاده از رویکرد استوار تشریح شده در بخش ۲ ارائه خواهد شد. پارامترهای غیرقطعی به قرار $\hat{e}_i, \hat{d}_{mk}, \hat{c}_{ij}, \hat{c}_{jk}$ هستند که به صورت متغیرهای تصادفی متقارن و محدود تعریف می‌شوند. مقادیر اسمی و انحرافات این پارامترهای غیرقطعی به ترتیب معادل $e_i, d_{mk}, c_{ij}, c_{jk}$ و همچنین $\hat{e}_i, \hat{d}_{mk}, \hat{c}_{ij}, \hat{c}_{jk}$ و \hat{c}_{jk} می‌باشند. بدون از دست دادن کلیت، در ادامه فرض می‌کنیم که پارامتر بودجه‌های عدم قطعیت مقادیر صحیح به خود می‌گیرند.

۴-۱. لحاظ کردن عدم قطعیت در تابع هدف

با توجه به رویکرد تشریح شده در بخش ۲، همزاد غیرخطی تابع هدف زنجیره تأمین انسان دوستانه مورد نظر به قرار زیر تعریف می‌شود:

d_{mk} : تقاضای کالای امدادی نوع m در نقطه آسیب‌دیده k .

S_{mi} : مقدار کالای امدادی نوع m در نقطه تأمین i .

C_{ij} : هزینه انتقال هر واحد کالای امدادی از نقطه تأمین i به مرکز توزیع j .

C_{jk} : هزینه انتقال هر واحد کالای امدادی از مرکز توزیع j به نقطه آسیب‌دیده k .

P_{mk} : هزینه کمبود هر واحد کالا از نوع m در نقطه آسیب‌دیده k .

V_m : حجم کالای امدادی نوع m .

V_j : ظرفیت انبارش مرکز توزیع امداد j .

ω_{mk} : حداقل نسبت برآورده شدن تقاضای کالای امدادی نوع m در نقاط آسیب دیده k .

متغیرهای تصمیم مدل زنجیره تأمین امدادی به صورت زیر تعریف می‌شوند:

x_{mij} : مقدار کالای نوع m منتقل شده از نقطه تأمین i به مرکز توزیع امداد j .

y_{mjk} : مقدار کالای نوع m منتقل شده از مرکز توزیع امداد j به ناحیه آسیب‌دیده k .

w_j : اگر مرکز توزیع امداد j فعال شود برابر ۱؛ در غیر این صورت برابر ۰ می‌باشد.

I_{mk} : تعداد تقاضای برآورده نشده از کالای امدادی نوع m در ناحیه آسیب دیده k .

با توجه به فرضیات و پارامترهای تعریف شده مدل زنجیره تأمین انسان دوستانه به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$\text{Min } F = \sum_j e_j w_j + \sum_{m,i,j} c_{ij} x_{mij} + \sum_{m,j,k} c_{jk} y_{mjk} + \sum_{m,k} p_{mk} I_{mk} \quad (6)$$

$$\text{s.t.} : \sum_j x_{mij} \leq S_{mi} \quad \forall m, i \quad (7)$$

$$\sum_k d_{mk} - \sum_{j,k} y_{mjk} \leq \sum_k I_{mk} \quad \forall m \quad (8)$$

$$\sum_j y_{mjk} \geq \omega_{mk} d_{mk} \quad \forall m, k \quad (9)$$

$$\text{Min } \tilde{F} = \sum_j e_j w_j + \sum_{m,i,j} c_{ij} x_{mij} + \sum_{m,j,k} c_{jk} y_{mjk} + \sum_{m,k} p_{mk} I_{mk} + \max_{\Omega^e, \Omega^{C_1}, \Omega^{C_2}} \left\{ \sum_{j \in S^j} \hat{e}_j w_j + \sum_{(i,j) \in S^{C_1}} \hat{c}_{ij} \sum_m x_{mij} + \sum_{(j,k) \in S^{C_2}} \hat{c}_{jk} \sum_m y_{mjk} \right\} \quad (15)$$

$$\Omega^e = \{S^e \mid S^e \subseteq J^e, |S^e| \leq \Gamma^e\}, J^e = \{j \mid \hat{e}_j > 0\} \& \Gamma^e \in [0, |J^e|]$$

$$\Omega^{C_1} = \{S^{C_1} \mid S^{C_1} \subseteq J^{C_1}, |S^{C_1}| \leq \Gamma^{C_1}\}, J^{C_1} = \{(i,j) \mid \hat{c}_{ij} > 0\} \& \Gamma^{C_1} \in [0, |J^{C_1}|]$$

$$\Omega^{C_2} = \{S^{C_2} \mid S^{C_2} \subseteq J^{C_2}, |S^{C_2}| \leq \Gamma^{C_2}\}, J^{C_2} = \{(j,k) \mid \hat{c}_{jk} > 0\} \& \Gamma^{C_2} \in [0, |J^{C_2}|]$$

$$\beta^{C_1}(x_{mij}^*, \Gamma^{C_1}) = \max_{\Omega^{C_1}} \sum_{(i,j) \in J^{C_1}} \hat{c}_{ij} \sum_m x_{mij}^* \quad (16)$$

برای نوشتن همزاد خطی تابع هدف، گام‌هایی که در ادامه مطرح می‌شوند، برای هر پارامتر غیر قطعی در تابع هدف طی می‌شوند.

با فرض داشتن x_{ij}^* ، تابع محافظت برای پارامتر هزینه‌های \hat{c}_{ij}

بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\max \sum_{(i,j) \in J^{C_1}} \hat{c}_{ij} u_{ij} \sum_m x_{mij}^* \quad (17)$$

توزیع‌های مستقل و همسانی هستند که به بازه‌های متقارن $[d_m - \hat{d}_m, d_m + \hat{d}_m]$ و $[s_m - \hat{s}_m, s_m + \hat{s}_m]$ تعلق دارند. برای کمینه سازی کمبود در مراکز تأمین متغیر کمکی S_{mi} به محدودیت (۷) بصورت زیر اعمال می‌شود:

$$\sum_j x_{mij} - \tilde{s}_{mi} \leq S_{mi} \quad \forall m, i \quad (23)$$

به همین ترتیب برای عبارت هزینه کمبود کالاها امدادی که از ضرب هزینه کمبود در مقدار کمبود حاصل می‌شود ($P_{mk} I_{mk}$) نیز با اعمال متغیر کمکی H_{mk} خواهیم داشت:

$$P_{mk} (\tilde{d}_{mk} - \sum_j y_{mjk}) = P_{mk} I_{mk} \leq H_{mk} \quad \forall m, k \quad (24)$$

لازم به ذکر است که متغیر کمکی H_{mk} در تابع هدف بجای عبارت $P_{mk} I_{mk}$ جایگذاری خواهد شد. از آنجایی که در هر سطر یک پارامتر تقاضا یا تأمین داریم، در نتیجه باید بودجه عدم قطعیت آنها برای هر سطر بین صفر و یک تغییر کند که موجب می‌شود تا حالات زیادی از ترکیبات صفر و یک و حتی مقادیر بین آنها برای بدست آوردن جواب بهینه آزموده شود. برای حل این مشکل، تیل [۲۱] پیشنهاد داد تا از بودجه عدم قطعیت مشترک برای تقاضای هر نوع کالا در مراکز آسیب استفاده شود و برای تمامی نقاط تقاضا بودجه‌ای معادل Γ_m^k منظور گردد که در بازه $\Gamma_m^k \in [0, k]$ ، $\forall m$ تغییر مقدار دهد. k تعداد نقاط آسیب است و این بازه به این معناست که پارامتر بودجه عدم قطعیت تقاضا، به ازای هر کالای امدادی، برای تمام نقاط تقاضا مشترک است و حداکثر به تعداد نقاط آسیب تغییر می‌کند. با توجه به این موضوع که مقدار بدبینانه برای پارامتر تقاضا وقتی به وقوع می‌پیوندد که حد بالای تعدیل شده بازه $[d_m - \hat{d}_m, d_m + \hat{d}_m]$ که معادل $d_m + \frac{\Gamma_m^k}{k} \hat{d}_m$ است رخ دهد، شکل استوار رابطه (۲۴) بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$P_{mk} (d_m + \frac{\Gamma_m^k}{k} \hat{d}_m - \sum_j y_{mjk}) \leq H_{mk} \quad \forall m, k \quad (25)$$

با پیروی از منطق تیل [۲۱]، حد پایین تعدیل شده بازه $[s_m - \hat{s}_m, s_m + \hat{s}_m]$ که بصورت $s_m - \frac{\Gamma_m^i}{n} \hat{s}_m$ تعریف می‌شود برای پارامتر غیرقطعی تأمین استفاده خواهد شد تا بدترین حالات را پوشش دهد. با توجه به آن چه برای استواری پارامترهای تقاضا و تأمین به عنوان سمت راست‌های محدودیتها مطرح شد، محدودیت‌های (۲۳)، (۸) و (۹) بصورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\sum_j x_{mij} - s_m + \frac{\Gamma_m^i}{n} \hat{s}_m \leq S_{mi} \quad \forall m, i \quad (26)$$

$$S.t.: \sum_{(i,j) \in J^{C_1}} u_{ij}^{C_1} \leq \Gamma^{C_1} \\ 0 \leq u_{ij}^{C_1} \leq 1 \quad \forall (i, j) \in J^{C_1}$$

رابطه (۱۷) معادل رابطه (۳) از بخش دوم است. همانطور که در تشریح این رویکرد در بخش ۲ مطرح شد، تا سقف Γ^{C_1} تعداد از پارامترهای هزینه از مقدار اسمی‌شان می‌توانند منحرف شوند. وقتی x_{ij} متغیر تصمیم در نظر گرفته شود، دوگان برنامه‌ریزی خطی (۱۷) بصورت زیر نوشته خواهد شد که معادل رابطه (۴) بخش دوم است:

$$\min \lambda^{C_1} \Gamma^{C_1} + \sum_{(i,j) \in J^{C_1}} \mu_{ij}^{C_1} \quad (18)$$

$$S.t.: \mu_{ij}^{C_1} + \lambda^{C_1} \geq \hat{c}_{ij} \sum_m x_{mij} \quad \forall (i, j) \in J^{C_1} \\ \mu_{ij}^{C_1} \geq 0 \quad \forall (i, j) \in J^{C_1} \\ \lambda^{C_1} \geq 0 \quad (19)$$

با به کارگیری گام‌های فوق در مورد پارامترهای غیرقطعی \tilde{c}_i و \tilde{c}_{jk} تابع هدف استوار بصورت زیر بدست می‌آید:

$$\min \tilde{F} = \sum_j e_j w_j + \sum_{m,i,j} c_{ij} x_{mij} + \sum_{m,j,k} c_{jk} y_{mjk} + \sum_{m,k} P_{mk} I_{mk} + \lambda^e \Gamma^e + \sum_{j \in J^f} \mu_j^e + \lambda^{C_1} \Gamma^{C_1} + \sum_{(i,j) \in J^{C_1}} \mu_{ij}^{C_1} + \lambda^{C_2} \Gamma^{C_2} + \sum_{(j,k) \in J^{C_2}} \mu_{jk}^{C_2} \quad (20)$$

$$S.t.: \mu_{ij}^{C_1} + \lambda^{C_1} \geq \hat{c}_{ij} \sum_m x_{mij} \quad \forall (i, j) \in J^{C_1} \\ \mu_{ij}^{C_1} \geq 0 \quad \forall (i, j) \in J^{C_1} \\ \lambda^{C_1} \geq 0$$

$$\mu_j^e + \lambda^e \geq \hat{e}_j w_j \quad \forall j \in J^f \\ \mu_j^e \geq 0 \quad \forall j \in J^f \quad (21)$$

$$\lambda^e \geq 0 \\ \mu_{jk}^{C_2} + \lambda^{C_2} \geq \hat{c}_{jk} \sum_m y_{mjk} \quad \forall (j, k) \in J^{C_2} \\ \mu_{jk}^{C_2} \geq 0 \quad \forall (j, k) \in J^{C_2} \\ \lambda^{C_2} \geq 0 \quad (22)$$

۲-۴. لحاظ کردن عدم قطعیت در پارامترهای تقاضا و تأمین

از آنجایی که مواجهه با کمبود کالاها امدادی در شرایط بحران موجب خسارات جانی خواهد شد، منظور کردن عدم قطعیت در پارامترهای تقاضا و تأمین در زنجیره‌های تأمین انسان دوستانه اهمیت پیدا می‌کند. در این پژوهش برای اعمال عدم قطعیت استوار بر پارامتر تقاضا و تأمین از توسعه‌ای که تیل [۲۱] بر رویکرد برتسیماس و سیم [۱۹] داشت استفاده خواهیم کرد. پارامترهای \tilde{s}_{mi} و \tilde{d}_{mk} دارای

۵-۱. مقایسه مدل استوار ارائه شده با مدل استوار سناریویی

ارائه شده توسط اسوپوکه و همکاران

به منظور بررسی کارآمدی و صحت مدل ارائه شده، در این بخش عملکرد مدل استوار با عملکرد مدل توسعه داده شده توسط اسوپوکه و همکاران (۲۰۰۹) مورد مقایسه قرار می‌گیرد. اسوپوکه و همکاران [۲۲] یک رویکرد استوار سناریویی^{۳۰} ارائه می‌کنند که در آن هر پارامتر غیرقطعی، توزیع احتمالی مستقل دارد و معیار تاسف مورد توجه قرار می‌گیرد. نویسندگان به پیاده‌سازی رویکرد خود با استفاده از مدل زنجیره تأمین چندسطحی با هدف کمینه سازی مجموع هزینه‌های بازگشایی انبارها و هزینه‌های جریان مواد در سطوح زنجیره پرداختند. در زنجیره تأمین اسوپوکه و همکاران [۲۲] پارامترهای تقاضا، تأمین و هزینه‌های جریان کالا در زنجیره تأمین غیرقطعی فرض می‌شوند. جدول ۱ داده‌های استفاده شده در مسئله ایشان را ارائه می‌نماید.

$$kd_m + \Gamma_m^k \hat{d}_m - \sum_{j,k} y_{mjk} \leq \sum_k I_{mk} \quad \forall m \quad (27)$$

$$\omega_{mk} (d_m + \frac{\Gamma_m^k}{k} \hat{d}_m) \leq \sum_j y_{mjk} \quad \forall m, k \quad (28)$$

Γ_m^k و Γ_m^i بودجه‌های عدم قطعیت مشترک برای تمام مراکز تأمین و تقاضا به ازای هر قلم کالای امدادی هستند. مدل نهایی زنجیره تأمین انسان دوستانه استوار با روابط (۱۰)، (۱۱)، (۲۰) تا (۲۲) و همچنین (۲۵) تا (۲۸) تعریف می‌شود.

۵. حل عددی مدل استوار

در این بخش به منظور بررسی کارایی مدل توسعه داده شده با رویکردهای استوار بکاربرده شده در ادبیات زنجیره‌ها غیرقطعی، ابتدا نتایج مدل استوار ارائه شده با مدل استوار سناریویی توسعه داده شده توسط اسوپوکه و همکاران [۲۲] مقایسه خواهد شد. سپس به حل و تحلیل مدل زنجیره انسان دوستانه با استفاده از داده‌های یک مطالعه موردی در مورد وقوع زلزله در ناحیه البرز می‌پردازیم.

جدول ۱. اطلاعات زنجیره تأمین چند سطحی در کشور آمریکا [۲۲]

محل تأمین کنندگان	ظرفیت تأمین	محل انبارها	ظرفیت انبار	محل تقاضا	میزان تقاضا	هزینه جریمه کمبود (\$)
سندیگو	۲۵۰۰	ساگرامنتو	۲۵۰۰	پورت لند	۸۰۰	۱۲۵
دنور	۳۰۰۰	اوکلاهوما سیتی	۲۶۰۰	لس آنجلس	۱۰۵۰	۱۴۰
کانزاس سیتی	۲۰۰۰	لینکولن	۲۵۰۰	فونیکس	۶۰۰	۱۲۰
ال پاسو	۱۰۰۰	نش ویل	۳۰۰۰	هیوستن	۱۸۰۰	۱۵۰
سینسیناتی	۸۰۰	کلیولند	۲۶۰۰	میامی	۱۵۰۰	۱۲۵
بویس	۵۰۰	فورت نورث	۲۱۰۰	نیویورک	۱۲۵۰	۱۳۰
آستین	۱۱۰۰	یوجن	۲۳۰۰	اس. تی. لوئیس	۱۰۵۰	۱۲۰
شارلوت	۲۰۰۰	سانتا ف	۱۷۰۰	شیکاگو	۱۷۵۰	۱۴۰
هانتس ویل	۷۰۰	چک سانو	۲۴۰۰	فیلا دل	۷۵۰	۱۲۵
بیزمارک	۶۰۰	بوستن	۲۶۰۰	آتلانتا	۱۸۵۰	۱۵۵

پارامتر Γ نیز برای پارامترهای تقاضا، تأمین و هزینه‌های جریان کالاها به ترتیب معادل ۷، ۷، ۶۰ و ۶۰ در نظر گرفته شد. زمان حل مدل با استفاده از نرم‌افزار برنامه ریزی ریاضی LINGO 11.0 از ۲۳ ثانیه تجاوز نمود و جواب مشابهی در خصوص مکانهای بازگشایی انبارها بدست آمد. از آنجایی که هنگام وقوع بحران، اخذ تصمیمات در زمان کوتاه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، استفاده از مدل استوار توسعه داده شده در شرایط واقعی می‌تواند بسیار مفید باشد.

۵-۲. مطالعه موردی وقوع زلزله در ناحیه البرز

ایران کشوری لرزه خیز است و بر روی یکی از دو کمربند بزرگ لرزه خیز جهان موسوم به «آپا» قرار دارد^{۳۱}. منطقه جنوب البرز مرکزی که کلانشهر تهران در آن واقع می‌باشد نیز نه تنها از خطر زلزله ایمن نیست بلکه سالهاست در انتظار زلزله‌های ویرانگر با قدرت بالای ۷

اسوپوکه و همکاران [۲۲] مدل زنجیره تأمین پیشنهادی خود را با در نظر گرفتن تعداد ۴۰ سناریو برای هر پارامتر غیرقطعی حل نمودند (مجموعاً ۳ سناریو) بطوریکه پارامترها مقادیر خود را در بازه متقارن ۸۰٪ تا ۱۲۰٪ از مقادیر جدول ۱ می‌گیرند. مدل ایشان در ابعاد بیان شده و با استفاده از نرم‌افزار CPLEX، طی ۵۷ تکرار و زمان ۵۸ ساعت و ۲۷ دقیقه و ۳۲ ثانیه حل شده است. به موجب حل مدل استوار سناریویی ایشان انبارها در شهرهای ساگرامنتو، کلیولند، نش ویل، فورت نورث و بوستن نیاز به بازگشایی دارند. جهت بررسی و مقایسه کارایی مدل استوار توسعه داده شده در مقاله حاضر از داده‌های مسئله اسوپوکه و همکاران [۲۲] استفاده گردید. بطور مشابه، برای قابل مقایسه بودن جواب بهینه و کارایی دو مدل، هر یک از پارامترهای تقاضا، تأمین و هزینه‌های جریان کالا در زنجیره تأمین در بازه ۸۰٪ تا ۱۲۰٪ از مقادیر جدول ۱ در نظر گرفته شدند.

شده‌اند که در جدول (۱) نام آنها ذکر شده است. جهت انتقال کالاهای امدادی چادر، آب و غذا، شش مکان برای احداث مراکز توزیع در شهرهای نکا، رودبار، قزوین، گرمسار، تهران و کاشان در نظر گرفته شده است. به منظور پشتیبانی از مراکز توزیع نیز، شش مرکز تأمین کالای امدادی در شهرهای گرگان، آمل، قزوین، سمنان، اراک و اصفهان مدنظر می‌باشند.

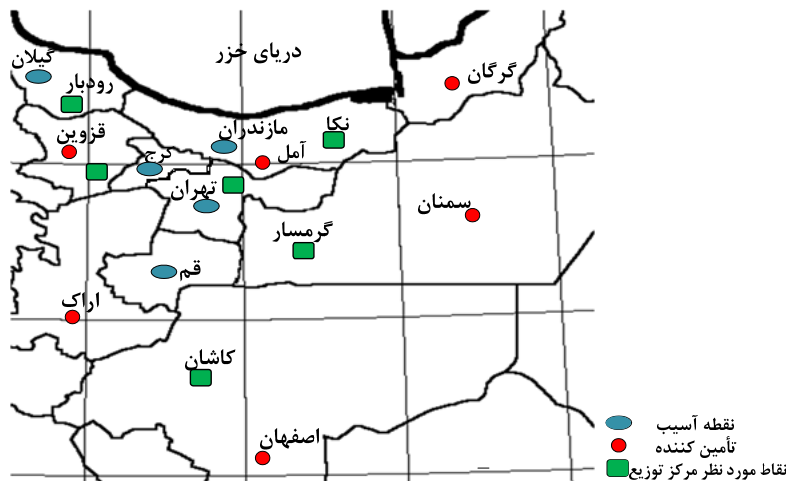
شمایی از زنجیره انسان‌دوستانه مورد مطالعه در شکل (۱) نشان داده شده است.

ریشتر به سر می‌برد. عامل اصلی وقوع زلزله در تهران وجود ۱۵ گسل در این منطقه است که سه گسل در این میان هریک به تنهایی پتانسیل ایجاد زلزله ای بیش از ۷ ریشتر را دارند^{۳۲}. براساس تحقیق انجام شده توسط ناطقی [۲۳]، در اثر وقوع زلزله در این منطقه حدود ۱۵٪ مردم جان خود را از دست می‌دهند، ۵٪ مردم بشدت آسیب خواهند دید و ۵۸٪ از ساختمان‌های تهران ویران می‌شوند و یا به شدت صدمه خواهند دید.

با توجه به نقشه گسل‌های فعال در ناحیه البرز، ۱۳ منطقه به عنوان نقاط آسیب‌پذیر در هنگام وقوع بلای طبیعی زلزله انتخاب

جدول ۲. سیزده نقطه آسیب هنگام وقوع بلای طبیعی زلزله در ناحیه البرز

نام منطقه	نام منطقه	شماره	شماره
مناطق ۶، ۷، ۸ و ۱۳ شهرداری تهران	تهران ۳	۷	۱ مازندران
مناطق ۱۱، ۱۲ و ۱۴ شهرداری تهران	تهران ۴	۸	۲ رشت
مناطق ۱۷ و ۱۸ شهرداری تهران	تهران ۵	۹	۳ کرج
مناطق ۱۹ و ۲۰ شهرداری تهران	تهران ۶	۱۰	۴ قم
اسلامشهر و رباط کریم	شهرستان توابع تهران ۱	۱۱	۵ تهران ۱ مناطق ۱، ۳ و ۴ شهرداری تهران
پاکدشت، ورامین، ری، پیشوا،	شهرستان توابع تهران ۲	۱۲	۶ تهران ۲ مناطق ۲، ۵، ۲۱ و ۲۲ شهرداری تهران
فیروزکوه، دماوند و شمیرانات	شهرستان توابع تهران ۳	۱۳	
شهریار، قدس و ملارد			



شکل ۱. شمایی از مراکز تأمین، نقاط مورد نظر راه‌اندازی مراکز توزیع و نقاط آسیب

می‌باشد. پارامتر ω_{mk} نیز برای تمام کالاهای امداد ۰.۳ منظور شده است. به این معنا که حداقل ۳۰٪ تقاضای مربوط به هر کالای امدادی باید در نقاط آسیب برآورده شوند. با توجه به فواصل بین مراکز تأمین و مراکز توزیع و همچنین مراکز توزیع و نقاط آسیب، هزینه انتقال هر واحد کالا به شرح جداول (۳) و (۴) می‌باشد.

با توجه به جمعیت هر نقطه آسیب، تقاضای هر نقطه و ظرفیت تأمین هر تأمین‌کننده برای هر کالای امدادی به شرح جدول (۲) است. هزینه راه‌اندازی هر مرکز توزیع به قرار ۴۰ میلیون تومان با حجم ۴۰۰۰۰ مترمکعب برآورد شده است. حجم هر جعبه ۱۲ تایی آب ۰.۰۵ متر مکعب، هر کارتون شامل ۱۲ غذای آماده ۰.۰۸ مترمکعب و هر چادر چهار نفره به منظور اسکان افراد ۰.۳ متر مکعب برآورد شده است. جریمه کمبود هر واحد کالای امدادی نیز ۱۵۰۰ تومان

جدول ۳. میزان تقاضای هر نقطه آسیب و ظرفیت تأمین هر کالای امدادی

چادر	غذا	آب
میزان تقاضا	۶۰۰۰۰	۶۰۰۰۰۰
میزان تأمین	۲۳۰۰۰۰	۹۰۰۰۰۰

جدول ۴. هزینه انتقال هر واحد کالای امدادی بین مراکز تأمین و مراکز توزیع

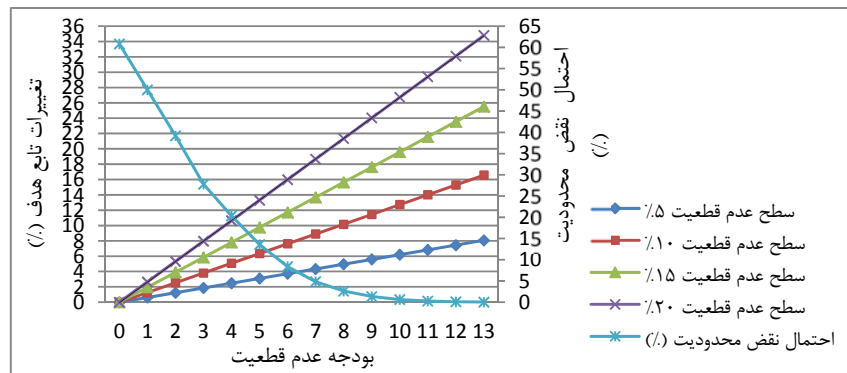
	کاشان	تهران	گرمسار	قزوین	رودبار	نکا
گرگان	۱۶۰۷.۵	۱۰۴۲.۵	۱۰۶۷.۵	۱۳۶۷.۵	۱۶۱۷.۵	۲۷۵
آمل	۱۱۳۲.۵	۶۶۷.۵	۶۷۸.۵	۸۹۲.۵	۱۱۴۲.۵	۲۲۲.۵
قزوین	۹۹۰	۳۷۵	۷۱۵	۱۲۵	۲۵۰	۱۰۹۲.۵
سمنان	۱۲۰۵	۶۴۰	۲۵۰	۹۶۵	۹۶۵	۵۶۲.۵
اراک	۵۷۵	۶۸۲.۵	۱۰۷۲.۵	۷۵۷.۵	۱۰۰۷.۵	۱۴۵۰
اصفهان	۴۵۵	۱۱۴۷.۵	۱۴۳۷.۵	۱۲۰۰	۱۴۵۰	۱۸۱۵

جدول ۵. هزینه انتقال هر واحد کالای امدادی بین مراکز توزیع و نقاط آسیب

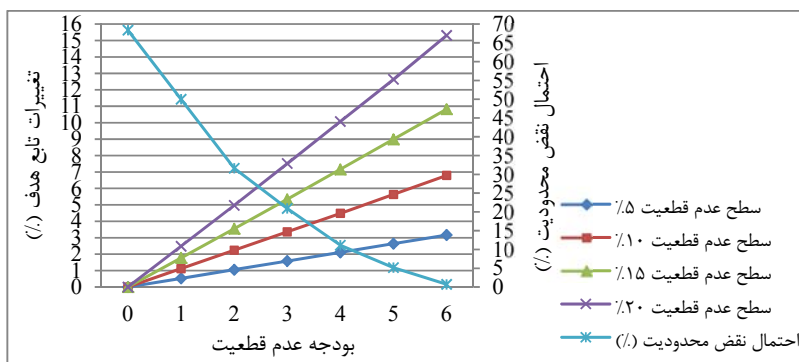
توابع تهران ۳	توابع تهران ۲	توابع تهران ۱	تهران ۶	تهران ۵	تهران ۴	تهران ۳	تهران ۲	تهران ۱	قم	کرج	گیلان	مازندران
۹۱۷.۵	۴۱۷.۵	۸۱۷.۵	۷۵۷.۵	۷۶۷.۵	۷۳۷.۵	۷۳۵	۷۸۲.۵	۷۴۵	۱۰۴۷.۵	۹۵۰	۹۷۰	۲۰۰
۷۰۰	۸۷۵	۷۷۵	۴۲۵	۶۴۰	۶۶۵	۶۷۰	۶۴۵	۶۷۷.۵	۹۰۵	۵۲۵	۲۳۷.۵	۱۰۴۵
۴۵۰	۶۲۵	۵۲۵	۱۵۲	۳۹۰	۴۱۵	۴۲۰	۳۹۵	۴۳۷.۵	۷۰۵	۳۲۵	۴۶۲.۵	۹۴۷.۵
۴۵۰	۲۵۰	۳۷۵	۳۵۷.۵	۳۹۲.۵	۳۷۰	۳۸۰	۴۱۵	۳۹۰	۵۱۲.۵	۳۴۰	۱۱۵۲.۵	۶۳۵
۱۲۵	۲۰۰	۱۰۰	۴۲.۵	۴۵	۵۰	۶۲.۵	۶۵	۷۰	۳۳۰	۱۵۰	۸۶۲.۵	۶۲۲.۵
۷۵۰	۶۶۵	۶۱۵	۶۳۵	۶۴۵	۶۵۵	۶۷۰	۶۷۵	۶۸۲.۵	۲۸۵	۷۴۰	۱۴۲۷.۵	۱۱۸۷.۵

برای نشان دادن روند تغییرات در مقدار تابع هدف به ازای تغییر در بودجه‌های عدم قطعیت، از مقدار تغییر استاندارد که از رابطه $(Z^R - Z^N)/Z^N$ بدست می‌آید و برحسب درصد می‌باشد، استفاده شده است. با این توضیح که، Z^R و Z^N به ترتیب مقادیر تابع هدف مدل‌های قطعی و استوار هستند. شکل‌های (۲)، (۳)، (۴)، (۵) و (۶) تغییرات استاندارد تابع هدف بهینه برحسب تغییرات بودجه عدم قطعیت را نشان می‌دهد. همچنین، احتمال نقض محدودیت بر حسب بودجه‌های عدم قطعیت مختلف که از رابطه (۵) محاسبه می‌شود در این شکل‌ها نشان داده شده است.

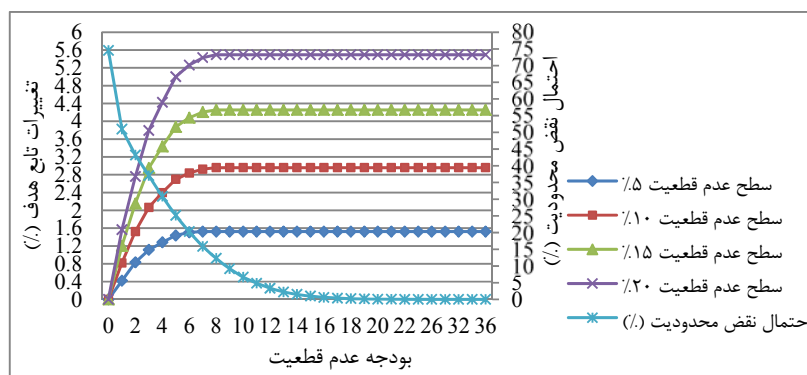
مدل با استفاده از نرم‌افزار LINGO 11.0 کد نویسی و در رایانه‌ای با ریزپردازنده دو هسته‌ای Core i3 و ۲ گیگا بایت حافظه موقت حل شده است. به منظور تشخیص این که هر پارامتر عدم قطعیت به تنهایی چه میزان بر مقدار تابع هدف تأثیر می‌گذارد، در این مطالعه موردی به تحلیل حساسیت پرداخته شده است. برای هر یک از پارامترهای غیرقطعی، انحراف ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصدی از مقادیر اسمی آن‌ها در نظر گرفته شده است. در تحلیل حساسیت انجام شده، بودجه‌های عدم قطعیت با توجه به ابعاد مسئله در بازه‌های $\Gamma^{C_1} = [0,36]$ ، $\Gamma_m^i = [0,6]$ ، $\Gamma_m^k = [0,13]$ و $\Gamma^f = [0,6]$ و $\Gamma^{C_2} = [0,78]$ تغییر می‌کنند.



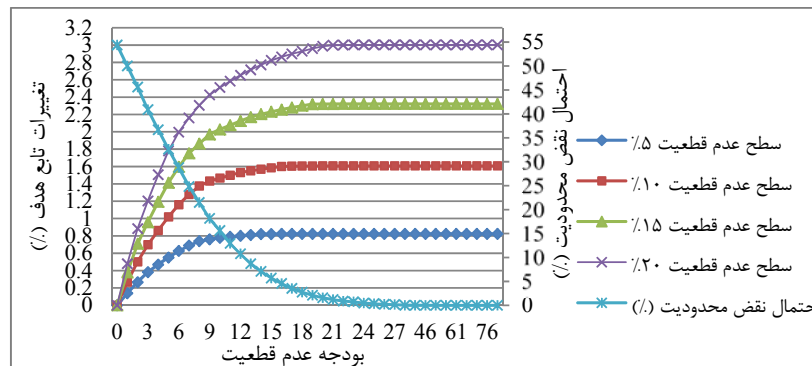
شکل ۲. تغییرات تابع هدف و احتمال نقض محدودیت با توجه به مقادیر مختلف بودجه عدم قطعیت تقاضا



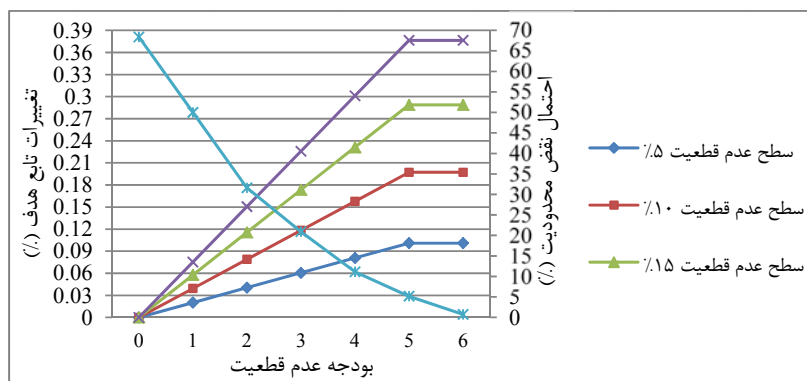
شکل ۳. تغییرات تابع هدف و احتمال نقض محدودیت با توجه به مقادیر مختلف بودجه عدم قطعیت میزان تأمین



شکل ۴. تغییرات تابع هدف و احتمال نقض محدودیت با توجه به مقادیر مختلف بودجه عدم قطعیت Γ^1



شکل ۵. تغییرات تابع هدف و احتمال نقض محدودیت با توجه به مقادیر مختلف بودجه عدم قطعیت Γ^2



شکل ۶. تغییرات تابع هدف و احتمال نقض محدودیت با توجه به مقادیر مختلف بودجه عدم قطعیت Γ^f

است. همچنین، انحراف پارامتر هزینه راه اندازی مراکز توزیع کمترین تأثیر را بر تابع هدف می‌گذارد و زمانی که انحراف از مقدار اسمی آن ۰.۲ باشد، این تأثیر برابر ۰.۳۸٪ است. با توجه به نمودارهای (۲) تا (۶) و حساسیت قابل توجه مقدار تابع هدف نسبت به تغییرات پارامتر تقاضا و تأمین، بهتر است مقدار بودجه عدم قطعیت متناظر این پارامترها محافظه‌کارانه انتخاب شود. با در نظر گرفتن رویکرد محافظه‌کارانه که منجر به انتخاب بودجه‌های عدم قطعیت $I^{C_1} = 9$ ، $I^{C_2} = 12$ ، $I^f = 4$ و $I_m^k = 13$ و $I_m^i = 6$ می‌شود، تخصیص بهینه کالاهای امدادی از مراکز تأمین به مراکز توزیع و از مراکز توزیع به نقاط آسیب به شرح جداول (۶) و (۷) به دست می‌آید. همچنین، ۵ مرکز توزیع به غیر از رودبار باید راه‌اندازی شوند تا پاسخگوی تقاضای آسیب‌دیدگان در ۱۳ نقطه آسیب باشند.

همانطور که در شکل (۲) و (۳) مشاهده می‌شود، بدترین مقدار تابع هدف وقتی بدست می‌آید که پارامتر غیر قطعی تقاضا و تأمین بیشترین مقدار خود را داشته باشند ($I = |J|$). اما طبق شکل-های (۴) تا (۶)، بدترین مقدار تابع هدف وقتی حاصل می‌شود که پارامتر غیرقطعی کمتر از بیشترین مقداری که میتواند به خود بگیرد را اختیار کنند ($I^{C_1} = 8 < |J^{C_1}| = 36$)، $I^{C_2} = 24 < |J^{C_2}| = 78$ و $I^f = 5 < |J^f| = 6$. در نتیجه برای بدست آوردن نتایج با بالاترین سطح محافظه‌کاری لازم نیست مقدار I^{C_1} بیش از ۸ اختیار شود.

همچنین نتایج گویای آن هستند که انحراف در پارامتر تقاضا تأثیر بیشتری نسبت به سایر پارامترها بر تابع هدف دارد. این درصد تأثیر گذاری برای زمانی که انحراف از مقدار اسمی ۰.۲ باشد برابر با ۳۴٪

جدول ۶. میزان تخصیص کالاهای امدادی از مراکز تأمین به مراکز توزیع راه اندازی شده

کاشان (آب، غذا، چادر)	تهران (آب، غذا، چادر)	گرمسار (آب، غذا، چادر)	قزوین (آب، غذا، چادر)	نکا (آب، غذا، چادر)
			(۸۰۲۴۹۹، ۸۰۲۴۰، ۲۰۵۰۸۳)	گرگان
	(۸۰۲۴۰، ۸۰۲۴۹۹، ۲۰۵۰۸۳)			آمل
			(۸۰۲۴۰، ۸۰۲۴۹۹، ۲۰۵۰۸۳)	قزوین
		(۲۰۵۰۸۳، ۸۰۲۴۰، ۸۰۲۴۹۹)		سمنان
	(۸۰۲۴۰، ۸۰۲۴۹۹، ۲۰۵۰۸۳)			اراک
(۸۰۲۴۹۹)				اصفهان
(۲۰۵۰۸۳، ۸۰۲۴۰)				

جدول ۷. میزان تخصیص کالاهای امدادی از مراکز توزیع راه اندازی شده و نقاط آسیب

توابع تهران ۳	توابع تهران ۲	توابع تهران ۱	تهران ۶	تهران ۵	تهران ۴	تهران ۳	تهران ۲	تهران ۱	قم	کرج	گیلان	مازندران
۱۸۸۶۵۳												۶۱۳۸۴۶
۱۸۸۶۵												۶۱۳۸۴
۵۱۶۲۱												۱۵۳۴۶۱
				۵۵۶۹۶۱						۲۴۵۵۳۸		
				۵۵۶۹۶						۲۴۵۵۳		
				۱۴۳۶۹۸						۶۱۳۸۴		
									۳۲۰۴۲۲			
				۵۶۸۸۴	۴۲۵۱۹۲							
				۵۶۸۸	۴۲۵۱۹					۳۲۰۴۲		
				۹۷۶۲	۱۰۱۸۳۹					۹۳۴۸۰		
									۲۴۵۵۳۸	۲۴۵۵۳۸	۲۴۵۵۳۸	۲۴۵۵۳۸
									۲۴۵۵۳	۲۴۵۵۳	۲۴۵۵۳	۲۴۵۵۳
									۶۱۳۸۴	۶۱۳۸۴	۶۱۳۸۴	۶۱۳۸۴
												۹۳۴۸۰
									۶۱۳۸۴۶			
									۶۱۳۸۴			
										۱۵۳۴۶۱		

13. Bender's decomposition approach
14. Scenario based robust programming
15. Supermom
16. Conservative
17. Worst-case values
18. Box and ellipsoid uncertainty sets
19. Second order cone problem (SOCP)
20. Mixed integer linear programming (MILP)
21. Mixed integer conic program model
22. Adjustable robust counterpart (ARC)
23. Affinely adjustable robust counterpart (AARC)
24. Computationally intractable
25. System optimum dynamic traffic assignment model
26. Semi-definite optimization
27. Row wise
28. Symmetric and bounded random variable
29. Robust counterpart
30. The full-factorial scenario design of data uncertainty
31. www.earthquake.ir/index.php?menu=earth_quake_in_iran
32. http://www.earthquake.ir/index.php?menu=earthquake_in_tehran

مراجع

- [1] The International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies (IFRC), World Disasters Report: Focus on Early Warning, Early Action, available at: <http://preventionweb.net/go/10176>, (2009).
- [2] Bozorgi-Amiri A, Jabalameli MS, Mirzapour Al-e-Hashem SMJ. A multi-objective robust stochastic programming model for disaster relief logistics under uncertainty, *OR Spectrum*, (2011), pp. 1-29.
- [3] Ben-Tal A, Chung BD, Mandala SR, Yao T. Robust optimization for emergency logistics planning: risk mitigation in humanitarian relief supply chains, *Transportation Research Part B*, (2011), Vol. 45. pp. 1177-1189.
- [4] Altay N, Green WG. OR/MS research in disaster operations management, *European Journal of Operations Research*, (2006), Vol. 175, pp. 475-493.
- [5] Kovacs G, Spen KM. Humanitarian logistics in disaster relief operations, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, (2007), Vol. 37, pp. 99-114.
- [6] Overstreet RE, Hall D, Hanna JB, Rainer RK. Research in humanitarian logistics, *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, (2011), Vol. 1, pp. 114-131.

۶. نتیجه گیری

در این مقاله به توسعه یک مدل بهینه سازی جهت طراحی زنجیره تأمین انسان‌دوستانه سه سطحی شامل تأمین‌کنندگان، مراکز توزیع امداد رسانی و نقاط آسیب، در شرایط عدم قطعیت پرداخته شد. عدم قطعیت پارامترهای تقاضا، تأمین و مولفه‌های هزینه‌ای در زنجیره تأمین مزبور با استفاده از رویکرد بهینه سازی استوار برای داده‌های بازه‌ای مدل شدند. هدف مدل، کمینه نمودن هزینه کل زنجیره تأمین و به طور ضمنی بیشینه‌سازی رضایت افراد آسیب دیده بود. در پی توسعه مدل ریاضی زنجیره تأمین انسان‌دوستانه مورد نظر، رویکرد استوار به کار برده شده پیچیدگی مدل را تغییر نداد و مدل استوار مانند مدل قطعی، همچنان مختلط خطی باقی ماند. به منظور آزمودن رویکرد استوار بکار گرفته شده، ابتدا مقایسه‌ای میان کارایی مدل استوار توسعه داده شده در پژوهش حاضر با مدل استوار سناریویی بازه‌ای صورت پذیرفت که در نتیجه آن مدل استوار بازه‌ای ارائه شده بطور قابل توجهی عملکرد بهتری از نظر زمان حل و نیاز به کمترین اطلاعات از خود نشان داد. علاوه بر آن داده‌های حاصل از مطالعه موردی وقوع زلزله در منطقه البرز به کار برده شدند و مکان‌های بهینه استقرار مراکز امدادی و مقادیر بهینه جریان کالاهای امدادی تعیین گردیدند.

رویکرد ارائه شده در این مقاله از چندین جنبه قابل توسعه است. در بررسی موردی این مقاله، تمرکز اصلی بر مجموع هزینه‌های زنجیره تأمین و سطح رضایت نقاط آسیب دیده قرار داشت. توسعه مدل در شرایطی که علاوه بر مجموع هزینه‌ها، توابع هدف دیگری همچون زمان خدمت رسانی و قابلیت اطمینان زنجیره تأمین مورد توجه قرار گیرند می‌تواند در بسیاری دیگر از کاربردهای عملی مفید باشد. همچنین، لحاظ نمودن تصمیمات مسیریابی و محدودیت‌های ظرفیت ناوگان حمل و نقل در مدل می‌تواند منجر به استخراج نتایج مدیریتی مناسب گردد. از دیدگاه مدل سازی عدم قطعیت نیز می‌توان مسئله را در شرایطی بررسی نمود که بودجه عدم قطعیت به صورت یک متغیر تصمیم در نظر گرفته شود و پیچیدگی و کیفیت مدل حاصل را با رویکرد ارائه شده مورد مقایسه قرار داد.

پی‌نوشت

1. Humanitarian relief supply chain
2. Uncertainty
3. Robust optimization
4. Interval data
5. National Disaster Risk Reduction & Management Council (www.ndrrmc.gov.ph)
6. Stochastic programming
7. Robust optimization
8. Maximal covering
9. Conditional value at risk (CVaR)
10. Risk level
11. Two-stage stochastic programming
12. sample average approximation (SAA) technique

- uncertain linear programs, *Mathematical Programming*, (2004), Vol. 99, pp. 351-376.
- [18] Tang F, Zhang L, Huang J, Yang W. An affinely adjustable robust optimization approach to emergency logistics distribution under uncertain demands, In *Industrial Engineering and Engineering Management Conference, IEEE IEEM*, (2009), pp. 1738-1742.
- [19] Bertsimas D, Sim M. The Price of Robustness, *Operations Research*, (2004), Vol. 52, pp. 35-53.
- [20] Najafi M, Eshghi K, Dullaert W. A multiobjective robust optimization model for logistics planning in the earthquake response phase, *Transportation Research, Part E*, (2013), Vol. 49, pp. 217-249.
- [21] Thiele A. A robust optimization approach to supply chain and revenue management, *Doctoral Dissertation in Industrial engineering, Massachusetts Institute of Technology*, (2004).
- [22] Assavapokee T, Realff MJ, Ammons JC. A relative robust optimization approach for full factorial scenario design of data uncertainty and ambiguity, In *Optimization and logistics challenges in the enterprise*, Springer US, (2009), pp. 145-174.
- [23] Nateghi F. Earthquake scenario for the megacity of Tehran, *Disaster Prevention and Management*, (2001), Vol. 10, No. 2, pp. 95-101.
- [7] Parsa H, Jin M, Roni M, Eksioglu B, Eksioglu S. Healthcare inventory and supply chain management: a literature review, *Bioinfo Systems Engineering*. (2011), Vol. 1, pp. 11-19.
- [8] Caunhye AM, Nie X, Pokhare Sh. Optimization Models in Emergency Logistics: A Literature Review, *Socio-Economic Planning Sciences*, (2012), Vol. 46, pp. 4-13.
- [9] Shahanaghi K, Ghezavati VR. Efficient solution procedure to develop maximal covering location problem under uncertainty (Using GA and simulation), *International Journal of Industrial Engineering & Production Research*, (2008), Vol. 19, No. 4, pp. 21-29.
- [10] Babazadeh R, Tavakkoli-Moghaddam R, Razmi J. A complex design of the integrated forward-reverse logistics network under uncertainty, *International Journal of Industrial Engineering & Production Research*, (2012), Vol. 23, No. 2, pp. 113-123.
- [11] Bashiri M, Rezaei HR. Reconfiguration of supply chain: A two stage stochastic programming, *International Journal of Industrial Engineering & Production Research*, (2013), Vol. 24, No. 1, pp. 47-58.
- [12] Döyen A, Aras N, Barbarosoğlu G. A two-echelon stochastic facility location model for humanitarian relief logistics, *Optimization Letters*, (2012), Vol. 6, pp. 1123-1145.
- [13] Bozorgi-Amiri A, Jabalameli MS, Alinaghian M, Heydari M. A modified particle swarm optimization for disaster relief logistics under uncertain environment, *International Journal of Advanced Manufacturing and Technology*, (2012), Vol. 60, pp. 357-371.
- [14] Soyster AL. Convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming, *Operations Research Letters*, (1973), Vol. 21, pp. 1154-1157.
- [15] Ben-Tal A, Nemirovski A. Robust solutions of linear programming problems contaminated with uncertain data, *Mathematical Programming Series B*, (2000), Vol. 88, pp. 411-424.
- [16] Baron O, Milner J, Naseraldin H. Facility location: a robust optimization approach, *Production and Operations Management*, (2011), Vol. 20, pp. 772-785.
- [17] Ben-Tal A, Goryashko A, Guslitzer E, Nemirovski A. Adjustable robust solutions of