یکپارچه‌سازی عملیات قبل و بعد بحران با درنظرگرفتن بازسازی مسیرها و انبارهای آسیب‌دیده

سید علی ترابی[1*]، منصور دودمان[2]، علی بزرگی امیری [3]

۱. استاد دانشکدۀ مهندسی صنایع، پردیس فنی دانشگاه تهران

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکدۀ مهندسی صنایع دانشگاه تهران

۳. استادیار دانشکدۀ مهندسی صنایع پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۹۶/۰۶/۱۶، تاریخ روایت اصلاح‌شده: ۹۶/۰۸/۰۹ تاریخ تصویب: ۹۶/۰۹/۲۹)

چکیده

روند روبه‌افزایش وقوع حوادث و بحران‌های طبیعی بیانگر اهمیت برنامه‌ریزی‌های مقابله با آن‌هاست. در این پژوهش، مدل امکانی-تصادفی دوسطحی چندهدفه-چنددوره‌ای-چندکالایی مبتنی بر برنامه‌ریزی آرمانی به‌منظور یکپارچه‌سازی عملیات قبل و بعد بحران، همچنین بازسازی مسیرها و تسهیلات امدادی آسیب‌دیده ارائه شده است. توابع هدف درنظر گرفته‌شده شامل حداقل‌کردن کل هزینه‌ها (هزینه‌های حمل کالاهای امدادی میان تسهیلات، هزینه‌های ذخیره‌سازی اقلام امدادی، هزینه‌های کمبود، هزینه‌های بازسازی انبارها و مسیرهای آسیب‌دیده) و حداکثرکردن توزیع عادلانۀ اقلام امدادی در مناطق آسیب‌دیده است. عدم قطعیت شناختی در پارامترهای مرتبط با اهداف آرمانی، تقاضای نقاط آسیب‌دیده و هزینه‌ها درنظر گرفته شده است. مدل غیرقطعی ابتدا به‌کمک روش برنامه‌ریزی امکانی کارا، به مدل قطعی چندهدفه تبدیل شده و در ادامه با استفاده از روش ترابی و هسینی به مدل تک‌هدفۀ معادل کاهش می‌یابد. نتایج حاصل از حل مدل روی مثال عددی، بیانگر کارایی مدل ریاضی است.

واژه‌های کلیدی: لجستیک بشردوستانه، بازسازی مسیرها و انبارهای آسیب‌دیده، برنامه‌ریزی آرمانی، برنامه‌ریزی امکانی-تصادفی دومرحله‌ای، بهینه‌سازی چندهدفه.

مقدمه

هرساله بلایای طبیعی مانند سیل، طوفان و خشک‌سالی قسمت‌های مختلفی از جهان را فرامی‌گیرد. وقوع این حوادث با صدمه به جان و مال انسان‌ها همراه است. براساس آمار منتشرشده از هلال‌احمر و صلیب‌سرخ در سال ۲۰۰۹، وقوع حوادث طبیعی بین سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۸ جان بیش از یک میلیون انسان در سراسر جهان را گرفته است. اگرچه وقوع بحران‌ها و حوادث طبیعی غیرقابل‌اجتناب است، با طراحی زنجیرۀ مناسب امداد می‌توان کالاهای امدادی را در زمان مناسب و به مقدار لازم به نقاط آسیب‌دیده رساند و از شدت تأثیر بلایا و آثار مخرب آن کاست. به زنجیره‌هایی که پس از وقوع بحران به‌منظور کمک به نقاط آسیب‌دیده و توزیع کالاهای امدادی بین نقاط آسیب‌دیده تشکیل می‌شوند، زنجیرۀ امداد بشردوستانه اطلاق می‌شود [۱]. آمادگی لجستیک برای مدیریت بحران بخش اساسی هر سیستم مدیریت بحران است. هر نظام مدیریت بحران را می‌توان به چهار فاز تقسیم‌بندی کرد که در دو بخش فاز قبل از بحران و فاز بعد از بحران دسته‌بندی می‌شود. فاز قبل از بحران شامل فعالیت‌های پیشگیری و کاهش و آمادگی است و فاز بعد از بحران، عملیات پاسخ، بهبود و بازسازی را شامل می‌شود. مرحلۀ پیشگیری به‌منظور جلوگیری از تبدیل‌شدن خطر به بحران یا فاجعه انجام می‌شود. همچنین، فعالیت‌های مرحلۀ آمادگی قبل از وقوع بحران و به‌منظور پاسخ مناسب به بحران صورت می‌گیرد و شامل تصمیم‌هایی مانند تعیین مکان احداث انبارهای امدادی و مقادیر پیش‌ذخیره‌سازی کالاهای امدادی در آن‌هاست. مرحلۀ پاسخ به بحران نیز شامل توزیع کالاهای امدادی به مردم آسیب‌دیده در حداقل زمان ممکن است. درنهایت فاز بهبود و بازسازی شامل بازگرداندن مسیرها و تسهیلات

* نویسندۀ مسئول، تلفن:۰۲۱۶۱۱۱۴۲۶۷
Email: satorabi@ut.ac.ir

امدادی به شرایط قبل از بحران است [۲]. در این مقاله، مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه مبتنی بر برنامه‌ریزی آرمانی فازی برای یکپارچه‌سازی عملیات امدادرسانی در مرحلهٔ قبل و بعد از بحران و بازسازی مسیرها و تسهیلات امدادی آسیب‌دیده ارائه شده است. در مرحلهٔ قبل از بحران، میزان پیش‌ذخیره‌سازی کالاهای امدادی در هر یک از انبارها تعیین می‌شود و بعد از وقوع بحران نیز تصمیم‌های مربوط به میزان کالای ارسالی از انبارها به نقاط تقاضا و بازسازی انبارها و مسیرهای آسیب‌دیده درنظر گرفته می‌شود. توزیع کالاهای امدادی در فاز پاسخ به بحران (معمولاً ۷۲ ساعت اول) به‌صورت چنددوره‌ای درنظر گرفته شده است. این امر سبب افزایش قابلیت پاسخ‌دهی سازمان‌های امداد می‌شود؛ زیرا امکان درنظرگرفتن اطلاعات به‌دست‌آمدهٔ جدید در اصلاح برنامهٔ توزیع دوره‌های پیش‌رو با رانش مجدد مدل با منطق افق غلتان به‌وجود می‌آید [۴]. کالاهای امدادی به دو صورت مصرف‌شدنی (آب، غذا و دارو) و مصرف‌نشدنی (چادر) درنظر گرفته شده است.

ادامهٔ این مقاله بدین‌صورت سازمان‌دهی شده است که در بخش ۲، مروری بر پژوهش‌های پیشین صورت گرفته است. در بخش ۳، تعریف مسئله ارائه شده و مفروضات مسئله و مدل ریاضی چندهدفهٔ مبتنی بر برنامه‌ریزی آرمانی فازی بیان شده است. در بخش ۴، نحوهٔ برخورد با عدم قطعیت در پارامترهای مسئله تشریح شده است. در بخش ۵، مثال عددی ارائه و نتایج تحلیل شده است. در بخش آخر نیز نتایج و پیشنهادها برای مطالعات آتی مشاهده می‌شود.

مرور ادبیات

در این بخش، مدل‌های مربوط به طراحی زنجیرهٔ تأمین بشردوستانه بررسی شده است که نتایج آن نشان می‌دهد بحث مربوط به یکپارچه‌سازی عملیات امدادرسانی در مرحلهٔ قبل و بعد از بحران با درنظرگرفتن خرابی مسیرها و تسهیلات امدادی در ادبیات بسیار اندک مدنظر است؛ بنابراین توسعهٔ مدل‌های ریاضی جدید در این زمینه ضروری است. بالسیک و بئومن برای اولین بار در سال ۲۰۰۸، مدلی تصادفی را به‌منظور مکان‌یابی تسهیلات امدادی و ذخیره‌سازی اقلام امدادی ارائه دادند. مدل ارائه‌شده شامل تعیین تعداد و مکان مراکز توزیع اقلام امدادی و میزان کالایی است که در هریک از این تسهیلات امدادی ذخیره می‌شود [۳]. در ادامه، پژوهش‌های بسیاری در حوزهٔ مکان‌یابی و تخصیص و توزیع اقلام امدادی انجام شده است. سلیک (۲۰۱۷) مروری جامع بر مطالعات درمورد بازسازی مسیرها، انبارها و شبکهٔ لجستیک امداد انجام داد. وی مطالعات انجام‌شده در حوزهٔ بازسازی شبکه‌های لجستیک امداد را در شش دسته شامل بازسازی مسیرها و راه‌های آسیب‌دیده، بازسازی زیرساخت‌ها، بازسازی و ساخت شبکهٔ لجستیک امداد، برف‌روبی مسیرها در فاز پاسخ به بحران و پاک‌سازی و جمع‌آوری آوار طبقه‌بندی کرده است. وی در هر دستهٔ اهداف، نوع مدل‌سازی و روش‌های حل به‌کاررفته را به‌تفصیل تشریح کرد [۴]. گراس و فیسچر (۲۰۱۶) مرور جامعی بر مدل‌های تصادفی دوسطحی ارائه‌شده در لجستیک امداد داشتند [۵]. بالسیک و همکاران (۲۰۱۶) مروری جامع بر مدل‌های مدیریت موجودی در لجستیک امداد انجام دادند و به بررسی جامع مشخصات مدل‌های ارائه‌شده در فاز قبل و بعد بحران و مدل‌های موجودی در فاز هشدار به بحران پرداختند [۶]. در این بخش به‌مرور مقالاتی پرداخته خواهد شد که تصمیم‌های مربوط به مرحلهٔ قبل و بعد بحران، همچنین تصمیم‌های مربوط به بازسازی مسیرها و تسهیلات آسیب‌دیده را درنظر گرفته‌اند. بزرگی امیری و همکاران (۲۰۱۳) مدل برنامه‌ریزی امکانی استوار چندهدفه را ارائه دادند که در آن به تعیین مکان تسهیلات توزیع اقلام امدادی و میزان کالایی که در هریک از تسهیلات ذخیره می‌شود پرداختند. مدل ارائه‌شده سعی در حداقل‌کردن هزینه‌های تأسیس مراکز توزیع اقلام امدادی، هزینه‌های ذخیره‌سازی اقلام و حداکثرکردن میزان رضایت نقاط آسیب‌دیده دارد. مدل ارائه‌شده، عدم قطعیت را در میزان تقاضای نقاط آسیب‌دیده و امکان خرابی انبارها درنظر گرفته است [۷]. دیان و همکاران (۲۰۱۲) یک مدل ریاضی دومرحله‌ای دوسطحی را به‌منظور تعیین مکان مراکز توزیع اقلام امدادی و میزان ذخیره‌سازی اقلام در این مراکز در مرحلهٔ قبل از بحران و تعیین مکان پناهگاه‌های امدادی و میزان کالایی که از مراکز توزیع به نقاط تقاضا و پناهگاه‌ها ارسال می‌شود، توسعه دادند [۸].

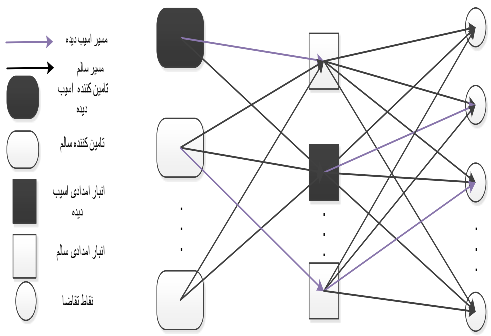
رنسیکاربوم و ماسون (۲۰۱۴) مدلی چندهدفه را برای یکپارچه‌سازی عملیات مرحلۀ پاسخ به بحران و بازسازی مسیرها و تسهیلات آسیب‌دیده ارائه دادند. در این مدل سعی شده است تا هزینه‌های حمل کالاهای امدادی، هزینه‌های کمبود و بازسازی تسهیلات و مسیرهای آسیب‌دیده، همچنین حداکثرکردن حداقل سطح رضایت در نقاط آسیب‌دیده به حداقل برسد [۹]. رنسیکاربوم و ماسون (۲۰۱۶) مدلی چندهدفه را مبتنی بر برنامه‌ریزی آرمانی برای یکپارچه‌سازی عملیات توزیع کالاهای امدادی و بازسازی تسهیلات و مسیرهای آسیب‌دیده ارائه دادند. آنان اهداف آرمانی برای حداکثر هزینه‌های قابل‌قبول، حداکثر کمبود مجاز و حداقل سطح رضایت که باید برآورده شود، درنظر گرفتند و میزان انحراف از این آرمان‌ها را به‌عنوان متغیر تصمیم در تابع هدف لحاظ کردند [۱۰]. رودریگز و همکاران (۲۰۱۷) مدلی چندهدفه را به‌منظور تعیین مکان‌های تسهیلات امدادی در مرحلۀ قبل از بحران، میزان کالایی که در هریک از این تسهیلات ذخیره می‌شود، تخصیص کالاهای امدادی به نقاط آسیب‌دیده و همچنین تعداد نیروی موردنیاز برای انجام عملیات را تعیین کردند و سیستم اطلاعات جغرافیایی را به‌منظور جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز به‌کار بردند [۱۱]. توفیقی و همکاران (۲۰۱۶) مدل مختلط تصادفی-امکانی سناریو-محور را به‌منظور یکپارچه‌سازی عملیات امدادرسانی در مرحلۀ قبل و بعد بحران ارائه دادند. در مرحلۀ قبل از بحران، تصمیم‌های مربوط به مکان تسهیلات امدادی و میزان پیش‌ذخیره‌سازی کالاهای امدادی در هریک از این تسهیلات و در مرحلۀ پاسخ به بحران میزان کالایی که به هریک از نقاط آسیب‌دیده ارسال می‌شود، همچنین میزان کمبود در هریک از نقاط آسیب‌دیده تعیین می‌شود [۲]. یانگ یی و همکاران (۲۰۱۷) مدل تصادفی دوسطحی را برای تخصیص کالاهای امدادی به نقاط آسیب‌دیده با حداقل زمان ممکن ارائه دادند [۱۲]. زکائی و همکاران (۲۰۱۶) مدل بهینه‌سازی استوار را به‌منظور طراحی شبکۀ لجستیک بشردوستانه با هدف حداقل‌کردن کل هزینه‌ها و حداکثرکردن سطح رضایت مردم آسیب‌دیده ارائه دادند. آن‌ها عدم قطعیت را در پارامترهای مرتبط با عرضه و تقاضای کالای امدادی، همچنین تمام پارامترهای هزینه لحاظ کردند [۱].

با توجه به پژوهش‌های انجام‌شده می‌توان استنباط کرد که تاکنون تأثیرات درنظرگرفتن عملیات مرحلۀ بازسازی تسهیلات و مسیرهای امدادی بر ذخیره‌سازی اقلام امدادی به‌صورت جدی بررسی نشده است. تنها وایستجند و همکاران (۲۰۱۵) تأثیر خرابی مسیرها را بر عملیات قبل از بحران بررسی کردند؛ بنابراین در این مقاله، یک مدل مختلط برنامه‌ریزی امکانی-تصادفی چندهدفۀ چنددوره‌ای ارائه شده است. در مرحلۀ قبل از بحران، میزان پیش‌ذخیره‌سازی کالاهای امدادی در هریک از انبارها تعیین می‌شود. در مرحلۀ پاسخ به بحران، میزان توزیع کالاهای امدادی به هریک از نقاط تقاضا، میزان کمبود کالای امدادی در هریک از نقاط تقاضا و تصمیم‌های مربوط به بازسازی مسیرها و انبارهای آسیب‌دیده دریافت می‌شود. شایان ذکر است مدل ارائه‌شده در این مقاله، توسعه‌یافتۀ مدل مقاله [۱۰] است که با درنظرگرفتن نوآوری‌ها و شرایط زیر توسعه داده شده است:

- کالاهای امدادی در دو بخش مصرف‌شدنی و مصرف‌نشدنی درنظر گرفته شده است؛
- مرحلۀ پاسخ به بحران به‌صورت چنددوره‌ای (برای پوشش بهنگام‌سازی تدریجی تقاضاها) درنظر گرفته شده است؛
- یکپارچه‌سازی عملیات مربوط به ذخیره‌سازی هریک از اقلام امدادی در مرحلۀ قبل بحران و توزیع آن‌ها بین نقاط تقاضا پس از وقوع بحران؛
- درنظرگرفتن بازسازی جزئی انبارها و مسیرهای آسیب‌دیده در مرحلۀ پاسخ به بحران؛
- درنظرگرفتن عدم قطعیت شناختی در پارامترهای مربوط به اهداف آرمانی، میزان تقاضای نقاط آسیب‌دیده و تمامی پارامترهای هزینه‌ای به‌صورت اعداد فازی مثلثی؛
- استفاده از برنامه‌ریزی مختلط امکانی-تصادفی سناریو-محور برای مقابله با پارامترهای غیرقطعی.

تعریف مسئله

در این پژوهش، مدل امکانی-تصادفی دوسطحی چندهدفهٔ چند دوره‌ای-چندکالایی مبتنی بر برنامه‌ریزی آرمانی به‌منظور یکپارچه‌سازی عملیات قبل و بعد بحران و همچنین بازسازی مسیرها و تسهیلات امدادی آسیب‌دیده ارائه شده است. کالاهای امدادی به دو صورت مصرف‌شدنی (آب و غذا) و مصرف‌نشدنی (چادر) درنظر گرفته شده است. در سطح اول زنجیرهٔ بشردوستانهٔ مورد بررسی، تأمین‌کنندگان وجود دارند که مکان و ظرفیت آن‌ها مشخص است. در سطح دوم، انبارهای امدادی قرار دارند که مکان و ظرفیت این انبارها مشخص است و در مرحلهٔ قبل از بحران، پیش‌ذخیره‌سازی کالاهای امدادی در هریک از این انبارها تعیین می‌شود. در سطح سوم نیز نقاط آسیب‌دیده قرار دارند که کمبود در این مکان‌ها با جریمه همراه است. هنگام وقوع بحران، کالاهای امدادی از تأمین‌کنندگان به انبارها و از انبارها به نقاط تقاضا به‌صورت چنددوره‌ای ارسال می‌شود. در زمان وقوع بحران ممکن است تعدادی از تسهیلات امدادی (انبارها و تأمین‌کنندگان) و مسیرهای بین تسهیلات امدادی دچار اختلال شوند که در مرحلهٔ پاسخ به بحران با توجه به بودجهٔ درنظر گرفته‌شده بازسازی می‌شوند. تأمین‌کنندگان آسیب‌دیده یا به‌طور کامل بازسازی می‌شوند و به حالت قبل بحران برمی‌گردند یا اینکه بازسازی نمی‌شوند. انبارهای امدادی آسیب‌دیده نیز یا بازسازی نمی‌شوند یا در صورت بازسازی به‌طور کامل به حالت قبل بحران برمی‌گردند یا به میزان نصف ظرفیت قبل بحران بازسازی و تعمیر می‌شوند. مسیرهای آسیب‌دیده بین تسهیلات نیز به میزان صفر، ۲۵ درصد، ۵۰ درصد، ۷۵ درصد یا ۱۰۰ درصد قابل‌تعمیر است. به‌منظور واردکردن ترجیحات تصمیم‌گیرندگان در مدل ارائه‌شده از برنامه‌ریزی آرمانی استفاده شده است. ترجیحات تصمیم‌گیرندگان درمورد میزان هزینه‌های قابل‌قبول و حداقل سطح رضایت قابل‌قبول با توجه به اخذ آن‌ها از خبرگان، به‌صورت اعداد مثلثی فازی درنظر گرفته شده است.



شکل ۱. شبکهٔ زنجیرهٔ تأمین مورد نظر

مفروضات مدل

- کمبود مجاز است و متناسب با آن هزینه درنظر گرفته می‌شود.
- فساد کالاهای امدادی در این مسئله درنظر گرفته نشده است؛ بنابراین بازپرسازی کالاهای فسادپذیر به‌صورت دوره‌ای بر اساس تاریخ انقضا انجام می‌شود.
- مکان انبارهای امدادی از قبل مشخص است.
- کالاهای امدادی به دو صورت مصرف‌شدنی و مصرف‌نشدنی درنظر گرفته شده‌اند و میزان کمبود کالاهای امدادی مصرف‌نشدنی در هر دوره، در دورهٔ بعدی جبران می‌شود، در صورتی که کمبود کالاهای امدادی مصرف‌شدنی به‌صورت کمبود ازدست‌رفته درنظر گرفته شده است.

مجموعه‌ها

$N(A)$	مجموعهٔ گره‌ها (کمان‌ها)
$S(D)$	مجموعهٔ نقاط عرضه (تقاضا)
W	مجموعهٔ انبارهای امدادی
$S^F(S^D)$	مجموعهٔ نقاط عرضهٔ کارکردی (آسیب‌دیده)
$W^F(W^D)$	مجموعهٔ انبارهای کارکردی (آسیب‌دیده)
Λ	مجموعهٔ کمان‌های بین نقاط عرضه و انبارها
Π	مجموعهٔ کمان‌های بین انبارها و نقاط تقاضا
$\Lambda^F(\Lambda^D)$	مجموعهٔ کمان‌های کارکردی

(آسیب‌دیده) بین نقاط عرضه و انبارها

$\Pi^F (\Pi^D)$ مجموعهٔ کمان‌های کارکردی (آسیب‌دیده) بین انبارها و نقاط تقاضا

Γ^N مجموعهٔ نقاط آسیب‌دیده

Γ^A مجموعهٔ کمان‌های آسیب‌دیده

D مجموعهٔ نقاط تقاضا

C مجموعهٔ کالاهای امدادی

T مجموعهٔ دوره‌های زمانی

P مجموعهٔ سناریوهای اختلال

پارامترها

S_i ظرفیت تأمین‌کنندهٔ $i \in S$ برای عرضهٔ کالای امدادی

$\tilde{d}_{cjtp}$ میزان تقاضای کالای امدادی c در نقطهٔ آسیب‌دیدهٔ $j \in D$ در دورهٔ t تحت سناریوی p

α_i ظرفیت انبار $i \in W$ برای ذخیره‌سازی کالای امدادی

δ_{ij}^{SW} ظرفیت مسیرهای بین عرضه‌کننده‌ها و انبارها برای حمل کالاهای امدادی $(i, j) \in \Lambda$

δ_{ij}^{WD} ظرفیت مسیرهای بین انبارها و نقاط تقاضا برای حمل کالاهای امدادی $(i, j) \in \Pi$

ϕ_{ci} ظرفیت مورد نیاز برای ذخیره‌سازی هر واحد کالای امدادی نوع c در انبار $i \in W$

ψ_{cij}^{SW} ظرفیت مورد نیاز برای حمل هر واحد کالای امدادی c در مسیرهای بین عرضه‌کننده‌ها و انبارها $(i, j) \in \Lambda$

ψ_{cij}^{WD} ظرفیت مورد نیاز برای حمل هر واحد کالای امدادی c در مسیرهای بین انبارها و نقاط تقاضا $(i, j) \in \Pi$

ρ_{cip} نسبت کالای امدادی c قابل‌مصرف در انبار $i \in W$ تحت سناریوی p

$a\tilde{q}_c$ هزینهٔ نگه‌داری هر واحد کالای c

$\tilde{\pi}_c$ هزینهٔ کمبود هر واحد کالای c؛

$\tilde{C}_{ij}$ هزینهٔ حمل‌ونقل هر واحد کالای امدادی به ازای هر کیلومتر

$\tilde{\eta}_i^S (\tilde{\eta}_i^W)$ هزینهٔ بازسازی تأمین‌کنندهٔ آسیب‌دیدهٔ $i \in S^D$ (انبار آسیب‌دیدهٔ $i \in W^D$)

$\tilde{\eta}_{ij}^{SW}$ هزینهٔ بازسازی مسیر آسیب‌دیده بین تأمین‌کننده‌ها و انبارها $(i, j) \in \Lambda^D$

$\tilde{\eta}_{ij}^{WD}$ هزینهٔ بازسازی مسیر آسیب‌دیده بین انبارها و نقاط تقاضا $(i, j) \in \Pi^D$

$b^N (b^A)$ بودجهٔ دردسترس برای بازسازی تسهیلات آسیب‌دیده (مسیرهای آسیب‌دیده)

b^F بودجهٔ دردسترس برای کل هزینهٔ حمل‌ونقل

$\tilde{V}^S (\tilde{V}^W)$ هزینهٔ ثابت بازسازی تأمین‌کننده‌های آسیب‌دیده (انبارهای آسیب‌دیده)

$\theta^N (\theta^A)$ تعداد تسهیلات مجاز بازسازی (شامل تأمین‌کننده‌ها و انبارها)؛

$\tilde{\omega}^{SW}$ هزینهٔ ثابت بازسازی مسیرهای آسیب‌دیده بین تأمین‌کننده‌ها و انبارها

$\tilde{\omega}^{WD}$ هزینهٔ ثابت بازسازی مسیرهای آسیب‌دیده بین انبارها و نقاط تقاضا

d_{ij}^{OD} فاصلهٔ بین هر زوج مبدأ و مقصد $(i, j) \in A$

p_p احتمال وقوع سناریوی p.

پارامترهای مرتبط با اهداف آرمانی

$\tilde{g}_c$ حداقل سطح عدالت قابل‌قبول برای تصمیم‌گیرنده به‌منظور برآورده‌کردن تقاضای مناطق آسیب‌دیده

$\tilde{g}_F$ حداکثر کل هزینه‌ای که تصمیم‌گیرنده تمایل به پرداخت آن به‌منظور بازسازی شبکهٔ آسیب‌دیده، هزینه‌های حمل کالاهای امدادی، هزینه‌های کمبود و هزینه‌های ذخیره‌سازی اقلام امدادی دارد.

پارامترهای مرتبط با بازسازی مسیرها و تسهیلات آسیب‌دیده

$f_i^{W_1} (f_i^{W_2})$ ۵۰ درصد، ۱۰۰ درصد بازسازی انبار امدادی آسیب‌دیده $i \in W^D$

$f_{ij}^{SW1}, (f_{ij}^{SW2}), (f_{ij}^{SW3})$ ۲۵ درصد، ۵۰ درصد، ۱۰۰ درصد بازسازی مسیرهای آسیب‌دیده بین

تأمین‌کننده‌ها و انبارها $(i,j)\in\Lambda^D$

$f_{ij}^{WD1},(f_{ij}^{WD2}),(f_{ij}^{WD3})$ ۲۵ درصد، ۵۰ درصد، ۱۰۰ درصد بازسازی مسیرهای آسیب‌دیدهٔ بین انبارها و نقاط تقاضا $(i,j)\in\Pi^D$

متغیرهای تصمیم

X_{cijtp} میزان کالای امدادی c که از طریق مسیر $(i,j)\in A$ در دورهٔ t تحت سناریوی p ارسال می‌شود.

K_{ip} برابر یک است، اگر تأمین‌کنندهٔ آسیب‌دیدهٔ $i\in S^D$ تحت سناریوی p بازسازی شود. در غیر این صورت برابر صفر است.

L_{ip} میزان بازسازی جزئی انبار آسیب‌دیده $i\in W^D$ تحت سناریوی p

M_{ijp} میزان بازسازی جزئی مسیر آسیب‌دیده بین تأمین‌کننده و انبارها تحت سناریوی p. $(i,j)\in\Lambda^D$

Y_{ij}^{WD} برابر یک است اگر مسیر آسیب‌دیده بین انبارها و تأمین‌کننده‌ها بازسازی شود. در غیر این صورت برابر صفر است.

Y_{ij}^{SW} برابر یک است اگر مسیر آسیب‌دیده بین تأمین‌کننده‌ها و انبارها مورد بازسازی قرار بگیرد. در غیر این صورت برابر صفر است.

q_{ci} میزان کالای امدادی c که در انبار $i\in W$ در مرحلهٔ قبل بحران ذخیره می‌شود.

N_{ijp} میزان بازسازی جزئی مسیر آسیب‌دیده بین انبارها و نقاط تقاضا تحت سناریوی p. $(i,j)\in\Lambda^D$

b_{cjtp} میزان کمبود کالای امدادی c در نقطهٔ آسیب‌دیدهٔ $j\in D$ در دوره t تحت سناریوی p.

Y_i^S برابر یک است اگر تأمین‌کنندهٔ آسیب‌دیده $i\in S^D$ بازسازی شود. در غیر این صورت برابر صفر است.

Y_i^W برابر یک است اگر انبار آسیب‌دیده $i\in W^D$ بازسازی شود. در غیر این صورت برابر صفر است.

مدل ریاضی چندهدفهٔ مبتنی بر برنامه‌ریزی آرمانی فازی

در این بخش، مدل چندهدفهٔ چنددوره‌ای مبتنی بر برنامه‌ریزی آرمانی فازی ارائه شده است.

$$\min Z_1=\sum_{i\in T}\sum_{c}a\tilde{q}_c q_{ic}+\sum_{p}p_p\left(\begin{array}{l}\sum_{i\in S^D}\tilde{\eta}_i^S k_{ip}+\sum_{i\in T^D}\tilde{\eta}_i^w l_{ip}+\\ \sum_{i\in S^D}\tilde{v}^S Y_i^S+\sum_{i\in T^D}\tilde{v}^W Y_i^W+\\ \sum_{(i,j)\in\Lambda^D}\tilde{\lambda}_{ij}^{SW}M_{ijp}+\sum_{(i,j)\in\Pi^D}\tilde{\lambda}_{ij}^{WD}N_{ijp}+\\ \sum_{(i,j)\in\Lambda^D}W^{SW}Y_{ij}^{SW}+\sum_{(i,j)\in\Lambda^D}W^{WD}Y_{ij}^{WD}+\\ \sum_{(i,j)\in A}\sum_{c}\sum_{t}C_{ij}d_{i,j}^{OD}X_{cijtp}+\sum_{j}\sum_{c}\sum_{t}\tilde{\pi}_c b_{cjts}\end{array}\right) \quad (۱)$$

$$\max Z_2=\sum_{p}p_pV_p \quad (۲)$$

$$\min Z_3=D^{+c} \quad (۳)$$

$$\min Z_4=D^{-F} \quad (۴)$$

تابع هدف ۱ به‌دنبال حداقل‌کردن هزینه‌های نگه‌داری کالاهای امدادی در مرحلهٔ قبل بحران، هزینه‌های متغیر و ثابت بازسازی تسهیلات و مسیرهای شبکه، هزینه‌های حمل کالاهای امدادی و هزینهٔ کمبود کالاهای امدادی در نقاط تقاضاست. تابع هدف ۲ با درنظرگرفتن محدودیت ۵ سعی در حداکثرکردن سطح عدالت در توزیع کالاهای امدادی بین نقاط آسیب‌دیده را دارد. توابع هدف ۳ و ۴ متغیرهای انحراف از اهداف آرمانی درنظر گرفته‌شده برای هزینه و عدالت را حداقل می‌کنند.

$$V_p \le \left(\sum_{i \in W} \sum_c \sum_t \frac{X_{cijtp}}{\tilde{d}_{cjtp}} \right) 100 \qquad \forall j \in D, \mathrm{p} \in \mathrm{P} \tag{۵}$$

$$\sum_c \phi_c q_{ic} \le \alpha_i \qquad \forall i \in W \tag{۶}$$

محدودیت ۶ مرتبط با ظرفیت انبارهاست.

$$\rho_{cjp} q_{jc} + \sum_{i \in S} X_{cijtp} - \sum_{k \in D} X_{ciktp} = I_{cjtp} \qquad \forall j \in W, c \in C, p \in P, t = 1 \tag{۷}$$

$$I_{cj(t-1)\mathrm{p}} + \sum_{i \in S} X_{cijtp} - \sum_{k \in D} X_{cikp} = I_{cjtp} \qquad \forall j \in W, c \in C, p \in P, t > 1 \in T \tag{۸}$$

محدودیت‌های ۷ و ۸ مرتبط با معادلات تعادل موجودی است. میزان موجودی در هر دوره با میزان موجودی باقیمانده از دورهٔ قبلی به‌علاوه میزان موجودی که از تأمین‌کننده در دورهٔ مورد نظر خریداری می‌شود برابر است.

$$\sum_{i \in W} X_{cijtp} + b_{cjtp} = \tilde{d}_{cjtp} \qquad \forall j \in D, p \in P, t \in T, c = 1 \tag{۹}$$

$$\sum_{i \in W} X_{cijtp} + b_{cjtp} = \tilde{d}_{cjtp} + b_{cj(t-1)\mathrm{p}} \qquad \forall j \in D, p \in P, t \in T, C = 2 \tag{۱۰}$$

محدودیت‌های ۹ و ۱۰ به‌ترتیب بیانگر محدودیت ارضای تقاضای محصولات مصرف‌شدنی و مصرف‌نشدنی هستند.

$$\sum_{j \in W} \sum_c \sum_t X_{cijtp} \le S_i \qquad \forall i \in S^F, \mathrm{p} \in \mathrm{P} \tag{۱۱}$$

$$\sum_{j \in W} \sum_c \sum_t X_{cijtp} \le S_i K_{ip} \qquad \forall i \in S^D, \mathrm{p} \in \mathrm{P} \tag{۱۲}$$

محدودیت‌های ۱۱ و ۱۲ ظرفیت تأمین‌کنندگان برای ارسال کالاهای امدادی را محدود می‌کنند.

$$\sum_{j \in D} X_{cijtp} \le I_{citp} \qquad \forall i \in W, p \in P, c \in C \tag{۱۳}$$

محدودیت ۱۳ میزان ارسال کالای امدادی در هر دوره را محدود می‌کند.

$$\sum_c I_{cit\,\mathrm{p}} \le \alpha_i \qquad \forall i \in W^F, c \in C, p \in P \tag{۱۴}$$

$$\sum_c I_{cit\,\mathrm{p}} \le \alpha_i L_{ip} \qquad \forall i \in W^D, c \in C, p \in P \tag{۱۵}$$

محدودیت‌های ۱۴ و ۱۵ محدودیت ظرفیت انبارها را نشان می‌دهند.

محدودیت‌های ۱۶ و ۱۷ محدودیت ظرفیت مسیرهای بین تأمین‌کنندگان و انبارها را برای ارسال اقلام امدادی نشان می‌دهند. محدودیت‌های ۱۸ و ۱۹ نیز بیان‌کنندهٔ محدودیت ظرفیت مسیرهای بین انبارها و نقاط تقاضا هستند.

طبق محدودیت‌های ۲۰ تا ۲۳ هزینه‌های ثابت بازسازی تأمین‌کنندگان آسیب‌دیده (۲۰)، انبارهای آسیب‌دیده (۲۱)، مسیرهای آسیب‌دیده بین تأمین‌کنندگان و انبارها (۲۲) و مسیرهای آسیب‌دیده بین انبارها و نقاط تقاضا (۲۳) در صورتی درنظر گرفته می‌شوند که تسهیلات و مسیرهای آسیب‌دیده بازسازی شوند.

محدودیت‌های ۲۴ و ۲۵ حداکثر تعداد گره‌ها و مسیرهای قابل‌بازسازی و تعمیر را نشان می‌دهند.

محدودیت‌های ۲۶ و ۲۷ تصمیم‌های مربوط به بازسازی جزئی انبارهای آسیب‌دیده را در دو سطح ۵۰ درصد و ۱۰۰ درصد محدود می‌کنند.

محدودیت‌های ۲۸ و ۲۹ تصمیم‌های مربوط به بازسازی جزئی مسیرهای آسیب‌دیده بین تأمین‌کنندگان و انبارها را به سطوح ۲۵ درصد، ۵۰ درصد، ۷۵ درصد و ۱۰۰ درصد و محدودیت‌های ۳۰ و ۳۱ تصمیم‌های مربوط به بازسازی جزئی مسیرهای آسیب‌دیده را محدود می‌کنند.

محدودیت‌های ۳۲ تا ۳۴ محدودیت بودجهٔ مرتبط با بازسازی تسهیلات آسیب‌دیده را بیان می‌کنند.

$$\psi_{ij}^{ST} X_{c_{ijt\Omega}} \le \delta_{ij}^{ST} \qquad \forall (i,j) \in \Lambda^F, t \in T, c \in C, p \in P \tag{۱۶}$$

$$\psi_{ij}^{SW} X_{c_{ijtp}} \le \delta_{ij}^{SW} M_{ijp} \qquad \forall (i,j) \in \Lambda^D, t \in T, c \in C, p \in P \tag{۱۷}$$

$$\psi_{ij}^{WD} X_{c_{ijt\Omega}} \le \delta_{ij}^{WD} \qquad \forall (i,j) \in \Lambda^D, t \in T, c \in C, p \in P \tag{۱۸}$$

$$\psi_{ij}^{SW} X_{c_{ijtp}} \le \delta_{ij}^{SW} N_{ijp} \qquad \forall (i,j) \in \Pi^D, t \in T, c \in C, p \in P \tag{۱۹}$$

$$K_{jp} \le Y_j^S \qquad \forall j \in S^D, p \in P \tag{۲۰}$$

$$L_{jp} \le Y_j^W \qquad \forall j \in T^D, p \in P \tag{۲۱}$$

$$M_{ijp} \le Y_{ij}^{SW} \qquad \forall (i,j) \in \Lambda^D, p \in P \tag{۲۲}$$

$$N_{ijp} \le Y_{ij}^{WD} \qquad \forall (i,j) \in \Pi^D, p \in P \tag{۲۳}$$

$$\sum_{j\in S^D} k_{jp} + \sum_{j\in W^D} L_{jp} \le \theta^N \qquad \forall p\in P \tag{۲۴}$$

$$\sum_{(i,j)\in\Lambda^D} M_{ijp} + \sum_{(i,j)\in\Pi^D} N_{ijp} \le \theta^A \qquad \forall p\in P \tag{۲۵}$$

$$l_{is} = f_i^{W1} Q_i^{W1} + f_i^{W2} Q_i^{W2} \qquad \forall i,s \tag{۲۶}$$

$$l_{is} \le f_i^{W2} \qquad \forall i,s \tag{۲۷}$$

$$M_{ijp} = f_{ij}^{SW1} Q_{ij}^{SW1} + f_{ij}^{SW2} Q_{ij}^{SW2} + f_{ij}^{SW3} Q_{ij}^{SW3} \qquad \forall (i,j)\in\Lambda^D, p\in P \tag{۲۸}$$

$$M_{ijp} \le f_{ij}^{SW3} \qquad \forall (i,j)\in\Lambda^D, p\in P \tag{۲۹}$$

$$N_{ijp} = f_{ij}^{WD1} Q_{ij}^{WD1} +_{ij}^{WD2} f_{ij}^{WD2} Q + f_{ij}^{WD3} Q_{ij}^{WD3} \qquad \forall (i,j)\in\Pi^D, p\in P \tag{۳۰}$$

$$N_{ijp} \le f_{ij}^{WD3} \qquad \forall (i,j)\in\Pi^D, p\in P \tag{۳۱}$$

$$\sum_{i\in S^D} \tilde{\eta}_i^S l_{ip} + \sum_{i\in T^D} \tilde{\eta}_i^S l_{ip} + \sum_{i\in S^D} \tilde{v}^S Y_i^S + \sum_{i\in T^D} \tilde{v}^W Y_i^W \le b^N \qquad \forall p\in P \tag{۳۲}$$

$$\sum_{(i,j)\in\Lambda^D} \tilde{\lambda}_{ij}^{SW} M_{ij} + \sum_{(i,j)\in\Pi^D} \tilde{\lambda}_{ij}^{WD} N_{ij} + \sum_{(i,j)\in\Lambda^D} \tilde{W}^{SW} Y_{ij}^{SW} + \sum_{(i,j)\in\Lambda^D} \tilde{W}^{WD} Y_{ij}^{WD} \le b^A \qquad \forall p\in P \tag{۳۳}$$

$$\sum_{(i,j)\in A} \sum_c \sum_t C_{ij} d_{i,j}^{OD} X_{cijtp} \le b^F \qquad \forall p\in P \tag{۳۴}$$

$$\sum_{i\in T}\sum_c a\tilde{q}_c q_{ic} + \sum_p p_p \begin{pmatrix} \sum_{i\in S^D} \tilde{\eta}_i^S l_{ip} + \sum_{i\in T^D} \tilde{\eta}_i^S l_{ip} + \sum_{i\in S^D} \tilde{v}^S Y_i^S + \sum_{i\in T^D} \tilde{v}^W Y_i^W + \\ \sum_{(i,j)\in\Lambda^D} W^{SW} Y_{ij}^{SW} + \sum_{(i,j)\in\Lambda^D} W^{WD} Y_{ij}^{WD} + \\ \sum_{(i,j)\in\Lambda^D} \tilde{\lambda}_{ij}^{SW} M_{ij} + \sum_{(i,j)\in\Pi^D} \tilde{\lambda}_{ij}^{WD} N_{ij} + \\ \sum_{(i,j)\in A} \sum_c \sum_t C_{ij} d_{i,j}^{OD} X_{cijtp} + \sum_j \sum_c \sum_t \tilde{\pi}_c b_{cjts} \end{pmatrix} + D^{-c} - D^{+c} = \tilde{g}_c \tag{۳۵}$$

$$\sum_p p_p V_p + D^{-F} - D^{+F} = \tilde{g}_F \tag{۳۶}$$

محدودیت‌های ۳۵ و ۳۶ بیانگر محدودیت‌های آرمانی توابع هدف اول و دوم هستند.

$$K_{ip}, y_i^s, y_i^W, y_{ij}^{SW}, y_{ij}^{WD} \in \{0,1\} \tag{۳۷}$$

$$L_{ip}, M_{ip}, b_{cjtp}, q_{ci}, I_{citp}, X_{ijtp} \ge 0 \tag{۳۸}$$

محدودیت‌های ۳۷ و ۳۸ نوع متغیرهای تصمیم را نشان می‌دهند.

روش حل پیشنهادی

مرحلهٔ اول: تعیین مدل کمکی قطعی

در این پژوهش، به‌منظور برخورد با عدم قطعیت‌های شناختی در پارامترهای مدل از روش امکانی خیمنز [۱۳] به‌دلیل کارایی بالای آن استفاده شده است. این روش علاوه‌بر حفظ خطی‌بودن مسئله، تعداد توابع هدف و محدودیت‌های نامساوی را افزایش نمی‌دهد. روش خیمنز و همکاران بر مبنای مقدار و بازهٔ مورد انتظار طراحی شده است. همچنین به‌منظور حفظ کارایی و سادگی در محاسبات، از اعداد فازی مثلثی به‌منظور مدل‌سازی پارامترهای غیردقیق مدل استفاده شده است. فرض کنید $\tilde{\zeta}$ یک عدد فازی مثلثی است، تابع عضویت این عدد فازی $\mu_{\tilde{\zeta}}(x)$ به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu_{\xi}(x) = \begin{cases} f_{\zeta}(x) = \dfrac{x-\zeta^p}{\zeta^m-\zeta^p} & if\ \zeta^p \le x \le \zeta^m \\ 1 & if x = \zeta^m \\ g_{\zeta}(x) = \dfrac{\zeta^o - x}{\zeta^o - \zeta^m} & if\ \zeta^m \le x \le \zeta^0 \\ 0 & if x \le \zeta^p or x \ge \zeta^0 \end{cases} \tag{۳۹}$$

حال، فاصلهٔ مورد انتظار (EI) و امید ریاضی (EV) این عدد فازی مثلثی از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$EI(\tilde{\zeta}) = \left[E_1^{\zeta}\ E_2^{\zeta}\right] = \left[\int_0^1 f_{\zeta}^{-1}(x)dx \quad \int_0^1 g_{\zeta}^{-1}(x)dx\right] = \left[\frac{1}{2}(\zeta^p+\zeta^m) \quad \frac{1}{2}(\zeta^o+\zeta^m)\right] \tag{۴۰}$$

$$EV(\tilde{\zeta}) = \frac{E_1^{\zeta}+E_1^{\zeta}}{2} = \frac{\zeta^p + 2\zeta^m + \zeta^o}{4} \tag{۴۱}$$

همچنین برای جفت اعداد فازی $\tilde{a}$ و $\tilde{b}$، درجهٔ بزرگ‌تر بودن $\tilde{a}$ از $\tilde{b}$ با رابطهٔ زیر تعریف می‌شود:

$$\mu_M(x)=(\tilde{a},\tilde{b})=\begin{cases}1 & if\ E_1^a>E_2^b\\ \dfrac{E_2^a-E_1^b}{E_2^a-E_1^b-(E_1^a-E_1^a)} & if\ 0\in\left[E_1^a-E_2^b,E_2^a-E_1^b\right]\\ 0 & if\ E_2^a<E_1^b\end{cases} \quad (۴۲)$$

$\mu_M\left(\tilde{a},\tilde{b}\right)\geq\alpha$ به این معناست که در درجهٔ α، $\tilde{a}$ بزرگ‌تر مساوی $\tilde{b}$ بوده و به‌صورت $\tilde{a}\geq_\alpha\tilde{b}$ تعریف می‌شود. علاوه‌بر آنچه گفته شد، برای جفت عدد فازی $\tilde{a}$ و $\tilde{b}$ که در آن $\tilde{a}$ با $\tilde{b}$ برابر است داریم: $\tilde{a}\geq_{\frac{\alpha}{2}}\tilde{b},\tilde{a}\leq_{\frac{\alpha}{2}}\tilde{b}$

اکنون به مدل برنامه‌ریزی ریاضی فازی زیر که در آن همهٔ پارامترها به‌صورت فازی درنظر گرفته شده‌اند توجه کنید:

$$\begin{aligned}&\min z=\tilde{c}^t x\\ &\tilde{a}_i x\geq\tilde{b}_i x \qquad i=1,\dots,1\\ &\tilde{a}_i x=\tilde{b}_i x \qquad i=l+1,\dots,m\\ &x\geq 0\end{aligned} \quad (۴۳)$$

با توجه به روابط گفته‌شده و شرایط روش فازی خیمنز می‌توان مدل برنامه‌ریزی فازی ذکرشده را به‌صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned}&\min EV(\tilde{c})x\\ &[(1-\alpha)E_2^{a_i}+\alpha E_1^{a_i}]\mathrm{x}\geq (1-\alpha)E_1^{b_i}+\alpha E_2^{b_i} && i=1,\dots,l\\ &[(1-\frac{\alpha}{2})E_1^{a_i}+\frac{\alpha}{2}E_2^{a_i}]\mathrm{x}\leq (1-\frac{\alpha}{2})E_2^{b_i}+\frac{\alpha}{2}E_1^{b_i} && i=1+1,\dots,\mathrm{m}\\ &[(1-\frac{\alpha}{2})E_2^{a_i}+\frac{\alpha}{2}E_1^{a_i}]\mathrm{x}\geq (1-\frac{\alpha}{2})E_1^{b_i}+\frac{\alpha}{2}E_2^{b_i} && i=1+1,\dots,\mathrm{m}\end{aligned} \quad (۴۴)$$

در ادامه با توجه به معادلات و روابط ذکرشده، مدل فازی مسئله را به مدل قطعی تبدیل می‌کنیم. باید توجه داشت که محدودیت‌هایی که در قسمت مدل قطعی کمکی آورده نشده‌اند؛ چون نیاز به تغییر نداشته‌اند، به همان صورت در مدل قطعی کمکی استفاده می‌شوند.

$$\min\mathrm{Z}_1=\sum_{i\in T}\sum_c(\frac{a\tilde{q}_c^p+2a\tilde{q}_c^m+a\tilde{q}_c^o}{4})q_{ic}+\sum_p p_p\left(\begin{array}{l}\sum_{i\in T^D}(\frac{\eta_i^{Sp}+2\eta_i^{Sm}+\eta_i^{So}}{4})l_{ip}\\ \sum_{(i,j)\in\Lambda^D}(\frac{W^{SWp}+2W^{SWm}+W^{SWo}}{4})Y_{ij}^{SW}+\\ \sum_{(i,j)\in\Lambda^D}(\frac{W^{WDp}+2W^{WDm}+W^{WDo}}{4})Y_{ij}^{WD}+\\ \sum_{(i,j)\in\Pi^D}(\frac{\lambda_{ij}^{WDp}+2\lambda_{ij}^{WDm}+\lambda_{ij}^{WDo}}{4})N_{ij}+\\ \sum_{(i,j)\in A}\sum_c\sum_t C_{ij}d_{i,j}^{OD}X_{cijtp}+\\ \sum_j\sum_c\sum_t(\frac{\pi_c^p+2\pi_c^m+\pi_c^o}{4})b_{cjts}\\ +\sum_{(i,j)\in\Lambda^D}(\frac{\lambda_{ij}^{SWp}+2\lambda_{ij}^{SWm}+\lambda_{ij}^{SWo}}{4})M_{ij}\end{array}\right) \quad (۴۵)$$

$$\sum_{i\in W}X_{cijtp}+b_{cjtp}\leq(\alpha/2)(d^p{}_{cjtp}+d^m{}_{cjtp}/2)+(1-\alpha/2)(d^o{}_{cjtp}+d^m{}_{cjtp}/2) \qquad \forall j\in D,p\in P \quad (۴۶)$$

$$\sum_{i\in W}X_{cijtp}+b_{cjtp}\geq(1-\alpha/2)(d^o{}_{cjtp}+d^m{}_{cjtp}/2)+(\alpha/2)(d^p{}_{cjtp}+d^m{}_{cjtp}/2) \qquad \forall j\in D \quad (۴۷)$$

$$\sum_{i\in W}X_{cijtp}+b_{cjtp}\leq(1-\alpha/2)(d^o{}_{cjtp}+d^m{}_{cjtp}/2)+(\alpha/2)(d^p{}_{cjtp}+d^m{}_{cjtp}/2)+b_{cj(t-1)p} \qquad \forall j\in D,\mathrm{p}\in\mathrm{P} \quad (۴۸)$$

$$\sum_{i\in W}X_{cijtp}+b_{cjtp}\geq(1-\alpha/2)(d^o{}_{cjtp}+d^m{}_{cjtp}/2)+(\alpha/2)(d^p{}_{cjtp}+d^m{}_{cjtp}/2)+b_{cj(t-1)p} \qquad \forall j\in D,\mathrm{p}\in\mathrm{P} \quad (۴۹)$$

$$\begin{aligned}
&\sum_{i\in S^D}((\alpha)(\frac{\eta_i^{Sm}+\eta_i^{So}}{2})+(1-\alpha)(\frac{\eta_i^{Sp}+\eta_i^{Sm}}{2}))l_{ip}+\\
&\sum_{i\in T^D}(\alpha)(\frac{\eta_i^{Sm}+\eta_i^{So}}{2})+(1-\alpha)(\frac{\eta_i^{Sp}+\eta_i^{Sm}}{2})l_{ip}+\\
&\sum_{i\in S^D}((\alpha)(\frac{v^{sm}+v^{so}}{2})+(1-\alpha)(\frac{v^{sp}+v^{sm}}{2}))Y_i^{S}+ \qquad \forall p\in P\\
&\sum_{i\in T^D}((\alpha)(\frac{v^{wm}+v^{wo}}{2})+(1-\alpha)(\frac{v^{wp}+v^{wm}}{2}))Y_i^{W}\\
&\le(\alpha)(\frac{b^{Np}+b^{Nm}}{2})+(1-\alpha)(\frac{b^{Nm}+b^{No}}{2})
\end{aligned}$$ (۵۰)

$$\begin{aligned}
&\sum_{(i,j)\in\Lambda^D}((\alpha)(\frac{\lambda_{ij}^{SWp}+\lambda_{ij}^{SWm}}{2})+(1-\alpha)(\frac{\lambda_{ij}^{SWm}+\lambda_{ij}^{SWo}}{2}))M_{ij}+\\
&\sum_{(i,j)\in\Pi^D}(\alpha)(\frac{\lambda_{ij}^{WDp}+\lambda_{ij}^{WDm}}{2})+(1-\alpha)(\frac{\lambda_{ij}^{WDm}+\lambda_{ij}^{WDo}}{2}))N_{ij}+\\
&\sum_{(i,j)\in\Lambda^D}(\alpha)(\frac{W^{SWP}+W^{SWm}}{2})+(1-\alpha)(\frac{W^{SWm}+W^{SWo}}{2}))Y_{ij}^{SW}+ \qquad \forall p\in P\\
&\sum_{(i,j)\in\Lambda^D}(\alpha)(\frac{W^{WDP}+W^{WDm}}{2})+(1-\alpha)(\frac{W^{WDm}+W^{WDo}}{2}))Y_{ij}^{WD}\\
&\le(\alpha)(\frac{b^{Ap}+b^{Am}}{2})+(1-\alpha)(\frac{b^{Am}+b^{Ao}}{2})
\end{aligned}$$ (۵۱)

$$\begin{aligned}
&\sum_{(i,j)\in A}\sum_{c}\sum_{t}((\alpha)(\frac{C^m{}_{ij}+C^o{}_{ij}}{2})+\\
&(1-\alpha)(\frac{C^p{}_{ij}+C^m{}_{ij}}{2}))d_{i,j}^{OD}X_{cijtp} \qquad \forall p\in P\\
&\le(\alpha)(\frac{b^{Fp}+b^{Fm}}{2})+(1-\alpha)(\frac{b^{Fm}+b^{Fo}}{2})
\end{aligned}$$ (۵۲)

$$\min Z_1=\sum_{i\in T}\sum_{c}(\frac{aq_c^p+2aq_c^m+aq_c^o)}{4}q_{ic}+$$

$$\begin{aligned}
&\min Z_1=\sum_{i\in T}\sum_{c}(\frac{aq_c^p+2aq_c^m+aq_c^o)}{4}q_{ic}\\
&+\sum_{p}p_p\left(\begin{array}{l}
\sum_{i\in S^D}(\frac{v^{Sp}+2v^{Sm}+v^{So}}{4})Y_i^{S}+\\
\sum_{i\in T^D}(\frac{v^{Wp}+v^{Wm}+v^{Wo}}{4})Y_i^{W}+\\
\sum_{i\in S^D}(\frac{\eta_i^{Sp}+2\eta_i^{Sm}+\eta_i^{So}}{4})l_{ip}+\\
\sum_{i\in T^D}(\frac{\eta_i^{Sp}+2\eta_i^{Sm}+\eta_i^{So}}{4})l_{ip}\\
\sum_{(i,j)\in\Lambda^D}(\frac{W^{SWp}+2W^{SWm}+W^{SWo}}{4})Y_{ij}^{SW}+\\
\sum_{(i,j)\in\Lambda^D}(\frac{W^{WDp}+2W^{WDm}+W^{WDo}}{4})Y_{ij}^{WD}+\\
\sum_{(i,j)\in\Lambda^D}(\frac{\lambda_{ij}^{SWp}+2\lambda_{ij}^{SWm}+\lambda_{ij}^{SWo}}{4})M_{ij}+\\
\sum_{(i,j)\in\Pi^D}(\frac{\lambda_{ij}^{WDp}+2\lambda_{ij}^{WDm}+\lambda_{ij}^{WDo}}{4})N_{ij}+\\
\sum_{j}\sum_{c}\sum_{t}(\frac{\pi_c^p+2\pi_c^m+\pi_c^o}{4})b_{cjts}\\
\sum_{(i,j)\in A}\sum_{c}\sum_{t}C_{ij}d_{i,j}^{OD}X_{cijtp}+
\end{array}\right)\\
&\ge(\alpha)(\frac{g_c^o+g_c^m}{2})+(1-\alpha)(\frac{g_c^m+g_c^p}{2})
\end{aligned}$$ (۵۳)

$$\begin{aligned}
&\sum_{p}p_pV_p+D^{-F}-D^{+F}\ge\\
&(\alpha/2)(\frac{g_F^p+g_F^m}{2})+(1-\alpha/2)(\frac{g_F^m+g_F^o}{2})
\end{aligned}$$ (۵۴)

مرحلهٔ دوم: حل مدل چندهدفهٔ قطعی

در مرحلهٔ دوم از رویکرد ترابی و هسینی [۱۴] به‌منظور تبدیل مدل چندهدفهٔ قطعی به مدل تک‌هدفه استفاده شده است.

گام‌های روش ترابی و هسینی (TH) به‌صورت زیر است:

۱. تعیین جواب ایده‌ال مثبت (PIS) و جواب ایده‌ال منفی (NIS) برای هریک از توابع؛
۲. تعیین تابع عضویت فازی خطی برای هریک از توابع فازی خطی به‌صورت رابطهٔ زیر:
۳. تابع عضویت فازی تابع هدف حداکثرسازی از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود:

$$\mu_1(x)=\begin{cases}1 & z_1^{\alpha-PIS}\ge z_1\\ \dfrac{z_1^{\alpha-NIS}-z_1}{z_1^{\alpha-NIS}-z_1^{\alpha-PIS}} & z_1^{\alpha-PIS}\le z_1\le z_1^{\alpha-NIS}\\ 0 & z_1^{\alpha-NIS}\le z_1\end{cases} \quad (۵۵)$$

عضویت فازی تابع هدف حداقل‌سازی از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود:

$$\mu_1(x)=\begin{cases}1 & z_1^{\alpha-PIS}\le z_1\\ \dfrac{z_1-z_1^{\alpha-NIS}}{z_1^{\alpha-PIS}-z_1^{\alpha-NIS}} & z_1^{\alpha-NIS}\le z_1\le z_1^{\alpha-PIS}\\ 0 & z_1^{\alpha-NIS}\ge z_1\end{cases} \quad (۵۶)$$

$\mu_h(x)$ نشان‌دهندهٔ درجهٔ تأمین h امین تابع هدف است. درنهایت با کمک تابع ادغام‌سازی TH، مدل چندهدفهٔ قطعی به مدل تک‌هدفه تبدیل می‌شود:

$$\begin{aligned}&\max \beta(x)=\beta_0(\gamma)+(1-\gamma)\sum_h \theta_h \mu_h(x)\\ &s.t.\\ &\beta_0\le \mu_h(x) \qquad h=1,2\\ &x\in G(x), \beta and\ \beta_0\in[0,1]\end{aligned} \quad (۵۷)$$

G(x) نشان‌دهندهٔ ناحیه شدنی تشکیل‌شده براساس محدودیت‌های مدل قطعی کمکی است. همچنین γوθ_h به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ درجهٔ اهمیت h امین تابع هدف و ضریب جبران هستند.

نتایج حل مدل پیشنهادی

برای اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، مثال عددی با نرم‌افزار GAMS روی رایانه‌ای با حافظهٔ 3GB و پردازشگر Intel core 2 Duo (2MB Cache, 2.6 GHz) حل شده است. داده‌های مورد نیاز برای این مثال با اقتباس از داده‌های پژوهش پیشین [۱۲] شبیه‌سازی و تولید شده‌اند. در جدول ۱، مجموعه‌ای از داده‌های درنظر گرفته‌شده برای این مثال عددی آمده است.

جدول ۱. داده‌های مثال عددی

توزیع	پارامتر
۴	S^F
۲	S^D
۳	W^F
۴	W^D
۳	T
۳	P
۵	D

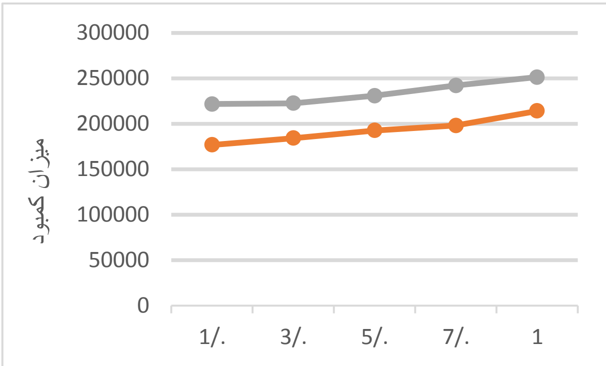
جدول ۲. میزان اقلام امدادی ذخیره‌شده

میزان ذخیره‌سازی اقلام غیرمصرفی	میزان ذخیره‌سازی اقلام مصرفی	سطح رضایت
۲۳۳۳	۸۸۸۹	۰/۱
۱۵۳۴۳	۸۸۸۹	۰/۳
۸۴۱۴	۷۲۷۹	۰/۵
۸۴۱۴	۶۵۴۳	۰/۷
۷۵۴۳	۳۶۷۳	۱

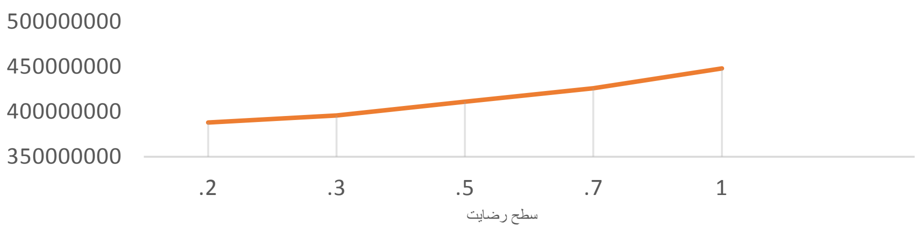
با توجه به جدول ۲، با افزایش سطح رضایت تصمیم‌گیرنده، ابتدا میزان ذخیره‌سازی اقلام امدادی تا قبل از سطح رضایت ۰/۵ افزایش می‌یابد که موجب افزایش هزینه‌ها می‌شود. در مقابل، میزان کمبود کاهش یافته و سطح رضایت نقاط آسیب‌دیده افزایش می‌یابد. با افزایش سطح رضایت از مقدار ۰/۵ به‌منظور ایجاد تعادل بین اهداف حداقل‌کردن هزینه‌ها و حداکثرکردن سطح رضایت نقاط آسیب‌دیده، میزان افزایش در ذخیره‌سازی اقلام امدادی کاهش می‌یابد.

با توجه به نمودار ۱، افزایش سطح رضایت به این معنی است که امکان برآورده‌شدن تقاضای نقاط آسیب‌دیده افزایش می‌یابد. از طرف دیگر به‌منظور پاسخ به سهم بیشتری از تقاضای نقاط آسیب‌دیده با افزایش سطح رضایت تصمیم‌گیرنده، هزینه‌های مرتبط با ذخیره‌سازی اقلام امدادی و هزینه‌های حمل‌ونقل افزایش می‌یابد.

همچنین ظرفیت عرضه‌کننده‌ها و انبارهای امدادی برای عرضه و پیش‌ذخیره‌سازی اقلام امدادی محدود است. درنتیجه، به‌منظور ایجاد تعادل بین توابع هزینه و سطح رضایت و همچنین وجود محدودیت در ظرفیت تسهیلات امدادی، با افزایش سطح رضایت، میزان کمبود اقلام مصرف‌شدنی و مصرف‌نشدنی افزایش می‌یابد. با توجه به جدول ۲ می‌توان به منطقی و قابل‌قبول‌بودن رفتار مدل ریاضی ارائه‌شده پی برد؛ زیرا با افزایش بیشتر از ۰/۵ در سطح رضایت نقاط آسیب‌دیده، میزان ذخیره‌سازی اقلام امدادی کاهش می‌یابد. درنتیجه میزان کمبود نیز افزایش خواهد یافت. بدین‌ترتیب، درنظرگرفتن مدل فازی ابزار مناسبی را در اختیار مدیران و برنامه‌ریزان قرار می‌دهد. به‌نحوی‌که با توجه به مقداری که برای سطح رضایت نقاط تقاضا درنظر می‌گیرند، اقدام به برنامه‌ریزی مناسب برای خرید، ذخیره‌سازی و توزیع کالاهای امدادی انجام دهند. درنهایت می‌توان به‌عنوان پیشنهاد مدیریتی، اقدام به خرید اقلام امدادی را برای مناطق آسیب‌دیده از سازمان‌های ملی و بین‌المللی در مرحلهٔ پاسخ به بحران مدنظر قرار داد. البته برای چنین عملیاتی، برنامه‌های تأمین مشخصی باید درنظر گرفته شود.



نمودار ۱. نمایش تغییرات میزان کمبود با تغییرات سطح رضایت تصمیم‌گیرنده



نمودار ۲. نمایش تغییرات هزینه در برابر تغییرات سطح رضایت تصمیم‌گیرنده

جدول ۳. نمایش تأثیر تغییرات در میزان آرمان درنظر گرفته‌شده

مقدار تابع هدف دوم (10^8)	مقدار تابع هدف اول (10^8)	مقدار کمبود اقلام مصرف‌نشدنی	مقدار کمبود اقلام مصرف‌شدنی	مقدار اقلام امدادی مصرف‌نشدنی	مقدار اقلام امدادی مصرف‌شدنی	درصد تغییر در سطح آرمان
۲/۶	۳/۲۷	۱۳۸۵۹۵	۱۳۱۷۱۲	۶۷۷۶۸	۷۵۴۱۲	۰/۱
۲/۱۸	۳/۲۷	۱۳۳۱۳۲	۱۳۷۱۷۵	۷۲۹۹۰	۷۰۱۹۰	۰/۱۵
۱/۶۵	۳/۲۹	۱۵۵۶۴۲	۱۱۹۱۱۵	۶۰۵۲۷	۸۵۴۱۴	۰/۲۵
۱/۸۷	۳/۳۲	۱۲۶۵۴۸	۱۲۵۲۰۱	۷۲۳۰۳	۷۳۶۳۸	۰/۳۵
۱/۹۹	۱/۲۷	۱۲۱۸۶۲۹	۱۰۳۵۵۰	۷۳۳۴۵	۸۱۳۴۶	۰/۴۵
½	۳/۱۱	۱۱۴۸۶۷	۱۲۲۹۵	۶۲۰۳۷	۵۳۹۷۸	۰/۵۰

نمودار ۲ تغییرات تابع هدف TH را در برابر تغییرات سطح رضایت تصمیم‌گیرنده نمایش می‌دهد. با افزایش این سطح، مقدار تابع هدف TH افزایش می‌یابد و در ادامه بعد از رسیدن به مقدار مشخصی میزان افزایش در تابع هدف TH روند نزولی به خود می‌گیرد. در جدول ۳، تأثیر تغییرات سطح آرمان را بر میزان ذخیره‌سازی اقلام امدادی، مقدار کمبود هریک از اقلام امدادی و تأثیر آن بر توابع هدف اول و دوم نمایش داده شده است. با توجه به سطح آرمان‌های درنظر گرفته‌شده، مقدار ذخیره‌سازی اقلام امدادی در برابر مقدار کمبود ایجادشده بسیار کم است؛ بنابراین همان‌طور که پیش از این ذکر شد، در این موارد یکی از اقدام‌های مناسب مدیریتی می‌تواند جبران کمبود و ارضای تقاضای نقاط آسیب‌دیده از طریق سازمان‌های ملی و بین‌المللی باشد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، مدل چندهدفهٔ چنددوره‌ای-چندکالایی مبتنی بر برنامه‌ریزی آرمانی فازی به‌منظور یکپارچه‌سازی عملیات قبل از بحران با عملیات توزیع کالاهای امدادی و بازسازی انبارها و مسیرهای آسیب‌دیده در مرحلهٔ پس از بحران ارائه شده است. در مرحلهٔ قبل از بحران، میزان ذخیره‌سازی اقلام امدادی در انبارها تعیین می‌شود و در مرحلهٔ پاسخ به بحران نیز دربارهٔ به توزیع کالاهای امدادی در میان نقاط آسیب‌دیده و بازسازی انبارها و مسیرهای آسیب‌دیده تصمیم‌گیری می‌شود. مدل برنامه‌ریزی آرمانی درنظر گرفته‌شده شامل اهداف حداقل‌کردن هزینه‌ها و افزایش سطح عدالت در توزیع کالاهای امدادی با درنظرگرفتن محدودیت‌های بودجه و ظرفیت است. توجه به آرمان برای هریک از اهداف سبب می‌شود تا نظرات تصمیم‌گیرنده در برنامه‌ریزی و نتایج مدل تأثیر داشته باشد و موجب افزایش انعطاف‌پذیری در تصمیم‌گیری‌ها می‌شود. ابتدا به‌دلیل غیرقطعی‌بودن پارامترهای مرتبط با اهداف آرمانی و پارامترهای تقاضا و هزینه، از روش امکانی خیمنز برای تبدیل مدل امکانی به یک مدل معادل قطعی استفاده شده است. سپس مدل چندهدفه قطعی با روش ترابی و حسینی به مدلی تک‌هدفه تبدیل شده و در نرم‌افزار GAMS کد نویسی شده است. در ادامه نیز مثال عددی ارائه و نتایج حاصل تحلیل شده است.

درنهایت، حل مدل در ابعاد بزرگ به‌کمک الگوریتم‌های فراابتکاری، درنظرگرفتن مسائل مسیریابی در زمان اختلال، توجه به وقوع چندین بحران هم‌زمان می‌تواند به‌عنوان مطالعات آتی مدنظر قرار بگیرد.

منابع

1. Zokaee, S., Bozorgi-Amiri, A., and Sadjadi, S. J. (2016). “A Robust Optimization Model for Humanitarian Relief Chain Design Under Uncertainty”, *Appl. Math. Model*, Vol. 40, No. 17–18, PP. 7996–8016.
2. Tofighi, S., Torabi, S. A., and Mansouri, S. A. (2016). “Humanitarian Logistics Network Design Under Mixed Uncertainty”, *Eur. J. Oper. Res.*, Vol. 250, No. 1, PP. 239–250.
3. Balcik, B., and Beamon, B. M. (2008). “Facility Location in Humanitarian Relief”, *Int. J. of Log. R. Res. and App*, Vol. 11, No. 2, PP. 101–121.
4. Çelik, M. (2017). “Network Restoration and Recovery in Humanitarian Operations: Framework, Literature Review, and Research Directions”, *Surv. Oper. Res. Manag. Sc*i, Vol. 21, No. 2, PP. 47-61.
5. Grass, E., and Fischer, K. (2016). “Two-Stage Stochastic Programming in Disaster Management: A Literature Survey”, *Surv. Oper. Res. Manag. Sci.*, Vol. 21, No. 2, PP. 85-100.
6. Balcik, B., Deniz, C., and Kundakcioglu, O. E. (2016).“A Literature Review on Inventory Management in Humanitarian Supply Chains”, *Surv. Oper. Res. Manag. Sci.*, Vol. 21, No. 2, PP. 101-116.
7. Bozorgi Amiri, A., Jabalameli, M. S., and Mirzapour Al-E-Hashem, S. M. J. (2013). “A Multi-Objective Robust Stochastic Programming Model for Disaster Relief Logistics Under Uncertainty”, *OR Spectr.*, Vol. 35, No. 4, PP. 905–933.
8. Döyen A., Aras, N., and Barbaroso, G. (2012). “A Two-Echelon Stochastic Facility Location Model for Humanitarian Relief Logistics”, *Optimization Letters*, Vol. 6, No. 6, PP. 1123–1145.

9. Ransikarbum, K. R., and Mason, S. J. (2014).“Multiple-Objective Analysis of Integrated Relief Supply and Network Restoration in Humanitarian Logistics Operations”, *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 54, No. 1, PP. 49–68.
10. Ransikarbum, K., and Mason, S. J. (2016). “Goal Programming-Based Post-Disaster Decision Making For Integrated Relief Distribution And Early-Stage Network Restoration”, *Int. J. Prod. Econ.*, Vol. 182, Pp. 324–341.
11. Rodríguez-Espíndola, O., Albores, P And Brewster, C. (2017). “Disaster Preparedness In Humanitarian Logistics: Acollaborative Approach For Resource Management In Floods”, *Eur. J. Oper. Res.*, Vol. 0, Pp. 1–16.
12. Yang, Y., Yang, Y. B., and Chen, Z. X. (2017). “Seismic Damage Assessment of RC Structures Under Shaking Table Tests Using the Modified Direct Stiffness Calculation Method”, *Eng. Struct.*, Vol. 131, PP. 574–586.
13. Journal, E., Jim, M., and Her, E. (2007). “Linear Programming with Fuzzy Parameters: An Interactive Method Resolution Linear Programming with Fuzzy Parameters: An Interactive Method Resolution”, *Eur. J. Oper. Res.*, Vol. 177, PP. 1599–1609.
14. Torabi, S. A., and Hassini, E. (2015). “An Interactive Possibilistic Programming Approach for Multiple Objective Supply Chain Master Planning an Interactive Possibilistic Programming Approach for Multiple Objective Supply Chain Master Planning”, *Fuzzy Sets and System*s, Vol. 159, PP. 193–214.

واژه‌های لاتین به‌ترتیب استفاده در متن

1. Fuzzy Goal Programming
2. Relief Supply Chain
3. Relief Prepositioning
4. Network Restoration
5. Integrated Pre- and Post-Disaster
6. Rolling Horizon
7. Partial Restoration