

یکپارچه‌سازی عملیات قبل و بعد بحران با در نظر گرفتن بازسازی مسیرها و انبارهای آسیب‌دیده

سید علی ترابی^{۱*}، منصور دودمان^۲، علی بزرگی امیری^۳

۱. استاد دانشکده مهندسی صنایع، پردیس فنی دانشگاه تهران

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه تهران

۳. استادیار دانشکده مهندسی صنایع پردیس دانشگاه‌های 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 به منظور یکپارچه‌سازی عملیات قبل و بعد بحران، همچنین بازسازی مسیرها و تسهیلات امدادی آسیب‌دیده ارائه شده است. توابع هدف در نظر گرفته‌شده شامل حداقل کردن کل هزینه‌ها (هزینه‌های حمل کالاهای امدادی میان تسهیلات، هزینه‌های ذخیره‌سازی اقلام امدادی، هزینه‌های کمبود، هزینه‌های بازسازی انبارها و مسیرهای آسیب‌دیده) و حداکثر کردن توزیع عادلانه اقلام امدادی در مناطق آسیب‌دیده است. عدم قطعیت شناختی در پارامترهای مرتبط با اهداف آرمانی، تقاضای نقاط آسیب‌دیده و هزینه‌ها در نظر گرفته شده است. مدل غیرقطعی ابتدا به کمک روش برنامه‌ریزی امکانی کارا، به مدل قطعی چندهدفه تبدیل شده و در ادامه با استفاده از روش ترابی و هسینی به مدل تک‌هدفه 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

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. مرحله پیشگیری به منظور جلوگیری از تبدیل شدن خطر به بحران یا فاجعه انجام می‌شود. همچنین، فعالیت‌های مرحله آمادگی قبل از وقوع بحران و به منظور پاسخ مناسب به بحران صورت می‌گیرد و شامل تصمیم‌هایی مانند تعیین مکان احداث انبارهای امدادی و مقادیر پیش‌ذخیره‌سازی کالاهای امدادی در آن‌هاست. مرحله پاسخ به بحران نیز شامل توزیع کالاهای امدادی به مردم آسیب‌دیده در حداقل زمان ممکن است. در نهایت فاز بهبود و بازسازی شامل بازگرداندن مسیرها و تسهیلات

هرساله بلاای 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 غیرقابل اجتناب است، با طراحی زنجیره 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 به منظور کمک به نقاط آسیب‌دیده و توزیع کالاهای امدادی بین نقاط آسیب‌دیده تشکیل می‌شوند، زنجیره امداد بشردوستانه اطلاق می‌شود [۱]. آمادگی لجستیک

ارائه شده 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 حوزه مکان‌یابی و تخصیص و توزیع اقلام امدادی انجام شده است. سلیک (۲۰۱۷) مروری جامع بر مطالعات درمورد بازسازی مسیرها، انبارها و شبکه لجستیک امداد انجام داد. وی مطالعات انجام شده در حوزه بازسازی شبکه‌های لجستیک امداد را در شش دسته شامل بازسازی مسیرها و راه‌های آسیب‌دیده، بازسازی زیرساخت‌ها، بازسازی و ساخت شبکه لجستیک امداد، برفروبی مسیرها در فاز پاسخ به بحران و پاک‌سازی و جمع‌آوری آوار طبقه‌بندی کرده است. وی در هر دسته اهداف، نوع مدل‌سازی و روش‌های حل به‌کاررفته را به تفصیل تشریح کرد [۴]. گراس و فیسچر (۲۰۱۶) مروری جامعی بر مدل‌های تصادفی دوسطحی ارائه شده 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 ارائه شده در فاز قبل و بعد بحران و مدل‌های موجودی در فاز هشدار به بحران پرداختند [۶]. در این بخش به مرور مقالاتی پرداخته خواهد شد که تصمیم‌های مربوط به مرحله قبل و بعد بحران، همچنین تصمیم‌های مربوط به بازسازی مسیرها و تسهیلات آسیب‌دیده را در نظر 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 ارائه شده سعی در حداقل کردن هزینه‌های تأسیس مراکز توزیع اقلام امدادی، هزینه‌های ذخیره‌سازی اقلام و حداکثر کردن میزان رضایت نقاط آسیب‌دیده دارد. مدل ارائه شده، عدم قطعیت را در میزان تقاضای نقاط آسیب‌دیده و امکان خرابی انبارها در نظر گرفته است [۷]. دیان و همکاران (۲۰۱۲) یک مدل ریاضی دومرحله‌ای دوسطحی را به منظور تعیین مکان مراکز توزیع اقلام امدادی و میزان ذخیره‌سازی اقلام در این مراکز در مرحله 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].

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 مرحله قبل و بعد از بحران و بازسازی مسیرها و تسهیلات امدادی آسیب‌دیده ارائه شده است. در مرحله 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 در نظر گرفته می‌شود. توزیع کالاهای امدادی در فاز پاسخ به بحران (معمولاً ۷۲ ساعت اول) به صورت چنددوره‌ای در نظر گرفته شده است. این امر سبب افزایش قابلیت پاسخ‌دهی سازمان‌های امداد می‌شود؛ زیرا امکان در نظر گرفتن اطلاعات به‌دست‌آمده جدید در اصلاح برنامه توزیع دوره‌های پیش‌رو با رانش مجدد مدل با منطق افق غلتان به وجود می‌آید [۴]. کالاهای امدادی به دو صورت مصرف‌شدنی (آب، غذا و دارو) و مصرف‌نشده (چادر) در نظر گرفته شده است.

ادامه این مقاله بدین صورت 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 چندهدفه مبتنی بر برنامه‌ریزی آرمانی فازی بیان شده است. در بخش ۴، نحوه 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 زنجیره تأمین بشردوستانه بررسی شده است که نتایج آن نشان می‌دهد بحث مربوط به یکپارچه‌سازی عملیات امدادرسانی در مرحله قبل و بعد از بحران با در نظر گرفتن خرابی مسیرها و تسهیلات امدادی در ادبیات بسیار اندک مدنظر است؛ بنابراین توسعه مدل‌های ریاضی جدید در این زمینه ضروری است. بالسیک و بئومن برای اولین بار در سال ۲۰۰۸، مدلی تصادفی را به منظور مکان‌یابی تسهیلات امدادی و ذخیره‌سازی اقلام امدادی ارائه دادند. مدل

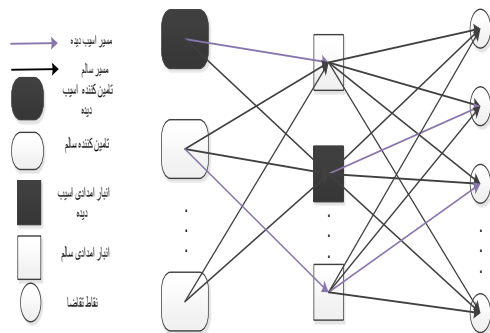
تقاضای کالای امدادی، همچنین تمام پارامترهای هزینه لحاظ کردند [۱].

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

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

رنسیکاریوم و ماسون (۲۰۱۴) مدلی چندهدفه را برای یکپارچه‌سازی عملیات مرحله 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 حداکثر کردن حداقل سطح رضایت در نقاط آسیب‌دیده به حداقل برسد [۹]. رنسیکاریوم 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 قابل قبول، حداکثر کمبود مجاز و حداقل سطح رضایت که باید برآورده شود، در نظر گرفتند و میزان انحراف از این آرمان‌ها را به عنوان متغیر تصمیم در تابع هدف لحاظ کردند [۱۰]. رودریگز و همکاران (۲۰۱۷) مدلی چندهدفه را به منظور تعیین مکان‌های تسهیلات امدادی در مرحله قبل از بحران، میزان کالایی که در هر یک از این تسهیلات ذخیره می‌شود، تخصیص کالاهای امدادی به نقاط آسیب‌دیده و همچنین تعداد نیروی مورد نیاز برای انجام عملیات را تعیین کردند و سیستم اطلاعات جغرافیایی را به منظور جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز به کار بردند [۱۱]. توفیقی و همکاران (۲۰۱۶) مدل مختلط تصادفی-امکانی سناریو-محور را به منظور یکپارچه‌سازی عملیات امداد رسانی در مرحله قبل و بعد بحران ارائه دادند. در مرحله قبل از بحران، تصمیم‌های مربوط به مکان تسهیلات امدادی و میزان پیش‌ذخیره‌سازی کالاهای امدادی در هر یک از این تسهیلات و در مرحله پاسخ به بحران میزان کالایی که به هر یک از نقاط آسیب‌دیده ارسال می‌شود، همچنین میزان کمبود در هر یک 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 به منظور طراحی شبکه لجستیک بشردوستانه با هدف حداقل کردن کل هزینه‌ها و حداکثر کردن سطح رضایت مردم آسیب‌دیده ارائه دادند. آن‌ها عدم قطعیت را در پارامترهای مرتبط با عرضه و

تعریف مسئله



شکل ۱. شبکه زنجیره تأمین مورد نظر

مفروضات مدل

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

مجموعه‌ها

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

در این پژوهش، مدل امکانی-تصادفی دوسطحی چندهدفه چند دوره‌ای-چندکالایی مبتنی بر برنامه‌ریزی آرمانی به منظور 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) در نظر گرفته شده است. در سطح اول زنجیره بشردوستانه 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 مرحله 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 به صورت 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 مرحله پاسخ به بحران با توجه به بودجه در نظر گرفته‌شده بازسازی می‌شوند. تأمین‌کنندگان آسیب‌دیده یا به طور کامل بازسازی می‌شوند و به حالت قبل بحران برمی‌گردند یا اینکه بازسازی نمی‌شوند. انبارهای امدادی آسیب‌دیده نیز یا بازسازی نمی‌شوند یا در صورت بازسازی به طور 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 قابل تعمیر است. به منظور وارد کردن ترجیحات تصمیم‌گیرندگان در مدل ارائه‌شده از برنامه‌ریزی آرمانی استفاده شده است. ترجیحات تصمیم‌گیرندگان در مورد میزان هزینه‌های قابل قبول و حداقل سطح رضایت قابل قبول با توجه به اخذ آن‌ها از خبرگان، به صورت اعداد مثلی فازی در نظر گرفته شده است.

$\tilde{\eta}_i^S (\tilde{\eta}_i^W)$ هزینه بازسازی تأمین‌کننده آسیب‌دیده $i \in S^D$ (انبار آسیب‌دیده $i \in W^D$)	$\tilde{\eta}_{ij}^{SW}$ هزینه بازسازی مسیر آسیب‌دیده بین تأمین‌کننده‌ها و انبارها $(i, j) \in \Lambda^D$	$\tilde{\eta}_{ij}^{WD}$ هزینه بازسازی مسیر آسیب‌دیده بین انبارها و نقاط تقاضا $(i, j) \in \Pi^D$	$b^N (b^A)$ بودجه در دسترس برای بازسازی تسهیلات آسیب‌دیده (مسیرهای آسیب‌دیده)	b^F بودجه در دسترس برای کل هزینه حمل‌ونقل	$\tilde{V}^S (\tilde{V}^W)$ هزینه ثابت بازسازی تأمین‌کننده‌های آسیب‌دیده (انبارهای آسیب‌دیده)	$\theta^N (\theta^A)$ تعداد تسهیلات مجاز بازسازی (شامل تأمین‌کننده‌ها و انبارها)؛	ظرفیت تأمین‌کننده $i \in S$ برای عرضه کالای امدادی S_i
							میزان تقاضای کالای امدادی c در نقطه آسیب‌دیده $j \in D$ در دوره t تحت سناریوی P \tilde{d}_{cjp}
							ظرفیت انبار $i \in W$ برای ذخیره‌سازی کالای امدادی α_i
							ظرفیت مسیرهای بین عرضه‌کننده‌ها و انبارها برای حمل کالاهای امدادی $(i, j) \in \Lambda$ δ_{ij}^{SW}
							ظرفیت مسیرهای بین انبارها و نقاط تقاضا برای حمل کالاهای امدادی $(i, j) \in \Pi$ δ_{ij}^{WD}
							ظرفیت مورد نیاز برای ذخیره‌سازی هر واحد کالای امدادی نوع c در انبار $i \in W$ ϕ_{ci}
							ظرفیت مورد نیاز برای حمل هر واحد کالای امدادی c در مسیرهای بین عرضه‌کننده‌ها و انبارها $(i, j) \in \Lambda$ ψ_{cij}^{SW}
							ظرفیت مورد نیاز برای حمل هر واحد کالای امدادی c در مسیرهای بین انبارها و نقاط تقاضا $(i, j) \in \Pi$ ψ_{cij}^{WD}
							نسبت کالای امدادی c قابل‌مصرف در انبار $i \in W$ تحت سناریوی P ρ_{cip}
							هزینه نگاه‌داری هر واحد کالای c $a\tilde{q}_c$
							هزینه کمبود هر واحد کالای c ؛ $\tilde{\pi}_c$
							هزینه حمل‌ونقل هر واحد کالای امدادی به ازای هر کیلومتر \tilde{C}_{ij}

پارامترها

$\tilde{\omega}^{SW}$ هزینه ثابت بازسازی مسیرهای آسیب‌دیده بین تأمین‌کننده‌ها و انبارها	$\tilde{\omega}^{WD}$ هزینه ثابت بازسازی مسیرهای آسیب‌دیده بین انبارها و نقاط تقاضا	d_{ij}^{OD} فاصله 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 برآورده کردن تقاضای مناطق آسیب‌دیده	\tilde{g}_F حداکثر کل هزینه‌ای که تصمیم‌گیرنده تمایل به پرداخت آن به‌منظور بازسازی شبکه آسیب‌دیده، هزینه‌های حمل کالاهای امدادی، هزینه‌های کمبود و هزینه‌های ذخیره‌سازی اقلام امدادی دارد.						
پارامترهای مرتبط با بازسازی مسیرها و تسهیلات آسیب‌دیده							
۵۰ درصد، ۱۰۰ درصد بازسازی انبار	$f_i^{W_1}, (f_i^{W_2})$ امدادی آسیب‌دیده $i \in W^D$						
۲۵ درصد، ۵۰ درصد، ۱۰۰ درصد بازسازی مسیرهای آسیب‌دیده بین	$f_{ij}^{SW_1}, (f_{ij}^{SW_2}), (f_{ij}^{SW_3})$						

برابر یک است اگر مسیر آسیب‌دیده بین تأمین‌کننده‌ها و انبارها مورد بازسازی قرار بگیرد. در غیر این صورت برابر صفر است. میزان کالای امدادی c که در انبار $i \in W$ در مرحله قبل بحران ذخیره می‌شود.

میزان بازسازی جزئی مسیر آسیب‌دیده بین انبارها و نقاط تقاضا تحت سناریوی p .

میزان کمبود کالای امدادی c در نقطه آسیب‌دیده $j \in D$ در دوره t تحت سناریوی p .

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

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

مدل ریاضی چندهدفه مبتنی بر برنامه‌ریزی آرمانی فازی

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

تأمین‌کننده‌ها و انبارها $(i, j) \in \Lambda^D$
 ۲۵ درصد، ۵۰ درصد، ۱۰۰ درصد
 $f_{ij}^{WD1}, (f_{ij}^{WD2}), (f_{ij}^{WD3})$
 بازسازی مسیرهای آسیب‌دیده 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 دوره t تحت سناریوی p ارسال می‌شود.

K_{ip} برابر یک است، اگر تأمین‌کننده آسیب‌دیده $i \in S^D$ 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.

$$\min Z_1 = \sum_{i \in T} \sum_c a \tilde{q}_c q_{ic} + \sum_p p_p \left(\begin{aligned} & \sum_{i \in S^D} \tilde{\eta}_i^S k_{ip} + \sum_{i \in T^D} \tilde{\eta}_i^W l_{ip} + \\ & \sum_{i \in S^D} \tilde{v}^S Y_i^S + \sum_{i \in T^D} \tilde{v}^W Y_i^W + \\ & \sum_{(i, j) \in \Lambda^D} \tilde{\lambda}_{ij}^{SW} M_{ijp} + \sum_{(i, j) \in \Pi^D} \tilde{\lambda}_{ij}^{WD} N_{ijp} + \\ & \sum_{(i, j) \in \Lambda^D} W^{SW} Y_{ij}^{SW} + \sum_{(i, j) \in \Lambda^D} W^{WD} Y_{ij}^{WD} + \\ & \sum_{(i, j) \in A} \sum_c \sum_t C_{ij} d_{i,j}^{OD} X_{cijtp} + \sum_j \sum_c \sum_t \tilde{\pi}_c b_{cjt} \end{aligned} \right) \quad (1)$$

$$\max Z_2 = \sum_p p_p V_p \quad (2)$$

$$\min Z_3 = D^{+c} \quad (3)$$

$$\min Z_4 = D^{-F} \quad (4)$$

سعی در حداکثرکردن سطح عدالت در توزیع کالاهای امدادی بین نقاط آسیب‌دیده را دارد. توابع هدف ۳ و ۴ متغیرهای انحراف از اهداف آرمانی در نظر گرفته شده برای هزینه و عدالت را حداقل می‌کنند.

تابع هدف ۱ به دنبال حداقل کردن هزینه‌های نگهداری کالاهای امدادی در مرحله قبل بحران، هزینه‌های متغیر و ثابت بازسازی تسهیلات و مسیرهای شبکه، هزینه‌های حمل کالاهای امدادی و هزینه کمبود کالاهای امدادی در نقاط تقاضاست. تابع هدف ۲ با در نظر گرفتن محدودیت ۵

$$\sum_c I_{cjp} \leq \alpha_i L_{ip} \quad \forall i \in W^D, c \in C, p \in P \quad (15)$$

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 بیان‌کننده 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 در نظر گرفته می‌شوند که تسهیلات و مسیرهای آسیب‌دیده بازسازی شوند.

محدودیت‌های ۲۴ و ۲۵ حداکثر تعداد گره‌ها و مسیرهای قابل بازسازی 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 بودجه مرتبط با بازسازی تسهیلات آسیب‌دیده را بیان می‌کنند.

$$\psi_{ij}^{ST} X_{c_{j\Omega}} \leq \delta_{ij}^{ST} \quad \forall (i, j) \in \Lambda^F, t \in T, c \in C, p \in P \quad (16)$$

$$\psi_{ij}^{SW} X_{c_{j\Omega}} \leq \delta_{ij}^{SW} M_{ijp} \quad \forall (i, j) \in \Lambda^D, t \in T, c \in C, p \in P \quad (17)$$

$$\psi_{ij}^{WD} X_{c_{j\Omega}} \leq \delta_{ij}^{WD} \quad \forall (i, j) \in \Lambda^D, t \in T, c \in C, p \in P \quad (18)$$

$$\psi_{ij}^{SW} X_{c_{j\Omega}} \leq \delta_{ij}^{SW} N_{ijp} \quad \forall (i, j) \in \Pi^D, t \in T, c \in C, p \in P \quad (19)$$

$$\forall j \in S^D, p \in P \quad K_{jp} \leq Y_j^S \quad (20)$$

$$\forall j \in T^D, p \in P \quad L_{jp} \leq Y_j^W \quad (21)$$

$$\forall (i, j) \in \Lambda^D, p \in P \quad M_{ijp} \leq Y_{ij}^{SW} \quad (22)$$

$$\forall (i, j) \in \Pi^D, p \in P \quad N_{ijp} \leq Y_{ij}^{WD} \quad (23)$$

$$V_p \leq \left(\sum_{i \in W} \sum_c \sum_t \frac{X_{cijp}}{d_{cijp}} \right) 100 \quad \forall j \in D, p \in P \quad (5)$$

$$\sum_c \phi_c q_{ic} \leq \alpha_i \quad \forall i \in W \quad (6)$$

محدودیت ۶ مرتبط با ظرفیت انبارهاست.

$$\rho_{cjp} q_{jc} + \sum_{i \in S} X_{cijp} - \sum_{k \in D} X_{cikp} = I_{cjp} \quad \forall j \in W, c \in C, p \in P, t = 1 \quad (7)$$

$$I_{cj(t-1)p} + \sum_{i \in S} X_{cijp} - \sum_{k \in D} X_{cikp} = I_{cjp} \quad \forall j \in W, c \in C, p \in P, t > 1 \in T \quad (8)$$

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

$$\sum_{i \in W} X_{cijp} + b_{cjp} = \bar{d}_{cjp} \quad \forall j \in D, p \in P, t \in T, c = 1 \quad (9)$$

$$\sum_{i \in W} X_{cijp} + b_{cjp} = \bar{d}_{cjp} + b_{cj(t-1)p} \quad \forall j \in D, p \in P, t \in T, c = 2 \quad (10)$$

محدودیت‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب بیانگر محدودیت ارضای تقاضای محصولات مصرف‌شدنی و مصرف‌نشده هستند.

$$\sum_{j \in W} \sum_c \sum_t X_{cijp} \leq S_i \quad \forall i \in S^F, p \in P \quad (11)$$

$$\sum_{j \in W} \sum_c \sum_t X_{cijp} \leq S_i K_{ip} \quad \forall i \in S^D, p \in P \quad (12)$$

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

$$\sum_{j \in D} X_{cijp} \leq I_{cjp} \quad \forall i \in W, p \in P, c \in C \quad (13)$$

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

$$\sum_c I_{cjp} \leq \alpha_i \quad \forall i \in W^F, c \in C, p \in P \quad (14)$$

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

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

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

$$l_{is} \leq f_i^{W2} \quad \forall i, s \tag{۲۷}$$

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

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

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

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

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

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

$$\sum_{(i,j) \in \Lambda} \sum_c \sum_t C_{ij} a_{i,j}^{OD} X_{cijp} \leq b^F \quad \forall p \in P \tag{۳۴}$$

$$\sum_{i \in I} \sum_c a_{ic}^q q_{ic} + \sum_p p_p \left(\begin{array}{l} \sum_{i \in S^D} \tilde{\eta}_i^S l_{ip} + \sum_{i \in T^D} \tilde{\eta}_i^S l_{ip} + \sum_{i \in S^D} \tilde{v}^S Y_i^S + \sum_{i \in T^D} \tilde{v}^W Y_i^W + \\ \sum_{(i,j) \in \Lambda^D} W^{SW} Y_{ij}^{SW} + \sum_{(i,j) \in \Lambda^D} W^{WD} Y_{ij}^{WD} + \\ \sum_{(i,j) \in \Lambda^D} \tilde{\lambda}_{ij}^{SW} M_{ij} + \sum_{(i,j) \in \Pi^D} \tilde{\lambda}_{ij}^{WD} N_{ij} + \\ \sum_{(i,j) \in \Lambda} \sum_c \sum_t C_{ij} a_{i,j}^{OD} X_{cijp} + \sum_j \sum_c \sum_t \tilde{\pi}_j b_{cjt} \end{array} \right) + D^+ - D^{+c} = \tilde{g}_c \tag{۳۵}$$

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

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

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

$$K_{ip}, Y_i^S, Y_i^W, Y_{ij}^{SW}, Y_{ij}^{WD} \in \{0,1\} \tag{۳۷}$$

$$L_{ip}, M_{ijp}, b_{cjp}, q_{ci}, I_{cijp}, X_{ijp} \geq 0 \tag{۳۸}$$

محدودیت‌های ۳۷ و ۳۸ نوع متغیرهای تصمیم را نشان می‌دهند.

روش حل پیشنهادی

مرحله اول: تعیین مدل کمکی قطعی

در این پژوهش، به منظور برخورد با عدم قطعیت‌های شناختی در پارامترهای مدل از روش امکانی خیمنز [۱۳] به دلیل کارایی بالای آن استفاده شده است. این روش علاوه بر حفظ خطی بودن مسئله، تعداد توابع هدف و محدودیت‌های نامساوی را افزایش نمی‌دهد. روش خیمنز و همکاران بر مبنای مقدار و بازه مورد انتظار طراحی شده است. همچنین به منظور حفظ کارایی و سادگی در محاسبات، از اعداد فازی مثلثی به منظور مدل‌سازی پارامترهای غیردقیق مدل استفاده شده است. فرض کنید

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

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

$$= \left[\frac{1}{2}(\zeta^p + \zeta^m) \quad \frac{1}{2}(\zeta^o + \zeta^m) \right]$$

$$EV(\tilde{\zeta}) = \frac{E_1^{\tilde{\zeta}} + E_2^{\tilde{\zeta}}}{2} = \frac{\zeta^p + 2\zeta^m + \zeta^o}{4} \tag{۴۱}$$

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

با توجه به روابط گفته‌شده و شرایط روش فازی خیمزن می‌توان مدل برنامه‌ریزی فازی ذکر شده را به صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} \min EV(\tilde{c})x \\ [(1-\alpha)E_2^{a_i} + \alpha E_1^{a_i}]x \geq \quad & i = 1, \dots, l \\ (1-\alpha)E_1^{b_i} + \alpha E_2^{b_i} \\ [(1-\frac{\alpha}{2})E_1^{a_i} + \frac{\alpha}{2}E_2^{a_i}]x \leq \quad & i = 1+1, \dots, m \\ (1-\frac{\alpha}{2})E_2^{b_i} + \frac{\alpha}{2}E_1^{b_i} \\ [(1-\frac{\alpha}{2})E_2^{a_i} + \frac{\alpha}{2}E_1^{a_i}]x \geq \quad & i = 1+1, \dots, m \\ (1-\frac{\alpha}{2})E_1^{b_i} + \frac{\alpha}{2}E_2^{b_i} \end{aligned} \quad (44)$$

در ادامه با توجه به معادلات و روابط ذکر شده، 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.

$$\mu_M(x) = (\tilde{a}, \tilde{b}) = \begin{cases} 1 & \text{if } E_1^a > E_2^b \\ \frac{E_2^a - E_1^b}{E_2^a - E_1^b - (E_1^a - E_1^b)} & \text{if } 0 \in [E_1^a - E_2^b, E_2^a - E_1^b] \\ 0 & \text{if } E_2^a < E_1^b \end{cases} \quad (42)$$

$\mu_M(\tilde{a}, \tilde{b}) \geq \alpha$ به این معناست که در درجه α ، \tilde{a} بزرگ‌تر مساوی \tilde{b} بوده و به صورت $\tilde{a} \geq_{\alpha} \tilde{b}$ تعریف می‌شود. علاوه بر آنچه گفته شد، برای جفت عدد فازی \tilde{a} و \tilde{b} که در آن $\tilde{a} \geq_{\frac{\alpha}{2}} \tilde{b}, \tilde{a} \leq_{\frac{\alpha}{2}} \tilde{b}$ داریم: اکنون به مدل برنامه‌ریزی ریاضی فازی زیر که در آن همه پارامترها به صورت فازی در نظر گرفته شده‌اند توجه کنید:

$$\begin{aligned} \min z &= \tilde{c}^t x \\ \tilde{a}_i x &\geq \tilde{b}_i x \quad i = 1, \dots, l \\ \tilde{a}_i x &= \tilde{b}_i x \quad i = l + 1, \dots, m \\ x &\geq 0 \end{aligned} \quad (43)$$

$$\min Z_1 = \sum_{i \in T} \sum_c \left(\frac{a\tilde{q}_c^p + 2a\tilde{q}_c^m + a\tilde{q}_c^o}{4} \right) q_{ic} + \sum_p p_p \left(\begin{aligned} & \sum_{i \in T^D} \left(\frac{\eta_i^{Sp} + 2\eta_i^{Sm} + \eta_i^{So}}{4} \right) l_{ip} \\ & \sum_{(i,j) \in \Lambda^D} \left(\frac{W^{SWp} + 2W^{SWm} + W^{SWo}}{4} \right) Y_{ij}^{SW} + \\ & \sum_{(i,j) \in \Lambda^D} \left(\frac{W^{WDP} + 2W^{WDM} + W^{WDO}}{4} \right) Y_{ij}^{WD} + \\ & \sum_{(i,j) \in \Pi^D} \left(\frac{\lambda_{ij}^{WDP} + 2\lambda_{ij}^{WDM} + \lambda_{ij}^{WDO}}{4} \right) N_{ij} + \\ & \sum_{(i,j) \in A} \sum_c \sum_t C_{ij} d_{i,j}^{OD} X_{cijtp} + \\ & \sum_j \sum_c \sum_t \left(\frac{\pi_c^p + 2\pi_c^m + \pi_c^o}{4} \right) b_{cjts} \\ & + \sum_{(i,j) \in \Lambda^D} \left(\frac{\lambda_{ij}^{SWp} + 2\lambda_{ij}^{SWm} + \lambda_{ij}^{SWo}}{4} \right) M_{ij} \end{aligned} \right) \quad (45)$$

$$\sum_{i \in W} X_{cijtp} + b_{cijtp} \leq (\alpha/2)(d_{cijtp}^p + d_{cijtp}^m / 2) \quad \forall j \in D, p \in P \quad (46)$$

$$+(1-\alpha/2)(d_{cijtp}^o + d_{cijtp}^m / 2)$$

$$\sum_{i \in W} X_{cijtp} + b_{cijtp} \geq (1-\alpha/2)(d_{cijtp}^o + d_{cijtp}^m / 2) \quad \forall j \in D \quad (47)$$

$$+(\alpha/2)(d_{cijtp}^p + d_{cijtp}^m / 2)$$

$$\sum_{i \in W} X_{cijtp} + b_{cijtp} \leq (1-\alpha/2)(d_{cijtp}^o + d_{cijtp}^m / 2) \quad \forall j \in D, p \in P \quad (48)$$

$$+(\alpha/2)(d_{cijtp}^p + d_{cijtp}^m / 2) + b_{cj(t-1)p}$$

$$\sum_{i \in W} X_{cijtp} + b_{cijtp} \geq (1-\alpha/2)(d_{cijtp}^o + d_{cijtp}^m / 2) \quad \forall j \in D, p \in P \quad (49)$$

$$+(\alpha/2)(d_{cijtp}^p + d_{cijtp}^m / 2) + b_{cj(t-1)p}$$

$$\begin{aligned}
 & \sum_{i \in S^D} ((\alpha) \left(\frac{\eta_i^{Sm} + \eta_i^{So}}{2} \right) + (1-\alpha) \left(\frac{\eta_i^{Sp} + \eta_i^{Sm}}{2} \right)) l_{ip} + \\
 & \sum_{i \in T^D} ((\alpha) \left(\frac{\eta_i^{Sm} + \eta_i^{So}}{2} \right) + (1-\alpha) \left(\frac{\eta_i^{Sp} + \eta_i^{Sm}}{2} \right)) l_{ip} + \\
 & \sum_{i \in S^D} ((\alpha) \left(\frac{v^{sm} + v^{so}}{2} \right) + (1-\alpha) \left(\frac{v^{sp} + v^{sm}}{2} \right)) Y_i^S + \quad \forall p \in P \tag{50} \\
 & \sum_{i \in T^D} ((\alpha) \left(\frac{v^{wm} + v^{wo}}{2} \right) + (1-\alpha) \left(\frac{v^{wp} + v^{wm}}{2} \right)) Y_i^W \\
 & \leq (\alpha) \left(\frac{b^{Np} + b^{Nm}}{2} \right) + (1-\alpha) \left(\frac{b^{Nm} + b^{No}}{2} \right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \sum_{(i,j) \in \Lambda^D} ((\alpha) \left(\frac{\lambda_{ij}^{SWp} + \lambda_{ij}^{SWm}}{2} \right) + (1-\alpha) \left(\frac{\lambda_{ij}^{SWm} + \lambda_{ij}^{SWo}}{2} \right)) M_{ij} + \\
 & \sum_{(i,j) \in \Pi^D} ((\alpha) \left(\frac{\lambda_{ij}^{WDP} + \lambda_{ij}^{WDM}}{2} \right) + (1-\alpha) \left(\frac{\lambda_{ij}^{WDM} + \lambda_{ij}^{WDO}}{2} \right)) N_{ij} + \\
 & \sum_{(i,j) \in \Lambda^D} ((\alpha) \left(\frac{W^{SWp} + W^{SWm}}{2} \right) + (1-\alpha) \left(\frac{W^{SWm} + W^{SWo}}{2} \right)) Y_{ij}^{SW} + \quad \forall p \in P \tag{51} \\
 & \sum_{(i,j) \in \Lambda^D} ((\alpha) \left(\frac{W^{WDP} + W^{WDM}}{2} \right) + (1-\alpha) \left(\frac{W^{WDM} + W^{WDO}}{2} \right)) Y_{ij}^{WD} \\
 & \leq (\alpha) \left(\frac{b^{Ap} + b^{Am}}{2} \right) + (1-\alpha) \left(\frac{b^{Am} + b^{Ao}}{2} \right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \sum_{(i,j) \in A} \sum_c \sum_t ((\alpha) \left(\frac{C_{ij}^m + C_{ij}^o}{2} \right) + \\
 & (1-\alpha) \left(\frac{C_{ij}^p + C_{ij}^m}{2} \right)) d_{i,j}^{OD} X_{cijtp} \quad \forall p \in P \tag{52} \\
 & \leq (\alpha) \left(\frac{b^{Fp} + b^{Fm}}{2} \right) + (1-\alpha) \left(\frac{b^{Fm} + b^{Fo}}{2} \right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \min Z_1 &= \sum_{i \in T} \sum_c \left(\frac{aq_c^p + 2aq_c^m + aq_c^o}{4} \right) q_{ic} + \\
 \min Z_1 &= \sum_{i \in T} \sum_c \left(\frac{aq_c^p + 2aq_c^m + aq_c^o}{4} \right) q_{ic} \\
 & \left(\begin{aligned}
 & \sum_{i \in S^D} \left(\frac{v^{Sp} + 2v^{Sm} + v^{So}}{4} \right) Y_i^S + \\
 & \sum_{i \in T^D} \left(\frac{v^{Wp} + v^{Wm} + v^{Wo}}{4} \right) Y_i^W + \\
 & \sum_{i \in S^D} \left(\frac{\eta_i^{Sp} + 2\eta_i^{Sm} + \eta_i^{So}}{4} \right) l_{ip} + \\
 & \sum_{i \in T^D} \left(\frac{\eta_i^{Sp} + 2\eta_i^{Sm} + \eta_i^{So}}{4} \right) l_{ip} \\
 & \sum_{(i,j) \in \Lambda^D} \left(\frac{W^{SWp} + 2W^{SWm} + W^{SWo}}{4} \right) Y_{ij}^{SW} + \\
 & \sum_{(i,j) \in \Lambda^D} \left(\frac{W^{WDP} + 2W^{WDM} + W^{WDO}}{4} \right) Y_{ij}^{WD} + \\
 & \sum_{(i,j) \in \Lambda^D} \left(\frac{\lambda_{ij}^{SWp} + 2\lambda_{ij}^{SWm} + \lambda_{ij}^{SWo}}{4} \right) M_{ij} + \\
 & \sum_{(i,j) \in \Pi^D} \left(\frac{\lambda_{ij}^{WDP} + 2\lambda_{ij}^{WDM} + \lambda_{ij}^{WDO}}{4} \right) N_{ij} + \\
 & \sum_j \sum_c \sum_t \left(\frac{\pi_c^p + 2\pi_c^m + \pi_c^o}{4} \right) b_{cjt} + \\
 & \sum_{(i,j) \in A} \sum_c \sum_t C_{ij} d_{i,j}^{OD} X_{cijtp} +
 \end{aligned} \right) \tag{53}
 \end{aligned}$$

$$\geq (\alpha) \left(\frac{g_c^o + g_c^m}{2} \right) + (1-\alpha) \left(\frac{g_c^m + g_c^p}{2} \right)$$

$$\begin{aligned}
 & \sum_p p_p Y_p + D^{-f} - D^{+f} \geq \\
 & (\alpha/2) \left(\frac{g_f^p + g_f^m}{2} \right) + (1-\alpha/2) \left(\frac{g_f^m + g_f^o}{2} \right) \tag{54}
 \end{aligned}$$

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 در نظر گرفته‌شده برای این مثال عددی آمده است.

جدول ۱. داده‌های مثال عددی

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

جدول ۲. میزان اقلام امدادی ذخیره‌شده

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

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 به منظور ایجاد تعادل بین اهداف حداقل کردن هزینه‌ها و حداکثر کردن 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 برآورده شدن تقاضای نقاط آسیب‌دیده افزایش می‌یابد. از طرف دیگر به منظور پاسخ به سهم بیشتری از تقاضای نقاط آسیب‌دیده با افزایش سطح رضایت تصمیم‌گیرنده، هزینه‌های مرتبط با ذخیره‌سازی اقلام امدادی و هزینه‌های حمل‌ونقل افزایش می‌یابد.

مرحله دوم: حل مدل چندهدفه قطعی

در مرحله دوم از رویکرد ترابی و هسینی [۱۴] به منظور تبدیل مدل چندهدفه قطعی به مدل تک‌هدفه استفاده شده است.

گام‌های روش ترابی و هسینی (TH) به صورت زیر است:

۱. تعیین جواب ایده‌آل مثبت (PIS) و جواب ایده‌آل منفی (NIS) برای هر یک از توابع؛
۲. تعیین تابع عضویت فازی خطی برای هر یک از توابع فازی خطی به صورت رابطه زیر:
۳. تابع عضویت فازی تابع هدف حداکثرسازی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\mu_1(x) = \begin{cases} 1 & z_1^{\alpha-PIS} \geq z_1 \\ \frac{z_1^{\alpha-NIS} - z_1}{z_1^{\alpha-NIS} - z_1^{\alpha-PIS}} & z_1^{\alpha-PIS} \leq z_1 \leq z_1^{\alpha-NIS} \\ 0 & z_1^{\alpha-NIS} \leq z_1 \end{cases} \quad (55)$$

عضویت فازی تابع هدف حداقل‌سازی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\mu_1(x) = \begin{cases} 1 & z_1^{\alpha-PIS} \leq z_1 \\ \frac{z_1 - z_1^{\alpha-NIS}}{z_1^{\alpha-PIS} - z_1^{\alpha-NIS}} & z_1^{\alpha-NIS} \leq z_1 \leq z_1^{\alpha-PIS} \\ 0 & z_1^{\alpha-NIS} \geq z_1 \end{cases} \quad (56)$$

$\mu_h(x)$ نشان‌دهنده درجه تأمین h امین تابع هدف است. در نهایت با کمک تابع ادغام‌سازی TH، مدل چندهدفه قطعی به مدل تک‌هدفه تبدیل می‌شود:

$$\max \beta(x) = \beta_0(\gamma) + (1-\gamma) \sum_h \theta_h \mu_h(x) \quad (57)$$

s. t.

$$\beta_0 \leq \mu_h(x) \quad h = 1, 2$$

$$x \in G(x), \beta \text{ and } \beta_0 \in [0, 1]$$

$G(x)$ نشان‌دهنده ناحیه شدنی تشکیل‌شده بر اساس

محدودیت‌های مدل قطعی کمکی است. همچنین γ و θ_h

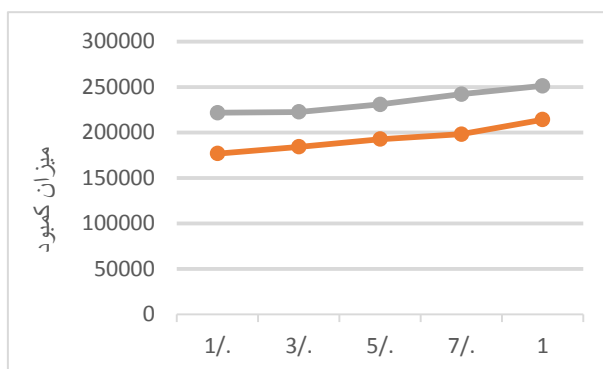
به ترتیب نشان‌دهنده درجه اهمیت h امین تابع هدف و ضریب جبران هستند.

نتایج حل مدل پیشنهادی

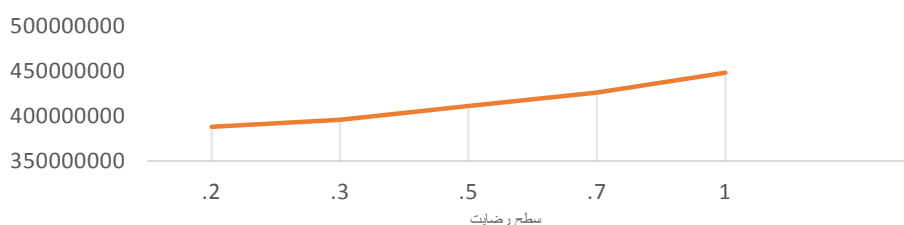
برای اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، مثال عددی با نرم‌افزار GAMS روی رایانه‌ای با حافظه 3GB و پردازشگر Intel core 2 Duo (2MB Cache, 2.6 GHz) حل

خواهد یافت. بدین ترتیب، در نظر گرفتن مدل فازی ابزار مناسبی را در اختیار مدیران و برنامه ریزان قرار می دهد. به نحوی که با توجه به مقداری که برای سطح رضایت نقاط تقاضا در نظر می گیرند، اقدام به برنامه ریزی مناسب برای خرید، ذخیره سازی و توزیع کالاهای امدادی انجام دهند. در نهایت می توان به عنوان پیشنهاد مدیریتی، اقدام به خرید اقلام امدادی را برای مناطق آسیب دیده از سازمان های ملی و بین المللی در مرحله پاسخ به بحران مدنظر قرار داد. البته برای چنین عملیاتی، برنامه های تأمین مشخصی باید در نظر گرفته شود.

همچنین ظرفیت عرضه کننده ها و انبارهای امدادی برای عرضه و پیش ذخیره سازی اقلام امدادی محدود است. در نتیجه، به منظور ایجاد تعادل بین توابع هزینه و سطح رضایت و همچنین وجود محدودیت در ظرفیت تسهیلات امدادی، با افزایش سطح رضایت، میزان کمبود اقلام مصرف شدنی و مصرف نشدنی افزایش می یابد. با توجه به جدول ۲ می توان به منطقی و قابل قبول بودن رفتار مدل ریاضی ارائه شده پی برد؛ زیرا با افزایش بیشتر از ۰/۵ در سطح رضایت نقاط آسیب دیده، میزان ذخیره سازی اقلام امدادی کاهش می یابد. در نتیجه میزان کمبود نیز افزایش



نمودار ۱. نمایش تغییرات میزان کمبود با تغییرات سطح رضایت تصمیم گیرنده



نمودار ۲. نمایش تغییرات هزینه در برابر تغییرات سطح رضایت تصمیم گیرنده

جدول ۳. نمایش تأثیر تغییرات در میزان آرمان در نظر گرفته شده

درصد تغییر در سطح آرمان	مقدار اقلام امدادی مصرف شدنی	مقدار اقلام امدادی مصرف نشدنی	مقدار کمبود اقلام مصرف شدنی	مقدار کمبود اقلام مصرف نشدنی	مقدار تابع هدف اول (10^8)	مقدار تابع هدف دوم (10^8)
۰/۱	۷۵۴۱۲	۶۷۷۶۸	۱۳۱۷۱۲	۱۲۸۵۹۵	۳/۲۷	۲/۶
۰/۱۵	۷۰۱۹۰	۷۲۹۹۰	۱۳۷۱۷۵	۱۳۳۱۳۲	۳/۲۷	۲/۱۸
۰/۲۵	۸۵۴۱۴	۶۰۵۲۷	۱۱۹۱۱۵	۱۵۵۶۴۲	۳/۲۹	۱/۶۵
۰/۳۵	۷۳۶۳۸	۷۲۳۰۳	۱۲۵۲۰۱	۱۲۶۵۴۸	۳/۳۲	۱/۸۷
۰/۴۵	۸۱۳۴۶	۷۳۳۴۵	۱۰۳۵۵۰	۱۲۱۸۶۲۹	۱/۲۷	۱/۹۹
۰/۵۰	۵۳۹۷۸	۶۲۰۳۷	۱۲۲۹۵	۱۱۴۸۶۷	۳/۱۱	۱/۲

مرحله پاسخ به بحران نیز درباره توزیع کالاهای امدادی در میان نقاط آسیب‌دیده و بازسازی انبارها و مسیرهای آسیب‌دیده تصمیم‌گیری می‌شود. مدل برنامه‌ریزی آرمانی در نظر گرفته شده شامل اهداف حداقل کردن هزینه‌ها و افزایش سطح عدالت در توزیع کالاهای امدادی با در نظر گرفتن محدودیت‌های بودجه و ظرفیت است. توجه به آرمان برای هر یک از اهداف سبب می‌شود تا نظرات تصمیم‌گیرنده در برنامه‌ریزی و نتایج مدل تأثیر داشته باشد و موجب افزایش انعطاف‌پذیری در تصمیم‌گیری‌ها می‌شود. ابتدا به دلیل غیرقطعی بودن 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 هسینی 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.

در نهایت، حل مدل در ابعاد بزرگ به کمک الگوریتم‌های فراابتکاری، در نظر گرفتن مسائل مسیریابی در زمان اختلال، توجه به وقوع چندین بحران هم‌زمان می‌تواند به عنوان مطالعات آتی مدنظر قرار بگیرد.

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 هر یک از اقلام امدادی و تأثیر آن بر توابع هدف اول و دوم نمایش داده شده است. با توجه به سطح آرمان‌های در نظر گرفته شده، مقدار ذخیره‌سازی اقلام امدادی در برابر مقدار کمبود ایجاد شده 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 چندهدفه چنددوره‌ای-چندکالایی مبتنی بر برنامه‌ریزی آرمانی فازی به منظور یکپارچه‌سازی عملیات قبل از بحران با عملیات توزیع کالاهای امدادی و بازسازی انبارها و مسیرهای آسیب‌دیده در مرحله پس از بحران ارائه شده است. در مرحله قبل از بحران، میزان ذخیره‌سازی اقلام امدادی در انبارها تعیین می‌شود و در

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. Sci.*, 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: A Collaborative 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 Systems*, Vol. 159, PP. 193–214.

واژه‌های لاتین به ترتیب 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