

بازطراحی زنجیره‌ی تأمین سبز - مقاوم شبکه‌ی آب‌رسانی: مطالعه‌ی موردی شبکه‌ی آب‌رسانی شهرکرد

محمد باوری* (استادیار)

ریحانه نادری (دانشجوی کارشناسی ارشد)

الهام سجادپور (دانشجوی کارشناسی ارشد)

گروه مهندسی صنایع، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه قم

مهندسی صنایع و مدیریت شریف، زمستان ۱۳۹۹ (مجله‌ی ۳۶-۱، شماره ۱/۲، ص. ۲۳-۳۳)

در سالیان اخیر با افزایش اختلال در زنجیره‌های تأمین، طراحی زنجیره‌ی تأمین مقاوم ضروری شده است. در این میان، زنجیره‌های تأمین آب ساختار مختص به خود را دارد که مقاوم‌سازی آن‌ها مورد غفلت قرار گرفته است. این تحقیق به دنبال بازطراحی سبز شبکه‌ی آب‌رسانی به منظور مقاوم‌سازی آن در برابر اختلال با هدف کمینه‌سازی هزینه‌ها به همراه کمینه‌سازی میزان انتشار آلاینده‌ی هاست. دو راهکار انتقال عرضی و مستحکم‌سازی مسیر بین تسهیلات زنجیره برای مقاوم‌سازی شبکه‌ی آب‌رسانی به کار گرفته شده است. برای مسئله‌ی معرفی شده، یک مدل برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح خطی ارائه شده است. کاربردی بودن مدل ارائه شده در یک مطالعه‌ی موردی واقعی در زنجیره‌ی تأمین آب‌رسانی شهرکرد بررسی شده است. مدل مقاوم ارائه شده در مقایسه با مدل غیر مقاوم در تابع اقتصادی و تابع سبز به ترتیب ۶٪ و ۳۳ درصد بهبود عملکرد داشته است. همچنین راهکار انتقال عرضی نسبت به راهکار مستحکم‌سازی خطوط لوله مؤثرتر است.

واژگان کلیدی: زنجیره‌ی تأمین سبز، طراحی مجدد شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین، اختلال، مقاوم‌سازی، شبکه‌ی آب‌رسانی.

۱. مقدمه

تعریف سنتی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین^۱ فرایندی از برنامه‌ریزی، اجرا و کنترل عملیات از تأمین‌کنندگان به مجموعه‌ی مشتریان بر اساس بهره‌برداری است.^[۱] طراحی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین^۲ دارای تأثیر قابل توجهی در عملکرد زنجیره‌ی تأمین است. طراحی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین بر روی عملکرد کیفی و کمی زنجیره‌ی تأمین نظیر تعداد، مکان و ظرفیت تسهیلات، ظرفیت امکانات و نیز تخصیص منابع تأثیر می‌گذارد.^[۲] در بین تمام منابع حیاتی موجود، آب یکی از مهم‌ترین منابع برای انسان و موجودات روی زمین است. هر انسان نقش مهمی در حفظ منابع آبی ایفا می‌کند. خدمات آب‌رسانی عمومی بیش از ۹۰ درصد تأمین آب در جهان را فراهم می‌کند. سیستم انتقال قسمتی حیاتی برای شبکه‌ی آب‌رسانی^۳ آشامیدنی است و نقش مهمی در توزیع آب آشامیدنی در بین مصرف‌کنندگان دارد. بنابراین طراحی و تجزیه و تحلیل شبکه‌ی آب‌رسانی اهمیت زیادی دارد.

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۷/۱۱/۲۶، اصلاحیه ۱۳۹۸/۱۲/۲۳، پذیرش ۱۳۹۹/۲/۱۷.

DOI:10.24200/J65.2020.52635.1954

«طراحی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین» مشتمل است بر: تصمیمات راهکار از قبیل تعیین تعداد، مکان و ظرفیت تسهیلات به منظور توزیع محصولات به مشتریان با کم‌ترین هزینه.^[۳] در سالیان اخیر به دلیل الزامات قانونی و نیز افزایش آگاهی‌های عمومی نسبت به محیط‌زیست، طراحی زنجیره‌ی تأمین سبز^۴ مورد توجه محققین قرار گرفته است. از این رو باید در طراحی زنجیره‌ی تأمین، الزامات زیست‌محیطی در تمام مراحل طراحی محصول، انتخاب و تأمین مواد اولیه، تولید و ساخت، فرایندهای توزیع و انتقال، تحویل به مشتری و حتی پس از مصرف، مدیریت بازیافت و مصرف مجدد به منظور بیشینه‌سازی میزان بهره‌وری مصرف انرژی و منابع همراه با بهبود عملکرد کل زنجیره‌ی تأمین مورد توجه قرار گیرد. در شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین آب، به دلیل فعالیت‌هایی مانند احداث تسهیلات و احداث خطوط لوله و همچنین استخراج و انتقال آب به واسطه‌ی مصرف، انرژی برق توسط پمپ‌های استخراج و انتقال گازهای آلاینده منتشر می‌شود.

در تحقیقات پیشین مدل‌های بررسی شده بر روی زنجیره‌ی تأمین بدون اختلال^۵ تمرکز داشته‌اند، در حالی که در جهان واقعی این‌گونه نیست. شبکه‌های زنجیره‌ی تأمین به دلایل مختلف مانند بلایای طبیعی، اعتصاب، تغییر مالکیت و عوامل دیگر

در برابر اختلالات آسیب‌پذیرند.^[۱۵] از جمله‌ی این اختلال‌ها در جهان می‌توان به آتش‌سوزی در کارخانه‌ی فیلیپس اشاره کرد که در نهایت منجر به زیان ۲/۳۴ میلیون دلار برای کارخانه‌ی مصرف‌کننده‌ی اریکسون شد.^[۱۶] اختلال در شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین می‌تواند باعث ایجاد هزینه شود؛ همچنین عدم واکنش مناسب و به‌موقع به اختلال باعث کاهش سطح فعالیت شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین می‌شود. بنابراین مدیران باید به تدابیر و راهکارهای مناسب برای افزایش قابلیت اطمینان و پاسخگو بودن زنجیره بیندیشند که این موضوع در سال‌های اخیر تحت عنوان «زنجیره‌ی تأمین مقاوم»^[۶] در تحقیقات مورد توجه قرار گرفته است. شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین آب هم به دلایلی مانند فرسودگی خطوط لوله و آلودگی آب چاه‌ها یا بلایای طبیعی ممکن است دچار اختلال شود. در مقالات پیشین مربوط به شبکه‌ی آب‌رسانی، فرض بر این بود که تسهیلات زنجیره (مانند تانکرهای ذخیره‌ی آب یا سازه‌های انتقال آب) پس از ساخت همیشه به‌طور مطلوب عمل می‌کنند، در حالی که تسهیلات و خطوط بین آن‌ها ممکن است با اختلال روبه‌رو شوند و بخشی از تسهیلات یا کل آن‌ها از کار بیفتد.

شبکه‌های زنجیره‌ی تأمین هرچند به‌صورت بهینه طراحی شده باشند، با گذشت زمان و تغییر پارامترهای مسئله - از جمله افزایش یا کاهش تقاضا، تغییر محل مشتریان یا تأمین‌کنندگان - کارایی مطلوب خود را از دست می‌دهند.^[۷] بنابراین با توجه به شرایط جدید لازم است تصمیماتی (مانند مکان‌یابی یا تصمیماتی مربوط به حمل‌ونقل و ...) تغییر کند که این موضوع مبحث «طراحی مجدد شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین»^[۷] را مطرح می‌کند.

این تحقیق به دنبال بازطراحی زنجیره‌ی تأمین به‌منظور مقاوم‌سازی و طراحی سبز زنجیره‌ی تأمین آب با هدف کمیته‌سازی توانان هزینه‌های زنجیره‌ی تأمین و میزان انتشار گازهای آلاینده است. به این منظور یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای مسئله توسعه داده شده است. همچنین دو راهکار مقاوم‌سازی شامل راهکار مستحکم‌سازی خطوط انتقال آب و انتقال عرضی آب برای مقاوم‌سازی زنجیره‌ی تأمین آب به کار گرفته شده است.

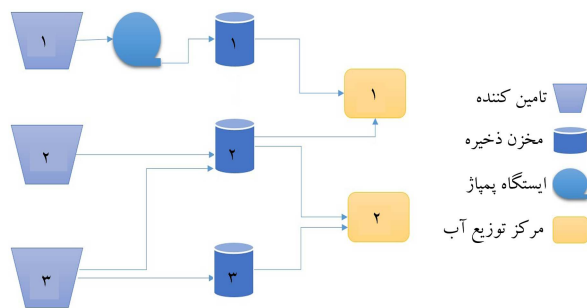
ساختار تحقیق حاضر به این صورت است که در بخش ۲ به مرور ادبیات تحقیق پرداخته‌ایم، و در بخش ۳ مدل ریاضی ارائه شده برای مسئله شرح داده شده است. در بخش ۴ مطالعه‌ی موردی تحقیق، شبکه‌ی آب‌رسانی شهرکرد، توضیح داده می‌شود. نتایج عملکرد مدل ارائه شده به همراه کارایی راهکارهای مقاوم‌سازی در بخش ۵ مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در انتها و در بخش ۶، یافته‌های تحقیق و پیشنهاد تحقیقات آتی ارائه می‌شود.

۲. مرور ادبیات

در این بخش، پیشینه‌ی تحقیق در سه حوزه‌ی طراحی زنجیره‌ی تأمین مقاوم، طراحی مجدد شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین و شبکه‌ی آب‌رسانی مورد مطالعه قرار گرفته است. در سالیان اخیر مقاوم‌سازی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. یک مدل مفهومی برای مدیریت اختلالات توسط کلیندورفر و سعد^[۷] پیشنهاد شده که در آن ریسک‌های قابل وقوع در زنجیره‌ی تأمین مورد توجه قرار گرفته است. آریانزاد و همکاران،^[۸] طراحی زنجیره‌ی تأمین را مورد بررسی قرار دادند که در آن مراکز توزیع در معرض اختلالات تصادفی قرار دارد. این اختلالات باعث شکست یک یا چند مرکز توزیع می‌شود. بنابراین هر مرکز توزیع با استفاده از ذخیره‌ی احتیاطی خدمات مناسب را به مشتریان ارائه می‌کند. در تحقیق آن‌ها یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی

برای کمیته‌سازی هزینه‌ی کل زنجیره‌ی تأمین ارائه شده است. لوکرا و سیفارت^[۹] در تحقیق خود یک شرکت دارویی را که تسهیلاتش مختل شده، مقاوم می‌کند.

به‌منظور طراحی یک شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین پاسخگو و مقاوم در برابر اختلالات، راهکارهای مقاوم‌سازی متفاوتی در دسترس است که انتخاب راهکار آن‌ها بستگی به منابع مالی موجود، ریسک‌پذیری تصمیم‌گیرنده، نوع شبکه‌ی مورد بررسی و سایر عوامل دارد. یکی از این راهکارها، راهکار مستحکم‌سازی تسهیلات است. لیم و همکاران،^[۱۰] راهکار مستحکم‌سازی تسهیلات را با یک مدل مکان‌یابی تسهیلات برای جلوگیری از اختلالات تسهیلات ترکیب کردند. جبارزاده و همکاران^[۱۱] نشان می‌دهند که در برابر اختلال‌های تسهیلات می‌توان با راهکار مستحکم‌سازی تسهیلات شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین را مقاوم کرد. آن‌ها در مطالعه‌شان یک مسئله‌ی واقع‌گرایانه را بررسی می‌کنند که در آن یک اختلال می‌تواند باعث توقف کامل تسهیلات یا کاهش ظرفیت عرضه شود. این مدل در یک شرکت تولیدی نفت در دنیای واقعی مورد بررسی قرار گرفته است. در مقالات فتحی و همکاران،^[۱۲] کین و همکاران،^[۱۳] حسینی و خسروجردی^[۱۴] از این راهکار برای مقاوم‌سازی زنجیره‌ی تأمین استفاده شده است. یکی دیگر از راهکارهای مقاوم‌سازی، راهکار انتقالات عرضی است. منظور از انتقال عرضی انتقال محصول بین نهادهای حاضر در یک سطح از زنجیره‌ی تأمین است. فیروز و همکاران^[۱۵] یک مدل طراحی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین را بررسی کرده‌اند که با استفاده از راهکار انتقالات عرضی و راهکار به‌کارگیری منابع چندگانه مقاوم شده است. ساویک^[۱۶] نیز به طراحی یک زنجیره‌ی تأمین پرداخته است؛ او برای انتخاب سبد عرضه‌ی مقاوم با استفاده از راهکارهای حفاظت از تسهیلات و ذخیره‌ی اضطراری یک رویکرد برنامه‌ریزی ریاضی ارائه کرد. ترابی و همکاران^[۱۷] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح برای طراحی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین مقاوم، به منظور مقابله با اختلال تأمین‌کننده ارائه می‌دهند. در تحقیقات پیشین طراحی مجدد زنجیره‌ی تأمین در حوزه‌های مختلف با اهداف گوناگون، مورد توجه قرار گرفته است. بازطراحی زنجیره‌ی تأمین در واقع طراحی مجدد یک زنجیره‌ی تأمین موجود است که هدف آن تغییر در تصمیمات راهکار زنجیره‌ی تأمین اولیه برای پیکربندی شبکه‌های جدید است. بر اساس مطالعات انجام شده توسط رزمی و همکاران^[۱۸] بازطراحی زنجیره‌ی تأمین مسئله‌ی پیچیده‌تر از طراحی زنجیره‌ی تأمین است، زیرا تغییرات باید به‌گونه‌ی برنامه‌ریزی شود که عملیات زنجیره‌ی تأمین حفظ شود. طراحی مجدد در سال ۱۹۹۹ برای اولین بار در مطالعات مین و ملاکریونودیس^[۱۹] مطرح شد که به دنبال تغییر مکان یک تسهیل از مکانی به مکان دیگر بود. ملاکریونودیس و مین،^[۲۰] مدل دیگری را با هدف تعیین زمان انتقال و مکان‌یابی مجدد برای تسهیلات موجود ارائه کردند. همچنین در سال ۲۰۰۷ ملاکریونوس و همکاران^[۲۱] به‌منظور کمیته‌سازی هزینه‌ی کل، یک مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط قطعی برای طراحی مجدد شبکه‌ی انبار ارائه کردند. کاسوماستوتی و همکاران^[۲۲] یک مدل برنامه‌ریزی یکپارچه، چندمنبع، تک‌محصولی و چنددوره‌ی را برای طراحی مجدد مراکز توزیع و تعمیر آن‌ها ارائه کردند. رزمی و همکاران^[۱۸] یک مدل تک‌محصولی و تک‌دوره‌ی با اهداف کمیته‌سازی هزینه‌های شبکه و بیشینه‌سازی درصد پوشش تقاضای مشتریان برای طراحی مجدد انبارها فرمول‌بندی کردند. بینگ و همکاران^[۲۳] یک مدل چندهدفه شامل کاهش هزینه‌ها و اثرات زیست‌محیطی ارائه کردند. تحقیق آن‌ها به دنبال مکان‌یابی مجدد کارخانه‌های بازفرآوری زباله‌ها در اروپا و چین برای کنترل نشت‌رگازهای گلخانه‌ی شبکه‌ی موجود از طریق بازطراحی زنجیره‌ی تأمین بودند. چاین و همکاران^[۲۴] در مقاله‌ی خود دو تابع هدف پیشنهاد می‌کنند: ۱. تابع هدف اقتصادی که تمام هزینه‌های فعالیت‌های مختلف زنجیره‌ی تأمین مانند تولید، توزیع، انتقال را کمیته می‌کنند؛ ۲. تابع هدف تأثیر زیست‌محیطی که کربن دی‌اکسید حاصله از انرژی مصرفی و زباله‌های تولیدی و حمل‌ونقل را کاهش می‌دهد.



شکل ۱. جریان آب در شبکه‌ی آب رسانی.

زنجیره‌ی کنونی تأمین آب دارای چندین تأمین‌کننده، مرکز توزیع، انتقال دهنده و مشتری است. جریان آب در شبکه‌ی توزیع به این‌گونه است که آب ابتدا از تأمین‌کننده‌ها استخراج شده و پس از انتقال به مخازن ذخیره که در صورت لزوم آب در آن‌ها نگه‌داری می‌شود، به مراکز توزیع آب شهری منتقل می‌شود. میزان استخراج از چاه‌ها وابسته به توان پمپ شناوری است که روی چاه نصب می‌شود. همچنین در بین مسیر انتقال آب از تأمین‌کننده‌ها به مخازن ذخیره در صورت طولانی بودن مسیری یا وجود اختلاف ارتفاع از پمپ‌های فشارقوی استفاده می‌شود که این پمپ‌ها در ایستگاه‌های پمپاژ بین خطوط ارتباطی نصب می‌شوند. ساختار زنجیره‌ی تأمین آب در شکل ۱ نشان داده شده است. چنان‌که اشاره شد، این زنجیره شامل چند تأمین‌کننده است؛ مجموعه‌ی تأمین‌کننده‌های در دسترس با $I, I = \{1, 2, \dots, |I|\}$ نشان داده می‌شود. بر روی تأمین‌کننده‌ها، پمپ‌هایی با قدرت u برای آسان‌سازی استخراج آب نصب شده است. همچنین برای تسهیل در انتقال آب بین تأمین‌کننده و مخزن ذخیره از پمپ‌های فشارقوی با قدرت O در ایستگاه‌هایی که پمپ نصب شده، استفاده می‌شود. مجموعه‌ی مخزن ذخیره و پمپ‌های فشارقوی در دسترس را به ترتیب با $K, K = \{1, 2, \dots, |K|\}$ و $J, J = \{1, 2, \dots, |J|\}$ نشان می‌دهند. سپس جریان آب از مخزن ذخیره به مرکز توزیع آب انتقال می‌یابد که مجموعه‌ی مرکز توزیع آب هم به وسیله $C, C = \{1, 2, \dots, |C|\}$ نشان داده می‌شود. هدف تحقیق حاضر، بازطراحی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین از طریق انتخاب تأمین‌کنندگان، مکان‌یابی ایجاد مراکز توزیع جدید، تغییر اندازه یا بستن مراکز توزیع کنونی، تعیین حجم استخراج و انتقال آب از تأمین‌کنندگان مختلف و به‌طور کلی تعیین جریان بین تسهیلات شبکه‌ی زنجیره آب است. هدف از بازطراحی کمیته‌سازی توأم آن هزینه‌های زنجیره‌ی تأمین و میزان نشرگازهای گلخانه‌یی فعالیت‌های زنجیره‌ی تأمین آب است. به این منظور دو راهکار مقاوم‌سازی شامل مستحکم‌سازی خطوط لوله و همچنین انتقال عرضی آب بین مراکز توزیع در یک مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح به کار گرفته شده است. در ادامه، ابتدا مدل غیرمقاوم (بدون راهکارهای مقاوم‌سازی) ارائه شده و سپس در بخش بعدی مدل مقاوم با به‌کارگیری راهکارهای مقاوم‌سازی توسعه داده شده است.

۱.۳. مدل طراحی مجدد شبکه‌ی توزیع غیرمقاوم

در زیر نمادهای لازم برای مدل بازطراحی زنجیره‌ی تأمین آب که به سه دسته مجموعه‌ها و پارامترها و متغیرهای تصمیم تقسیم می‌شود، معرفی شده است.

مجموعه‌ها

I : مجموعه‌ی تأمین‌کننده‌ها با اندیس i ؛

آب یکی از مهم‌ترین نیازمندی‌های مردم است که باید به‌صورت پیوسته و با هزینه‌ی مناسبی در اختیار تمام مردم قرار گیرد. از سوی دیگر ملاحظات زیست‌محیطی در ایجاد شبکه‌ی آب‌رسانی باید در نظر گرفته شود. طراحی شبکه‌ی آب‌رسانی در سالیان اخیر مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به ویژگی‌های اختصاصی استخراج، انتقال و ذخیره‌سازی آب مطالعه و طراحی اختصاصی زنجیره‌ی تأمین شبکه‌ی آب ضروری است. چندین مقاله در حوزه‌ی طراحی و برنامه‌ریزی شبکه‌ی آب‌رسانی چندسطحی با هدف بهینه‌سازی هزینه‌ی کل شبکه با استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی خطی ارائه شده است. ورلی و آفراف^[۲۵] یک برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط برای کمیته‌سازی هزینه‌ی تأمین آب آشامیدنی ارائه کرده است. نادری و پیشوایی^[۲۶] یک مدل دوهدفه برای طراحی مجدد شبکه‌ی آب‌رسانی شهری ارائه کردند. در تحقیقات پیشین در طراحی شبکه‌ی آب، امکان بروز اختلال در تسهیلات و خطوط ارتباطی مورد بررسی قرار نگرفته، بلکه فرض بر این بوده که زنجیره‌ی تأمین بعد از طراحی همیشه به‌صورت ایده‌آل کار می‌کند، درحالی‌که در عمل این‌گونه نیست و به دلایل مختلف مانند تغییرات آب و هوایی و فاجعه‌های طبیعی، اختلال در تسهیلات و خطوط ارتباطی محتمل است. به‌عنوان نمونه، در ژاپن، زلزله‌ی کوبه (۱۹۹۵) زیان ۱۰۰ میلیارد دلاری به زنجیره‌ی تأمین آب شهری وارد کرد.^[۲۷] سیلاب در میدوسترن ایالات متحده (۱۹۹۳) حدود ۱۵ میلیارد دلار ضرر به شبکه‌ی آب آن ایالت تحمیل کرد.^[۲۸] خشک‌سالی شدید در ایالات متحده باعث ایجاد ضرر ۱۴۴ میلیارد دلاری در فاصله‌ی سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۳ در شبکه‌ی آب شد.^[۲۹] در سالیان اخیر طراحی زنجیره‌های تأمین سبز و در نظر گرفتن ملاحظات زیست‌محیطی اهمیت زیادی پیدا کرده است.^[۳۰-۳۱] اخیراً طراحی زنجیره‌ی تأمین سبز در شرایط اختلال در چند مطالعه^[۳۲-۳۵] مورد بررسی قرار گرفته است. با این وجود بازطراحی زنجیره‌ی تأمین به منظور مقاوم‌سازی و طراحی سبز یک شکاف تحقیقاتی است. همچنین لازم به ذکر است که علاوه بر اختلال در طراحی و بازطراحی شبکه‌های انتقال آب در تحقیقات پیشین، ملاحظات زیست‌محیطی مورد غفلت قرار گرفته است.

همان‌طور که در این بخش اشاره شد در ادبیات موجود، طراحی مجدد شبکه با اهداف گوناگون اقتصادی، اجتماعی و ... مورد بررسی قرار گرفته، اما توجهی به مقاوم‌سازی شبکه‌ی آب‌رسانی نشده است. همچنین سبز بودن شبکه‌ی آب‌رسانی مغفول واقع شده است. از این رو در این تحقیق مسئله‌ی پوشش شکاف‌های تحقیقاتی، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای بازطراحی زنجیره‌ی تأمین آب به‌منظور مقاوم‌سازی زنجیره‌ی تأمین با هدف کمیته‌سازی انتشار گازهای گلخانه‌یی و هزینه‌ی کل شبکه‌ی آب‌رسانی مورد مطالعه قرار گرفته است. به این منظور، یک مدل بازطراحی زنجیره‌ی تأمین سبز غیرمقاوم برای شبکه‌ی آب‌رسانی به همراه یک مدل بازطراحی زنجیره‌ی تأمین سبز مقاوم برای شبکه‌ی آب‌رسانی ارائه شده است. در این مسئله اختلال در خطوط ارتباطی و تأمین‌کنندگان آب (چاه‌های آب) رخ می‌دهد. دو راهکار مستحکم‌سازی خطوط لوله و انتقالات عرضی بین تانکرهای ذخیره آب برای مقاوم‌سازی شبکه‌ی آب‌رسانی استفاده شده است.

۳. مدل‌سازی ریاضی

در این تحقیق یک زنجیره‌ی تأمین آب چهارسطحی شامل تأمین‌کنندگان (چاه‌ها و رودخانه)، انتقال‌دهندگان (ایستگاه‌های پمپاژ آب)، مراکز توزیع (مخازن ذخیره آب) و مشتریان (مراکز توزیع آب‌رسانی داخل شهر: نقاط تقاضا) در نظر گرفته شده است.

J : مجموعه‌ی پمپ‌ها با اندیس j ؛
 K, Q : مجموعه‌ی مخزن ذخیره با اندیس k, q ؛
 C : مجموعه‌ی مراکز توزیع با اندیس c ؛
 O : مجموعه‌ی قدرت پمپ‌های فشارقوی با اندیس o ؛
 U : مجموعه‌ی قدرت پمپ‌های شناور با اندیس u ؛
 L, L' : مجموعه‌ی ظرفیت مخزن ذخیره با اندیس l, l' ؛
 S : مجموعه‌ی تمامی سناریوهای ممکن با اندیس s .

پارامترها

a : میزان برق مصرف شده (کیلووات ساعت) برای پمپاژ هر متر مکعب آب؛
 b_l : مخزن ذخیره با ظرفیت l ؛
 cc : هزینه‌ی احداث یک مترمکعب مخزن ذخیره؛
 ce : هزینه‌ی هر کیلووات ساعت وات برق مصرفی؛
 cf^u : هزینه‌ی خرید پمپ‌های شناور با قدرت u کیلووات؛
 ch^o : هزینه‌ی خرید پمپ‌های فشارقوی با قدرت o کیلووات؛
 cp : هزینه‌ی هر متر لوله‌گذاری؛
 d_c : میزان تقاضای مرکز توزیع آب c ؛
 di_{ik} : فاصله‌ی میان تأمین‌کننده i تا مخزن ذخیره k ؛
 di_{kq} : فاصله‌ی دو مخزن ذخیره k و q ؛
 di_{kc} : فاصله‌ی مخزن ذخیره k تا مرکز توزیع آب c ؛
 e : میزان آلودگی ناشی از مصرف یک کیلووات برق برحسب میلی‌گرم؛
 f : میزان آلودگی به‌ازای احداث یک متر خط لوله؛
 g^l : میزان آلودگی ناشی از احداث مخزن ذخیره با ظرفیت l ؛
 li_i : میزان حد مجاز استخراج از تأمین‌کننده i ؛
 M : کوچک‌ترین عدد بزرگ؛
 pv_u : قدرت انتقال‌دهنده‌ی نصب شده بر تأمین‌کننده‌ها برحسب کیلووات ساعت؛
 pw_o : قدرت انتقال‌دهنده‌ی نصب‌شده در ایستگاه پمپاژ برحسب کیلووات ساعت؛
 $pr^{(s)}$: احتمال سناریوها؛

متغیرها
 $XSW_{ik}^{(s)}$: میزان آب انتقالی از تأمین‌کننده‌ی i به مخزن ذخیره‌ی k در سناریو s ؛
 $XSM_{ik}^{(s)}$: میزان آب انتقالی از تأمین‌کننده i به مخزن ذخیره k توسط ایستگاه پمپاژ در سناریو s ؛
 $XW_{kc}^{(s)}$: میزان آب انتقالی از مخزن ذخیره‌ی k به مرکز توزیع آب c در سناریو s ؛
 $XWW_{kq}^{(s)}$: میزان آب انتقالی بین دو مخزن ذخیره‌ی k و q در سناریو s ؛
 YW_k^l : اگر مخزن ذخیره‌ی k با ظرفیت l احداث شود 1 ، در غیر این صورت صفر؛
 $YR_k^{l'}$: اگر مخزن ذخیره‌ی k با ظرفیت l' به ظرفیت l تغییر سایز پیدا کند 1 ، در غیر این صورت صفر؛
 PM_{ijk}^o : اگر پمپ فشارقوی با قدرت o در سناریو s بین تأمین‌کننده‌ی i و مخزن ذخیره k احداث شود 1 و در غیر این صورت صفر؛
 PS_i^u : اگر انتقال‌دهنده با قدرت u بر روی تأمین‌کننده i در سناریو s نصب شود 1 در غیر این صورت صفر؛
 R_{ik} : اگر بین تأمین‌کننده‌ی i و مخزن ذخیره‌ی k خط لوله وجود داشته باشد 1 و در غیر این صورت صفر؛
 H_{kq} : اگر بین دو مخزن ذخیره‌ی k, q خط لوله باشد 1 ، در غیر این صورت صفر؛
 N_{kc} : اگر بین دو مخزن ذخیره‌ی k و q خط لوله باشد 1 ، در غیر این صورت صفر؛
 FP_{ik} : اگر مسیر بین تأمین‌کننده‌ی i و مخزن ذخیره‌ی k مستحکم‌سازی شود 1 ، در غیر این صورت صفر؛
 FF_{kc} : اگر مسیر بین مخزن ذخیره‌ی k و مرکز توزیع آب c مستحکم‌سازی شود 1 ، در غیر این صورت صفر؛
 FM_{kq} : اگر مسیر بین دو مخزن ذخیره‌ی k و q مستحکم‌سازی شود 1 ، در غیر این صورت صفر.
مدل ریاضی برای بازطراحی زنجیره‌ی تأمین آب بدون استفاده از راهکارهای کاهش ریسک چنین فرمول‌سازی شده است:

$$Z_1 = \min \sum_s pr^{(s)} \cdot \left(\sum_i \sum_k ce.a.XSW_{ik}^{(s)} + \sum_k \sum_c ce.a.\alpha_{kc}.XW_{kc}^{(s)} + \sum_i \sum_k ce.a.XSM_{ik}^{(s)} + \sum_i \sum_j \sum_k \sum_o ch^o.PM_{ijk}^o \right) + \sum_u \sum_i cf^u.PS_i^u + \sum_l \sum_k (1 - \nu_k^l).cc.b_l.YW_k^l + \sum_{l'} \sum_l \sum_k \nu_k^{l'}.cc.(b_l - b_{l'}).YR_k^{l'} + \sum_i \sum_k cp.di_{ik}.(1 - \zeta_{ik}).R_{ik} + \sum_k \sum_c cp.di_{kc}.(1 - \lambda_{kc}).N_{kc}$$

$$Z_2 = \min \sum_s pr^{(s)} \cdot \left(\sum_i \sum_k \sum_j \sum_o e.pw_o.pm_{ijk}^o \right) + \sum_u \sum_i e.pv_u.PS_i^u$$

نیز میزان آلودگی حاصل از احداث مخزن ذخیره جدید و تغییر اندازه‌ی مخزن ذخیره و خطوط انتقال آب است. محدودیت ۳ بیانگر رابطه‌ی تعادلی برای مخازن ذخیره است، به این معنا که مقدار جریان ورودی به مخزن ذخیره برابر با مقدار خروجی از آن در هر سناریو است. محدودیت ۴ بیانگر معادله‌ی تعادلی جریان‌های ورودی و خروجی به ایستگاه پمپاژ در هر سناریو است. محدودیت ۵ و ۶ مربوط به این است که اگر جریانی در هر سناریو به هر مخزن ذخیره وارد یا خارج شود، باید آن مخزن ذخیره وجود داشته باشد یا احداث شود یا مخزن ذخیره موجود تغییر اندازه دهد. محدودیت ۷ تعیین می‌کند که اگر بین تأمین‌کننده و مخزن ذخیره در هر سناریو نیاز به یک پمپ فشارقوی در ایستگاه پمپاژ باشد باید خط لوله وجود داشته باشد. محدودیت‌های ۸ و ۹ برای اطمینان از این است که اگر انتقال آب بین تأمین‌کننده و مخزن ذخیره و بین مخزن ذخیره و مشتری وجود داشته باشد حتماً باید خطوط لوله بین آنها باشد. محدودیت ۱۰ برای اطمینان از این است که کل آب استخراج شده در هر سناریو باید کم‌تر از سطح ظرفیت تأمین‌کننده باشد. محدودیت ۱۱ برای رعایت حد مجاز استخراج آب از تأمین‌کنندگان است. محدودیت ۱۲ بیان می‌دارد که روی هر تأمین‌کننده در هر سناریو حداکثر یک نوع پمپ شناور باید قرار بگیرد. محدودیت ۱۳ تعیین می‌کند که در محل مخازن ذخیره‌ی موجود امکان احداث مخزن ذخیره‌ی جدید نیست. با محدودیت ۱۴، فقط مخازن ذخیره‌ی موجود می‌توانند تغییر اندازه بدهند. در محدودیت ۱۵ هر مخزن ذخیره تنها یک سطح ظرفیت می‌تواند داشته باشد. محدودیت ۱۶ بیانگر آن است که ظرفیت مخازن ذخیره فقط می‌تواند افزایش پیدا کند. محدودیت ۱۷ در هر سناریو بیان می‌دارد که امکان انتقال آب به مخزن ذخیره تنها از طریق تأمین‌کننده‌ی فعال وجود دارد. در محدودیت ۱۸ باید تقاضای مرکز توزیع آب تأمین شود. و محدودیت‌های ۱۹ و ۲۰ نشان‌دهنده‌ی نوع متغیرهای مدل هستند و بیان می‌دارند که مدل جزء مسائل عدد صحیح مختلط است.

۲.۳. مدل طراحی مجدد شبکه‌ی آب‌رسانی مقاوم

برای تعیین سناریوها ابتدا باید تمام اختلال‌های ممکن و احتمال وقوع هر کدام را شناسایی کرد. در این مدل وجود اختلال در تأمین‌کننده‌ها و خطوط لوله‌ی شبکه‌ی آب‌رسانی امکان‌پذیر است. در این بخش مدل ریاضی طراحی مجدد شبکه‌ی آب‌رسانی مقاوم که با استفاده از راهکارهای انتقالات عرضی و مستحکم‌سازی تسهیلات مقاوم‌سازی شده است، ارائه می‌شود و نحوه‌ی تأثیر هر راهکار بر مدل نشان داده شده است.

۱.۲.۳. راهکار انتقالات عرضی

راهکار انتقالات عرضی، توانایی انتقال آب بین دو مخزن ذخیره است. این راهکار باعث تعریف پارامترهای di_{kq} برابر با فاصله‌ی دو مخزن ذخیره و سه پارامتر باینری δ_{kq} ، θ_{kq} و $\tau_{kq}^{(s)}$ می‌شود که به ترتیب نشان‌دهنده‌ی وجود ایستگاه پمپاژ بین دو مخزن ذخیره و وجود خط لوله و خراب بودن آن است. همچنین دو متغیر $XWW_{kq}^{(s)}$ و H_{kq} هم اضافه می‌شود که متغیر مثبت $XWW_{kq}^{(s)}$ نشان‌دهنده‌ی مقدار جریان بین دو مخزن k, q و متغیر باینری H_{kq} و تصمیم‌گیرنده برای وجود خط لوله بین دو مخزن k, q است. این راهکار باعث ایجاد تغییر در محدودیت‌های ۵ و ۶ می‌شود که به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\begin{aligned} & + \sum_k \sum_l g^l . YW_k^l \\ & + \sum_l \sum_{l'} \sum_k (g^{l'} - g^l) . YR_k^{l'} \\ & + \sum_i \sum_k f . di_{ik} . (\lambda - \zeta_{ik}) . R_{ik} \\ & + \sum_k \sum_c f . di_{kc} . (\lambda - \lambda_{kc}) . N_{kc} \end{aligned} \quad (2)$$

S.t.

$$\sum_i XSW_{ik}^{(s)} \geq \sum_c XW_{kc}^{(s)} \quad \forall k, s \quad (3)$$

$$XSM_{ik}^{(s)} \geq M . (\sum_j \sum_o PM_{ijk}^{o(s)} - 1) + XSW_{ik} \quad \forall i, k, s \quad (4)$$

$$\sum_c XW_{kc}^{(s)} \leq M . (\sum_l YW_k^l + \sum_{l'} YR_k^{l'} + \sum_l \nu_k^l) \quad \forall k, s \quad (5)$$

$$\sum_i XSW_{ik}^{(s)} \leq M . (\sum_l YW_k^l + \sum_{l'} YR_k^{l'} + \sum_l \nu_k^l) \quad \forall k, s \quad (6)$$

$$\sum_j \sum_o PM_{ijk}^{o(s)} = \beta_{ik} . R_{ik} \quad \forall i, k, s \quad (7)$$

$$XSW_{ik}^{(s)} \leq M . R_{ik} \quad \forall i, k, s \quad (8)$$

$$XW_{kc}^{(s)} \leq M . N_{kc} \quad \forall k, c, s \quad (9)$$

$$\sum_u \alpha_u . PS_i^{u(s)} \geq \sum_k XSW_{ik}^{(s)} \quad \forall i, s \quad (10)$$

$$\sum_k XSW_{ik}^{(s)} \leq Li \quad \forall i, s \quad (11)$$

$$\sum_u PS_i^{u(s)} \leq 1 \quad \forall i, s \quad (12)$$

$$\sum_l YW_k^l + \sum_l \nu_k^l \leq 1 \quad \forall k, s \quad (13)$$

$$\sum_{l'} YR_k^{l'} \leq \sum_l \nu_k^l \quad \forall k \quad (14)$$

$$\sum_l YW_k^l \leq 1 \quad \forall k \quad (15)$$

$$b_l . YR_k^{l'} \leq b_{l'} . \nu_k^l \quad \forall k, l \quad (16)$$

$$\sum_k XSW_{ik}^{(s)} \leq M . \omega_i \quad \forall i, s \quad (17)$$

$$\sum_k XW_{kc}^{(s)} \geq d_c \quad \forall c, s \quad (18)$$

$$YW_k^l, YR_k^{l'}, PM_{ijk}^{o(s)}, PS_i^{u(s)}, R_{ik}, N_{kc} \in \{0, 1\} \quad (19)$$

$$XSW_{ik}^{(s)}, XSM_{ik}^{(s)}, XW_{kc}^{(s)} \geq 0 \quad (20)$$

تابع هدف ۱ برای کمیته‌سازی هزینه‌های کل شبکه‌ی توزیع آب، شامل هزینه‌های مربوط به هر سناریو و هزینه‌های ثابت کاربرد دارد. هزینه‌های هر سناریو شامل هزینه‌ی برق برای انتقال آب بین اجزای شبکه‌ی توزیع آب و هزینه‌ی مربوط به خرید پمپ‌های شناور و فشارقوی است؛ هزینه‌های ثابت نیز شامل هزینه‌ی احداث مخزن ذخیره و هزینه‌ی مربوط به تغییر سائز مخازن ذخیره و هزینه‌های لوله‌گذاری و هزینه‌ی احداث مخزن ذخیره برای نگه‌داری ذخیره‌ی اضطراری است. تابع هدف ۲ هم به دو بخش هزینه‌های وابسته به سناریو و ثابت تقسیم می‌شود که قسمت اول مربوط به کمیته‌سازی میزان آلاینده‌ی ناشی از برق مصرف شده توسط پمپ‌های شناور و فشارقوی نصب شده در زنجیره‌ی تأمین در هر سناریو است؛ قسمت دوم

شهرکرد در حال حاضر رشته خط انتقال از چشمه کوه رنگ و چاه‌هایی است که در سفره‌ی آب زیرزمینی دشت شهرکرد حفر شده است. بر اساس آخرین آمار دریافتی تعداد ۲۸ حلقه چاه عمیق فعال در شش حوزه برای تأمین آب مورد نیاز وجود دارد. در سال‌های اخیر برای تأمین نیازهای آبی شبکه‌ی توزیع آب شهرکرد یک رشته خط انتقال از چشمه کوه رنگ به شهر کشیده شده که بر اساس اعلام شرکت آب و فاضلاب استان چهارمحال و بختیاری، حدود ۳۵ درصد از آب مورد نیاز شهر را تأمین خواهد کرد. در واقع هفت تأمین‌کننده‌ی اصلی آب وجود دارد که یکی از آن‌ها خط انتقال کوه رنگ و ۲۸ چاه موجود است که به ۶ حوزه تقسیم شده‌اند و ۶ تأمین‌کننده‌ی بعدی هستند. آب‌های موجود در این تأمین‌کننده‌ها دارای مقادیری فلزات سنگین مانند نیترات است. نیترات موجود در آب‌ها اگر از حدی بالاتر برود مشکلاتی برای سلامتی مصرف‌کنندگان به وجود می‌آورد. بنابراین تأمین‌کننده‌ی که دارای آبی با نیترات بالا باشد متوقف و تأمین‌کننده دچار اختلال می‌شود. از طرفی سابقه‌ی ایجاد شبکه‌ی لوله‌کشی آب شهرکرد مربوط به سال‌های ۱۳۳۰ است و خط لوله‌های موجود در شبکه به دلیل بالا بودن قدمت شبکه‌ی آب‌رسانی خراب می‌شود و انتقال آب در آن‌ها صورت نمی‌گیرد. بنابراین خط لوله‌ها دچار اختلال می‌شوند. برای تعیین سناریوها با توجه به نکات گفته شده در بالا به دلیل نزدیک بودن چاه حوزه‌ی ۱ به زمین‌های کشاورزی در بعضی از فصول خاص نیترات موجود در آب بالاتر از حد مجاز می‌رود و استخراج آب از آن متوقف می‌شود. خط لوله‌های بین مخزن ذخیره‌ی ۲ و مخزن ذخیره‌ی آب ۱ و همچنین بین مرکز توزیع آب ۶ و مرکز توزیع آب ۱ دچار اختلال می‌شود. بنابراین ۴ سناریوی اختلال برای شبکه‌ی آب‌رسانی امکان‌پذیر است. در سناریوی اول شرایط کاملاً عادی است و با احتمال ۶۸ اختلالی ایجاد نمی‌شود. سناریوی دوم اختلال در چاه‌های حوزه‌ی ۱ با احتمال ۲۰ به وجود می‌آید. سناریوی سوم هم خرابی خطوط لوله را بررسی می‌کند که احتمال آن ۱۰ درصد است. در سناریوی چهارم اختلال هم در تأمین‌کننده و هم در خطوط ارتباطی ایجاد شده است که احتمال آن برابر با حاصل ضرب احتمال دو اختلال یعنی ۲ درصد است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در صورت وجود n اختلال، سناریو امکان‌پذیر می‌شود.

۵. ارزیابی مدل

در این بخش با استفاده از داده‌های به دست آمده به دو سؤال زیر باید پاسخ داد:

۱. نادیده گرفتن راهکارهای مقاوم‌سازی در شبکه‌ی آب‌رسانی چه تأثیری بر توابع هدف دارد؟
۲. هر یک از راهکارهای مقاوم‌سازی به‌تنهایی چه تأثیری بر بهبود شبکه‌ی آب‌رسانی دارد؟

برای مقایسه‌ی دو مدل ارائه شده، مدل طراحی مجدد شبکه‌ی آب‌رسانی سبز - غیرمقاوم و مدل طراحی مجدد شبکه‌ی آب‌رسانی سبز - مقاوم را با ترکیب تمام سناریوها و احتمال وقوع آن‌ها توسط CPLEX در نرم‌افزار گمز حل شده است. در مدل طراحی مجدد شبکه‌ی آب‌رسانی سبز - مقاوم، شبکه‌ی آب‌رسانی می‌تواند با استفاده از منابع مختلف به اختلالات احتمالی پاسخ دهد. دو راهکار مستحکم‌سازی خطوط لوله و انتقالات عرضی، اثر اختلالات را کاهش می‌دهد. در جدول ۱ میزان توابع هدف شبکه‌ی آب‌رسانی سبز - غیرمقاوم

$$\sum_i XSW_{ik}^{(s)} + \sum_{q=1}^k XWW_{kq}^{(s)} \geq \sum_{q=1}^k XWW_{kq}^{(s)} + \sum_c XW_{kc} \quad \forall k, s \quad (21)$$

$$\sum_c XW_{kc}^{(s)} + \sum_{q=1}^k XWW_{kq}^{(s)} \leq M \cdot (\sum_l YW_k^l + \sum_{l'} YR_k^{l'} + \sum_l \nu_k^l) \quad \forall k, s \quad (22)$$

همچنین باعث ایجاد محدودیت جدید می‌شود:

$$XWW_{kq}^{(s)} \leq M \cdot H_{kq} \quad \forall k, s \quad (23)$$

محدودیت ۲۳ تضمین می‌کند که در صورت وجود انتقال بین دو مخزن ذخیره، باید خط لوله وجود داشته باشد. همچنین این راهکار باعث ایجاد هزینه‌ی برابر با رابطه‌ی $\sum_k \sum_q ce.a.\delta_{kq} \cdot XWW_{kq}^{(s)}$ برای قسمت وابسته به سناریو و رابطه‌ی $\sum_k \sum_q cp.di_{kq} \cdot (1 - \theta_{kq}) \cdot H_{kq}$ برای قسمت هزینه‌ی ثابت می‌شود. همچنین این راهکار هزینه‌ی زیست‌محیطی هم ایجاد می‌کند که با اضافه کردن رابطه‌ی $\sum_k \sum_q f.di_{kq} \cdot (1 - \theta_{kq}) \cdot H_{kq}$ به تابع هدف دوم محاسبه می‌شود.

۲.۲.۳. راهکار مستحکم‌سازی خطوط لوله

برای مقابله با اختلال‌های خط لوله از راهکار مستحکم‌سازی استفاده می‌شود. این راهکار باعث اضافه شدن پارامتر v و سه متغیر باینری FP_{ik} و FF_{kc} و FM_{kq} می‌شود. پارامتر v برابر با هزینه‌ی ثابت مستحکم‌سازی خط لوله است و سه متغیر باینری در مورد استفاده از راهکار مستحکم‌سازی در خط لوله بین تأمین‌کننده‌ها و مخازن ذخیره و مشتری‌ها تصمیم‌گیری می‌کنند.

محدودیت‌های ۲۴ تا ۲۹ مربوط به راهکار مستحکم‌سازی خطوط لوله است که به محدودیت‌های مدل اضافه می‌شوند:

$$XWW_{kq}^{(s)} \leq M \cdot (FM_{kq} + T_{kq}^{(s)}) \quad \forall k, s \quad (24)$$

$$XW_{kc}^{(s)} \leq M \cdot (FF_{kc} + \sigma_{kc}^{(s)}) \quad \forall k, c, s \quad (25)$$

$$XWW_{kq}^{(s)} \leq M \cdot (FM_{kq} + \rho_{ik}^{(s)}) \quad \forall i, k, s \quad (26)$$

$$\zeta_{ik} \geq FP_{ik} \quad \forall i, k \quad (27)$$

$$\lambda_{kc} \geq FF_{kc} \quad \forall k, c \quad (28)$$

$$\theta_{kq} \geq FM_{kq} \quad \forall k \quad (29)$$

محدودیت ۲۴ تا ۲۶ برای آن است که جریان آب در هر سناریو فقط می‌تواند از خط لوله‌ی فعال یا از خط لوله‌هایی که مستحکم‌سازی شده‌اند عبور کنند. محدودیت ۲۷ تا ۲۹ مربوط به این است که تنها خط لوله‌های موجود می‌توانند مستحکم‌سازی شوند.

همچنین برای مستحکم‌سازی خطوط لوله، سه قسمت $\sum_i \sum_k v.di_{ik} \cdot FP_{ik} + \sum_k \sum_c v.di_{kc} \cdot FF_{kc} + \sum_k \sum_q v.di_{kq} \cdot FM_{kq}$ به عنوان هزینه‌ی مستحکم‌سازی به تابع هدف هزینه اضافه می‌شود.

۴. مطالعه‌ی موردی

در این بخش برای نشان دادن کاربرد بودن مدل ارائه شده، از داده‌های واقعی به دست آمده از شرکت آب شهرستان شهرکرد استفاده می‌شود. منابع تأمین آب

جدول ۱. نتایج به دست آمده از مقاوم سازی زنجیره‌ی تأمین آب.

سبز بودن	هزینه (میلیون تومان)	سناریوها	
۶۸۸۵۷۲,۵۴۳	۱۲۰,۰۸۳	سناریو ۱	شبکه‌ی آبرسانی سبز - غیرمقاوم
۹۹۲۸۳۲,۵۴۳	۲۰۲,۰۶۷	سناریو ۲	
۶۸۸۵۷۲,۵۴۳	۱۲۰,۰۶۲	سناریو ۳	
۱۱۴۴۹۶۲,۵۴۳	۲۴۳,۰۸۱	سناریو ۴	
۷۵۸۵۵۲,۳۴۳	۲۷۷,۸۶۵	میانگین موردنظر	
۴۷۹۴۴۰	۱۳۳,۳۰۶	سناریو ۱	شبکه‌ی آبرسانی سبز - مقاوم
۶۳۱۵۷۰	۱۶۱,۰۷۱	سناریو ۲	
۴۷۹۴۴۰	۱۲۰,۰۷۶	سناریو ۳	
۶۳۱۵۷۰	۱۶۱,۰۷۱	سناریو ۴	
۵۱۲۹۰۸,۶	۲۷۶,۱۸۰	میانگین موردنظر	
٪۳۳	٪۰,۶	درصد بهبود	

جدول ۲. نتایج به دست آمده از مقاوم سازی با راهکار مستحکم سازی.

سبز بودن	هزینه (میلیون تومان)	سناریوها	
۶۸۸۵۷۲,۵۴۳	۱۲۰,۰۸۳	سناریو ۱	شبکه‌ی آبرسانی سبز - غیرمقاوم
۹۹۲۸۳۲,۵۴۳	۲۰۲,۰۶۷	سناریو ۲	
۶۸۸۵۷۲,۵۴۳	۱۲۰,۰۶۲	سناریو ۳	
۱۱۴۴۹۶۲,۵۴۳	۲۴۳,۰۸۱	سناریو ۴	
۷۵۸۵۵۲,۳۴۳	۲۷۷,۸۶۵	میانگین موردنظر	
۵۳۴۰۷۲,۹۵۷	۱۲۰,۰۷۸	سناریو ۱	مقاوم سازی شبکه‌ی آبرسانی سبز با مستحکم سازی
۸۳۸۳۳۲,۹۵۷	۲۰۲,۰۷۴	سناریو ۲	
۵۳۴۰۷۲,۹۵۷	۱۲۰,۰۶۷	سناریو ۳	
۶۸۶۲۰۲,۹۵۷	۱۶۱,۰۷۱	سناریو ۴	
۵۹۷۹۶۷,۵۵۷	۲۷۶,۲۰۵	میانگین موردنظر	
٪۲۲	٪۰,۶	درصد بهبود	

- در بهبود بخشیدن دو تابع هدف هزینه و سبز بودن شبکه‌ی آبرسانی، راهکار انتقالات عرضی در رتبه‌ی اول و راهکار مستحکم سازی خطوط لوله در رتبه‌ی دوم قرار گرفته‌اند.
- همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود بر اثر استفاده از راهکارهای ارائه شده، هزینه‌ی کل شبکه و میزان آلایندگی‌ها کاهش یافته و عملکرد شبکه در هر دو تابع هدف بهبود یافته است. برای بررسی تأثیر هر کدام از راهکارها بر توابع هدف، مدل ارائه شده با هر کدام از راهکارها به صورت جداگانه حل شده است. در جداول ۱ تا ۳ نتایج حاصله ثبت شده است.
- شبکه‌ی آبرسانی سبز - مقاوم در هریک از سناریوها نشان داده شده است. برای مقایسه‌ی دو راهکار مقاوم سازی، مدل طراحی مجدد شبکه‌ی آبرسانی در دو آزمایش مورد ارزیابی قرار گرفته است: ۱. مقاوم سازی با راهکار مستحکم سازی؛ ۲. مقاوم سازی با راهکار انتقالات عرضی. نتایج این دو آزمایش در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است. مشاهده‌ی این دو جدول نشان می‌دهد که:
 - تابع هدف هزینه‌ی شبکه‌ی آبرسانی سبز - مقاوم ۰/۶ درصد نسبت به شبکه‌ی آبرسانی سبز - غیرمقاوم و تابع هدف سبز بودن ۳۳ درصد بهبود یافته است.

جدول ۳. نتایج به دست آمده از مقاومسازی با راهکار انتقالات عرضی.

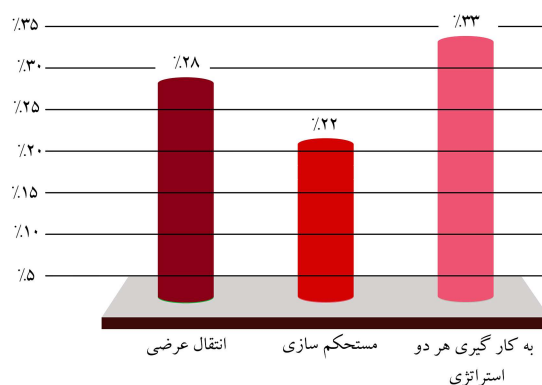
سناریوها	هزینه (میلیون تومان)	سبز بودن
سناریو ۱	۱۲۰,۰۸۳	۶۸۸۵۷۲,۵۴۳
سناریو ۲	۲۰۲,۰۶۷	۹۹۲۸۳۲,۵۴۳
سناریو ۳	۱۲۰,۰۶۲	۶۸۸۵۷۲,۵۴۳
سناریو ۴	۲۴۳,۰۸۱	۱۱۴۴۹۶۲,۵۴۳
میانگین موردنظر	۲۷۷,۸۶۵	۷۵۸۵۵۲,۳۴۳
مقاومسازی شبکه‌ی آب‌رسانی سبز با مستحکم سازی		
سناریو ۱	۱۲۰,۰۵۷	۴۷۹۹۴۴۰
سناریو ۲	۲۰۲,۰۶۲	۷۸۳۷۰۰
سناریو ۳	۱۲۰,۰۵۴	۴۷۹۴۴۰
سناریو ۴	۲۰۲,۰۶۲	۷۸۳۷۰۰
میانگین موردنظر	۲۷۶,۱۹۳	۵۴۶۳۷۷,۲
درصد بهبود	٪۶۱	٪۲۸

آلایندگی‌ها توسعه یافته است. این مدل شامل مجموعه‌ی بی از تأمین‌کننده‌ها و مخازن ذخیره و پمپ‌ها و مراکز توزیع آب است. سه وضعیت برای مخازن ذخیره در قسمت بازطراحی شبکه‌ی آب‌رسانی در نظر گرفته شده است: ۱. احداث مخزن ذخیره‌ی جدید؛ ۲. افزایش اندازه‌ی مخزن‌های ذخیره‌ی موجود. در این تحقیق از دو راهکار انتقالات عرضی و مستحکم‌سازی خطوط لوله برای مقاومسازی شبکه‌ی آب‌رسانی استفاده شده است. کارایی مدل ارائه شده در دنیای واقعی، در شرکت آب و فاضلاب شهرکرد مورد آزمایش قرار گرفته است.

نتایج نشان می‌دهد که راهکارهای مقاومسازی موجب بهبود تابع هدف هزینه و سبز بودن شبکه‌ی آب‌رسانی می‌شود، به‌گونه‌ی که تابع هدف هزینه‌ی شبکه‌ی آب‌رسانی ۰/۶ درصد و تابع هدف سبز بودن شبکه‌ی آب‌رسانی ۳۳ درصد بهبود یافته است. از سوی دیگر، تأثیر دو راهکار به صورت جداگانه، بیان می‌دارد که راهکار انتقالات عرضی نسبت به مستحکم‌سازی خطوط لوله، دو تابع هدف را بیشتر بهبود می‌دهد.

در نظر گرفتن تقاضای غیرقطعی برای مدل و حل آن به روش استوار یا فازی می‌تواند زمینه‌ی پژوهش‌های بعدی باشد. همچنین می‌توان با بررسی اختلال‌های دیگر راهکارهای بیشتری را به مدل اضافه کرد. و نهایتاً مقایسه‌ی زمان و نتایج حل دقیق با یک روش ابتکاری جدید برای مسائلی با ابعاد بزرگ می‌تواند پیشنهادی برای مطالعات بعدی باشد.

۱/۵ سانت ۳ سانت



شکل ۲. درصد بهبود راهکارها در توابع هدف.

در شکل ۲ میزان بهبود در دو تابع هدف توسط راهکارهای مختلف با هم مقایسه شده است.

۶. نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای بازطراحی شبکه‌ی آب‌رسانی سبز - مقاوم با اهداف کمیته‌سازی هزینه‌های کل شبکه و میزان

پانویس‌ها

1. supply chain network
2. supply chain network design
3. water supply network
4. Green supply chain
5. disruption
6. resilient supply chain
7. supply chain network redesign

منابع (References)

- Zahiri, B., Zhuang, J. and Mohammadi, M. "Toward an integrated sustainable-resilient supply chain: a pharmaceutical case study", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **103**, pp. 109-142 (2017).
- Devika, K., Jafarian, A. and Nourbakhsh, V. "Designing a sustainable closed-loop supply chain network based on triple bottom line approach: a comparison of metaheuristics hybridization techniques", *European J. Oper. Res*, **235**, pp. 594-615 (2014).
- Fu, J. and Fu, Y. "An adaptive multi-agent system for cost collaborative management in supply chains", *Eng. Appl. Artif. Intell*, **44**, pp. 91-100 (2015).
- Farahani, R.Z, Rezapour, S., Drezner, T. and et al. "Competitive supply chain network design: an overview of classifications, models, solution techniques and applications", *Omega*, **45**(1), pp. 92-118 (2014).
- Feitó-Cespón, M., Sarache, W., Piedra-Jimenez, F. and et al. "Redesign of a sustainable reverse supply chain under uncertainty: a case study", *Journal of Cleaner Production*, **151**, pp. 206-217 (2017).
- Mouawad, J. "Katrina's shock to the system", *New York Times*, **4**, (2005).
- Sheffi, Y., *The Resilient Enterprise: Overcoming Vulnerability For Competitive Advantage*, MIT Press Books, 1 (2005).
- Kleindorfer, P.R. and Saad, G. H. "Managing disruption risks in supply chains", *Production and Operations Management*, **14**(1), pp. 53-68 (2005).
- Aryanezhad, M. B., Jalali, S. G. and Jabbarzadeh, A. "An integrated supply chain design model with random disruptions consideration", *African Journal of Business Management*, **4**(12), p. 2393 (2010).
- Lücker, F. and Seifert, R.W. "Building up resilience in a pharmaceutical supply chain through inventory, dual sourcing and agility capacity", *Omega*, **73**, pp. 114-124 (2017).
- Lim, M., Daskin, M. S., Bassamboo, A. and et al. "A facility reliability problem: formulation, properties, and algorithm", *Naval Research Logistics (NRL)*, **57**(1), pp. 58-70 (2010).
- Jabbarzadeh, A., Fahimnia, B., Sheu, J. B. and et al. "Designing a supply chain resilient to major disruptions and supply/demand interruptions", *Transportation Research Part B: Methodological*, **94**, pp. 121-149 (2016).
- Fattahi, M., Govindan, K. and Keyvanshokoh, E. "Responsive and resilient supply chain network design under operational and disruption risks with delivery lead-time sensitive customers", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **101**, pp. 176-200 (2017).
- Qin, X., Liu, X. and Tang, L. "A two-stage stochastic mixed-integer program for the capacitated logistics fortification planning under accidental disruptions", *Computers & Industrial Engineering*, **65**(4), pp. 614-623 (2013).
- Hasani, A. and Khosrojerdi, A. "Robust global supply chain network design under disruption and uncertainty considering resilience strategies: a parallel memetic algorithm for a real-life case study", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **87**, pp. 20-52 (2016).
- Firouz, M., Keskin, B.B. and Melouk, S.H. "An integrated supplier selection and inventory problem with multi-sourcing and lateral transshipments", *Omega*, **70**, pp. 77-93 (2017).
- Sawik, T. "Selection of resilient supply portfolio under disruption risks", *Omega*, **41**(2), pp. 259-269 (2013).
- Torabi, S.A., Baghersad, M. and Mansouri, S. A. "Resilient supplier selection and order allocation under operational and disruption risks. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **79**, pp. 22-48 (2015).
- Razmi, J., Zahedi-Anaraki, A. and Zakerinia, M. "A bi-objective stochastic optimization model for reliable warehouse network redesign", *Mathematical and Computer Modelling*, **58**(11-12), pp. 1804-1813 (2013).
- Min, H. and Melachrinoudis, E. "The relocation of a hybrid manufacturing/distribution facility from supply chain perspectives: a case study", *Omega*, **27**(1), pp. 75-85 (1999).
- Melachrinoudis, E. and Min, H. "The dynamic relocation and phase-out of a hybrid, two-echelon plant/warehousing facility: a multiple objective approach", *European Journal of Operational Research*, **123**(1), pp. 1-15 (2000).
- Melachrinoudis, E. and Min, H. (2007). "Redesigning a warehouse network", *European Journal of Operational Research*, **176**(1), pp. 210-229 (2007).
- Kusumastuti, R.D., Piplani, R. and Lim, G.H. "Redesigning closed-loop service network at a computer manufacturer: a case study", *International Journal of Production Economics*, **111**(2), pp. 244-260 (2008).
- Bing, X., Bloemhof-Ruwaard, J., Chaabane, A. and et al. "Global reverse supply chain redesign for household plastic waste under the emission trading scheme", *Journal of Cleaner Production*, **103**, pp. 28-39 (2015).
- Chaabane, A., Ramudhin, A. and Paquet, M. "Design of sustainable supply chains under the emission trading scheme", *International Journal of Production Economics*, **135**(1), pp. 37-49 (2012).
- Verleye, D. and Aghezzaf, E.-H. "Modeling and optimization of production and distribution of drinking water at VMW", *Network Optimization* pp. 315-326 Springer (2011).
- Naderi, M.J. and Pishvae, M.S. "A stochastic programming approach to integrated water supply and wastewater collection network design problem", *Computers & Chemical Engineering*, **104**, pp. 107-127 (2017).
- Chung, R., Madrzykowski, D., Stone, W. C. and et al. "January 17, 1995 hyogoken-nanbu (Kobe) earthquake: performance of structures, lifelines, and fire protection systems", NIST SP 901 (ISCCS TR18). Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology (1996).

29. Horsley, M.B., Carlson, D.J., McCarthy, D.W. and et al. "Design lessons from the flood of '93", *In Proc. 1994 AWWA Ann. Conf*, New York (1994).
30. Dai, A., Trenberth, K.E. and Qian, T. "A global dataset of palmer drought severity index for 1870 2002: relationship with soil moisture and effects of surface warming", *Journal of Hydrometeorology*, **5**(6), pp. 1117-1130 (2004).
31. Yavari, M. and Geraeli, M. "Heuristic method for robust optimization model for green closed-loop supply chain network design of perishable goods", *Journal of Cleaner Production*, **226**, pp. 282-305 (2019).
32. Devika, K., Jafarian, A. and Nourbakhsh, V. "Designing a sustainable closed-loop supply chain network based on triple bottom line approach: a comparison of meta-heuristics hybridization techniques", *European Journal of Operational Research*, **235**(3), pp. 594-615 (2014).
33. Yavari, M. and Zaker, H. "Designing a resilient-green closed loop supply chain network for perishable products by considering disruption in both supply chain and power networks", *Computers & Chemical Engineering*, **134**, p. 106680 (2020).
34. Yavari, M. and Zaker, H. "An integrated two-layer network model for designing a resilient green-closed loop supply chain of perishable products under disruption", *Journal of Cleaner Production*, **230**, pp. 198-218 (2019).
35. Mohammed, A. "Towards 'gresilient' supply chain management: a quantitative study", *Resources, Conservation and Recycling*, **155**, p. 104641 (2020).
36. Fahimnia, B., Jabbarzadeh, A. and Sarkis, J. "Greening versus resilience: A supply chain design perspective", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **119**, pp. 129-148 (2018).