

مکان‌یابی و تخصیص سیستم توزیع با در نظر گرفتن اختلال در انبارهای سیار و تسهیلات پشتیبان

سعید یعقوبی^{۱*}، جمال نهفتی کهنه^۲، امیر خسرو جردی^۳ و احمد محمدی^۴

۱. استادیار دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه علم و صنعت ایران

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع دانشگاه علم و صنعت ایران

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع دانشگاه علم و صنعت ایران

۴. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع دانشگاه علم و صنعت ایران

(تاریخ دریافت ۹۳/۶/۲۳ - تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۹۴/۴/۲ - تاریخ تصویب ۹۴/۴/۹)

چکیده

در این پژوهش، مسئله مکان‌یابی تسهیلات سیستم‌های توزیع - به‌عنوان یکی از مسائل مهم و راهبردی در مدیریت زنجیره تأمین - در حالت تصادفی در یک زنجیره تأمین سه سطحی بررسی شده است. بدین منظور، یک مدل ریاضی دومرحله‌ای برای مسئله مکان‌یابی - تخصیص سیستم‌های توزیع با در نظر گرفتن اختلال در انبارهای سیار توزیع‌کننده و پشتیبانی از سایر انبارهای مختل‌نشده در یک زنجیره تأمین سه‌سطحی ارائه شده است. در مرحله اول، تصمیمات مربوط به مکان‌یابی انبارهای سیار سیستم توزیع و انتقال محصولات بین کارخانه‌های تولیدی و انبارهای سیار اتخاذ شده است. در مرحله دوم نیز تصمیمات مربوط به برآورده کردن نیاز مشتری، با توجه به اختلال انبارهای توزیع و پشتیبانی از سایر انبارهای سیار مختل‌نشده گرفته می‌شود. شایان ذکر است اختلال در انبارها، به‌صورت سناریوهای مختلف در نظر گرفته شده است که برای رفع مشکل زمان محاسبات بالا در ابعاد بزرگ، از روش آزادسازی لاگرانژ برای حل این مسئله استفاده شده است. در نهایت، مثال‌های عددی با نرم‌افزار GAMS حل شده و سپس برای اعتبارسنجی مدل، تابع هدف مسئله با تابع هدف روش آزادسازی لاگرانژ مقایسه شده است.

واژه‌های کلیدی: انبارهای سیار، برنامه‌ریزی تصادفی مبتنی بر سناریو، تسهیلات پشتیبان، مکان‌یابی - تخصیص

سیستم توزیع.

مقدمه

- امروزه به‌دلیل آثار بسیار زیاد مکان‌یابی تسهیلات در منافع اقتصادی سازمان‌ها، کیفیت ارائه خدمات مناسب و رضایت مشتریان، مسئله مکان‌یابی یکی از مسائل مورد علاقه و جذاب محققان تحقیق در عملیات و علوم مدیریت است که پیشرفت‌های شایان توجهی نیز در این زمینه حاصل شده است [۱]. به‌دلیل اهمیت مسائل مکان‌یابی، در نظر گرفتن چند نکته در این رابطه ضروری است:
- تصمیمات مکان‌یابی معمولاً هنگامی اتخاذ می‌شوند که محصول جدیدی به بازار عرضه می‌شود، محصولی قدیمی از بازار خارج می‌شود و ظرفیت‌ها و فناوری‌های تولیدی تغییر می‌یابند.
- تصمیم مکان‌یابی با توجه به نحوه تملک تسهیلات، راهبردی (خرید) یا تاکتیکی (اجاره) است.
- مکان تسهیلات بر نحوه جذب تقاضاهای جدید تأثیرگذار است.
- طراح سیستم، مرزهای هریک از تسهیلات (نحوه تخصیص مشتریان به تسهیلات) را مشخص می‌کند. یکی از موارد مهم در حوزه مسائل مکان‌یابی، مسئله مکان‌یابی - تخصیص^۱ است که در آن علاوه بر تعیین محل استقرار خدمت‌دهنده‌ها به منظور تأمین تقاضای مشتریان، نحوه تخصیص مشتریان به خدمت‌دهندگان نیز تعیین می‌شود [۲]. بیشتر مدل‌های مکان‌یابی در فضای گسسته

NP-hard است؛ بنابراین، به دست آوردن جواب‌های خوب برای نمونه‌های بزرگ در زمان حل محدود دشوار است [۲۶]. در نتیجه، باید از رویکردهای ابتکاری یا فرا ابتکاری در حل این مسائل استفاده کرد.

کوپر برای اولین بار مسئله مکان‌یابی - تخصیص را معرفی کرد [۳]. لاو و موریس [۴] نیز روش کاهش مجموعه و الگوریتم پی - میانه^۲ را برای حل مسئله مکان‌یابی - تخصیص با فاصله پله‌ای ارائه کردند. سپس ارنگاک و همکاران [۵] پژوهشی را در حوزه برنامه‌ریزی تولید - توزیع یکپارچه در زنجیره تأمین با تأکید بر مکان‌یابی - تخصیص تسهیلات انجام دادند. علاوه بر این، کانل و همکاران [۶] یک مدل مکان‌یابی - تخصیص پویا در زنجیره تأمین چندسطحی ارائه دادند که در این مدل شرایط قطعی فرض شده است.

در اغلب مسائل مکان‌یابی فرض می‌شود که تسهیلات در هر شرایطی به کار خود ادامه می‌دهد؛ بنابراین، از کارافتادگی و خرابی را برای تسهیلات در نظر نمی‌گیرند، اما در دنیای واقعی، تسهیلات به دلایل مختلف طبیعی از جمله سیل، زلزله، شرایط آب‌وهوایی و غیرطبیعی مانند قطعی برق، اعتصاب کارکنان، آتش‌سوزی و سایر موارد، همواره در معرض اختلال^۳ هستند. همچنین، به دلیل حساسیت و اهمیت مضاعف تسهیلات سیستم‌های توزیع در نظر گرفتن اختلال در تسهیلات سیستم‌های توزیع اهمیت ویژه‌ای دارد. یکی از کاربردهای مهم این مسئله، بحث مکان‌یابی مراکز سیار اقلام حیاتی از قبیل خون و فرآورده‌های خونی، مواد سوختی مانند بنزین، اقلام دارویی و مواد غذایی فسادپذیر است که در صورت بروز اختلال در این مراکز به دلیل اهمیت زیاد آن‌ها، کشور با بحران‌های اجتماعی و اقتصادی مواجه می‌شود. در نتیجه، در این پژوهش علاوه بر بحث مکان‌یابی انبارهای سیار در سیستم‌های توزیع، اختلال در انبارها و نیز پشتیبانی از سایر انبارهای مختل نشده در یک زنجیره تأمین سه سطحی بررسی می‌شود.

داسکین و اشنايدر [۷] اولین مدل مکان‌یابی قابل اطمینان را در زمینه مکان‌یابی در حالت قابلیت اطمینان، با در نظر گرفتن اختلال مطرح کردند. موسوی و اخوان نیای [۸] یک مسئله مکان‌یابی - تخصیص با ظرفیت

محدود ارائه دادند و در آن مکان‌یابی را تصادفی و براساس یک توزیع نرمال و تقاضا را فازی در نظر گرفتند. سپس زینل همدانی و همکاران [۹] یک مدل مکان‌یابی - تخصیص برای سیستم حمل‌ونقل درونی در کارخانه فولاد مبارکه ارائه کردند. همچنین، حاجی‌پور و همکاران [۱۰] یک مسئله دو هدفه مکان‌یابی - تخصیص را در یک سیستم صف با محدودیت‌های بودجه و ظرفیت مدل کردند. با وجود این، پارک و همکاران [۱۱] مسئله دوسطحی مکان‌یابی - تخصیص را در طراحی شبکه‌های فیبر نوری بررسی کردند. پژوهشگران در این مسئله به دنبال یافتن مکان‌های بهینه سوئیچ‌ها و تخصیص تقاضاها هستند، به گونه‌ای که هزینه‌های سوئیچ و کابل فیبر حداقل شود. رحمتی و همکاران [۱۲] یک مدل چندهدفه مکان‌یابی - تخصیص را برای خدمت‌دهنده‌های ثابت در قالب صف در نظر گرفتند. در حوزه اختلال، حسینی‌نژاد و همکاران [۱۳] یک مسئله مکان‌یابی - تخصیص با ظرفیت محدود را با در نظر گرفتن هزینه ثابت و ریسک اختلال ارائه دادند و آن را با استفاده از یک الگوریتم فازی براساس روش برش α حل کردند. همچنین، ویدیارتی و جایاسوال [۱۴] مسئله مکان‌یابی - تخصیص را برای خدمت‌دهنده‌های ثابت و با تقاضای تصادفی بررسی کردند که در این مسئله به طور همزمان به مکان‌یابی تسهیلات و مجهز کردن آن‌ها توسط قابلیت‌های مناسب و تخصیص تقاضای مشتری به این تسهیلات پرداخته شده است. سپس ظهیری و همکاران [۱۵] از رویکرد بهینه‌سازی استوار برای مدل‌سازی مسئله مکان‌یابی - تخصیص چندهدفه مراکز اهدای عضو تحت عدم قطعیت با هدف کاهش کل هزینه‌ها استفاده کردند. این محققان برای حل مدل خود از نرم‌افزار GAMS بهره بردند.

بزرگی و همکاران [۱۶] نیز مدل بهینه‌سازی استوار دو هدفه‌ای را در زمینه مکان‌یابی تسهیلات و تخصیص منابع جهت لجستیک امداد بلافاصله ارائه دادند و سه منبع اصلی عدم قطعیت شامل تقاضا، تأمین و هزینه را در نظر گرفتند. همچنین، بزرگی و همکاران [۱۷] مدلی را برای مکان‌یابی و تخصیص مراکز توزیع امداد تحت عدم قطعیت ارائه دادند و با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات^۵ مدل ارائه شده را حل کردند. ژان و همکاران [۱۸] فرض اختلال

قابل اطمینان با هزینه ثابت و با ظرفیت محدود است. در هر دو مدل هر مشتری به یک تأمین‌کننده اولیه و تعدادی از تأمین‌کنندگان پشتیبان اختصاص می‌یابد که حداقل یکی از آن‌ها کاملاً قابل اطمینان است. همچنین، در این پژوهش اگر تأمین‌کننده جاری خراب شود، مشتری از تأمین‌کننده در دسترس پشتیبان بعدی خدمت می‌گیرد و احتمال خرابی تسهیلات یکسان و مستقل از هم در نظر گرفته شده است. در ادامه، استپیرکال و شیلینگ [۲۵] مدلی ارائه دادند که در آن هر تسهیل جدید، ظرفیت محدودی دارد و خدمات اولیه و پشتیبان به هر گره تقاضا ارائه می‌شود. علاوه بر این، کوی و همکاران [۲۶] فرض احتمالات خرابی همگن را با استفاده از روش آزادسازی لاگرانژ، آزاد کردند و به صورت احتمالات خاص مکان‌یابی در نظر گرفتند. آن‌ها برای تسهیلات دچار اختلال شدند و سایر تسهیلات را در سطوح بعد به عنوان تسهیل پشتیبان آن تسهیل، به صورت سلسله‌مراتبی لحاظ کردند. لی و اوپانگ [۲۷] نیز همین مسیر را توسعه داده‌اند و احتمالات خرابی را برای مکان‌های خاص در نظر گرفته‌اند.

بر اساس مطالعات مذکور، مشخص است بیشتر این تحقیقات مدل‌های خود را به علت راهبردی بودن بحث مکان‌یابی به صورت تک‌دوره‌ای در نظر گرفته‌اند و کمتر به چنددوره‌ای کردن مسئله به صورت تاکتیکی روی آورده‌اند، ولی در دنیای واقعی به علت تغییرات در شرایط، ممکن است مکان‌یابی انبارها نیز از این تغییرات تأثیر بپذیرد و در دوره‌های زمانی متفاوت به اصلاح و مکان‌یابی مجدد نیاز داشته باشد. در نتیجه، در این پژوهش بحث مکان‌یابی انبارهای سیار در چند دوره مطرح شده است که جزء تصمیمات تاکتیکی یک زنجیره است. یکی از دلایل استفاده از انبارهای سیار، هزینه‌های بسیار پایین فعال‌سازی این انبارهاست. بر اساس اینکه تقاضای مشتریان در بعضی از مناطق در تمام ادوار ثابت نیست، احداث انبارهای ثابت در این مناطق امری منطقی نیست. همچنین، با در نظر گرفتن اختلال در انبارهای سیار مثل حوادث طبیعی از قبیل زلزله، با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی مبتنی بر سناریو سعی شده است فضای مسئله به دنیای واقعی نزدیک‌تر شود.

همچنین، در بیشتر پژوهش‌های مربوط به مبحث

با توزیع یکنواخت را در مدل خود لحاظ کردند و یک مسئله تصادفی با هزینه ثابت را به صورت یک مسئله عدد صحیح ترکیبی غیرخطی^۶ مدل کردند. علاوه بر این، آزاد و همکاران [۱۹] به طراحی یک شبکه زنجیره تأمین احتمالی قابل اطمینان با خرابی‌های تصادفی در مکان‌های توزیع و حالات حمل‌ونقل پرداخته‌اند و خرابی را با استفاده از یک احتمال برای مراکز توزیع بررسی کرده‌اند. زنجیرانی فراهانی و همکاران [۲۰] امکان خرابی در تسهیلات را با توجه به سلسله‌مراتب حداقل کردن تقاضای پوشش داده شده در نظر گرفته‌اند که این مدل در مناطق مختلفی از جمله حوزه سلامت و سیستم‌های مدیریتی قابل اطمینان اجرا شده است. همچنین، لی و همکاران [۲۱] دو مدل برای طراحی شبکه توزیع قابل اطمینان شامل یک مدل پی-میانه قابل اطمینان و یک مدل مکان‌یابی با هزینه ثابت با ظرفیت نامحدود قابل اطمینان ارائه کردند که در هر دو مدل، احتمال خرابی تسهیلات ناهمگون و یک لایه از منبع پشتیبان‌گیری و غنی‌سازی تسهیلات با بودجه محدود و به صورت برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی در نظر گرفته شده است. نویسندگان برای کارایی محاسباتی خود از آزادسازی لاگرانژ^۷ استفاده کرده‌اند. چن و همکاران [۲۲] مسئله مکان‌یابی-موجودی قابل اطمینان را بررسی کردند که در آن تصمیمات بهینه مکان‌یابی، تخصیص مشتریان و مدیریت موجودی زمانی گرفته می‌شود که تسهیلات دچار اختلال می‌شوند. زمانی که تسهیلی دچار اختلال می‌شود، مشتریان به صورت سلسله‌مراتبی به سایر تسهیلات عملیاتی به منظور جلوگیری از هزینه زیاد از فروش از دست‌رفته تخصیص داده می‌شوند.

در حوزه تسهیلات پشتیبان، برای پاسخگویی به تقاضای مشتریان تخصیص داده شده به انبارهای مختل شده و جلوگیری از هزینه‌های بالای برآورده‌نشده نیازهای این مشتریان می‌توان از این تسهیلات استفاده کرد. هوگان و رول [۲۳] پوشش پشتیبان را در حالتی تعریف کرده‌اند که تسهیل اضافی یک گره تقاضا را پوشش می‌دهد و پوشش پشتیبان یک گره، برابر با تقاضای آن گره است. اشنایدر و داسکین [۲۴] دو مدل دارای قابلیت اطمینان را برای مکان‌یابی تسهیلات در نظر گرفتند که مدل اول آن‌ها یک مدل پی-میانه قابل اطمینان و مدل دوم مدل مکان‌یابی

مدل‌سازی مسئله

در این قسمت، مسئله مکان‌یابی - تخصیص انبارهای سیار سیستم توزیع در یک زنجیره تأمین سه سطحی شامل کارخانجات تولیدی، انبارهای سیار سیستم توزیع و مشتریان، با در نظر گرفتن اختلال به صورت دو مرحله‌ای^۹ مدل شده است، به طوری که در مرحله اول، درباره مکان‌یابی انبارهای سیار سیستم توزیع، مقدار تولید در بخش تولیدی و میزان انتقال از بخش تولیدی به انبارهای سیار سیستم توزیع تصمیم گرفته می‌شود. در مرحله دوم، در زمینه میزان موجودی در انبارهای سیار سیستم توزیع، نحوه تخصیص مشتریان به این انبارهای سیار، دریافت محصول از سایر انبارهای سیار مختل نشده در هر دوره - در صورت مختل بودن انبارها - و میزان فروش از دست‌رفته با توجه به اختلال رخ داده در انبارهای سیار سیستم توزیع تصمیم گرفته می‌شود.

در این مدل با توجه به پیچیده بودن مسئله مکان‌یابی - تخصیص، با در نظر گرفتن سناریو فرض شده است که اگر انبار سیاری دچار اختلال شود، موجودی آن از بین می‌رود و تقاضای مشتری تخصیص داده شده به آن انبار از سایر انبارهای سیاری برآورده می‌شود که اختلال ندارند. این تأمین با هزینه بیشتری انجام می‌گیرد که به میزان نزدیکی و دوری انبار اختلال یافته به سایر انبارهای اختلال نیافته بستگی دارد. در نهایت، در صورت برآورده نشدن به شکل فروش از دست‌رفته لحاظ می‌شود.

در شکل ۱، زنجیره تأمین سه سطحی مربوط به مسئله نشان داده می‌شود. این زنجیره شامل تعدادی از کارخانجات تولیدی، انبارهای سیار و مشتریان است. در این زنجیره، حمل و نقل بین سطوح زنجیره با هزینه ثابت و هزینه متغیر به ازای هر واحد محصول محاسبه می‌شود. در این مسئله، در هر دوره تصمیم‌های مربوطه اتخاذ می‌شود که دوره‌ها به صورت کوتاه مدت (سه تا شش ماه) فرض شده است. انبارهای سیار سیستم توزیع به صورت موقتی و سیار (کانکس) است و به همین دلیل هزینه ثابت تقریباً کوچکی برای احداث آن‌ها در نظر گرفته شده است. در اینجا، منظور از هزینه احداث هزینه اجاره مکان انبار برای دوره مورد نظر است. در این بخش فرض شده است در ابتدای افق زمانی تعداد نامحدودی از این انبارهای سیار یکسان به طور بالقوه

مکان‌یابی - تخصیص، تقاضای مشتری زمانی که با اختلال مواجه می‌شود، از یک انبار پشتیبان تأمین می‌شود که این انبار پشتیبان در برابر اختلالات مختلف از قبیل زلزله مقاوم‌سازی شده است. نکته مهم این است که مقاوم‌سازی هزینه بسیار زیادی دارد، به طوری که تمام شرکت‌ها قادر به انجام دادن آن نیستند. در نتیجه، باید تصمیمی دیگر اتخاذ کرد که به همین دلیل در پژوهش حاضر از مبحث انتقال جانبی^۸ ایده گرفته شده است. این مبحث بیشتر در مدل‌های اقلام یدکی کاربرد دارد و در تحقیق‌های مربوط به مبحث مکان‌یابی یا مکان‌یابی تخصیص کمتر از آن استفاده شده است. انتقال جانبی بدین صورت است که اگر مشتری در یک دوره به انبار سیاری مراجعه کند و موجودی در آن انبار وجود نداشته باشد، کالای مورد تقاضا از یک انبار سیار دیگر - که موجودی کافی دارد - به انبار سیار دچار کمبود انتقال داده می‌شود. در این پژوهش، از این مبحث در زمینه اختلال انبارهای سیار ایده گرفته شده است. در نتیجه، اگر مشتری در یک دوره به انبار سیاری مراجعه کند که دچار اختلال شده است و قابلیت پاسخگویی به تقاضای مشتری را ندارد، کالای مورد تقاضا از یک انبار سیار دیگر که در آن دوره مختل نشده است به انبار سیار مختل شده انتقال داده می‌شود و تقاضای مشتری برآورده می‌شود. این امر در بسیاری از حالات در دنیای واقعی رایج است، زیرا ممکن است اولاً فاصله مشتری تا انبار سیار مختل نشده زیاد باشد و ثانیاً مشتری زمان کافی برای مراجعه به این انبار سیار نداشته باشد. در نتیجه، مشتری حاضر است با پرداخت هزینه بیشتر کالای خود را از همان انبار سیار مختل شده دریافت کند. همچنین، با توجه به کار بودن روش آزادسازی لاگرانژ در حل برخی مسائل خطی مکان‌یابی، براساس شرایط مسئله در پژوهش حاضر از این روش استفاده شده است.

در تحقیق پیش رو، ابتدا مسئله و مفروضات آن به طور کامل شرح و مدل ریاضی مسئله ارائه می‌شود. پس از بحث درباره روش حل مدل، مثال‌های عددی مختلف در مورد مسئله و تحلیل حساسیت جواب‌های مسائل و مقایسه نتایج روش آزادسازی لاگرانژ با حل‌کننده CPLEX بررسی می‌شود. در نهایت، نتایج تحقیق و پیشنهادهای آتی ارائه می‌شود.

مفروضات

در این پژوهش فرض شده است:

- تقاضای مشتریان تقسیم پذیر است، به طوری که این تقاضاها در چند قسمت و از چند انبار سیار توسط توزیع کننده به مشتری تحویل داده می شود.
- اگر انبار سیاری دچار اختلال شود، موجودی آن از بین می رود و زمانی که انباری دچار اختلال می شود انتقال بین انبارهای سیار امکان پذیر است.
- تمام انبارهای سیار در سیستم توزیع یکسان فرض شده اند و تعداد نامحدودی از انبارهای سیستم توزیع موجود است که در هر دوره با توجه به تقاضای آن دوره می توان از این انبارهای سیار استفاده کرد.
- انبارهای سیار و کارخانجات تولیدی ظرفیت محدودی دارند.
- میزان حمل کالا بین هر کارخانه تولیدی و هر انبار و مشتریان در هر دوره با توجه به قوانین دولتی از قبیل محدودیت های ترافیکی در مسیرها، ظرفیت محدودی دارد.
- دوره ها کوتاه مدت فرض شده است.
- برای حمل و نقل، هزینه ثابت برای مواردی از قبیل سوخت و... و هزینه متغیر نیز برای حمل هر واحد کالا در نظر گرفته شده است.

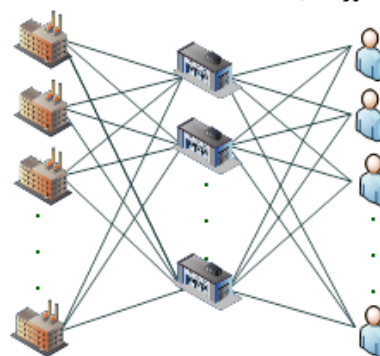
در این مدل، هدف یافتن مکان احداث انبارهای سیار سیستم توزیع، میزان تولید، میزان انتقال بین هر کارخانه تولیدی و انبارهای سیار سیستم توزیع، میزان موجودی هر محصول در هر انبار سیار سیستم توزیع، نحوه تخصیص هر انبار سیار به هر مشتری، میزان دریافت محصول از سایر انبارهای سیار مختل نشده در صورت بروز اختلال در یک یا چند انبار سیار و فروش از دست رفته برای تقاضای هر مشتری است.

مجموعه ها

- I: مجموعه محصولات
J: مجموعه کارخانجات تولیدی

در سیستم توزیع موجود است که با توجه به تصمیمات مکان‌یابی و تقاضای هر دوره می توان از این انبارهای سیار استفاده کرد. با توجه موقت بودن انبارهای سیار و پایین بودن هزینه ثابت، احداث کردن و احداث نکردن انبار در دوره های کوتاه مدت توجیه اقتصادی دارد. این فرض موجب انعطاف پذیری بیشتر سیستم توزیع با توجه به تغییرات تقاضا در دوره های مختلف مانند فصلی بودن برخی از محصولات و پاسخگویی در شرایط بحران و... می شود که در نتیجه، سبب افزودن انبارهای سیار به سیستم توزیع در شرایط افزایش تقاضا می شود. همچنین، در صورت کاهش تقاضا در برخی از دوره ها با توجه به پایین بودن هزینه احداث این انبارها، حذف این انبارها از سیستم توزیع توجیه پذیر است. یکی از کاربردهای اصلی این مسئله در زنجیره تأمین اقلام حیاتی مانند خون و مواد سوختی مانند بنزین است. ممکن است مراکز سیار خون گیری در دوره های مختلف در مکان های مختلفی استقرار یابند. در صورت بروز اختلال در این مراکز، کشور با بحران مواجه می شود؛ بنابراین، ضرورت بررسی این مسائل افزایش می یابد. در نتیجه، در هر دوره مراکز سیار که دچار اختلال نشده اند مراکز پشتیبان مراکز مختل شده در نظر گرفته می شوند.

برای هر سناریو با توجه به اطلاعات گذشته یک احتمال در نظر گرفته شده است. هر سناریو نشان دهنده اختلال داشتن یا اختلال نداشتن یک یا چند انبار سیار و دارای یک احتمال رخ دادن است که این احتمال براساس اطلاعات دوره های گذشته به دست آمده است.



مشتریان
انبارهای سیار
کارخانجات تولیدی

شکل ۱. پیکره بندی زنجیره تأمین مسئله

احتمال رخ دادن سناریوی s	: probs	مجموعه انبارهای سیار	: K
برابر ۱ اگر انبار سیار k در دوره t تحت	: A_{kt}^s	مجموعه مشتریها	: M
سناریوی s دچار اختلال نشده باشد و در		مجموعه دوره‌های زمانی	: T
غیر این صورت صفر		مجموعه سناریوها	: S

TC_{iklt}: هزینه اضافی پرداخت شده بابت انتقال محصول i از انبار سیار مختل نشده k به انبار سیار مختل شده l در دوره t

شناساگرها

i	: شناساگر مربوط به نوع محصولات (i ∈ I)
j	: شناساگر مربوط به کارخانجات تولیدی (j ∈ J)
l, k	: شناساگر مربوط به انبارهای سیار (l, k ∈ K)
m	: شناساگر مربوط به مشتریان (m ∈ M)
t	: شناساگر مربوط به دوره‌های زمانی (t ∈ T)
s	: شناساگر مربوط به سناریوها (s ∈ S)

متغیرهای تصمیم

مقدار تولید در کارخانه i از محصول i در دوره t	: PR _{ijt}
میزان انتقال محصول i از کارخانه تولیدی j به سمت انبار سیار k در دوره t	: FU _{ijkt}
میزان انتقال محصول i از انبار سیار k به مشتری m در دوره t تحت سناریوی s	: FUT _{ikmt}^s}
میزان موجودی محصول i در انبار سیار k در دوره t تحت سناریوی s	: IV _{ikt}^s}
مقدار فروش از دست‌رفته تقاضای مشتری m از محصول i در دوره t تحت سناریوی s	: LS _{imt}^s}
مقدار جابه‌جایی کالا بین انبارهای سیار k و l در صورتی که انبار سیار k تحت سناریوی s در دوره t خراب باشد	: TR _{iklt}^s}
برابر ۱ اگر انبار سیار k در دوره t باز باشد در غیر این صورت صفر	: Y _{kt}
برابر ۱ اگر محصول i از کارخانه تولیدی j به سمت انبار سیار k در دوره t حمل شود در غیر این صورت صفر	: X _{ijkt}}
برابر ۱ اگر محصول i از انبار سیار k به سمت مشتری m در دوره t حمل شود در غیر این صورت صفر	: E _{ikmt}^s}

پارامترها

هزینه تولید محصول i در کارخانه j	: VFC _{ij}
هزینه ثابت حمل‌ونقل محصول i از کارخانه j به انبار سیار k در دوره t	: FC _{ijkt}}
هزینه ثابت حمل‌ونقل محصول i از انبار سیار k به مشتری m در دوره t	: \overline{FC}_{ikmt}
هزینه حمل‌ونقل هر واحد محصول i از کارخانه j به انبار سیار k در دوره t	: VC _{ijkt}}
هزینه حمل‌ونقل هر واحد محصول i از انبار سیار k به مشتری m در دوره t	: \overline{VC}_{ikmt}
حداکثر مقدار انتقال محصول i از کارخانه تولیدی j به سمت انبار سیار k در دوره t	: FU _{ijkt}^{\max}}
هزینه فعال‌شدن انبار سیار k در دوره t	: OC _{kt}}
هزینه نگهداری موجودی محصول i در انبار سیار k در دوره t	: IC _{ikt}}
ظرفیت تولید محصول i در کارخانه j	: CAP _{ij}
ظرفیت محصول i در انبار سیار k	: \overline{CAP}_{ik}
حداکثر مقدار انتقال محصول i از انبار سیار k به مشتری m در دوره t	: FUT _{ikmt}^{\max}}
میزان تقاضای مشتری m از محصول i در دوره t	: D _{imt}}
هزینه فروش از دست‌رفته تقاضای مشتری m برای محصول i در دوره t	: CLS _{imt}}

مدل ریاضی

$$\begin{aligned} \text{MIN } Z = & \sum_i \sum_j \sum_t \text{VFC}_{ij} \text{PR}_{ijt} \\ & + \sum_i \sum_j \sum_k \sum_t \text{FC}_{ijkt} X_{ijkt} \end{aligned} \quad (1)$$

بین کارخانه و انبار سیار در دوره‌های مختلف اشاره می‌کند. عبارت چهارم دربرگیرنده هزینه استقرار انبار سیار در ادوار مختلف است. عبارت پنجم هزینه‌های موجودی را در انبارهای سیار سیستم توزیع نشان می‌دهد. عبارت ششم و هفتم همانند عبارت دو و سه است، با این تفاوت که در این عبارت‌ها، هزینه‌ها بین انبارها سیار و مشتریان است. عبارت هشتم نشان‌دهنده هزینه فروش از دست‌رفته تقاضای مشتریان است. آخرین عبارت نشان‌دهنده هزینه تأمین تقاضا از انبارهای سیار مختل نشده است. در محدودیت ۲ این نکته بیان شده است که میزان تولید در کارخانه زدر دوره t از ظرفیت تولید آن کارخانه در آن دوره کمتر است. در محدودیت ۳، نشان داده شده است میزان انتقال بین تولیدکننده و انبار سیار از حداکثر ظرفیت کانال موجود در دوره t بین این دو تسهیل کمتر است. در محدودیت ۴، برابر بودن میزان انتقال بین تولیدکننده و انبارهای سیار در دوره t با میزان تولید آن کارخانه تضمین شده است. در محدودیت ۵ به این نکته اشاره شده است که میزان انتقال بین انبار سیار و مشتری باید از حداکثر ظرفیت کانال موجود در دوره t بین این دو کمتر باشد. محدودیت ۶ نشان می‌دهد مجموع کالاهای حمل‌شده از انبارهای سیار به مشتری، کمتر از تقاضای مشتری است. محدودیت ۷ اشاره می‌کند محصولی زمانی به انبارهای سیار در دوره t حمل می‌شود که انبار سیار در آن دوره باز باشد. محدودیت ۸ بیان می‌کند محصول زمانی از انبارهای سیار به مشتری m در دوره t حمل می‌شود که انبار سیار در آن دوره باز باشد. محدودیت‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب میزان فروش از دست‌رفته را با توجه به مقدار حمل‌شده از انبارهای سیار به سمت مشتری و تقاضای مشتری و میزان موجودی در دوره t بیان می‌کنند. کم‌تر بودن میزان محصول حمل‌شده به انبارهای سیار از ظرفیت آن انبار در محدودیت ۱۱ بیان شده است. محدودیت ۱۲ محدودیت تعادلی جریان ورودی و خروجی در هر انبار سیار با توجه به دوره‌ها در هر سناریو است. محدودیت ۱۳ تضمین می‌کند اگر انبار سیار دچار اختلال شود، تقاضای مشتریان آن انبار سیار از سایر انبارهای سیار مختل نشده تأمین می‌شود. محدودیت ۱۴ بیان می‌کند انبار سیار مختل شده زمانی محصولی را از انبار سیار مختل نشده می‌گیرد که آن انبار سیار در آن دوره باز باشد. محدودیت ۱۵ بیان‌کننده متغیرهای تصمیم مثبت و صفر و یک است.

$$\begin{aligned}
 & + \sum_k \sum_i \sum_j \sum_t VC_{ijkt} FU_{ijkt} \\
 & + \sum_k \sum_t OC_{kt} Y_{kt} \\
 & + \sum_i \sum_k \sum_t \sum_s (probs) IC_{ikt} IV_{ikt}^s A_{kt}^s \\
 & + \sum_i \sum_k \sum_m \sum_t \sum_s (probs) \overline{FC}_{ikmt} E_{ikmt}^s \\
 & + \sum_i \sum_k \sum_m \sum_t \sum_s (probs) \overline{VC}_{ikmt} FUT_{ikmt}^s \\
 & + \sum_i \sum_m \sum_t \sum_s (probs) CLS_{imt} LS_{imt}^s \\
 & + \sum_i \sum_k \sum_l \sum_t \sum_s (probs) TC_{iklt} TR_{iklt}^s
 \end{aligned}$$

$$PR_{ijt} \leq CAP_{ij} \quad \forall i, j, t \quad (2)$$

$$FU_{ijkt} \leq FU_{ijkt}^{\max} X_{ijkt} \quad \forall i, j, k, t \quad (3)$$

$$\sum_k FU_{ijkt} = PR_{ijt} \quad \forall i, j, t \quad (4)$$

$$FUT_{ikmt}^s \leq FUT_{ikmt}^{\max} E_{ikmt}^s \quad \forall i, k, m, t, s \quad (5)$$

$$\sum_k FUT_{ikmt}^s \leq D_{imt} \quad \forall i, m, t, s \quad (6)$$

$$X_{ijkt} \leq Y_{kt} \quad \forall i, j, k, t \quad (7)$$

$$E_{ikmt}^s \leq Y_{kt} \quad \forall i, k, m, t, s \quad (8)$$

$$D_{imt} - \sum_k FUT_{ikmt}^s = LS_{imt}^s \quad \forall i, m, t, s \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
 & IV_{ikt-1}^s A_{kt-1}^s + \sum_j FU_{ijkt} - \sum_m FUT_{ikmt}^s A_{kt}^s \\
 & = IV_{ikt}^s \quad \forall i, k, t, s \quad (10)
 \end{aligned}$$

$$\sum_j FU_{ijkt} \leq \overline{CAP}_{ik} \quad \forall i, k, t \quad (11)$$

$$\sum_m FUT_{ikmt}^s \leq \sum_j FU_{ijkt} \quad \forall i, k, t, s \quad (12)$$

$$\sum_m FUT_{ikmt}^s (1 - A_{kt}^s) = \sum_l TR_{iklt}^s A_{lt}^s \quad \forall i, k, t, s \quad (13)$$

$$TR_{iklt}^s \leq Y_{lt} \overline{CAP}_{il} \quad \forall i, k, l, t, s \quad (14)$$

$$E_{ikmt}^s, Y_{kt}, X_{ijkt} \in \{0, 1\} \quad (15)$$

$$LS_{imt}^s, IV_{ikt}^s, TR_{iklt}^s, FUT_{ikmt}^s, FU_{ijkt}, PR_{ijt} \in \{0, 1\}$$

در تابع هدف مدل مذکور در رابطه ۱، عبارت اول مجموع هزینه تولید را در دوره‌ها و کارخانه‌های مختلف بیان می‌کند. عبارت دوم به هزینه ثابت حمل‌ونقل و عبارت سوم به هزینه‌های متغیر حمل‌ونقل برای محصولات مختلف

روش حل

برای حل مدل ریاضی ارائه شده از حل کننده CPLEX 24.1 نرم افزار GAMS و روش آزادسازی لاگرانژ استفاده شده است. حل کننده CPLEX در نرم افزار GAMS یک حل کننده بسیار خوب برای مدل های ریاضی خطی در مسائلی با ابعاد کوچک است، اما همین حل کننده در مسائلی با ابعاد بزرگ، زمان زیادی برای حل نیاز دارد که این موضوع برای حل مدل، یک ضعف به حساب می آید. به منظور رفع این مشکل از روش آزادسازی لاگرانژ برای حل مدل استفاده شده است.

روش آزادسازی لاگرانژ

یکی از ایده های مناسب محاسباتی در دهه ۱۹۷۰، مشاهده مسائل بسیار سختی است که می توان با مجموعه کوچکی از محدودیت های مرتبط آن ها را مسائلی آسان در نظر گرفت. تاریخچه روش لاگرانژ به سال ۱۹۷۰ برمی گردد که در آن سال هلد و کارپ (۱۹۷۰ و ۱۹۷۱) از یک مسئله لاگرانژ براساس مسئله حداقل درخت پوشا^{۱۰} به منظور طراحی یک الگوریتم بسیار موفق برای مسئله فروشنده دوره گرد استفاده کردند. روش های لاگرانژ موفق هلد و کارپ موجب ایجاد انگیزه در میان محققان شد و فیشدر در اوایل دهه ۱۹۷۰ از آن در مسائل زمان بندی و مسائل برنامه ریزی عدد صحیح عمومی استفاده کرد. روش لاگرانژ در آن سال ها ارزش شایان توجهی به دست آورده بود تا اینکه جفریون در سال ۱۹۷۴ نام مناسب رویکرد آزادسازی لاگرانژ را بر این روش نهاد. سپس فهرست کاربردهای آزادسازی لاگرانژ موجب رشد بسیاری از مسائل بهینه سازی ترکیبی بدنام شد. برای بسیاری از این مسائل، آزادسازی لاگرانژ بهترین الگوریتم موجود برای حل است که توانایی حل این مسائل را در اندازه های واقعی دارد [۲۸].

حل مسئله به روش آزادسازی لاگرانژ

طبق پژوهش فیشدر [۲۸] می توان این روش را برای محدودیت های مساوی و محدودیت های غیر مساوی به کار برد. برای حل مسئله به روش آزادسازی لاگرانژ بهترین حالت این است که محدودیت های ۳، ۴ و ۱۰ با ضرایب لاگرانژ در داخل تابع هدف قرار بگیرد و محدودیت های

مسئله از داخل حذف شود. فرض کنید u_{ijkt}^3 و u_{ijkt}^2 ، u_{ikts}^1 به ترتیب نشان دهنده ضرایب محدودیت های ۱۰، ۳ و ۴ هستند که به ترتیب با نمادهای λ_1 ، λ_2 و λ_3 نشان داده می شوند؛ بنابراین، تابع آزادسازی لاگرانژ به صورت زیر است:

$$L(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \text{Min}Z \quad (16)$$

$$+ \sum_i \sum_k \sum_t \sum_s \sum_j \sum_m \lambda_1 (IV_{ikt}^s - IV_{ikt-1}^s A_{kt-1}^s - FU_{ijkt} + FUT_{ikmt}^s A_{kt}^s)$$

$$+ \sum_i \sum_j \sum_k \sum_t \lambda_2 (FU_{ijkt} - FU_{ijkt}^{\max} X_{ijkt})$$

$$+ \sum_i \sum_j \sum_t \sum_k \lambda_3 (FU_{ijkt} - PR_{ijt})$$

s.t. سایر محدودیت ها به جز محدودیت های
محدودیت های ۳، ۴ و ۱۰

حد پایین

با حل رابطه ۱۶ با استفاده از نرم افزار گمز یک حد پایین برای مسئله به دست می آید. حال برای به دست آوردن حد بالا یک رویکرد ارائه می شود.

حد بالا

حال با توجه به مقادیر λ_1 ، λ_2 و λ_3 و مسئله $L(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ ، یک حل موجه برای مسئله با استفاده از Y_{kt} به دست آمده از رابطه ۱۶ و جایگذاری آن به عنوان پارامتر در مسئله اصلی (روابط ۱ تا ۱۵) به دست می آید. در شکل ۲، نمودار جریان برای توصیف روش آزادسازی لاگرانژ استفاده شده است که از پژوهش روجاگوپالان و همکاران [۲۹] اقتباس شده است. در تکرار اول $\alpha = 2$ در نظر گرفته شده است و اگر بهبودی در حد پایین برای چهار تکرار متوالی حاصل نشود، α نصف می شود. همچنین، حد تعداد تکرار الگوریتم ۵۰۰۰۰۰ تکرار و مقادیر اولیه λ_1 ، λ_2 و λ_3 برابر ۱ در نظر گرفته شده است. همچنین، درصد اختلاف حد بالا و پایین (ϵ) نیز یک درصد در نظر گرفته شده است.

بعد از به دست آوردن حد بالا و حد پایین، اندازه گام به صورت روابط ۱۷، ۱۸ و ۱۹ به روز می شود. در اینجا UP بهترین حد بالا در هر تکرار است. همچنین، λ_1 ، λ_2 و λ_3 نیز با روابط ۲۰، ۲۱ و ۲۲ به روز می شوند [۲۹].

فاصله جواب بهینه^{۱۱} در روش لاگرانژ و حل‌کننده CPLEX در نرم‌افزار GAMS برابر ۰/۲ درصد است.

براساس اطلاعات جدول ۱، در حالت ۴ انبار سیار، سه دوره مختلف ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ ماهه و تعداد سناریوهای مختلف ۱۵، ۱۰ و ۲۰ نتایج محاسباتی به صورت جدول ۲ است. همچنین، در حالت ۶ انبار سیار، سه دوره مختلف ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ ماهه و تعداد سناریوهای مختلف ۱۵، ۱۰ و ۲۰ نتایج محاسباتی به صورت جدول ۳ است. در حالت ۸ انبار سیار، سه دوره مختلف ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ ماهه و تعداد سناریوهای مختلف ۱۵، ۱۰ و ۲۰ نتایج محاسباتی به صورت جدول ۴ است.

براساس جدول‌های ۲، ۳ و ۴، جواب مسئله به پارامتر G_{kt}^s وابسته است، به گونه‌ای که اگر تعداد خرابی انبارهای سیار در دوره‌های مختلف زیاد باشد، مقدار تابع هدف بسیار بیشتر از همان حالتی است که تعداد خرابی انبارهای سیار در دوره‌های مختلف کم باشد؛ برای مثال، در جدول ۱ در حالت ۴ انبار سیار، ۱۲ دوره و ۲۰ سناریو مقدار تابع هدف نسبت به حالت ۴ انبار سیار، ۱۲ دوره و ۱۵ سناریو حتی با افزایش تعداد سناریوها کمتر است، زیرا پارامتر G_{kt}^s به صورت تصادفی توسط تابع توزیع یکنواخت تولید شده است. زمانی که تعداد خرابی‌ها در این پارامتر بیشتر می‌شود، هزینه‌های فروش از دست می‌رود و پشتیبانی از سایر انبارهای سیار به زنجیره تحمیل می‌شود. همچنین، در جدول‌های ۲، ۳ و ۴ مشاهده می‌شود که مقدار تابع هدف نسبت به افزایش تعداد دوره‌ها از افزایش تعداد انبارهای سیار و سناریوها حساس‌تر است. این افزایش چشمگیر به دلیل تأثیر افزایش افق زمانی بر تصمیمات دیگر مثل افزایش تعداد سناریوها و وقوع اختلال‌ها در شبکه و تعداد انبارهای سیار مکان‌یابی شده در کل افق است و موجب افزایش کل هزینه‌های موجود در زنجیره می‌شود.

همچنین، با مقایسه سه جدول ۲، ۳ و ۴ می‌توان دریافت در بیشتر مواقع در حالتی که تعداد سناریوها و دوره‌ها ثابت باشند، افزایش تعداد انبارهای سیار موجب افزایش کمی در هزینه‌ها تابع هدف می‌شود، زیرا انبارهای سیار هزینه‌های فعال‌سازی بسیار کمی نسبت به انبارهای ثابت دارند و با وجود این انبارها می‌توان تقاضای بسیاری از مشتریان را برآورده کرد و با هزینه فروش از دست‌رفته کمتری مواجه شد که این فروش از دست‌رفته برای بسیاری از صنایع غیرقابل جبران است و هزینه‌های جبران‌ناپذیری به آن‌ها وارد می‌کند.

$$\text{Stepsize1}^n = \frac{\alpha^n (UP - LB^n)}{\sum_i \sum_k \sum_t \sum_s \sum_j \sum_m \left\{ IV_{ikt}^s - IV_{ikt-1}^s A_{kt-1}^s - FU_{ijkt} + FUT_{ikmt}^s A_{kt}^s \right\}^2} \quad (17)$$

$$\text{Stepsize2}^n = \frac{\alpha^n (UP - LB^n)}{\sum_i \sum_j \sum_k \sum_t \left\{ FU_{ijkt} - FU_{ijkt}^{\max} X_{ijkt} \right\}^2} \quad (18)$$

$$\text{Stepsize3}^n = \frac{\alpha^n (UP - LB^n)}{\sum_i \sum_j \sum_t \sum_k \left\{ FU_{ijkt} - PR_{ijt} \right\}^2} \quad (19)$$

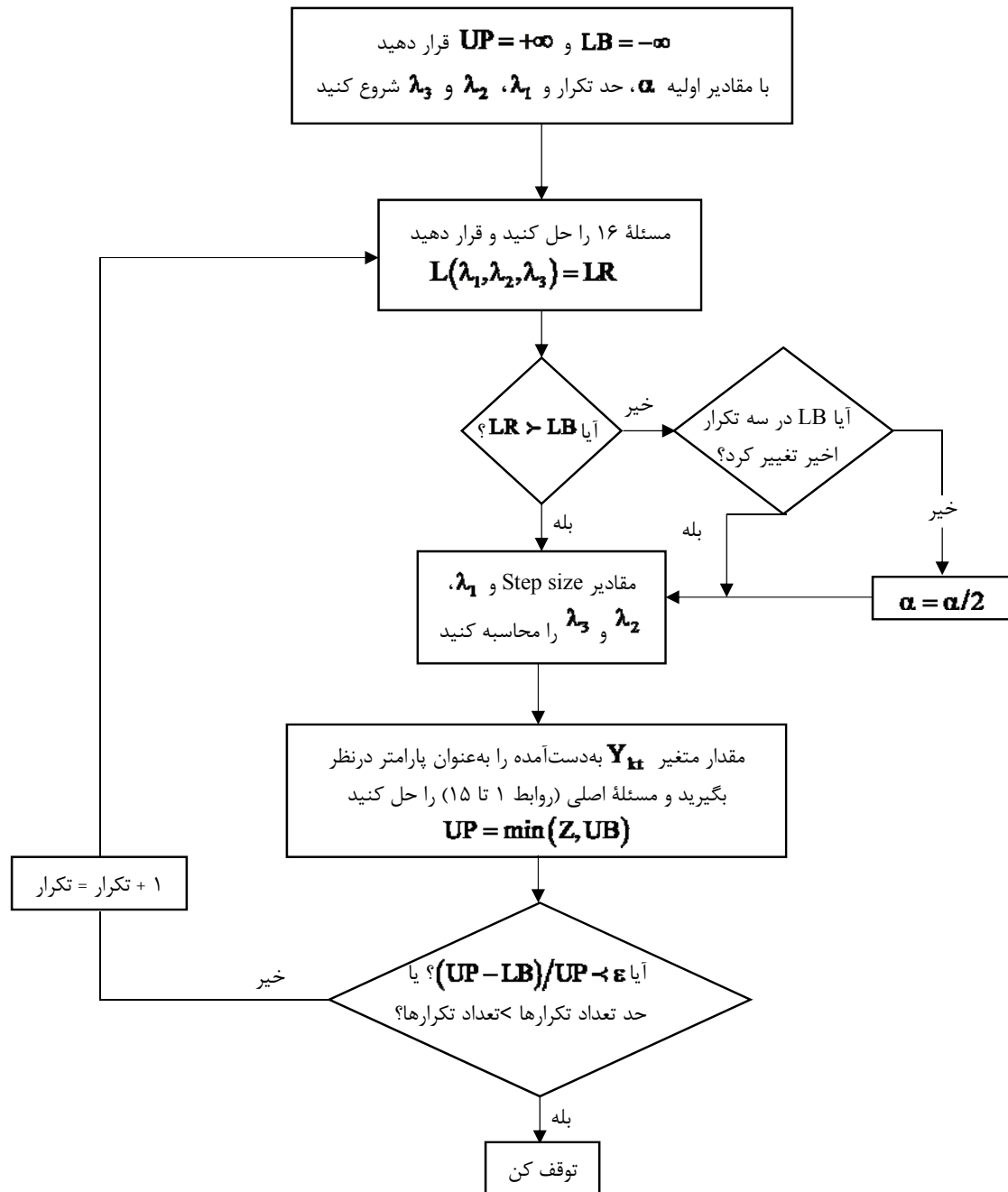
$$\lambda_1^{n+1} = u_{ikts}^{1,n+1} = \max \left\{ 0, u_{ikts}^{1,n} - \text{Stepsize1}^n \left(IV_{ikt}^s - IV_{ikt-1}^s A_{kt-1}^s - \sum_j FU_{ijkt} + \sum_m FUT_{ikmt}^s A_{kt}^s \right) \right\} \quad (20)$$

$$\lambda_2^{n+1} = u_{ijkt}^{2,n+1} = \max \left\{ 0, u_{ijkt}^{2,n} - \text{Stepsize2}^n \left(FU_{ijkt} - FU_{ijkt}^{\max} X_{ijkt} \right) \right\} \quad (21)$$

$$\lambda_3^{n+1} = u_{ijkt}^{3,n+1} = \max \left\{ 0, u_{ijkt}^{3,n} - \text{Stepsize3}^n \left(\sum_k FU_{ijkt} - PR_{ijt} \right) \right\} \quad (22)$$

مثال عددی

در این بخش ۳۶ مثال عددی متناسب با مدل پیشنهادی ارائه می‌شود تا درستی و صحت مدل بررسی شود. تمام مثال‌های ارائه‌شده شامل پنج واحد تولیدی، پنج نوع محصول و هفت مشتری می‌شود، ولی تعداد انبارهای سیار، دوره‌ها و سناریوها در مثال‌ها تغییر می‌کند، به گونه‌ای که تعداد انبارهای سیار در سه حالت ۴، ۶ و ۸ انبار و تعداد دوره‌ها در چهار حالت ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ دوره و تعداد سناریوها نیز در سه حالت ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سناریو در مثال‌های عددی در نظر گرفته شده است. برای بررسی کارایی روش لاگرانژ نیز مقدار تابع هدف و زمان در حالت‌های مختلف در این روش با حل‌کننده CPLEX نرم‌افزار GAMS مقایسه شده است. در جدول ۱، $U(a,b)$ نشان‌دهنده توزیع یکنواخت پیوسته و $U\{a, \dots, b\}$ نشان‌دهنده توزیع یکنواخت گسسته است. همچنین، میزان



شکل ۲. رویکرد الگوریتم آزادسازی لاگرانژ [۲۹]

هزینه‌های فروش از دست‌رفته را در پی دارد که در دنیای واقعی طبیعی به نظر می‌رسد. در نتیجه، مدیران با استفاده از برنامه‌ریزی مناسب و با بهره‌بردن از اطلاعات گذشته در زمینه حالات مختلف وقوع اختلال‌ها در زنجیره، می‌توانند از وقوع بسیاری از این اتفاقات یادشده و در پی آن تحمیل هزینه‌های سنگین به زنجیره بکاهند.

همچنین، با توجه جدول‌های ۲، ۳ و ۴ در حالتی که با افزایش تعداد انبارهای سیار و ثابت بودن تعداد سناریوها و دوره‌ها افزایش چشمگیری در تابع هدف و هزینه‌ها وجود دارد، تعداد اختلالات رخ داده در انبارهای سیار زنجیره افزایش می‌یابد. این امر هزینه پشتیبانی از سایر انبارهای سیار مختل نشده و در صورت کافی نبودن این انبارهای سیار،

جدول ۱. مقادیر پارامترهای مثال‌های عددی

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
VFC_{ij}	$U(۹۰ \text{ و } ۱۰۰)$	FC_{ijkt}	$U(۹۵۰ \text{ و } ۹۹۹)$
\overline{FC}_{ikmt}	$U(۹۵۰ \text{ و } ۹۹۹)$	VC_{ijkt}	$U(۱۵۰ \text{ و } ۲۰۰)$
\overline{VC}_{ikmt}	$U(۱۵۰ \text{ و } ۲۰۰)$	FU_{ijkt}^{\max}	$U(۹۵۰ \text{ و } ۹۹۹)$
OC_{kt}	$U(۹۰۰۰ \text{ و } ۱۰۰۰۰)$	IC_{ikt}	$U(۷۰ \text{ و } ۸۰)$
CAP_{ij}	$U(۴۹۰ \text{ و } ۴۹۹)$	\overline{CAP}_{ik}	$U(۶۰۰ \text{ و } ۶۵۰)$
FUT_{ikmt}^{\max}	$U(۹۵۰ \text{ و } ۹۹۹)$	D_{imt}	$U(۲۰۰ \text{ و } ۲۳۰)$
CLS_{imt}	$U(۳۹۵۰ \text{ و } ۳۹۹۹)$	TC_{iklt}	$U(۱۳۰ \text{ و } ۱۷۰)$
G_{kt}^s	$U\{۰ \text{ و } ۱\}$		

در بیشتر مواقع در حالتی که تعداد سناریوها و دوره‌ها ثابت باشند، افزایش تعداد انبارهای سیار موجب افزایش کمی در هزینه‌ها تابع هدف می‌شود، زیرا انبارهای سیار هزینه‌های فعال‌سازی بسیار کمی نسبت به انبارهای ثابت دارند و با وجود این انبارها می‌توان تقاضای بسیاری از مشتریان را برآورده کرد و با هزینه فروش از دست‌رفته کمتری مواجه شد که این فروش از دست‌رفته برای بسیاری از صنایع غیرقابل جبران است و هزینه‌های جبران‌ناپذیری به آن‌ها وارد می‌کند. همچنین، با توجه جدول‌های ۲، ۳ و ۴ در حالتی که با افزایش تعداد انبارهای سیار و ثابت‌بودن تعداد سناریوها و دوره‌ها افزایش چشمگیری در تابع هدف و هزینه‌ها وجود دارد، تعداد اختلالات رخ‌داده در انبارهای سیار زنجیره افزایش می‌یابد. این امر هزینه پشتیبانی از سایر انبارهای سیار مختل نشده و در صورت کافی نبودن این انبارهای سیار، هزینه‌های فروش از دست‌رفته را در پی دارد که در دنیای واقعی طبیعی به نظر می‌رسد. در نتیجه، مدیران با استفاده از برنامه‌ریزی مناسب و با بهره‌بردن از اطلاعات گذشته در زمینه حالات مختلف وقوع اختلال‌ها در زنجیره، می‌توانند از وقوع بسیاری از این اتفاقات یادشده و در پی آن تحمیل هزینه‌های سنگین به زنجیره بکاهند.

مقایسه جواب‌های روش آزادسازی لاگرانژ و

حل‌کننده CPLEX

در این بخش، جواب‌های روش آزادسازی لاگرانژ و حل‌کننده CPLEX در دو بعد مقایسه می‌شود. در بعد اول، مقایسه بین مقدار تابع هدف در روش آزادسازی لاگرانژ- که همان حد بالا در این روش است- و مقدار تابع هدف در حل‌کننده CPLEX انجام می‌گیرد. برای انجام دادن مقایسه مقادیر تابع هدف در سه جدول ۲، ۳ و ۴ از آزمون فرض آماری استفاده شده است.

براساس اطلاعات جدول ۱، در حالت ۴ انبار سیار، سه دوره مختلف ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ ماهه و تعداد سناریوهای مختلف ۱۰، ۱۵، ۲۰ و نتایج محاسباتی به صورت جدول ۲ است. همچنین، در حالت ۶ انبار سیار، سه دوره مختلف ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ ماهه و تعداد سناریوهای مختلف ۱۰، ۱۵، ۲۰ و نتایج محاسباتی به صورت جدول ۳ است. در حالت ۸ انبار سیار، سه دوره مختلف ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ ماهه و تعداد سناریوهای مختلف ۱۰، ۱۵، ۲۰ و نتایج محاسباتی به صورت جدول ۴ است.

براساس جدول‌های ۲، ۳ و ۴، جواب مسئله به پارامتر G_{kt}^s وابسته است، به گونه‌ای که اگر تعداد خرابی انبارهای سیار در دوره‌های مختلف زیاد باشد، مقدار تابع هدف بسیار بیشتر از همان حالتی است که تعداد خرابی انبارهای سیار در دوره‌های مختلف کم باشد؛ برای مثال، در جدول ۱ در حالت ۴ انبار سیار، ۱۲ دوره و ۲۰ سناریو مقدار تابع هدف نسبت به حالت ۴ انبار سیار، ۱۲ دوره و ۱۵ سناریو حتی با افزایش تعداد سناریوها کمتر است، زیرا پارامتر G_{kt}^s به صورت تصادفی توسط تابع توزیع یکنواخت تولید شده است. زمانی که تعداد خرابی‌ها در این پارامتر بیشتر می‌شود، هزینه‌های فروش از دست می‌رود و پشتیبانی از سایر انبارهای سیار به زنجیره تحمیل می‌شود. همچنین، در جدول‌های ۲، ۳ و ۴ مشاهده می‌شود که مقدار تابع هدف نسبت به افزایش تعداد دوره‌ها از افزایش تعداد انبارهای سیار و سناریوها حساس‌تر است. این افزایش چشمگیر به دلیل تأثیر افزایش افق زمانی بر تصمیمات دیگر مثل افزایش تعداد سناریوها و وقوع اختلال‌ها در شبکه و تعداد انبارهای سیار مکان‌یابی شده در کل افق است و موجب افزایش کل هزینه‌های موجود در زنجیره می‌شود.

همچنین، با مقایسه سه جدول ۲، ۳ و ۴ می‌توان دریافت

جدول ۲. جواب‌های به‌دست‌آمده با در نظر گرفتن ۴ انبار سیمار

لاگراتز	زمان حل (ثانیه)	میزان انحراف مقدار تابع هدف بین حد بالا و حد پایین در روش لاگراتز و حل مسئله CPLEX	میزان انحراف بین حد بالا و حد پایین در روش لاگراتز	تابع هدف		فاصله جواب با جواب بهینه (GAP)	مستارها	دوره	انبار
				حد بالا	حد پایین				
۲۸۱	۱۷۳	۰/۰۲	۲۱۳۳۶۸۱/۵۳	۲۱۲۶۵۳۷/۲۱	۲۱۲۶۵۳۷/۲۱	۲۱۲۶۵۳۷/۲۱	۱۰	۶	۴
۶۲۴	۱۱۱	%/۰/۲۸	۲۲۹۷۶۹۱۶/۳۱	۲۲۸۶۰۴۱۲/۰۹	۲۲۸۶۰۴۱۲/۰۹	۲۲۹۱۲۵۳۵/۷۱	۱۵	۶	۴
۳۲۷	۱۴۴	%/۰/۰۷	۲۵۷۳۳۰۶/۸۷	۲۵۶۰۵۹۸۰/۲۷	۲۵۶۰۵۹۸۰/۲۷	۲۵۷۱۶۲۸۰/۲۷	۲۰	۶	۴
۲۶۶	۸۷	%/۰/۲۲	۳۲۱۹۳۳۸۹/۷	۳۲۰۶۸۴۱۲/۲۱	۳۲۰۶۸۴۱۲/۲۱	۳۲۱۳۳۸۲۹/۸۴	۱۰	۹	۴
۷۹۵	۱۹۲۲	%/۰/۱۱	۳۲۲۲۰۰۲/۰۹	۳۲۱۵۱۷۳۲/۱۶	۳۲۱۵۱۷۳۲/۱۶	۳۲۱۸۵۲۷۲/۷۲	۱۵	۹	۴
۷۳۵	۲۷۳۵	%/۰/۱۱	۳۷۷۵۵۲۵/۰۸	۳۷۵۹۱۴۰۲/۵۴	۳۷۵۹۱۴۰۲/۵۴	۳۷۷۱۶۹۸۱/۱۱	۲۰	۹	۴
۵۳۱	۱۸۳	%/۰/۰۳	۵۲۱۲۹۹۸۲/۰۲	۵۱۸۴۳۶۲۹/۸۱	۵۱۸۴۳۶۲۹/۸۱	۵۲۱۱۳۷۷۱/۵۱	۱۰	۱۲	۴
۶۴۵	۱۵۴۶	%/۰/۰۵	۶۲۵۱۸۷۰۰/۰۴	۶۲۳۸۲۴۲/۵۱	۶۲۳۸۲۴۲/۵۱	۶۲۴۸۸۳۰۲/۸۹	۱۵	۱۲	۴
۷۲۱	۲۷۱۲	%/۰/۱۳	۵۵۸۲۲۸۸/۱۱	۵۵۶۳۳۴۰۸/۸۴	۵۵۶۳۳۴۰۸/۸۴	۵۵۷۶۶۹۳۷/۸۴	۲۰	۱۲	۴
۵۱۲	۷۴۱	%/۰/۳۲	۶۷۱۴۵۱۰۴/۲۹	۶۶۸۷۵۳۳/۸۷	۶۶۸۷۵۳۳/۸۷	۶۶۹۳۲۱۴۶/۲۱	۱۰	۱۵	۴
۹۴۲	۱۸۲۴	%/۰/۳۴	۷۴۶۱۶۶۸۱/۶۲	۷۴۶۱۶۶۸۱/۶۲	۷۴۶۱۶۶۸۱/۶۲	۷۴۶۶۱۰۲۸/۲۷	۱۵	۱۵	۴
۱۴۷۹	۳۶۵۷	%/۰/۱۷	۸۰۵۵۰۷۳۳/۷۶	۸۰۰۶۷۴۱۹/۴۲	۸۰۰۶۷۴۱۹/۴۲	۸۰۴۱۴۱۵۵/۱۴	۲۰	۱۵	۴

جدول ۳. جواب‌های به‌دست‌آمده با در نظر گرفتن ۶ انبار سیار

لاگراتر	زمان حل (ثانیه)	میزان انحراف مقدار تابع هدف بین حد بالا در روش لاگراتر و حل کننده CPLEX		میزان انحراف بین حد بالا و حد پایین در روش لاگراتر		تابع هدف			فاصله جواب با جواب بهینه (GAP)	سازو	دوره	انبار
		میزان انحراف مقدار تابع هدف بین حد بالا در روش لاگراتر و حل کننده CPLEX		میزان انحراف بین حد بالا و حد پایین در روش لاگراتر		تابع هدف						
		لاگراتر	CPLEX	حد بالا	حد پایین	Cplex						
۵۷۴	۴۸	% -۱۰۸	% -۰۴	۳۳۹۶۷۵/۱	۳۳۹۰۳۳/۳۹	۳۳۹۶۷۸۳۹/۲۲			۱۰	۶	۶	
۶۹۰	۸۵۵	% -۱۰	% -۰۵	۲۱۴۹۵۶۱/۸۲	۲۱۳۸۸۱۵۳/۶۶	۲۱۴۷۴۹۸۷/۰۱			۱۵	۶	۶	
۹۸۴	۲۸۴۲	% -۱۲۳	% -۰۴۵	۲۱۴۳۸۰۱/۵	۲۱۳۷۸۳۰۵/۹	۲۱۴۲۷۳۳۲/۲۴			۲۰	۶	۶	
۴۴۰	۲۶۳	% -۳۹	% -۰۵۴	۳۳۵۰۳۳۱۹/۳۸	۳۳۲۰۹۷۹/۴۷	۳۳۴۰۸۶۷۲/۴۷			۱۰	۹	۶	
۶۹۶	۱۲۵۲	% -۱۰۱	% -۰۳۹	۳۳۷۱۲۲۱۷/۹۸	۳۳۵۷۹۳۲۰/۴۶	۳۳۷۱۲۲۳۲/۱۳			۱۵	۹	۶	
۹۴۴	۱۰۶۴	% -۲۱	% -۰۵۹	۳۷۷۱۵۸۷۸/۲۶	۳۷۰۹۲۶۷۷/۱۸	۳۷۶۳۷۸۰۷/۲۳			۲۰	۹	۶	
۶۲۳	۳۲۸	% -۱۹	% -۰۵۵	۴۵۵۶۲۷۷/۷	۴۵۳۱۸۶۶۶/۶۲	۴۵۳۱۸۶۶۶/۵			۱۰	۱۲	۶	
۱۱۹۰	۱۸۳۱	% -۲۳	% -۰۳	۴۹۸۵۰۲۰/۴۷	۴۹۵۳۲۸۳/۵۱	۴۹۷۸۰۲۵۰/۴۷			۱۵	۱۲	۶	
۱۲۶۸	۲۰۵۵	% -۲۳	% -۰۴۴	۴۷۵۹۳۷۷/۰۶	۴۷۳۸۲۰۰۵/۴۸	۴۷۳۸۲۳۹/۷۵			۲۰	۱۲	۶	
۷۱۴	۹۱۲	% -۴۴	% -۰۷	۶۴۴۱۰۰۲/۳۶	۶۱۹۷۴۱۲۵/۰۱	۶۲۱۲۸۱۲۵/۴۱			۱۰	۱۵	۶	
۱۵۴۵	۳۴۱۲	% -۱۳	% -۰۶۸	۷۸۷۵۳۶۸۸/۳۹	۷۸۲۱۸۱۴۹/۷۱	۷۸۵۱۴۳۷/۱۶			۱۵	۱۵	۶	
۲۰۱۴	۴۹۹۷	% -۲۲	% -۰۱۶	۸۶۰۳۱۶۶۹/۳۷	۸۵۳۷۶۸۸/۹	۸۵۸۴۱۳۷۲/۰۷			۲۰	۱۵	۶	

جدول ۴. جواب‌های به‌دست‌آمده یا در نظر گرفته‌شده ۸ آنتن سیمار

زمان (ثانیه)	میزان انحراف مقدار تابع هدف			میزان انحراف بین حد بالا و حد پایین در روش لاگرانژ			تابع هدف			فاصله جواب یا جواب بهینه (GAP)	ستاربر	دوره	آنتن
	لاگرانژ	Cplex	و حل‌کننده Cplex	حد بالا	لاگرانژ	حد پایین	Cplex						
							حد بالا	حد پایین					
۶۸۹	۲۲۰	%/۰۰۸	%/۰۴۴	۲۱۰۸۸۹۰۹/۴۳	۲۰۹۶۱۱۸/۲۲	۲۱۰۷۴۵۰۸/۰۲				۱۰	۶	۸	
۹۲۱	۵۳۳	%/۰۱۰	%/۰۴۳	۲۱۰۹۳۳۴/۴	۲۱۰۰۱۴۸۴/۹۴	۲۱۰۱۳۸۱۸/۱۴				۱۵	۶	۸	
۲۴۳۶	۵۷۷	%/۰۳۳	%/۰۴۹	۲۱۴۲۰۰۶۴/۲۹	۲۱۳۱۵۱۰۵/۱۷	۲۱۳۳۵۱۳/۰۷				۲۰	۶	۸	
۵۸۷	۴۶۸	%/۰۳۹	%/۰۵۸	۳۱۹۳۲۸۴/۹	۳۱۷۴۷۶۳۷/۳۸	۳۱۹۱۱۹۱۰/۷				۱۰	۹	۸	
۱۰۱۴	۶۴۱۹	%/۰۰۱	%/۰۵۲	۳۲۰۹۲۳۳۶/۵۸	۳۱۹۲۸۱۸۹/۴۲	۳۲۰۴۹۵۹۰/۰۱				۱۵	۹	۸	
۳۸۰۱	۱۳۹۳۲	%/۰۲۱	%/۰۰۷	۳۴۱۳۰۵۷۹/۲۶	۳۳۸۹۱۶۶۵/۰۴	۳۴۰۴۰۰۵۸/۰۴			%/۰۲	۲۰	۹	۸	
۶۸۰	۱۷۸۹	%/۰۱۹	%/۰۲۹	۶۵۸۷۵۸۱۴/۴۱	۶۵۶۸۴۷۷۴/۳۸	۶۵۸۲۰۵۶۴/۸۹				۱۰	۱۲	۸	
۲۴۵۷	۹۲۷۵	%/۰۳۳	%/۰۰۶	۷۴۵۸۱۰۳۵/۹۲	۷۴۱۳۳۵۹/۷	۷۴۳۵۶۲۵۴/۳۶				۱۵	۱۲	۸	
۴۸۳۷	۱۵۶۹۶	%/۰۳۳	%/۰۶۲	۸۷۴۵۱۸۹/۲۹	۸۶۷۰۴۲۶۹/۴۷	۸۶۸۶۹۹۲۲/۹۱				۲۰	۱۲	۸	
۹۵۰	۲۵۷۱	%/۰۵۶	%/۰۸۶	۹۰۱۸۸۱۷/۸۱۴	۸۹۲۱۴۷۱۵/۲۱	۸۹۶۸۷۰۴۹/۱۲				۱۰	۱۵	۸	
۳۶۷۴	۱۱۴۲۱	%/۰۰۴	%/۰۰۷	۹۷۸۹۲۱۲۰/۱۹	۹۷۲۰۲۱۲۸/۵	۹۷۵۰۱۷۸۵/۴۷				۱۵	۱۵	۸	
۶۳۲۷	۲۲۱۲۲	%/۰۲۹	%/۰۶۱	۱۰۹۵۶۴۴/۰	۱۰۸۸۹۱۳۶/۴	۱۰۹۴۱۲۸۴/۹				۲۰	۱۵	۸	

هستند. شایان ذکر است درجه آزادی این آزمون فرض نیز از رابطه ۲۴ به دست می‌آید.

$$v_1 = \frac{\left(\frac{S_{(z)lagrange}^2}{n_{lagrange}} + \frac{S_{(z)cplex}^2}{n_{cplex}} \right)^2}{\left(\frac{S_{(z)lagrange}^2}{n_{lagrange}} \right)^2 + \left(\frac{S_{(z)cplex}^2}{n_{cplex}} \right)^2} \quad (24)$$

بنابراین، برای آزمون فرض بالا ناحیه پذیرش به صورت $[-\infty, t_{\alpha, v_1}]$ است [۳۰]. در اینجا، در سطح معنی‌دار $\alpha = 0.05$ این آزمون برای نمونه‌های سه جدول ۱، ۲ و ۳ انجام گرفته است که نتایج آن در جدول ۵ آورده می‌شود. در نتیجه، براساس نتایج جدول ۵، دلیلی برای رد فرض صفر وجود ندارد و فرض صفر پذیرفته می‌شود؛ بنابراین، کیفیت جواب‌های روش لاگرانژ مشابه کیفیت جواب‌های روش CPLEX است.

میانگین تابع هدف جوامع در جدول ۱ تا ۳ در روش لاگرانژ و حل‌کننده CPLEX به ترتیب با $\mu_{Z_{lagrange}}$ و $\mu_{Z_{cplex}}$ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است تعداد نمونه در روش لاگرانژ و حل‌کننده CPLEX یکسان ($n_{lagrange} = n_{cplex}$) و برابر ۳۶ است؛ بنابراین، در اینجا هدف، بررسی فرض صفر $H_0: \mu_{Z_{lagrange}} = \mu_{Z_{cplex}}$ در برابر فرض مقابل $H_1: \mu_{Z_{lagrange}} > \mu_{Z_{cplex}}$ است، به طوری که واریانس جوامع با هم برابر نیستند. با توجه به اینکه تعداد نمونه‌ها کافی است، از آماره t_1 برای این آزمون فرض استفاده می‌شود.

$$t_1 = \frac{\mu_{(z)lagrange} - \mu_{(z)cplex}}{\sqrt{\frac{S_{(z)lagrange}^2}{n_{lagrange}} + \frac{S_{(z)cplex}^2}{n_{cplex}}}} \quad (23)$$

در رابطه ۲۳ $\mu_{(z)cplex}$ و $\mu_{(z)lagrange}$ به ترتیب میانگین تابع هدف نمونه‌ها و $S_{(z)cplex}^2$ و $S_{(z)lagrange}^2$ واریانس تابع هدف نمونه‌ها در روش لاگرانژ و حل‌کننده CPLEX

جدول ۵. نتایج آزمون فرض مقادیر تابع هدف در روش لاگرانژ و حل‌کننده CPLEX

پارامترهای توزیع نمونه‌ها	$\mu_{(z)}$	$S_{(z)}^2$	n	آماره آزمون و درجه آزادی آن	ناحیه پذیرش
روش لاگرانژ	۷۶.۵۵۴۷۶۹۹۸	۲.۲۰۳×10^{15}	۳۶	۰.۱۳.۱	$[-\infty, ۱.۶۷۱]$ $v = ۵۸$
حل‌کننده CPLEX	۴۱.۴۶۲۵۳۳۴۶	۷.۸۱۵×10^{14}	۳۶		

با هم برابر نیستند. همچنین، مشابه آزمون فرض قبل با توجه به اینکه تعداد نمونه‌ها (بیشتر از ۳۰) کافی است، از آماره t_2 برای این آزمون فرض استفاده می‌شود.

$$t_2 = \frac{\mu_{(t)cplex} - \mu_{(t)lagrange}}{\sqrt{\frac{S_{(t)lagrange}^2}{n_{lagrange}} + \frac{S_{(t)cplex}^2}{n_{cplex}}}} \quad (25)$$

در رابطه ۲۵ $\mu_{t_{cplex}}$ و $\mu_{t_{lagrange}}$ به ترتیب میانگین زمان حل نمونه‌ها در روش لاگرانژ و حل‌کننده CPLEX و $S_{(t)lagrange}^2$ و $S_{(t)cplex}^2$ واریانس زمان حل نمونه‌ها در روش لاگرانژ و حل‌کننده CPLEX است. همچنین، درجه آزادی این آزمون فرض نیز از رابطه ۲۶ به دست می‌آید.

در بعد دوم، بین زمان حل روش آزادسازی لاگرانژ و حل‌کننده CPLEX مقایسه انجام می‌گیرد. در اینجا نیز به روش مشابه برای مقایسه زمان حل روش لاگرانژ و حل‌کننده CPLEX در سه جدول ۱، ۲ و ۳ از آزمون فرض آماری استفاده می‌شود. بدین منظور، میانگین زمان حل جوامع در جدول‌های ۱ تا ۳ در روش لاگرانژ و حل‌کننده CPLEX به ترتیب با $\mu_{t_{lagrange}}$ و $\mu_{t_{cplex}}$ نشان داده شده است. همچنین، تعداد نمونه در روش لاگرانژ و حل‌کننده CPLEX یکسان ($n_{lagrange} = n_{cplex}$) و برابر ۳۶ است؛ بنابراین، در اینجا هدف، بررسی فرض صفر $H_0: \mu_{t_{cplex}} = \mu_{t_{lagrange}}$ در برابر فرض مقابل $H_1: \mu_{t_{cplex}} > \mu_{t_{lagrange}}$ است، به طوری که واریانس جوامع

توزیع در یک زنجیره تأمین سه سطحی با در نظر گرفتن اختلال در انبارهای سیار سیستم توزیع و پشتیبانی از سیار تسهیلات مختل نشده برای انبارها دچار اختلال پرداخته شد. مدل ارائه شده در این پژوهش به صورت چند دوره‌ای، تصادفی، دومرحله‌ای و سناریوبندی است. تصمیمات در نظر گرفته شده در تحقیق حاضر شامل این موارد می‌شود: مقدار تولید در کارخانجات، مکان‌یابی انبارهای سیار، تخصیص مشتریان به انبارهای سیار، پشتیبانی از انبارهای سیار مختل نشده برای انبارهای مختل شده، میزان انتقال بین سطوح، میزان موجودی انبارها و فروش ازدست‌رفته. در این مسئله، برای رفع مشکل زیادبودن زمان حل در ابعاد بزرگ از روش آزادسازی لاگرانژ استفاده شد که با توجه به نتایج عددی و مقایسه این روش با حل‌کننده CPLEX نرم‌افزار GAMS، روش آزادسازی لاگرانژ جوابی نزدیک به بهینه و در زمانی کوتاه ارائه داد.

$$V_2 = \frac{\left(\frac{S_{(t)lagrange}^2}{n_{lagrange}} + \frac{S_{(t)cplex}^2}{n_{cplex}} \right)^2}{\left(\frac{S_{(t)lagrange}^2}{n_{lagrange}} \right)^2 + \left(\frac{S_{(t)cplex}^2}{n_{cplex}} \right)^2} \quad (26)$$

بنابراین، برای آزمون فرض بالا ناحیه پذیرش به صورت $[-\infty, t_{\alpha, v_2}]$ است [۳۰]. حال در اینجا در سطح معنی‌دار $\alpha = 0.05$ این آزمون برای نمونه‌های سه جدول ۱، ۲ و ۳ انجام گرفته است که نتایج آن در جدول ۶ آورده می‌شود. در نتیجه، با توجه به نتایج جدول ۵، فرض صفر $H_0: \mu_{t_{lagrange}} = \mu_{t_{cplex}}$ به نفع فرض مقابل $H_1: \mu_{t_{cplex}} > \mu_{t_{lagrange}}$ رد می‌شود؛ یعنی زمان حل روش لاگرانژ از حل‌کننده CPLEX بهتر و کمتر است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش به بررسی مسئله مکان‌یابی سیستم‌های

جدول ۶. نتایج آزمون فرض زمان حل در روش لاگرانژ و حل‌کننده CPLEX

پارامترهای توزیع نمونه‌ها	$\mu_{(t)}$	$S_{(t)}^2$	n	آماره آزمون و درجه آزادی آن	ناحیه پذیرش
روش لاگرانژ	۱۳۳۳/۹۷	۱۷۹۶۸۶۶/۸۹	۳۶	۴/۰۷۳	[-∞, ۱/۶۸۴]
حل‌کننده CPLEX	۴۸۵۵/۰۴	۲۵۱۱۹۷۰۷/۹۸	۳۶	۴۰۷ ≈	

تجزیه بندرز- در صورت کارایی آن- استفاده کرد. همچنین، به دلیل اینکه روش لاگرانژ کارایی خود را در حل مسائل بسیار بزرگ به تدریج از دست می‌دهد، برای حل این‌گونه مسائل می‌توان از الگوریتم‌های فرا ابتکاری استفاده کرد.

پیشنهادهای تحقیقات آتی در دو حوزه مفروضات و روش حل مطرح می‌شود. در حوزه مفروضات می‌توان خرابی را در بخش تولید و همچنین تقاضا را غیرقطعی در نظر گرفت و برای مدل‌سازی آن از رویکرد بهینه‌سازی استوار استفاده کرد. در حوزه روش حل نیز می‌توان از روش

مراجع

- Avriel, M. (1980) "A Geometric Programming Approach to the Solution of Location Problems." *J. Reg. Sci.*, Vol. 20, PP. 239–246.
- Jabal-Ameli, M. S., Ghaderi, A. (2005). "Solution of location-allocation large problems by Using the variable neighborhood search combination algorithm." 2nd logistics conference, Tehran.
- Cooper, L. (1963). "Location-Allocation Problems." *Oper. Res.*, Vol. 11, PP. 331–343.
- Love, R., Morris, J. and Wesolowshy, G. (1988). *facilities Layout and Location: Models & Methods*, North-Holland, New York.
- Erenguc, S. S., Simpson, N. C. and Vakharia, A. J. (1999). "Integrated production / distribution planning in supply chains : An invited review." *Eur. J. Oper. Res.*, Vol. 115, PP. 219–236.

6. Canel, C. and Das, S. R. (2002). "Modeling global facility location decisions: integrating marketing and manufacturing decisions." *Ind. Manag. Data Syst.*, Vol. 102, No. 2, PP. 110–118.
 7. Daskin, M. S., Snyder, L. V and Berger, R. T. (2005). "Facility Location in Supply Chain Design." *Transp. Sci.*, PP. 400–416.
 8. Mousavi, S. M. and Akhavan Niaki, S. T. (2013). "Capacitated location allocation problem with stochastic location and fuzzy demand : A hybrid algorithm." *Appl. Math. Model.*, Vol. 37, No. 7, PP. 5109–5119.
 9. Zeinal Hamadani, A., Abouei Ardakan, M., Rezvan, T. and Honarmandian, M. M. (2013). "Location-allocation problem for intra-transportation system in a big company by using meta-heuristic algorithm." *Socioecon. Plann. Sci.*, Vol. 47, No. 4, PP. 309–317.
 10. Hajipour, V., Rahmati, S. H. A., Pasandideh, S. H. R. and Niaki, S. T. A. (2014). "A multi-objective harmony search algorithm to optimize multi-server location–allocation problem in congested systems." *Comput. Ind. Eng.*, Vol. 72, PP. 187–197.
 11. Park, G., Lee, Y. and Han, J. (2014). "A two-level location–allocation problem in designing local access fiber optic networks." *Comput. Oper. Res.*, Vol. 51, PP. 52–63.
 12. Rahmati, S. H. A., Ahmadi, A., Sharifi, M. and Chambari, A. (2014). "A multi-objective model for facility location–allocation problem with immobile servers within queuing framework." *Comput. Ind. Eng.*, Vol. 74, PP. 1–10.
 13. Hosseinezhad, S.J., Jabalameli, M.S. and Naini, S.G.J. (2014) "A fuzzy algorithm for continuous capacitated location allocation model with risk consideration," *Appl. Math. Model.*, Vol. 38, No. 3, PP.983–1000.
 14. Vidyarthi, N. and Jayaswal, S. (2014). "Efficient solution of a class of location–allocation problems with stochastic demand and congestion." *Comput. Oper. Res.*, Vol. 48, PP. 20–30.
 15. Zahiri, B., Tavakkoli-Moghaddam, R. and Pishvae, M. S. (2014). "A robust possibilistic programming approach to multi-period location–allocation of organ transplant centers under uncertainty." *Comput. Ind. Eng.*, Vol. 74, PP. 139–148.
 16. Bozorgi-Amiri, A., Jabalameli, M. S. and Mirzapour Al-e-Hashem, S. M. J. (2011) "A multi-objective robust stochastic programming model for disaster relief logistics under uncertainty." *OR Spectr.*, Vol. 35, No. 4, PP. 905–933.
 17. Bozorgi-Amiri, A., Jabalameli, M. S., Alinaghian, M. and Heydari, M. (2011). "A modified particle swarm optimization for disaster relief logistics under uncertain environment." *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 60, No. 1–4, PP. 357–371.
 18. Zhan, R.L, Shen, Z. J. M. and Daskin, M. S. (2007). "System reliability with location- specific failure probabilities. Working paper." University of California, Berkeley.
 19. Azad, N. and Davoudpour, H. (2013). "A new model to mitigating random disruption risks of facility and transportation in supply chain network design." *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 70, No. 9–12, PP. 1757–1774.
 20. Farahani, R. Z., Hassani, A., Mousavi, S. M. and Baygi, M. B. (2013). "A Hybrid Artificial Bee Colony for disruption in a hierarchical maximal covering location problem." *Comput. Ind. Eng.*, Vol. 75, PP. 129–141.
 21. Li, Q., Zeng, B. and Savachkin, A. (2013). "Reliable facility location design under disruptions." *Comput. Oper. Res.*, Vol. 40, No. 4, PP. 901–909.
 22. Chen, Q., Li, X. and Ouyang, Y. (2011). "Joint inventory-location problem under the risk of probabilistic facility disruptions." *Transp. Res. Part B*, Vol. 45, No. 7, PP. 991–1003.
 23. Hogan, K. and Revelle, C. (1986). "Cocepts and Applications of Backup Coverage." *Manage. Sci.*, Vol. 32, No. 11, PP. 1434–1444.
 24. Snyder, L. V. and Daskin, M. S. (2005). "Reliability Models for Facility Location: The Expevted Failure Cost Case." *Transp. Sci.*, Vol. 39, No. 3, PP. 400–416.
-

25. Pirkul, H. and Schilling, D. (1989). "The Capacitated Maximal Covering Location Problem With Backup Service." *Ann. Oper. Res.*, Vol. 18, PP. 141–154.
26. Cui, T., Ouyang, Y. and Shen, Z.J. M. (2010). "Reliable Facility Location Design Under the Risk of Disruptions." *Oper. Res.*, Vol. 58, PP. 998–1011.
27. Li, X. and Ouyang, Y. (2010). "A continuum approximation approach to reliable facility location design under correlated probabilistic disruptions." *Transp. Res. Part B Methodol.*, Vol. 44, No. 4, PP. 535–548.
28. Fisher, M. L. (2004). "The lagrangian relaxation method for solving integer programming problems." *Manage. Sci.*, Vol. 50, No. 12, PP. 1861–1871.
29. Rajagopalan, S., Heragu, S. S., and Taylor, G. D. (2004). "A Lagrangian relaxation approach to solving the integrated pick-up/drop-off point and AGV flowpath design problem." *Appl. Math. Model.*, Vol. 28, No. 8, PP.735-750.
30. Bowker, A. H. and Lieberman, G. (1972). "Engineering Statistics." 2nd edition Prentice-Hall, Inc.

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1. Location-Allocation Problem
 2. P-median
 3. Disruption
 4. α -Cut Method
 5. Particle Swarm Optimization Algorithm
 6. Mixed Integer Nonlinear Programming (MINLP)
 7. Lagrangian Relaxation
 8. Lateral Transshipment
 9. Two Stage
 10. Minimum Spanning Tree
 11. Gap
-