

مکان‌یابی - موجودی - تخصیص افزونگی چندهدفه در زنجیره تأمین تک‌دوره‌ای با تقاضای احتمالی

فرید عبدی^۱، هیوا فاروقی^{۲*}، هیبت‌الله صادقی^۳، جمال ارکات^۴

۱. دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
۲. دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
۳. استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
۴. دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

خلاصه

یکی از کارآمدترین و شناخته شده‌ترین روش‌های افزایش قابلیت اطمینان کارخانه‌ها و بنگاه‌های تولیدی، اختصاص مناسب اجزای افزونه است، که در پاسخگویی مناسب به تقاضای مشتریان، تحویل به موقع محصولات و کاهش هزینه‌ها بسیار حائز اهمیت بوده و همین موضوع سبب ایجاد یک زنجیره تأمین پایدار و مطمئن می‌شود. در پژوهش پیش‌رو، مسأله بهینه‌سازی همزمان مکان‌یابی تسهیلات - موجودی - تخصیص افزونگی مورد تحقیق قرار گرفته، در این راستا، یک مسأله تک دوره‌ای و سه سطحی شامل تأمین‌کننده، توزیع‌کننده و خرده‌فروش در نظر گرفته شده است. فرض شده است که تقاضای خرده‌فروش احتمالی بوده و از توزیع نرمال پیروی می‌کند. همچنین به منظور مقابله با نوسانات تقاضا، از استراتژی ادغام ریسک در مسأله استفاده شده که در نتیجه آن، نگهداری موجودی فقط در مراکز توزیع انجام خواهد گرفت. به همین منظور، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی جهت بهینه‌سازی هزینه‌های کل زنجیره تأمین و همچنین قابلیت اطمینان آن ارائه شده است. با توجه اینکه مسائل مکان‌یابی - موجودی و همچنین تخصیص افزونگی در دسته مسائل NP-Hard قرار دارند، در نتیجه یک الگوریتم فراابتکاری چند هدفه مبتنی بر الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده، تحت عنوان AMOSA برای حل مسأله مذکور توسعه داده شده و در نهایت نتایج حاصل از آن با استفاده از نتایج حاصل از روش شمارش کامل مورد ارزیابی و سنجش قرار گرفت.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۳۹۸/۳/۸

پذیرش ۱۳۹۸/۷/۱۱

(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:

مدیریت زنجیره تأمین

مدل مکان‌یابی - موجودی

استراتژی ادغام ریسک

تخصیص افزونگی

الگوریتم AMOSA

۱. مقدمه

زمینه‌های تحقیقاتی و کاربردی بسیار زیادی تاکنون در عرصه زنجیره‌ی تأمین مورد بررسی و مطالعه محققین قرار گرفته است. یکی از این زمینه‌ها طراحی زنجیره تأمین است. طراحی زنجیره‌ی تأمین در جهت سیاست‌گذاری‌های استراتژیک، تاکتیکی و حتی عملیاتی در مجموعه به کار گرفته می‌شود. در حالت کلی، پروژه

طراحی شبکه زنجیره تأمین با مشخص کردن جایگاه‌های تسهیلات و ظرفیت موردنیاز آن‌ها و برنامه‌ریزی خرید، تولید، توزیع و نگهداری محصولات مواجه است.

مدیریت زنجیره تأمین، یک ابزار مهم جهت هماهنگ‌سازی عملیات زنجیره تأمین است که شامل مدیریت اطلاعات و جریان مواد ورودی و خروجی بوده و از منظر عملیاتی به معنی یکپارچه‌سازی تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، انبارها و توزیع‌کنندگان به شکلی اثربخش است؛ به گونه‌ای که کالاها به میزان صحیح، در زمان مناسب و در محل مناسب، تولید و توزیع شوند و هزینه کل زنجیره به طور همزمان با حفظ یا بهبود سطح خدمت‌دهی به مشتری، حداقل گردد.

* نویسنده مسئول: هیوا فاروقی

تلفن: ۰۱۷-۳۳۶۲۴۰۱۷-۰۸۷؛ پست الکترونیکی: h.farughi@uok.ac.ir

می‌شود. این مسأله روی سیستم‌هایی مطرح می‌شود که شامل چند زیرسیستم بوده که به صورت سری به همدیگر متصل هستند. در هر زیرسیستم تعدادی اجزای متصل به صورت موازی موجود بوده و همچنین انواع مختلفی از اجزا برای هر زیرسیستم در دسترس هستند.

یکی از موضوعات مهم که به افزایش سود شرکت‌ها در محیط رقابتی منجر می‌شود، طراحی یک زنجیره تأمین کارا و مناسب است. برای دستیابی به یک زنجیره مناسب، تصمیمات مختلفی می‌بایست در خصوص مکان‌یابی تسهیلات، کنترل موجودی، حمل‌ونقل، قابلیت اطمینان شبکه، تخصیص مشتریان و ... اخذ شود. سابقاً این تصمیمات مستقل از هم لحاظ می‌شد، در حالیکه برای بهینه‌سازی کل زنجیره، باید این تصمیمات به صورت یکپارچه در نظر گرفته شود. با توجه به اینکه موضوعات مدنظر جهت تحقیق در این مقاله، پیشتر به صورت مستقل و جدای از هم، در ادبیات موضوع مورد بررسی قرار گرفته‌اند؛ لذا در مرور پیشینه تحقیق، این بخش را در سه زیربخش مسائل مکان‌یابی-موجودی، مسائل مکان‌یابی تسهیلات با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان و مسائل تخصیص افزونگی بررسی می‌کنیم:

۱-۱. مسائل مکان‌یابی-موجودی

داسکین و همکاران [۱] در سال ۲۰۰۲ یک مدل برنامه‌ریزی عددصحيح غير خطی برای مسأله مکان‌یابی-موجودی پیشنهاد کردند و از رویکرد آزادسازی لاگرانژ برای حل آن استفاده نمودند. شن و همکاران [۲] در سال ۲۰۰۳ یک مسأله مکان‌یابی-موجودی شامل یک تأمین‌کننده و چندین خرده‌فروش را مورد مطالعه قرار دادند که در آن مقدار تقاضا ثابت نبود و همچنین خرده‌فروشان به عنوان مراکز توزیع نیز در نظر گرفته می‌شدند، به طوریکه سایر خرده‌فروشان به آن‌ها تخصیص می‌یافتند. آن‌ها یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحيح غير خطی را برای مسأله توسعه داده و از رویکرد تولید ستون برای حل آن استفاده نمودند. میراندا و گاریدو [۳] در سال ۲۰۰۴ تصمیمات کنترل موجودی را وارد مسائل مکان‌یابی تسهیلات با ظرفیت محدود کردند. آن‌ها یک مدل غير خطی عدد صحيح آمیخته را ارائه نموده و از یک روش ترکیبی شامل رویکردهای آزادسازی لاگرانژ و زیرگردایان برای حل آن استفاده کردند. میراندا و گاریدو [۴] همچنین در سال ۲۰۰۶ یک مدل غير خطی عدد صحيح آمیخته را برای مسائل مکان‌یابی-موجودی بیان کرده و دو محدودیت ظرفیت را لحاظ نمودند. محدودیت اول بیانگر حداکثر اندازه انباشته برای مقدار سفارش و محدودیت دوم بیانگر میزان ظرفیت موجودی است. آن‌ها از روشی مبتنی بر رویکرد آزادسازی لاگرانژ و زیرگردایان استفاده کردند.

شو و سان [۵] در سال ۲۰۰۶ یک مدل بهینه‌سازی احتمالی گسسته غیرخطی دو مرحله‌ای را برای طراحی یک شبکه توزیع یکپارچه ارائه نمودند. در مرحله اول، آن‌ها روی انتخاب خرده‌فروشان به عنوان مراکز توزیع، تصمیم‌گیری می‌کردند و در مرحله دوم هزینه

از طرفی، مدیریت موجودی نیز یکی از مهمترین موضوعات مطرح در زنجیره تأمین است، چرا که میزان قابل توجهی از دارایی شرکت‌ها در موجودی در گردش آن‌ها انباشته شده است. تعیین پارامترهای مهمی همچون میزان بهینه سفارش‌دهی مواد اولیه، میزان تولید، تعداد دفعات ارسال کالا بین سطوح مختلف و ظرفیت مناسب وسایل حمل کالا و ... می‌تواند تأثیر بسزایی در کاهش هزینه‌های زنجیره داشته باشد.

در مدل‌های کلاسیک مکان‌یابی تسهیلات، فرض می‌شود که پس از ساخت تسهیلات، سیستم حاصل، همواره بر طبق برنامه عمل خواهد کرد. اما در واقعیت، این‌گونه نیست و تسهیلات، هر از چندگاهی به دلایل مختلف، از جمله شرایط نامساعد جوی، اشتباهات انسانی، اعتصاب کارگران، جنگ‌ها و یا خراب‌کاری‌های عمدی از کار می‌افتند. چگونگی توزیع جغرافیایی تسهیلات در یک سیستم تأمین و یا توزیع، نقش بسزایی در میزان آسیب‌پذیری این سیستم نسبت به اختلالات دارد؛ بطوریکه در برخی از موارد، پیامدهای مربوط به از دست دادن یک یا چند تسهیل می‌تواند فاجعه بار باشد. از این‌رو در سال‌های اخیر تلاش شده است که در مکان‌یابی تسهیلات به بحث قابلیت اطمینان هم توجه شود. از آنجا که آسیب‌پذیری یک سیستم نسبت به از کار افتادن یک تسهیل، به فاصله آن تسهیل از دیگر تسهیلات، میزان تقاضای تخصیص داده شده به آن و یا هر دو، بستگی دارد، بنابراین مکان‌یابی قابل اطمینان تسهیلات می‌تواند باعث کاهش حجم خسارات حاصل از اختلالات به میزان قابل توجهی گردد.

از طرف دیگر جهت افزایش میزان پاسخگویی به تقاضای مشتریان باید سطوح ابتدایی زنجیره تأمین شامل سیستم‌های تولیدی، دارای بیشترین قابلیت اطمینان باشند، چراکه هر نوع خرابی و از کار افتادگی خطوط تولیدی سبب ایجاد اختلال در کل زنجیره شده و عدم پاسخگویی مناسب به نیاز و تقاضای مشتریان را به همراه خواهد داشت. لذا موضوع افزایش و بهینه‌سازی قابلیت اطمینان سیستم‌های تولیدی بسیار حائز اهمیت است. هدف علم مهندسی قابلیت اطمینان، ایجاد ساختاری مناسب برای سیستم است، به طوریکه با استفاده از کمترین منابع به بالاترین سطح از میزان قابلیت اطمینان دست یافت. روش‌های مختلفی جهت ارتقای قابلیت اطمینان سیستم وجود دارد، از جمله این روش‌ها می‌توان به افزایش قابلیت اطمینان هر جزء از اجزای سیستم، تخصیص قطعات افزونه به صورت موازی و استفاده ترکیبی از دو روش یادشده، اشاره کرد.

یکی از راه‌های رایج افزایش قابلیت اطمینان تخصیص افزونگی است. مسأله تخصیص افزونگی^۱ (RAP) به عنوان انتخاب ترکیبی بهینه از نوع اجزا و سطوح افزونگی برای هر زیرسیستم جهت برآورده ساختن نیازهای سیستم و یا ارتقا و بهبود عملکرد آن با در نظر گرفتن محدودیت‌هایی مانند بودجه، وزن، حجم و ... تعریف

1. Redundancy Allocation Problem

مدل مکان‌یابی- موجودی برای طراحی یک زنجیره تأمین با مراکز توزیع و خرده‌فروشی‌های چندگانه و در نظر گرفتن عدم قطعیت در تقاضا و زمان‌های تحویل ارائه نمودند. در مدل توسعه داده شده، تعداد مراکز توزیع، تخصیص خرده‌فروشان به مراکز توزیع و اندازه و زمان سفارشات در هر مرکز توزیع تعیین می‌شد. دای و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۸ برای مسأله مکان‌یابی-موجودی در زنجیره تأمین، یک مدل بهینه‌سازی برای محصولات فاسدشدنی با محدودیت‌های فازی ظرفیت و انتشار کربن توسعه دادند. برای حل این مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته، الگوریتم ترکیبی ژنتیک و جستجوی هارمونی جهت کمینه‌سازی هزینه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. رضایی نور و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۲۰ یک مدل جدید برنامه‌ریزی چندهدفه برای طراحی یک شبکه زنجیره تأمین چهار سطحی دارو در چند دوره و برای چند محصول فاسدشدنی توسعه دادند. این مدل به تصمیم‌گیری یکپارچه مسائل مکان‌یابی مراکز تولید و مراکز توزیع دارو، اختصاص بهینه آن‌ها به یکدیگر به منظور حمل‌ونقل مناسب داروها در بین سطوح، تعیین مقدار بهینه تولید و حمل‌ونقل در بین تسهیلات و نیز تعداد بهینه‌ی استخدام و اخراج نیروی کار برای تولید بهینه محصولات دارویی کمک می‌کند. همچنین مراکز تولید و توزیع دارای سطوح تکنولوژی مختلف جهت تأسیس هستند. در ادامه یک روش فراابتکاری مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله استفاده شد. صدری اصفهانی و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۲۰ یک مدل موجودی و قیمت‌گذاری در یک زنجیره تأمین، شامل چند تأمین‌کننده، چند تولیدکننده و چند مشتری توسعه دادند که در آن، توابع خطی تقاضا وابسته به قیمت فروش، هزینه نگهداری وابسته به زمان ذخیره‌سازی در انبار و هزینه خرید وابسته به اندازه سفارش است. بر این اساس، یک مدل ریاضی فرمول‌بندی شده و یک الگوریتم حل دستیابی به جواب بهینه با توجه به حداکثر رساندن سود کل، توسعه داده شد.

۲-۱. مسائل مکان‌یابی تسهیلات با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان

نخستین مطالعه‌ای که به طور مستقیم، مسائل جایابی و تخصیص تسهیلات را با در نظر گرفتن بحث قابلیت اطمینان مورد بررسی قرار داد، رساله دکتری اشنایدر در سال ۲۰۰۳ است که به راهنمایی پروفیسور داسکین انجام شد [۱۷]. اشنایدر در رساله دکتری خود، خرابی و از کارافتادگی تسهیلات را تحت عنوان قابلیت اطمینان تسهیلات در بحث جایابی و تخصیص تسهیلات مورد مطالعه قرار داد و دو مسئله جایابی تسهیلات با هزینه ثابت و P-میان را با رویکرد مطرح بودن قابلیت اطمینان برای تسهیلات مدنظر برای جایابی، مدل‌سازی کرد. اشنایدر و داسکین در سال ۲۰۰۵ و ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷ نتایج حاصل از این رساله دکتری را به صورت مقاله منتشر کردند [۱۸-۲۰].

ژان [۲۱] در سال ۲۰۰۷، مسئله جایابی تسهیلات بدون

تخصیص خرده‌فروشان به مراکز توزیع، هزینه‌های موجودی و هزینه‌های حمل‌ونقل را مورد توجه قرار می‌دادند. هدف مسأله، کمینه‌سازی هزینه‌ها شامل هزینه‌های موجودی، حمل‌ونقل و مکان‌یابی بود.

مطالعات دیگر، مسائل مکان‌یابی-موجودی دو سطحی را به مسائل مکان‌یابی-موجودی چند سطحی توسعه داده‌اند. تانکرز و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۲ یک مسأله مکان‌یابی-موجودی سه سطحی را جهت یکپارچه‌سازی تصمیمات مکان‌یابی، تخصیص مشتریان به مراکز توزیع و کارخانه‌ها و موجودی در نظر گرفتند. آن‌ها یک فرمولاسیون پیوسته غیرخطی را برای این مسأله پیشنهاد کردند و یک رویکرد ابتکاری تکراری برای حل آن ارائه نمودند. پارک و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۰ یک مسأله مکان‌یابی-موجودی سه سطحی را ارائه کردند که در آن سیاست موجودی به صورت پیوسته و زمان‌های تحویل وابسته به مکان کارخانه بود.

شهابی و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۳ یک مسأله مکان‌یابی-موجودی یکپارچه را در چهار سطح از زنجیره تأمین شامل تأمین‌کنندگان، هاب‌ها، انبارها و مراکز توزیع مورد مطالعه قرار دادند. هدف، کمینه‌سازی هزینه‌های مکان‌یابی تسهیلات، موجودی و حمل‌ونقل بود. آن‌ها مسأله را به عنوان یک مدل غیر خطی عدد صحیح آمیخته فرموله کردند و نتایج آن‌ها نشان داد که می‌توان مسائل با ابعاد بزرگ را با استفاده از تغییر فرمولاسیون مدل و همچنین استفاده از حل‌کننده‌های تجاری حل نمود. موسوی و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۵ مدلی برای مسأله مکان‌یابی-تخصیص-موجودی چند دوره‌ای و چند محصولی پیشنهاد کردند. آن‌ها یک الگوریتم بهینه‌سازی کرم میوه برای حل این مدل غیر خطی عدد صحیح آمیخته ارائه دادند. احمدی جاوید و حسین‌پور [۱۰] در سال ۲۰۱۵ یک مدل مکان‌یابی-موجودی-قیمت‌گذاری چند محصولی در زنجیره تأمین را با سیاست موجودی مرور پیوسته و تقاضاهای وابسته به قیمت برای تسهیلاتی با محدودیت ظرفیت و بدون محدودیت ظرفیت توسعه دادند. آن‌ها از یک روش آزاد سازی لاگرانژ استفاده نموده و نشان دادند که رویکرد آن‌ها می‌تواند برای مسائل با ابعاد بزرگ بکار گرفته شود. برمن و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۶ یک مدل مکان‌یابی-موجودی با تقاضای وابسته به زمان را مورد مطالعه قرار دادند که در آن دو مکانیزم برای تخصیص مشتریان به تسهیلات در نظر گرفتند. آن‌ها این مسأله را با سایر مسائل مکان‌یابی-موجودی مورد مقایسه قرار داده و دو الگوریتم ابتکاری برای مدل‌های ذکر شده ارائه کردند. احمدی و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۶ یک شبکه توزیع سه سطحی با محصولات فصلی و غیر فصلی و یکپارچه‌سازی تصمیمات مکان‌یابی-موجودی با امکان حمل عرضی بین انبارها را در نظر گرفتند. آن‌ها یک مدل دو هدفه برای این شبکه ارائه کردند که شامل بیشینه‌سازی سود نهایی و کمینه‌سازی عدم رضایت مشتری می‌شود و در نهایت با تبدیل مدل فازی به یک ساختار کلاسیک، اقدام به حل آن نمودند. دیابات و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۷ یک

تابع هدف با حداقل بودجه جهت استحکام‌سازی تسهیلات، تقاضای مشتریان را به تسهیلات تخصیص می‌داد، سپس برای حل مدل از الگوریتم جستجوی ممنوعه استفاده کردند. جلالی و همکاران [۲۸] در سال ۲۰۱۶ یک مسأله دو هدفه مکان‌یابی تسهیلات مطمئن با سطوح ظرفیت چندگانه را در یک زنجیره تأمین سه‌سطحی مطرح نمودند که محدودیت‌هایی روی سطوح پوشش وجود داشت. این مسأله با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب و تبرید شبیه‌سازی شده چند هدفه، حل شدند. فراهانی و همکاران [۲۹] در سال ۲۰۱۷ یک مسأله مکان‌یابی-موجودی چندمحصولی با در نظر گرفتن خرابی را ارائه کردند. آن‌ها به توسعه یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیر خطی پرداختند، با این فرض که تسهیلات ممکن است دچار خرابی جزئی شده و امکان جایگزینی محصولات به عنوان یک استراتژی در مقابل کاهش ریسک ناشی از خرابی تسهیلات وجود دارد. آن‌ها برای حل مدل، از الگوریتمی ترکیبی شامل روش‌های جستجوی ممنوعه و جستجوی همسایگی متغیر استفاده کردند. فخرزاد و همکاران [۳۰] در سال ۲۰۱۹ یک مدل زنجیره تأمین حلقه- بسته سبز در حالت چند دوره‌ای، چندسطحی و چندمحصولی تحت عدم قطعیت ارائه کردند که اهداف آن شامل کمینه‌سازی هزینه‌های شبکه زنجیره تأمین، کمینه‌سازی انتشار گازهای خروجی حاصل از جابه‌جایی وسیله نقلیه در بین مراکز و حداکثرسازی قابلیت اطمینان تحویل تقاضا - با لحاظ قابلیت اطمینان تعریف شده برای تأمین‌کنندگان- است. در این مقاله پارامترهای مدل به صورت اعداد فازی در نظر گرفته شد.

۳-۱. مسائل تخصیص افزونگی

مسأله تخصیص افزونگی یک مسأله بهینه‌سازی پیچیده (NP-Hard) است [۳۱]. این مسأله هم از نظر فرمولاسیون و مدل‌سازی مسأله و هم از نظر رویکردهای حل در ادبیات موضوع بسیار مورد تحقیق قرار گرفته است. در سال ۱۹۶۸، فایف و همکاران [۳۲] یک مدل ریاضی برای RAP با هدف بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان و با محدودیت‌های هزینه و وزن توسعه دادند. استراتژی افزونگی مدل آن‌ها از نوع فعال بود. آن‌ها مدل پیشنهادی را با استفاده از برنامه‌ریزی پویا حل نمودند. هیکیتا و همکاران [۳۳] مسأله بهینه‌سازی قابلیت اطمینان را با اهداف بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان سیستم و کمینه‌سازی هزینه اجزای افزونه با استفاده از برنامه ریزی پویا حل نمودند. در سال ۱۹۹۶ کویت واسمیت [۳۴] از الگوریتم ژنتیک برای حل مسأله چندهدفه بهینه‌سازی قابلیت اطمینان سیستم با اجزای افزونه استفاده کردند.

اگرچه در ادبیات موضوع، افزونگی فعال بیشتر مورد توجه بوده است، اما در عمل ممکن است هر دو استراتژی فعال و آماده بکار سرد به طور همزمان در یک سیستم وجود داشته باشد. کویت [۳۵] در سال ۲۰۰۳ یک مسأله بهینه‌سازی قابلیت اطمینان را ارائه نمود که در آن متغیرهای سیستم شامل استراتژی افزونگی، نوع و سطح افزونگی برای هر زیرسیستم، جهت بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان در

محدودیت ظرفیت (UFLP¹) را به صورت تک‌سطحی و چندسطحی با در نظر گرفتن تسهیلات نامطمئن مورد مطالعه قرار داده و مدل ریاضی عدد صحیح مختلط مسأله را ارائه کرد. وی همچنین رویکرد حل کارایی بر اساس الگوریتم ژنتیک به منظور حل مدل یاد شده لحاظ کرد. ژان و همکاران [۲۲] در سال ۲۰۰۷ نشان دادند که در بحث قابلیت اطمینان در مسائل جایابی تسهیلات، ممکن است متفاوت بودن احتمال خرابی برای تسهیلات در مکان‌های مختلف، تأثیر قابل توجهی در انتخاب مکان تسهیلات و جایابی آنها داشته باشد. ژان و همکاران با ارائه یک الگوریتم ژنتیک و کیو و همکاران با توسعه یک روش آزادسازی لاگرانژ، روش‌های حلی را برای تعیین جواب مسائل جایابی تسهیلات در شرایط یاد شده ارائه کرده‌اند.

لیم و همکاران [۲۳] در سال ۲۰۰۹ مسأله جایابی تسهیلات با هزینه ثابت را با در نظر گرفتن بحث قابلیت اطمینان مورد مطالعه قرار داده و یک مدل ریاضی عدد صحیح از مسأله، با در نظر گرفتن استحکام‌سازی تسهیلات، ارائه کردند. در نهایت، مدل ریاضی بدست آمده را با استفاده از روش آزادسازی لاگرانژ حل کردند. کیو و همکاران [۲۴] نیز در سال ۲۰۱۰ مسأله UFLP را در حالت گسسته و با در نظر گرفتن بحث قابلیت اطمینان برای تسهیلات، مورد مطالعه قرار داده و مسأله را با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های اولیه راه‌اندازی و هزینه‌های انتظاری حمل‌ونقل، مدل‌سازی نمودند و یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط، ارائه کردند. سیف برقی و همکاران [۲۵] در سال ۲۰۱۲ یک مدل دوهدفه برای یک زنجیره سه‌سطحی (تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان و مشتری‌ها) مبتنی بر سناریو ارائه دادند که هدف اول کاهش متوسط هزینه‌های خرابی مراکز توزیع و هدف دوم بیشینه‌کردن حداکثر تقاضای مورد پوشش مشتری‌ها بود.

شیشه‌بری و همکاران [۲۶] در سال ۲۰۱۴ یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای مدل ترکیبی مکان‌یابی تسهیلات- طراحی شبکه با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان سیستم ارائه نمودند. در این مدل، برخلاف مدل‌های بررسی شده پیشین، قابلیت اطمینان به صورت محدودیت ظاهر شده است. مسأله مطرح شده، مکان‌یابی تعداد P تسهیل نامطمئن روی تعدادی از گره‌های تقاضا را مدل‌سازی می‌کند که هر کدام از این تسهیلات امکان خرابی دارند. آن‌ها نشان دادند که یک افزایش جزئی در سرمایه جهت استقرار تسهیلات و هزینه‌های حمل، منجر به افزایش قابل توجهی در قابلیت اطمینان سیستم می‌شود.

لی و همکاران [۲۷] در سال ۲۰۱۵ یک مدل P-میان را با در نظر گرفتن تسهیلات پشتیبان طراحی کردند. تابع هدف در این مدل، کمینه‌کردن متوسط هزینه‌های جریان بین تسهیلات است. آن‌ها احتمال خرابی تسهیلات را وابسته به هزینه‌های ثابت و متغیر جهت استحکام تسهیلات، متفاوت در نظر گرفته بودند. به نحوی که

یافتن مقدار سفارش، تعداد دفعات سفارش مشتریان، تور بهینه سفر از فروشنده به مشتریان و تعداد ماشین‌ها می‌باشد، به نحوی که هزینه کل، مینیمم و قابلیت اطمینان ساخت محصول، بیشینه گردد. نهایتاً الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب برای حل آن استفاده شد. صبری و همکاران [۴۸] در سال ۲۰۱۹ مسأله تخصیص افزونگی را در سیستم‌های صف با ملاحظات تعمیرات و نگهداری در نظر گرفتند و از چهار الگوریتم جستجوی تصادفی برای حل آن بهره بردند.

برای دستیابی به یک زنجیره تأمین مناسب، باید عوامل مختلفی جهت بهبود و بهینه‌سازی زنجیره در نظر گرفته شود. همانطور که در بررسی ادبیات موضوع مشاهده شد، بیشتر پژوهش‌های انجام شده معمولاً روی یک و یا دو موضوع از این موارد متمرکز بوده‌اند و از طرف دیگر مبحث تخصیص افزونگی و ارتقای قابلیت اطمینان سیستم‌های تولید و توزیع، بسیار کم مورد توجه قرار گرفته و یکی از شکاف‌های تحقیقاتی این عرصه از مدیریت به شمار می‌آید. بنابراین، یکپارچه در نظر گرفتن موضوعاتی مانند مکان‌یابی تسهیلات، مدیریت موجودی و تخصیص افزونگی می‌تواند به مدیریت بهتر زنجیره تأمین و کاهش هزینه‌ها و افزایش میزان رضایت‌مندی مشتری کمک شایانی کند. این عوامل، تأثیرات متقابلی روی همدیگر دارند و بهینه‌سازی کل زنجیره، منوط به یافتن یک ترکیب بهینه از این اهداف است. به عنوان مثال، مکان‌یابی صحیح تسهیلات اثرات بسیار مهمی در کسب منافع اقتصادی، ارائه خدمات مناسب و ارتقای رضایت مشتریان دارد و اغلب روی معیارهای اساسی عملکرد زنجیره تأمین، از قبیل زمان تأخیر، موجودی، پاسخگویی در برابر تغییرات تقاضا، انعطاف‌پذیری و کیفیت تأثیر زیادی دارد. از طرف دیگر، میزان قابلیت اطمینان سیستم‌های تولیدی و ارتقای آن‌ها از طریق روش‌های مختلف از جمله تخصیص افزونگی، می‌تواند بر روی سطح نگهداری موجودی و سایر هزینه‌های آن و همچنین زمان‌های تحویل محصول به مشتری تأثیر مستقیمی داشته باشد.

در عالم واقعیت، همواره تقاضا برای محصولات از قبل مشخص نبوده و با عدم قطعیت همراه است. یکی از چالش‌های مهم برای مدیران حوزه زنجیره تأمین، پیش‌بینی تقاضا در دوره‌های مختلف است. از طرفی، در بسیاری از کسب و کارها و صنایع، نوسانات تقاضا به واسطه کوتاه شدن دوره عمر محصولات، تنوع محصولات و سهولت مقایسه کالاها در شبکه‌های مجازی و اینترنت و ... بسیار افزایش یافته است. این افزایش نوسانات تقاضا، فروشندگان را مجبور می‌سازد که جهت افزایش سطح پاسخگویی به مشتریان، موجودی بیشتری را نگهداری کنند. این امر افزایش هزینه‌های نگهداری خرده‌فروشان و به تبع آن کل زنجیره را به دنبال دارد. یکی از ابزارهای قدرتمند برای مقابله با تغییرات و نوسانات تقاضا، استراتژی ادغام ریسک است.

در استراتژی ادغام ریسک، بواسطه تجمیع و متمرکز ساختن تقاضای خرده‌فروشان در مراکز توزیع، نوسانات تقاضا کنترل می‌شود. در واقع، در این روش، افزایش تقاضای یکی از خرده‌فروشان بوسیله کاهش تقاضای یک خرده‌فروش دیگر، جبران می‌شود. این کاهش

نظر گرفته شدند. رامیرز و همکاران [۳۶] در سال ۲۰۰۴ از روش Max-Min برای حل مسأله RAP استفاده کردند. کالچرل و همکاران [۳۷] مسأله RAP را با اهداف بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان و کمینه‌سازی هزینه و وزن سیستم در نظر گرفتند و با استفاده از الگوریتم جستجوی ممنوعه به حل آن پرداختند.

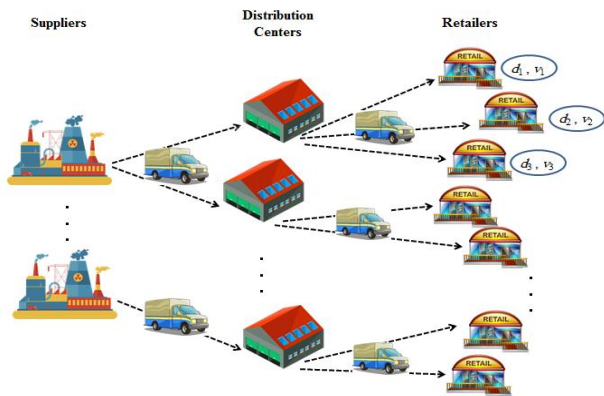
با توجه به پیچیدگی محاسباتی مسأله RAP، الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری بسیاری جهت حل این مسأله توسعه داده شده‌اند. ژائو و همکاران [۳۸] در سال ۲۰۰۷ از الگوریتم کلونی مورچگان برای حل مسأله RAP استفاده کردند. تابودا [۳۹] نیز یک الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب را برای حل مسأله بهینه‌سازی قابلیت اطمینان توسعه داد. توکلی‌مقدم و همکاران [۴۰] در سال ۲۰۰۸ مسأله بهینه‌سازی قابلیت اطمینان سیستم‌های سری-موازی با امکان انتخاب استراتژی افزونگی و همچنین انتخاب چندگانه اجزا برای هر زیرسیستم را مورد مطالعه قرار داده و یک الگوریتم ژنتیک کارا برای آن معرفی کردند. لیانگ و لو [۴۱] در سال ۲۰۱۰ از الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر برای حل همین مسأله استفاده نمود.

خلیلی‌دامغانی و امیری [۴۲] در سال ۲۰۱۲ برای حل مسأله دو وضعیته RAP دستورالعملی را بر اساس روش محدودیت پس‌یلون و تحلیل پوششی اطلاعات (DEA) پیشنهاد نمودند. صفری [۴۳] در سال ۲۰۱۲ نوعی از روش ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب را برای حل مسأله چندهدفه RAP با امکان انتخاب استراتژی افزونگی توسعه داد. چمبری و همکاران [۴۴] الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب را برای مدل دو هدفه RAP جهت بهینه‌ساختن قابلیت اطمینان و هزینه سیستم با امکان انتخاب استراتژی افزونگی توسعه دادند. ذوالفقاری و همکاران [۴۵] یک مدل جدید غیرخطی عدد صحیح آمیخته را برای بهینه‌سازی دسترسی‌پذیری سیستم توسعه دادند که در آن قطعات می‌توانستند قابل تعمیر و یا غیرقابل تعمیر باشند. زارع طلب و همکاران [۴۶] در سال ۲۰۱۵ مسأله RAP با اهداف بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان و کمینه‌سازی هزینه تحت محدودیت وزن را با استفاده از الگوریتم فراابتکاری KBAMOSA^۱ که دارای ساختار همسایگی مبتنی بر دانش است، حل نمودند.

صادقی و همکاران [۴۷] در سال ۲۰۱۴ یک مدل دو هدفه مدیریت موجودی توسط فروشنده در زنجیره تأمین با یک فروشنده و چندین خرده‌فروش را توسعه داده‌اند، به طوری که تعداد ماشین‌های مختلفی که برای تولید یک نوع محصول به صورت سری با هم در ارتباط هستند، تعیین می‌گردد. در این مسأله نرخ تقاضای قطعی بوده و شامل محدودیت‌های بودجه کل، فضای ذخیره موردنیاز، تعداد سفارشات کل و متوسط موجودی می‌باشد. هدف در این مسأله،

1. Knowledge Based Archive Multi Objective Simulated Annealing

دوم یا همان مراکز توزیع انجام می‌پذیرد که تعدادی مراکز توزیع از بین چندین مکان بالقوه انتخاب می‌شود.



شکل (۱): شمای کلی شبکه توزیع زنجیره تأمین

کارخانه‌ها هیچ‌گونه محدودیت ظرفیت تولیدی ندارند و هر کدام از مراکز توزیع می‌توانند به آن‌ها تخصیص داده شوند. همچنین در اینجا استراتژی تک منبعی لحاظ گردیده به طوری که هر خرده فروش سفارش‌های خود را تنها از یک مرکز توزیع دریافت می‌کند و هر مرکز توزیع فقط به یک تأمین‌کننده تخصیص داده می‌شود. تقاضای خرده‌فروشان غیر قطعی و از همدیگر مستقل بوده و دارای توزیع نرمال با میانگین d_i و واریانس v_i است. در این مسأله، موجودی فقط در مراکز توزیع نگهداری می‌شود به طوری که جوابگوی تقاضای خرده فروشان و همچنین ذخیره احتیاطی جهت مقابله با نواسانات تقاضا باشد و بدین شکل بتوان از مزایای استراتژی ادغام ریسک برخوردار شد. در این استراتژی، با توجه به کاهش نیاز به ذخیره احتیاطی در هر خرده فروش و تجمع موجودی در مراکز توزیع، علاوه بر کاهش ریسک ناشی از نواسانات تقاضا، هزینه‌های نگهداری نیز کاهش یافته و در نتیجه کاهش هزینه‌های کل زنجیره را در پی دارد. برای نمونه مطابق شکل (۱)، با فرض مستقل بودن تقاضاها، اگر موجودی در خرده‌فروشی‌ها نگهداری شود، ذخیره احتیاطی خرده‌فروشی‌های تخصیص یافته به مرکز توزیع اول نسبت مستقیمی با مجموع جذر مقدار واریانس آن‌ها دارد $(\sqrt{v_1} + \sqrt{v_2} + \sqrt{v_3})$ ؛ در صورتیکه با نگهداری موجودی در مرکز توزیع، و استفاده از استراتژی ادغام ریسک، ذخیره احتیاطی با مقدار جذر مجموع واریانس‌ها نسبت دارد $(\sqrt{v_1 + v_2 + v_3})$ ؛ که مقدار کمتری از رابطه قبلی است.

به منظور پاسخگویی سریع به تقاضای مشتریان و تحویل به موقع محصولات می‌بایست تسهیلات مربوط به تأمین‌کنندگان و توزیع‌کنندگان دارای قابلیت اطمینان بالایی باشند. در مراکز تولیدی، یکی از راه‌های رایج افزایش قابلیت اطمینان، تخصیص ماشین‌ها یا قطعات افزونه به صورت موازی به سیستم است. با توجه به اینکه محدودیت‌های فضا و هزینه برای ماشین‌های افزونه وجود دارد، بنابراین تعداد بهینه این ماشین‌ها باید به گونه‌ای انتخاب شود که قابلیت اطمینان کل زنجیره بیشینه شود. در اینجا فرض می‌شود که در هر کارخانه با یک سیستم سری-موازی سروکار داریم که شامل

نوسانات در تقاضا و یکپارچه‌سازی تقاضای خرده‌فروشان سبب کاهش ذخیره احتیاطی و در نتیجه کاهش میانگین موجودی می‌شود. کاهش ذخیره احتیاطی، کاهش هزینه‌های سفارش‌دهی و بالاسری، افزایش سطح خدمت‌دهی و پاسخگویی به تقاضای مشتریان و (احتمالاً) کاهش هزینه‌های حمل و نقل، از جمله مزایای استفاده از استراتژی ادغام ریسک است.

بنابراین در پژوهش پیش‌رو، برای اولین بار مسأله بهینه‌سازی همزمان مکان‌یابی تسهیلات-موجودی-تخصیص افزونگی به صورت سه سطحی شامل تأمین‌کننده، توزیع‌کننده و خرده‌فروش در حالت تک دوره‌ای مورد تحقیق قرار می‌گیرد. از نوآوری‌های دیگر مسأله، پارامتر تقاضا می‌باشد که در پژوهش‌های مشابه به صورت قطعی در نظر گرفته شده است، در حالیکه در اینجا تقاضا به صورت غیر قطعی لحاظ می‌گردد. از طرف دیگر، در این مقاله، از استراتژی ادغام ریسک جهت مقابله با نواسانات تقاضا استفاده شده است. با لحاظ ویژگی‌های یاد شده، در نهایت یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی توسعه داده خواهد شد به طوری که شاهد کمترین مقدار هزینه و بیشترین سطح از قابلیت اطمینان در شبکه زنجیره تأمین باشیم.

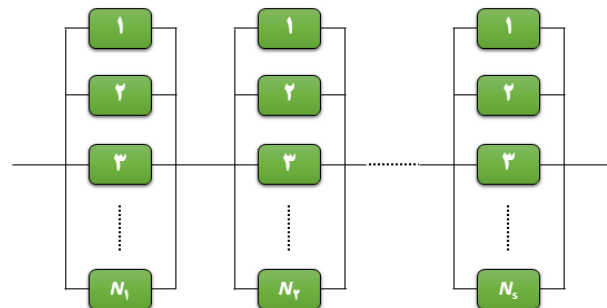
مسأله مکان‌یابی تسهیلات با ظرفیت محدود به لحاظ پیچیدگی محاسباتی، جزء مسائل NP-Hard است [۴۹]. بنابراین، بدلیل آنکه مسأله مکان‌یابی-موجودی توسعه‌یافته مسأله مکان‌یابی تسهیلات با ظرفیت محدود هستند، در نتیجه حل آن‌ها ساده‌تر نبوده و این مسائل نیز از دسته مسائل NP-Hard به شمار می‌آیند. از طرفی مسأله تخصیص افزونگی نیز یک مسأله بهینه‌سازی NP-Hard است [۳۱] که عموماً برای حل آن‌ها در مقیاس بزرگ از روش‌های ابتکاری استفاده می‌شود. با توجه به مواردی که عنوان شد، جهت حل مدل ارائه شده در این تحقیق، از یک الگوریتم فراابتکاری استفاده شده که جهت ارزیابی عملکرد الگوریتم، نتایج حاصل از آن در مسائل با ابعاد کوچک، با نتایج حاصل از روش شمارش کامل مقایسه شده است.

در ادامه ساختار مقاله بصورت زیر است: در بخش دوم تعریف مسأله و فرمول‌بندی مدل مسأله عنوان شده است. در بخش سوم روش‌های ارزیابی و حل مدل تشریح می‌گردد. در بخش چهارم به نتایج محاسباتی خواهیم پرداخت و نهایتاً در بخش پنجم جمع‌بندی و نتیجه‌گیری از تحقیق ارائه می‌گردد.

۲. تعریف و فرمول‌بندی مسأله

مسأله پیشنهادی یک شبکه زنجیره تأمین سه سطحی شامل چندین تأمین‌کننده (کارخانه)، چندین مرکز توزیع (انبار) و چندین خرده فروش است که به صورت شماتیک در شکل (۱) نشان داده شده است. مسأله به صورت تک دوره‌ای و تک محصولی بوده که سفارشها از طرف مراکز توزیع به تأمین‌کنندگان ارسال می‌شود. سپس محصولات تولید شده و نهایتاً به خرده‌فروشان تحویل داده می‌شود. فرض می‌شود مکان کارخانه‌ها و خرده‌فروش‌ها ثابت و از قبل مشخص بوده و تصمیمات مکان‌یابی تسهیلات فقط برای سطح

تعدادی زیرسیستم به صورت سری و تعدادی ماشین به صورت موازی است. شکل (۲) شمای کلی این سیستم را نشان می‌دهد. از طرفی جهت افزایش قابلیت اطمینان مراکز توزیع نیز، بایستی در مکان‌یابی آن‌ها در هر دوره، مراکز انتخاب شوند که احتمال دسترس پذیری آن‌ها حداکثر باشد.



شکل (۲): ساختار کلی سیستم‌های سری-موازی

۱-۲. مفروضات مسأله

این تحقیق دارای مفروضات ذیل است:

- مسأله به صورت سه سطحی بوده و شامل چندین تولیدکننده، توزیع‌کننده و خرده‌فروش است.
- چندین مکان بالقوه برای انتخاب به عنوان مراکز توزیع وجود دارد.
- هزینه مکان‌یابی تسهیلات شامل هزینه‌های اجاره انبار، تجهیز انبار و ... است.
- از سیستم سری-موازی در پیکربندی تولید محصولات استفاده می‌شود.
- سیستم تولیدی و همچنین ماشین‌آلات مورد استفاده برای تولید محصولات در تمام کارخانه‌ها یکسان است.
- فرض می‌شود که قطعات افزونه در یک انبار مرکزی موجود بوده و بر اساس میزان تقاضا، به تولیدکنندگان تخصیص داده می‌شود.
- هزینه تخصیص افزونگی شامل هزینه‌های حمل و نقل قطعات افزونه، نصب و راه‌اندازی آن‌ها است.
- بهبود قابلیت اطمینان تسهیلات، در مراکز تولیدی با استفاده از استراتژی تخصیص افزونگی و در مراکز توزیع با انتخاب تسهیلات با قابلیت اطمینان مناسب انجام می‌شود.
- استراتژی تخصیص افزونگی به صورت فعال می‌باشد.
- قطعات افزونه برای هر زیرسیستم مشابه و یکسان هستند.
- افق برنامه‌ریزی محدود به صورت تک دوره‌ای است.
- هزینه‌های عملیاتی شامل هزینه‌های مکان‌یابی، تخصیص افزونگی، سفارش‌دهی و نگهداری محصولات و حمل‌ونقل است.
- مسأله به صورت تک محصولی در نظر گرفته می‌شود.
- تقاضا غیر قطعی و به صورت احتمالی است. همچنین تابع توزیع نرخ تقاضا برای تمامی خرده‌فروشان یکسان و مستقل از هم و دارای توزیع نرمال استاندارد است.

۲-۲. نمادگذاری مسأله

اندیس‌ها:

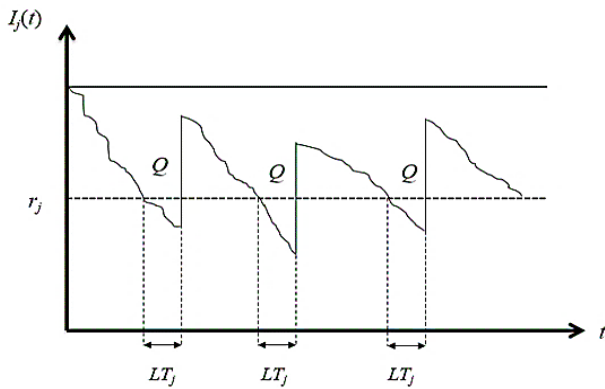
$i = 1, 2, \dots, n$ اندیس برای خرده فروش
 $j = 1, 2, \dots, m$ اندیس برای مرکز توزیع
 $k = 1, 2, \dots, l$ اندیس برای تامین کننده
 $p = 1, 2, \dots, s$ اندیس برای ماشین آلات کارخانه

پارامترها:

d_i مقدار میانگین تقاضای خرده فروش i ام
 v_i مقدار واریانس تقاضای خرده فروش i ام
 D_j مقدار میانگین تقاضای مرکز توزیع j ام
 V_j مقدار واریانس تقاضای مرکز توزیع j ام
 r_j نقطه سفارش مجدد مرکز توزیع j ام
 LT_j مدت زمان تدارک مرکز توزیع j ام
 L_{jk} مدت زمان تدارک مرکز توزیع j ام از کارخانه k ام
 $1 - \alpha$ سطح خدمت (احتمال پاسخگویی سیستم به تقاضا)
 $Z_{1-\alpha}$ مقدار توزیع نرمال استاندارد
 H_j هزینه نگهداری در مرکز توزیع j ام به ازای هر محصول
 SS_j مقدار ذخیره ایمنی مرکز توزیع j ام
 O_j هزینه سفارش دهی مرکز توزیع j ام
 TR هزینه حمل و نقل به ازای هر محصول
 TC_j مدت زمان مابین دو سفارش متوالی (طول هر سیکل) مرکز توزیع j ام
 F_j هزینه اجاره و راه اندازی مرکز توزیع j ام
 DIS_{ij} فاصله اقلیدوسی خرده فروش i تا مرکز توزیع j
 DIS_{jk} فاصله اقلیدوسی مرکز توزیع j تا کارخانه k
 $a(x, y)$ مختصات نقطه a
 Cap_j ظرفیت مرکز توزیع j
 R_j قابلیت اطمینان مرکز توزیع j
 $nmax_1$ حد بالای موجودی قطعات یدکی برای زیرسیستم p
 B مدت زمان مأموریت
 V_p قابلیت اطمینان یا احتمال موفق تعویض اجزا در زیرسیستم p
 Rb_p قابلیت اطمینان زیرسیستم p
 $k_p \lambda_p$ پارامترهای شکل و مقیاس برای توزیع ارلنگ برای ماشین p
 c_p هزینه حمل از انبار و نصب و راه اندازی ماشین p
 w_p مقدار فضای موردنیاز برای ماشین p
 TW_k مقدار کل فضای موجود برای نصب ماشین آلات در کارخانه k

متغیرهای تصمیم مستقل:

Z_j برابر با یک است اگر مرکز توزیع j انتخاب شود، در غیر اینصورت برابر است با صفر
 X_{ij} برابر با یک است اگر خرده فروش i به مرکز توزیع j



شکل (۳): سیاست موجودی (Q_j, r_j)

در رابطه (۴)، بخش اول مربوط به هزینه نگهداری ذخیره احتیاطی و بخش دوم مربوط به هزینه نگهداری میانگین موجودی بواسطه سفارش مقدار Q_j بوده که برابر با موجودی موردنیاز جهت پوشش تقاضای مابین دو سفارش متوالی است. با در نظر گرفتن هزینه سفارش دهی، مجموع این هزینه و هزینه نگهداری موجودی در هر سیکل برابر است با:

$$O_j + (H_j \cdot Z_{1-\alpha} \cdot \sqrt{V_j} \cdot \sqrt{LT_j} + H_j \cdot Q_j/2) \cdot TC_j \quad (5)$$

با در نظر گرفتن تعداد سیکل‌های هر دوره $(1/TC_j = D_j/Q_j)$ مجموع هزینه‌های موجودی در مرکز توزیع j برابر است با:

$$C_j^{inv} = 1/TC_j \cdot [O_j + (H_j \cdot Z_{1-\alpha} \cdot \sqrt{V_j} \cdot \sqrt{LT_j} + H_j \cdot Q_j/2) \cdot TC_j] \quad (6)$$

با ساده‌سازی رابطه (۶) داریم:

$$C_j^{inv} = O_j \cdot D_j/Q_j + H_j \cdot Z_{1-\alpha} \cdot \sqrt{V_j} \cdot \sqrt{LT_j} + H_j \cdot Q_j/2 \quad (7)$$

قضیه ۱: تابع C_j^{inv} بیان شده در رابطه (۷) محدب است.

بنابه تعریف تابع محدب، تابعی مانند $f(x)$ محدب است اگر و تنها اگر به ازای تمام مقادیر x ، مشتق دوم آن تابع نامنفی باشد $(f''(x) \geq 0)$.

اکنون جهت تعیین تحدب تابع C_j^{inv} ، شرط بالا بررسی می‌شود.

$$f'(Q_j) = -\frac{D_j \cdot O_j}{Q_j^2} + \frac{H_j}{2} \quad (8)$$

$$f''(Q_j) = \frac{2D_j \cdot O_j}{Q_j^3} \quad (9)$$

با توجه به اینکه مشتق دوم تابع C_j^{inv} مثبت است پس این تابع محدب است.

با توجه به محدب بودن تابع C_j^{inv} می‌توان مقدار سفارش اقتصادی را از برابر صفر قرار دادن مشتق تابع هزینه C_j^{inv} نسبت به Q_j تعیین کرد.

$$f'(Q) = -\frac{D_j \cdot O_j}{Q_j^2} + \frac{H_j}{2} = 0 \quad (10)$$

تخصیص داده شود، در غیر اینصورت برابر است با صفر برابر با یک است اگر مرکز توزیع j به کارخانه k تخصیص داده شود، در غیر اینصورت برابر است با صفر تعداد اجزایی که در کارخانه k برای زیرسیستم p استفاده می‌شوند.

متغیرهای تصمیم وابسته:

C_j^{inv}	هزینه‌های موجودی در مرکز توزیع j
Q_j	مقدار سفارش مرکز توزیع j
ARS_{pk}	استراتژی افزونگی تخصیص یافته به زیرسیستم p در کارخانه k
R_k	قابلیت اطمینان کارخانه k
TC	هزینه کل زنجیره تامین (تابع هدف اول)
LTR	قابلیت اطمینان کل زنجیره تامین (تابع هدف دوم)

۳-۲. فرمولاسیون مسأله

مدل‌سازی مسأله را در دو بخش بیان می‌کنیم. در بخش اول، مدل‌سازی مربوط به جایابی تسهیلات و کنترل موجودی را تشریح می‌کنیم و در بخش دوم به بحث قابلیت اطمینان مسأله می‌پردازیم و در نهایت مدل کلی مسأله را ارائه می‌دهیم.

۳-۲-۱. مدل‌سازی کنترل موجودی و جایابی تسهیلات

مشابه مدل ارائه شده توسط میراندا و گاریدو [۲]، سیاست موجودی در نظر گرفته شده برای این مسأله، سیاست مرور پیوسته موجودی یا همان سیاست (Q_j, r_j) است (شکل (۳)). مطابق این سیاست در صورتی که سطح موجودی به زیر خط سفارش مجدد یا r_j برسد، سفارشی به اندازه Q_j ارسال می‌شود که بعد از مدت زمان LT_j دریافت می‌شود. نقطه سفارش مجدد، به گونه‌ای تعیین می‌شود که در زمانی که یک سفارش ارسال شده است بایستی سطح موجودی بتواند جوابگوی تقاضای مدت زمان LT_j با احتمال $1 - \alpha$ باشد. این احتمال به عنوان سطح خدمت شناخته می‌شود. سطح خدمت سیستم به صورت زیر بیان می‌شود:

$$Prob(D(LT_j) \leq r_j) = 1 - \alpha \quad (1)$$

که در آن $D(LT_j)$ تقاضای تصادفی در طول مدت زمان سفارش تا دریافت آن در مرکز توزیع j است. با فرض اینکه تقاضا دارای تابع توزیع نرمال باشد، r_j می‌تواند به صورت زیر تعیین شود:

$$r_j = D_j \cdot LT_j + Z_{1-\alpha} \cdot \sqrt{V_j} \cdot \sqrt{LT_j} \quad (2)$$

بخش دوم رابطه بالا برابر با همان مقدار ذخیره احتیاطی است:

$$SS_j = Z_{1-\alpha} \cdot \sqrt{V_j} \cdot \sqrt{LT_j} \quad (3)$$

که در آن $Z_{1-\alpha}$ مقدار توزیع نرمال استاندارد است. فرض می‌شود که این مقدار برای کل شبکه و در همه دوره‌ها مقداری ثابت است. هزینه نگهداری کل موجودی در مرکز توزیع j برابر است با:

$$H_j \cdot Z_{1-\alpha} \cdot \sqrt{V_j} \cdot \sqrt{LT_j} + H_j \cdot Q_j/2 \quad (4)$$

بعد از ساده‌سازی رابطه بالا داریم:

$$Q_j^* = \sqrt{\frac{2 \cdot D_j \cdot O_j}{H_j}} \quad (11)$$

نکته جالب توجه این است که رابطه بدست آمده مشابه خروجی روش EOQ کلاسیک است، با این تفاوت که با تغییر پیکربندی شبکه و با تغییر یافتن مقادیر Z_j و Y_{jk} و در نتیجه تغییر در مقدار D_j مقدار Q_j^* نیز تغییر می‌کند. با جایگذاری رابطه بالا در تابع هزینه موجودی، تابع بهینه هزینه موجودی در هر مرکز توزیع به صورت زیر بدست می‌آید:

$$C_j^{inv*} = \sqrt{2 \cdot H_j \cdot O_j \cdot D_j} + H_j \cdot Z_{1-\alpha} \cdot \sqrt{V_j} \cdot \sqrt{LT_j} \quad (12)$$

در رابطه بالا و همچنین در ادامه مطالب، روابط زیر برقرار است:

$$D_j = \sum_{i=1}^n d_i \cdot X_{ij} \quad \forall j = 1, \dots, m \quad (13)$$

$$V_j = \sum_{i=1}^n v_i \cdot X_{ij} \quad \forall j = 1, \dots, m \quad (14)$$

زمان تدارکات نیز با توجه به مقدار قابلیت اطمینان کارخانه‌ها از طریق رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$LT_j = \sum_{k=1}^l \frac{L_{jk}}{R_k} Y_{jk} \quad \forall j = 1, \dots, m \quad (15)$$

از طرفی هزینه‌های حمل کالا در زنجیره به دو بخش هزینه حمل از کارخانه به مرکز توزیع و از مرکز توزیع به خرده فروش تقسیم می‌شود که به ترتیب از روابط (۱۶) و (۱۷) حاصل می‌گردد:

$$\sum_{k=1}^l TR \cdot DIS_{jk} \cdot D_j \cdot Y_{jk} \quad \forall j = 1, \dots, m \quad (16)$$

$$\sum_{j=1}^m TR \cdot DIS_{ij} \cdot d_i \cdot X_{ij} \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (17)$$

با در نظر گرفتن هزینه‌های مکان‌یابی تسهیلات شامل اجاره، تجهیز و راه‌اندازی برای تسهیلاتی که به عنوان مراکز توزیع انتخاب می‌شوند، مدل موجودی-مکان‌یابی به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \text{Min } TC &= \sum_{j=1}^m F_j \cdot Z_j + \sum_{j=1}^m \sqrt{2H_j \cdot O_j \cdot \sum_{i=1}^n d_i \cdot X_{ij}} \\ &+ \sum_{j=1}^m Z_{1-\alpha} \cdot H_j \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^l v_i \cdot \frac{L_{jk}}{R_k} \cdot X_{ij} \cdot Y_{jk}} \\ &+ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l TR \cdot DIS_{jk} \cdot d_i \cdot X_{ij} \cdot Y_{jk} \\ &+ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m TR \cdot DIS_{ij} \cdot d_i \cdot X_{ij} \end{aligned} \quad (18)$$

S.t.

$$\sum_{j=1}^m X_{ij} = 1 \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (19)$$

$$\sum_{k=1}^l Y_{jk} \leq Z_j \quad \forall j = 1, \dots, m \quad (20)$$

$$\sum_{i=1}^n d_i \cdot X_{ij} \leq Cap_j \cdot Z_j \quad \forall j = 1, \dots, m \quad (21)$$

$$X_{ij}, Y_{jk}, Z_j \in \{0, 1\} \quad (22)$$

محدودیت اول بیان می‌کند که هر خرده‌فروش فقط می‌تواند به یک مرکز توزیع تخصیص داده شود. محدودیت دوم بیانگر این است که زمانی امکان تخصیص یک مرکز توزیع به تامین‌کنندگان وجود دارد که این مرکز توزیع باز باشد. محدودیت سوم نیز بیانگر محدودیت ظرفیت هر کدام از مراکز توزیع است. رابطه (۲۲) نیز باینری بودن متغیرهای تصمیم را نشان می‌دهد.

۲-۳-۲. تخصیص افزونگی و قابلیت اطمینان

مسئله تخصیص افزونگی به عنوان انتخاب ترکیب بهینه اجزا و سطوح افزونگی برای هر زیرسیستم جهت برآورده ساختن نیازهای سیستم و یا ارتقا و بهبود عملکرد سیستم تحت تعدادی محدودیت مانند بودجه، وزن، فضا و ... تعریف می‌شود. در صورتیکه تمامی اجزای افزونه به طور همزمان از زمان صفر عمل کنند، حتی اگر سیستم فقط به یکی از آن‌ها در هر زمان نیاز داشته باشد، چنین چینیسی افزونگی فعال نامیده می‌شود. در غیر اینصورت، افزونگی آماده به کار نام دارد.

در چیدمان مربوط به استراتژی آماده به کار، اجزای افزونه به ترتیب در زمان‌های خرابی اجزا به کار گرفته می‌شوند. هر جزء افزونه در چیدمان آماده به کار، تنها زمانی می‌تواند بکار گرفته شود که تعویض شود. در واقع زمانیکه یک جزء در حال پردازش خراب می‌شود، جزء افزونه جهت ادامه پردازش سیستم جایگزین می‌شود. سه نوع مختلف از استراتژی آماده به کار وجود دارد: سرد، گرم و داغ. در افزونگی آماده به کار سرد، امکان خرابی اجزا قبل از شروع پردازش آن‌ها وجود ندارد. در استراتژی آماده به کار گرم، اجزا تمایل بیشتری به خرابی نسبت به استراتژی آماده به کار سرد قبل از شروع پردازش دارند. در استراتژی آماده به کار داغ، الگوی خرابی اجزا وابسته به اینکه آیا در حال پردازش و یا بیکار هستند، نمی‌باشند. مدل‌های ریاضی برای استراتژی آماده به کار داغ و استراتژی فعال یکسان است.

از طرفی در مدل‌های کلاسیک مکان‌یابی تسهیلات فرض می‌شود که پس از ساخت تسهیلات، سیستم حاصل، همواره بر طبق برنامه عمل خواهد کرد. اما در واقعیت، این‌گونه نیست و تسهیلات، هر از چندگاهی به دلایل مختلف، از جمله شرایط نامساعد جوی، اشتباهات انسانی، اعتصاب کارگران، جنگ‌ها و یا خراب‌کاری‌های عمدی از کار می‌افتند و نمی‌توانند به وظایف و سرویس‌دهی‌های

$$\sum_{k=1}^l n_{pk} \leq nmax_p \quad \forall p = 1, \dots, s \quad (26)$$

$$n_{pk} \in 1, 2, \dots, nmax_p \quad (27)$$

رابطه (۲۳) در مدل بالا به محاسبه قابلیت اطمینان کل شبکه می‌پردازد که شامل مجموع قابلیت اطمینان تأمین‌کنندگان از طریق تخصیص قطعات افزونه و قابلیت اطمینان مراکز توزیع از طریق انتخاب تسهیلات با قابلیت اطمینان مناسب است. رابطه (۲۴) بیانگر هزینه‌های ناشی از بکارگیری قطعات افزونه که شامل هزینه حمل و نصب و راه‌اندازی است، می‌باشد. لازم به ذکر است که بدلیل اینکه هزینه جایابی تسهیلات قبلاً در مدل مکان‌یابی-موجودی ذکر شده، از تکرار مجدد آن خودداری گردید. روابط (۲۵) و (۲۶) نیز به ترتیب بیان‌کننده محدودیت‌های فضا برای هر کارخانه و حداکثر تعداد قطعات افزونه موجود برای استفاده کارخانه‌ها، هستند. رابطه (۲۷) محدوده مقادیر مجاز برای متغیر n_{pk} را نشان می‌دهد. برای محاسبه قابلیت اطمینان هر یک از تأمین‌کنندگان کارخانه‌ها) از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$R_k = \prod_{p=1}^s [1 - (1 - Rb_p(B))^{n_{pk}}] \quad \forall k \quad (28)$$

۲-۳-۳. مدل نهایی مسأله مکان‌یابی-موجودی-تخصیص افزونگی چندهدفه در زنجیره تأمین تک دوره‌ای با تقاضای غیرقطعی

با تلفیق مدل مکان‌یابی-موجودی با مدل ارائه شده در بخش تخصیص افزونگی و قابلیت اطمینان در نهایت به مدل کلی زیر برای مسأله پیشنهادی می‌رسیم:

لازم به ذکر است که به علت اینکه توضیحات لازم درخصوص توابع هدف و محدودیت‌ها در بخش‌های قبلی، بیان شده است؛ بنابراین از ذکر مجدد آن‌ها در اینجا خودداری می‌شود.

$$\begin{aligned} \text{Min } TC &= \sum_{k=1}^l \sum_{p=1}^s c_p n_{pk} + \sum_{j=1}^m F_j \cdot Z_j \\ &+ \sum_{j=1}^m \sqrt{2H_j \cdot O_j \cdot \sum_{i=1}^n d_i \cdot X_{ij}} \\ &+ \sum_{j=1}^m Z_{1-\alpha} \cdot H_j \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^l v_i \cdot \frac{L_{jk}}{R_k} \cdot X_{ij} \cdot Y_{jk}} \quad (29) \\ &+ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l TR \cdot DIS_{jk} \cdot d_i \cdot X_{ij} \cdot Y_{jk} \\ &+ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m TR \cdot DIS_{ij} \cdot d_i \cdot X_{ij} \end{aligned}$$

معمول خود ادامه دهند. بنابراین مکان‌یابی قابل اطمینان مراکز توزیع می‌تواند باعث کاهش حجم خسارات حاصل از اختلالات به میزان قابل توجهی گردد. لازم به ذکر است، انتخاب مراکز توزیع با قابلیت اطمینان بالا مستلزم صرف هزینه‌های بالاتری می‌باشد، در نتیجه با توجه به اهداف متضاد در مسأله، بایستی بدنال بهترین جواب‌ها جهت دستیابی به یک شبکه مطمئن با هزینه‌های منطقی بود.

در این پژوهش با یک سیستم سری-موازی سروکار داریم که شامل تعداد s زیرسیستم به صورت سری و تعدادی اجزا به صورت موازی می‌باشد. شکل (۲) شمای کلی این سیستم را نشان می‌دهد. برای هر زیر سیستم p ، امکان انتخاب حداکثر $n_{max,p}$ جزء به صورت موازی وجود دارد. لازم به ذکر است استراتژی افزونگی در نظر گرفته شده در این تحقیق، استراتژی فعال است. سایر مفروضات به شرح زیر است:

- وضعیت اجزا و سیستم‌های مربوطه تنها به دو صورت می‌تواند باشد، سالم و یا خراب
- ویژگی‌های مربوط به اجزا (قابلیت اطمینان، هزینه و فضا) مشخص و قطعی هستند.
- اجزا تعمیرناپذیر بوده و خرابی آن‌ها مستقل از یکدیگر می‌باشد.
- خراب شدن اجزا به سیستم آسیب نمی‌رساند.
- اجزای مربوط به یک زیرسیستم همگی از یک نوع می‌باشند.
- کلیه تأمین‌کنندگان دارای سیستم تولیدی مشابه و با ماشین‌های تولیدی یکسان هستند.

فرض می‌شود که شبکه زنجیره تأمین دارای یک انبار جهت نگهداری ماشین‌های افزونه به تعداد محدود باشد و با توجه به میزان تقاضا و نیاز هر تأمین‌کننده، تعدادی از ماشین‌های افزونه به منظور بالا بردن قابلیت اطمینان و سطح پاسخگویی به تقاضای مشتریان به آن تأمین‌کننده ارسال گردد. با توجه به اینکه یکبار و در ابتدا ماشین‌آلات افزونه خریداری می‌شوند، هزینه خرید آن‌ها در نظر گرفته نمی‌شود و لذا هزینه‌های حمل‌ونقل از انبار ماشین‌آلات افزونه به سمت تأمین‌کنندگان و همچنین نصب و راه‌اندازی آن‌ها به عنوان هزینه‌های تخصیص افزونگی منظور می‌گردد.

در ادامه مدل مسأله قابلیت اطمینان و تخصیص افزونگی ارائه می‌شود. یادآوری می‌گردد که بهبود قابلیت اطمینان تسهیلات، در مراکز تولیدی با استفاده از استراتژی تخصیص افزونگی و در مراکز توزیع با انتخاب تسهیلات با قابلیت اطمینان مناسب انجام می‌شود.

$$\text{Max TRL} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{l} \sum_{k=1}^l R_k + \frac{1}{\sum_{j=1}^m Z_j} \sum_{k=1}^l R_j \cdot Z_j \right] \quad (33)$$

$$\text{Min C} = \sum_{k=1}^l \sum_{p=1}^s c_p n_{pk} \quad (34)$$

S.t.

$$\sum_{p=1}^s w_p n_{pk} \leq TW_k \quad \forall k = 1, \dots, l \quad (35)$$

مسائل NP-Hard می‌باشند؛ لذا در این تحقیق، جهت حل مدل ارائه شده در بخش دوم، از یک الگوریتم فراابتکاری چند هدفه مبتنی بر تبرید شبیه‌سازی شده تحت عنوان AMOSA¹ استفاده خواهد شد. در بخش چهارم، به منظور ارزیابی صحت عملکرد الگوریتم، نتایج حاصل از آن با نتایج حاصل از روش شمارش کامل، در تعدادی مسائل با ابعاد کوچک و متوسط مقایسه شده است. در ادامه به معرفی الگوریتم مذکور می‌پردازیم.

با بزرگتر شدن مسائل دنیای امروزی و همچنین پیچیدگی ذاتی بعضی از مسائل، دیگر استفاده از روش‌های حل کلاسیک چندان مناسب به نظر نمی‌رسد. یکی از این الگوریتم‌های بسیار کارا و پرکاربرد در حل مسائل پیچیده مختلف، الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده (SA) است. این الگوریتم اولین بار در سال ۱۹۸۳ توسط کرکپاتریچ و همکاران [۵۰] و با الهام از آنچه که در فرآیند ذوب و انجماد فلزات در ابعاد مولکولی اتفاق می‌افتد پیشنهاد گردید. تاکنون توسعه‌های زیادی روی روش SA داده شده است که یکی از مهمترین آن‌ها روش تبرید شبیه‌سازی چندهدفه آرشیو (AMOSA) است که در سال ۲۰۰۸ توسط باندیوپادیا و همکاران ارائه گردید [۵۱].

الگوریتم AMOSA نسخه چندهدفه الگوریتم SA است. این الگوریتم از یک مجموعه آرشیو برای ذخیره جواب‌های نامغلوب استفاده می‌کند. اندازه آرشیو محدود بوده و تعداد جواب‌های پارتویی از قبل تعیین شده است. مجموعه آرشیو دو نوع محدودیت دارد: (۱) محدودیت سخت با پارامتر HL و (۲) محدودیت نرم با پارامتر SL. جواب‌های نامغلوب در آرشیو ذخیره شده و تعداد جواب‌های ذخیره شده تا تعداد SL می‌تواند افزایش یابد. با افزایش جواب‌های ذخیره شده بیشتر از این مقدار، با استفاده از یک تکنیک خوشه‌بندی تعداد جواب‌های ذخیره شده به تعداد HL کاهش می‌یابد. پارامترهای الگوریتم AMOSA به شرح زیر است:

HL : حداکثر اندازه آرشیو در خاتمه الگوریتم

SL : حداکثر اندازه آرشیو تا قبل از خوشه‌بندی

Tmax : دمای اولیه

Tmin : دمای نهایی

Iter : تعداد تکرارها در هر دما

α : نرخ کاهش دما

۳-۱. مقدار دهی اولیه

الگوریتم با ایجاد مجموعه‌ای از جواب‌ها به تعداد $\beta \times SL$ ($\beta > 1$) شروع می‌شود. سپس از یک تابع برازندگی برای ارزیابی جواب‌های اولیه استفاده می‌شود. البته این تابع برازندگی در کل مراحل الگوریتم بکار گرفته می‌شود. این تابع برازندگی شامل دو بخش است: بخش اول مربوط به تابع هدف زنجیره تأمین و بخش دوم مربوط به قابلیت اطمینان آن. با ارزیابی جواب‌های اولیه، به مقایسه آن‌ها با همدیگر

$$\text{Max TRL} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{l} \sum_{k=1}^l R_k + \frac{1}{\sum_{j=1}^m Z_j} \sum_{k=1}^l R_j \cdot Z_j \right] \quad (30)$$

S.t.

$$\sum_{j=1}^m X_{ij} = 1 \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (31)$$

$$\sum_{k=1}^l Y_{jk} \leq Z_j \quad \forall j = 1, \dots, m \quad (32)$$

$$\sum_{i=1}^n d_i \cdot X_{ij} \leq \text{Cap}_j \cdot Z_j \quad \forall j = 1, \dots, m \quad (33)$$

$$\sum_{p=1}^s w_p n_{pk} \leq TW_k \quad \forall k = 1, \dots, l \quad (34)$$

$$\sum_{k=1}^l n_{pk} \leq n_{\text{max}_p} \quad \forall p = 1, \dots, s \quad (35)$$

$$n_{pk} \in 1, 2, \dots, n_{\text{max}_p} \quad (36)$$

$$X_{ij}, Y_{jk}, Z_j \in \{0, 1\} \quad (37)$$

۲. روش حل

همانطور که در مقدمه ذکر گردید، مسائل مکان‌یابی-موجودی که توسعه یافته مسائل CFLP هستند از دسته مسائل NP-Hard به شمار می‌آیند. از طرف دیگر، مسأله تخصیص افزونگی نیز یک مسأله بهینه‌سازی NP-Hard است. بنابراین با یک مسأله پیچیده سروکار داریم به طوری که هر چقدر ابعاد این مسائل بزرگ‌تر می‌شود حل آن‌ها نیز، بدلیل افزایش نمایی زمان حل، سخت‌تر می‌شود. بررسی مرور ادبیات این دو حوزه و گستردگی روش‌های تقریبی و ابتکاری مختلف برای حل این نوع مسائل، مبین این موضوع است.

از سویی دیگر، در حل مسائل چندهدفه، تکنیک‌های متعددی وجود دارد که در دو گروه روش‌های عددی و روش‌های پارتویی دسته‌بندی می‌شوند. روش‌های عددی مسائل چندهدفه را با استفاده از تبدیلات ریاضی به مسائل تک‌هدفه تبدیل می‌کنند. این امر به دلیل فقدان تکنیک‌های حل مناسب و کارا در گذشته صورت می‌گرفت. روش‌های پارتو از مفهوم مجموعه‌های غالب استفاده می‌کنند. در واقع یک جواب بر دیگری غالب است اگر در هیچ یک از اهداف از جواب دیگر بدتر نباشد و حداقل در یکی از اهداف از آن بهتر باشد. اغلب روش‌های بهینه‌یابی چندهدفه، از مفهوم غلبه برای یافتن جواب‌های پارتویی استفاده می‌کنند. در اینجا با یک مسأله چندهدفه با اهداف در تضاد با هم روبرو هستیم. برای حل اینگونه مسائل از روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه استفاده می‌شود.

با توجه به چند هدفه بودن این پژوهش و همچنین با عنایت به اینکه، یکپارچه در نظر گرفتن مسائل موجودی، مکان‌یابی و تخصیص افزونگی، پیچیدگی مسأله را دوچندان می‌کند و این مسائل جزء

توسط $k+1$ جواب (جواب فعلی به علاوه k جواب از آرشیو) است، از طریق رابطه (۴۰) بدست آید:

$$\Delta dom_{avg} = \frac{(\sum_{i=1}^k \Delta dom_{i,new-pt}) + \Delta dom_{current-pt,new-pt}}{k+1} \quad (40)$$

حالت دوم:

اگر جواب فعلی و جواب جدید نسبت به همدیگر نامغلوب باشند، حالت دوم انجام می‌گیرد. در این حالت، سه وضعیت امکان‌پذیر است: **وضعیت ۱:** در این حالت، تعداد k جواب از جواب‌های آرشیو ($k \geq 1$) می‌توانند جواب جدید را مغلوب کنند. بنابراین با محاسبه مقدار احتمال رابطه (۳۹) جواب جدید با جواب فعلی جایگزین می‌شود در صورتیکه مقدار Δdom_{avg} از طریق رابطه (۴۱) محاسبه می‌گردد:

$$\Delta dom_{avg} = \frac{(\sum_{i=1}^k \Delta dom_{i,new-pt})}{k} \quad (41)$$

وضعیت ۲: در این حالت، جواب جدید و تمام جواب‌های موجود در آرشیو، جواب‌های نامغلوب هستند. در این شرایط، جواب جدید با جواب فعلی جایگزین شده و به آرشیو اضافه می‌شود. در صورتیکه تعداد جواب‌های نامغلوب از مقدار SL فراتر برود، خوشه‌بندی جواب‌های آرشیو انجام شده تا تعداد جواب‌ها به مقدار HL کاهش یابد.

وضعیت ۳: در این حالت، جواب جدید k جواب ($k \geq 1$) از جواب‌های آرشیو را مغلوب سازد. در این شرایط جواب جدید با جواب فعلی جایگزین شده و به آرشیو اضافه می‌شود. همچنین جواب‌های مغلوب شده توسط جواب جدید، از آرشیو حذف می‌شوند.

حالت سوم:

جواب جدید جواب فعلی را مغلوب سازد. در این حالت، با توجه به وضعیت غلبه جواب جدید و جواب‌های آرشیو، سه وضعیت زیر اتفاق می‌افتد:

وضعیت ۱: در این حالت، k جواب ($k \geq 1$) از جواب‌های آرشیو جواب جدید را مغلوب سازند. در این شرایط کمترین فاصله مقادیر غلبه بین جواب k و $new-pt$ جواب آرشیو به عنوان Δdom_{min} محاسبه می‌شود. جواب متناظر با کمترین فاصله با جواب $new-pt$ با مقدار احتمال رابطه (۴۲) به عنوان جواب فعلی در نظر گرفته می‌شود. در غیر این صورت جواب $new-pt$ به عنوان جواب فعلی در نظر گرفته می‌شود.

$$prob = \frac{1}{1 + \exp(-\Delta dom_{min})} \quad (42)$$

وضعیت ۲: در این حالت، جواب جدید و تمام جواب‌های موجود در آرشیو، جواب‌های نامغلوب هستند. در این شرایط، جواب جدید با جواب فعلی جایگزین شده و به آرشیو اضافه می‌شود. اگر جواب فعلی در آرشیو موجود باشد بایستی حذف گردد. در صورتیکه تعداد جواب‌های نامغلوب از مقدار SL فراتر برود، خوشه‌بندی جواب‌های آرشیو انجام شده تا تعداد جواب‌ها به مقدار HL کاهش یابد.

وضعیت ۳: در این حالت، جواب جدید، k جواب ($k \geq 1$) از جواب‌های آرشیو را مغلوب سازد. در این شرایط جواب جدید با جواب فعلی

می‌پردازیم. جواب‌های مغلوب از مجموعه جواب‌ها حذف شده و جواب‌های نامغلوب تا حداکثر مقدار HL حفظ می‌شوند. در صورتی که تعداد جواب‌های نامغلوب بیشتر از مقدار HL باشد، از تابع خوشه‌بندی جهت کاهش اندازه آرشیو تا مقدار HL استفاده می‌کنیم. نحوه خوشه‌بندی جواب‌ها در بخش بعدی ذکر شده است.

۲-۲. خوشه‌بندی جواب‌های آرشیو

خوشه‌بندی جواب‌های آرشیو در الگوریتم AMOSA با هدف ایجاد تنوع بیشتر در بین جواب‌های نامغلوب صورت می‌پذیرد. در حالت کلی تعداد جواب‌های آرشیو می‌تواند تا مقدار SL افزایش یابد. بعد این که تعداد جواب‌های آرشیو به این مقدار رسید، جواب‌های آرشیو در HL گروه خوشه‌بندی می‌شوند. در خوشه‌بندی آرشیو از الگوریتم شناخته شده Single Linkage Clustering از جمله روش‌های خوشه‌بندی سلسله مراتبی استفاده شده است. در اینجا فاصله بین هر دو خوشه برابر با کمترین فاصله بین اعضای دو خوشه است. بعد از اینکه تعداد HL خوشه به دست آمد، عضوی از هر خوشه که کمترین میانگین فاصله را با سایر اعضای آن خوشه دارد به عنوان نماینده آن خوشه انتخاب می‌شود. در نهایت اعضای نماینده مربوط به HL خوشه در آرشیو ذخیره می‌شوند.

۳-۳. مقدار غلبه

در این الگوریتم از مفهوم مقدار غلبه در محاسبه احتمال پذیرش یک جواب جدید استفاده می‌شود. برای دو جواب a و b مقدار غلبه از طریق رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\Delta dom_{a,b} = \prod_{i=1, f_i(a) \neq f_i(b)}^M \frac{|f_i(a) - f_i(b)|}{R_i} \quad (38)$$

که در آن M تعداد توابع هدف، f_i تابع هدف نوع i و R_i دامنه مربوط به هدف i ام است. در صورتیکه دامنه توابع هدف مشخص نباشد، از مقادیر مربوط به توابع هدف جواب‌های موجود در آرشیو، به منظور محاسبه دامنه هر هدف استفاده خواهد شد.

۴-۳. فرآیند اصلی الگوریتم

یکی از جواب‌های مجموعه آرشیو به تصادف به عنوان جواب فعلی (Current-pt) انتخاب می‌شود. با استفاده از ساختار همسایگی، یک جواب جدید (new-pt) تولید می‌شود. وضعیت غلبه بین جواب جدید با جواب فعلی و جواب‌های مجموعه آرشیو بررسی می‌شود. بر همین اساس سه حالت ممکن امکان‌پذیر است:

حالت اول:

در این حالت، جواب فعلی، جواب بدست آمده با استفاده از ساختار همسایگی را مغلوب می‌سازد. همچنین تعداد k جواب آرشیو ($k \geq 0$) نیز جواب (new-pt) را مغلوب می‌سازند. در نتیجه جواب جدید با احتمال برابر با احتمال زیر با جواب فعلی جایگزین می‌شود.

$$prob = \frac{1}{1 + \exp(\Delta dom_{avg,temp})} \quad (39)$$

در رابطه بالا، مقدار $temp$ برابر با دمای فعلی تکرار مربوطه است. همچنین مقدار Δdom_{avg} که بیانگر میانگین مقدار غلبه (new-pt)

اول که اطلاعات آن در بخش ۵-۲ ذکر شده است، تنظیم شده‌اند. در جدول (۱) مقادیر پیشنهادی برای هر یک از پارامترهای الگوریتم AMOSA بیان شده است.

جدول (۱): مقادیر پیشنهادی برای پارامترهای الگوریتم AMOSA

پارامتر	مقادیر پیشنهادی		
HL	۳۵	۴۰	۴۵
SL	۵۰	۵۵	۶۰
Tmax	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰
Tmin	۱	۵	۱۰
Iter	۵۰۰	۷۵۰	۱۰۰۰
α	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۹۸

در جدول (۱) مقدار هر پارامتر با ثابت نگه‌داشتن سایر پارامترها در کمترین مقدار خود، بر اساس تعداد نقاط نامغلوب شناسایی شده و همچنین مدت زمان اجراء، در تعداد مشخصی تکرار، مورد سنجش و بررسی قرار گرفته و در نهایت پارامترهای الگوریتم بر اساس بهترین نتایج حاصله، بر اساس جدول (۲) در نظر گرفته شدند.

جدول (۲): پارامترهای الگوریتم برای حل مثال اول

HL	SL	Tmax	Tmin	Iter	α
۴۰	۶۰	۱۰۰	۱	۱۰۰۰	۰/۹۹۸

۴-۲. اعتبار سنجی الگوریتم AMOSA

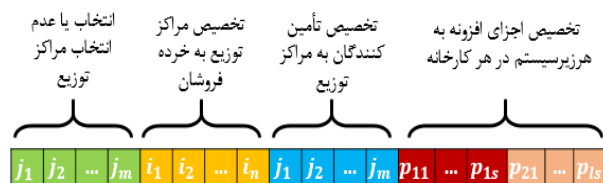
ارزیابی کارایی الگوریتم و بررسی صحت جواب‌های بدست آمده به چند طریق امکان پذیر است. یک راه، مقایسه جواب‌های بدست آمده از الگوریتم، با بهترین جواب‌های کسب شده توسط سایر پژوهشگران است، که به دلیل جدید بودن مدل ارائه شده و عدم وجود مثال‌های معیار برای این مسأله، امکان انجام این مقایسه وجود ندارد. یک راه دیگر مقایسه نتایج با نتایج حاصل از حل دقیق مسأله است. با توجه به اینکه توابع هدف در برگزیده عبارت‌های غیر خطی هستند، در نتیجه حل آن‌ها با استفاده از روش‌های دقیق و همچنین نرم افزارهای بهینه‌سازی موجود مانند GAMS، حتی با وجود ساده سازی برخی از عبارات، امکان‌پذیر نبود. به همین دلیل تصمیم گرفته شد با استفاده از روش شمارش کامل، تمامی فضای شدنی جواب مسأله مورد بررسی قرار گیرد و بدین طریق با بررسی تمامی حالت‌های ممکن، مجموعه نقاط نامغلوب یا پارتویی شناسایی گردند. جواب‌های بدست آمده از این طریق، جواب‌های دقیق مسأله هستند. از طرفی با توجه به سطح پیچیدگی مسأله و NP-hard بودن آن، که در آن با افزایش ابعاد مسأله، زمان‌های حل به صورت نمایی افزایش می‌یابد؛ روش شمارش کامل نیز برای مسائل با ابعاد بزرگ، قابل استفاده نخواهد بود. که موضوع افزایش زمان حل در مثال‌های حل شده کاملاً مشهود است. به همین منظور، برای ارزیابی کارایی الگوریتم AMOSA، نتایج حاصل از آن با نتایج حاصل از روش شمارش کامل برای چندین مثال با ابعاد کوچک، مقایسه شد. در واقع با این

جایگزین شده و به آرشو اضافه می‌شود. همچنین جواب‌های مغلوب شده توسط جواب جدید، از آرشو حذف می‌شوند.

فرآیند بالا به تعداد $iter$ مرتبه برای هر دما تکرار می‌شود. دما با استفاده شاخص خنک سازی α در هر بار به مقدار $temp \times \alpha$ کاهش می‌یابد تا زمانیکه دما به کمترین مقدار خود یعنی $Tmin$ برسد. در نهایت این فرآیند پایان یافته و آرشو دربرگیرنده جواب‌های نامغلوب نهایی خواهد بود.

۳-۵. نحوه نمایش جواب‌ها

نمایش جواب‌ها بوسیله یک ماتریس یک بعدی بیان می‌گردد. با فرض اینکه تعداد n خرده‌فروش، m توزیع کننده، l تأمین کننده و s ماشین در هر کارخانه داشته باشیم، ساختار نمایش جواب مطابق با شکل (۴) می‌باشد. در m خانه اول وضعیت باز یا بسته بودن مراکز توزیع مشخص می‌شود. در n خانه بعدی وضعیت تخصیص مراکز توزیع به هر خرده فروش تعیین می‌گردد. m خانه بعدی بیان کننده وضعیت تخصیص تأمین کنندگان به مراکز توزیع است. در $l*s$ خانه بعدی وضعیت تخصیص اجزای افزونه به هر کدام از زیرسیستم‌ها و در هر کارخانه بیان می‌شود.



شکل (۴): ساختار نمایش جواب

۴. نتایج محاسباتی

در این بخش، ابتدا به تنظیم پارامترهای الگوریتم پرداخته و سپس با اعتبار سنجی الگوریتم به ارائه نتایج حل می‌پردازیم.

۴-۱. تنظیم پارامترهای الگوریتم

الگوریتم‌های فراابتکاری نسبت به پارامترهای خود بسیار حساس بوده و تغییر پارامترها می‌تواند بر عملکرد آن‌ها تأثیر قابل ملاحظه‌ای داشته باشد. بنابراین تنظیم پارامترها باید با دقت انجام شود تا عملکرد الگوریتم به طور چشم‌گیری بهبود یابد. برای هر الگوریتم فراابتکاری تعدادی از پارامترها باید تنظیم شوند. تنظیم پارامترها موجب انعطاف‌پذیری و قابل اعتماد بودن بیشتر الگوریتم می‌گردد، این پارامترها تأثیر بسزایی بر کارایی و اثربخشی جستجو دارند و مقدار بهینه آن‌ها اساساً برای مسائل مختلف می‌تواند متفاوت باشد.

الگوریتم پیشنهادی در این پژوهش با استفاده از زبان برنامه‌نویسی C# کد شده و در سیستم رایانه با مشخصات پردازشگر Core i7 2.93 GHZ و حافظه جانبی 6GB اجرا شده‌اند. با توجه به حساسیت الگوریتم‌های فراابتکاری نسبت به پارامترهای خود و تأثیر تغییر پارامترها بر کارایی و اثربخشی جستجو، پارامترهای الگوریتم بر اساس زمان اجرا و همچنین کیفیت جواب‌های پیدا شده، برای مثال

$$SM = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2} \quad (44)$$

$d_i = \min_{j \in NDS, j \neq i} \sum_{k=1}^m \left| \frac{f_{ki} - f_{kj}}{f_k^{Max} - f_k^{Min}} \right|$

که در آن، n تعداد جواب‌های نامغلوب، \bar{d} ، مقدار میانگین تمام d_i ها، NDS مجموعه جواب‌های نامغلوب و مقدار k امین تابع هدف برای جواب نامغلوب i است. f_k^{Max} و f_k^{Min} نیز به ترتیب مقادیر بیشینه و کمینه تابع هدف k هستند. لازم به ذکر است، با توجه به اینکه محدوده توابع هدف با همدیگر متفاوت است، مقادیر آن‌ها باید نرمالیزه شوند.

شاخص بیشترین گسترش $(MS)^4$: این شاخص فاصله اقلیدسی بین جواب‌های ابتدایی و انتهایی مجموعه پارتو را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، این شاخص طول قطر مکعب فضایی را که به وسیله مقادیر انتهایی اهداف برای مجموعه پاسخ‌های نامغلوب بکار می‌رود را اندازه می‌گیرد. مقادیر بزرگتر این معیار، بیانگر پخش بودن بهتر جواب‌ها و کارایی بالاتر الگوریتم است.

$$MS = \sqrt{\sum_{k=1}^m \left(\max_{i \in NDS} f_{ki} - \min_{i \in NDS} f_{ki} \right)^2} \quad (45)$$

که در آن NDS مجموعه جواب‌های نامغلوب و مقدار k امین تابع هدف برای جواب نامغلوب i است. شاخص زمان اجرای الگوریتم: این شاخص بیانگر زمان اجرای الگوریتم تا یافتن جواب‌های نامغلوب و نزدیک به بهینه است. شاخص زمان اجرای الگوریتم اهمیت بسزایی در مقایسه الگوریتم‌های مختلف دارد. هرچقدر مقدار این شاخص کمتر باشد (در صورت برابری سایر شاخص‌ها)، الگوریتم موردنظر از کارایی بالاتری برخوردار است.

۳-۴. نتایج محاسباتی

به منظور حصول اطمینان از اینکه نتایج حاصل از مدل کاملاً به سمت جبهه پارتویی واقعی مسأله نیل می‌کند و پاسخ‌ها از پراکندگی لازم برخوردار می‌باشند، سه مثال در ابعاد نسبتاً کوچک - که اطلاعات آن‌ها در جدول (۳) تا جدول (۸) ارائه شده است - تولید شده و با جستجوی تمام فضای ممکن با استفاده از روش شمارش کامل در این مسائل، جبهه واقعی آن‌ها شناسایی می‌شود. در ادامه با استفاده از شاخص‌های مقایسه الگوریتم‌های چند هدفه ذکر شده در قسمت قبل، به بررسی نتایج حاصل از اجرای الگوریتم و همچنین سنجش میزان کارایی آن در یافتن جواب‌های مناسب می‌پردازیم.

لازم به ذکر است که در مثال‌های ارائه شده هزینه حمل کالا مابین تأمین کنندگان، مراکز توزیع و خرده‌فروشان، به ازای هر واحد محصول در واحد مسافت، ۵ واحد پولی در نظر گرفته شده است. همچنین سطح خدمت‌دهی در همه مثال‌ها برابر با ۹۵ درصد

کار، نتایج الگوریتم AMOSA با جواب‌های دقیق بدست آمده، مورد سنجش قرار گرفتند. که نتایج، حاکی از کارایی نسبتاً بالای الگوریتم در دستیابی به جواب‌های بهینه پارتویی است.

از طرف دیگر، برای ارزیابی دقیق‌تر الگوریتم فراابتکاری ارائه شده از چندین شاخص که برای مقایسه الگوریتم‌های چندهدفه بکار می‌روند، استفاده می‌شود. این شاخص‌ها عمدتاً به دو دسته تقسیم می‌شوند که دسته اول بر همگرایی و کیفیت جواب‌ها تأکید دارند و دسته دوم پراکندگی و گسترش جواب‌ها را در فضای حل مورد توجه قرار می‌دهند. در ادامه به اختصار به توصیف این شاخص‌ها می‌پردازیم:

شاخص تعداد جواب‌های پارتو $(NPS)^1$: مقدار معیار NOS نشان‌دهنده تعداد جواب‌های بهینه پارتو هستند، که در هر الگوریتم می‌توان یافت.

شاخص میانگین فاصله از جواب ایده‌آل $(MID)^2$: این شاخص بیانگر میانگین فاصله نقاط پارتو از جواب ایده‌آل است. در واقع میانگین فاصله اقلیدسی پاسخ‌ها را از نقطه‌ی ایده‌آل محاسبه می‌کند. مقدار ایده‌آل برابر با بهترین مقدار ممکن برای هر یک از توابع هدف است. مشخص است که هر چقدر این معیار کمتر باشد، کارایی الگوریتم بیشتر خواهد بود. این معیار از طریق رابطه (۴۳) زیر محاسبه می‌شود که در آن n بیانگر تعداد جواب‌های نامغلوب، f_{ki} مقدار k امین تابع هدف در جواب i ام، f_k^* مقدار ایده‌آل تابع هدف k ام، f_k^{Max} و f_k^{Min} نیز به ترتیب بیانگر مقدار بیشینه و کمینه مربوط به تابع هدف k ام است. لازم به ذکر است که با توجه به تفاوت در محدوده توابع هدف، نرمالیزه کردن این شاخص ضروری است.

$$MID = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{n} \quad , d_i = \sqrt{\sum_{k=1}^m \left(\frac{f_{ki} - f_k^*}{f_k^{Max} - f_k^{Min}} \right)^2} \quad (43)$$

شاخص فاصله $(SM)^3$: این شاخص پراکندگی مجموعه نقاط نامغلوب را در فضای حل اندازه‌گیری می‌کند. به عبارتی، این شاخص، میزان فاصله‌ی نسبی جواب‌های نامغلوب متوالی را محاسبه می‌کند. هرچقدر مقدار این شاخص بیشتر باشد، کارایی الگوریتم بالاتر است. این شاخص از طریق رابطه (۴۴) محاسبه می‌گردد.

1. Number of Pareto Solution

2. Mean Ideal Distance

3. Spacing Metric

می‌باشد.

۷	-	-	۳۵	۱۳	۴۰	۱۲
۸	-	-	-	-	۳۸	۹

جدول (۳): پارامترهای الگوریتم برای حل مثال اول

تعداد ماشین‌آلات در هر کارخانه	تعداد تامین کنندگان	تعداد مراکز توزیع	تعداد خرده فروشان	تعداد ماشین‌آلات		
				مثال اول	مثال دوم	مثال سوم
۳	۲	۴	۶	۶	۶	۶
۳	۳	۵	۷	۷	۷	۷
۴	۳	۶	۸	۸	۸	۸

جدول (۴): پارامترهای الگوریتم برای حل مثال اول

مثال سوم	مثال دوم	مثال اول		خرده فروشان	مثال سوم	
		واریانسی میانگین	واریانسی میانگین		واریانسی میانگین	واریانسی میانگین
۵	۴۴	۱۱	۴۳	۱۳	۳۰	۱
۱۵	۴۸	۷	۲۶	۳	۵۰	۲
۱۰	۲۳	۸	۴۷	۱۱	۳۰	۳
۸	۳۷	۹	۲۱	۷	۲۰	۴
۱۴	۴۹	۸	۳۱	۵	۲۵	۵
۷	۳۹	۵	۳۷	۱۰	۴۰	۶

در جدول (۹) تعدادی از جواب‌های نامغلوب مثال اول بر اساس نوع نمایش گفته شده در بخش ۳-۵، برای نمونه، بیان شده است. همچنین در شکل (۴) نحوه پراکندگی نقاط پارتو در فضای جواب (جبهه پارتویی) برای مثال اول نشان داده شده است. نتایج حاصل از حل سه مثال ارائه شده با استفاده از روش‌های جستجوی کامل فضای جواب و الگوریتم AMOSA و همچنین مقایسه این دو روش، از طریق شاخص‌های ارائه شده در بخش ۴-۲، در جدول (۱۰) نمایش داده شده است.

همانطور که از نتایج حاصل از حل مسائل در جدول (۱۰) پیداست با افزایش ابعاد مسئله فضای شدنی مسئله به مراتب وسیع‌تر شده و زمان‌های حل به صورت نمایی افزایش می‌یابد. به نحوی که در مثال اول با ۲ کارخانه، ۴ مرکز توزیع و ۶ خرده فروش و با در نظر گرفتن ۳ ماشین در هر کارخانه، کل فضای شدنی در مدت زمان ۳۶۹ ثانیه بررسی شد و نقاط بهینه نامغلوب شناسایی گردید.

جدول (۵): اطلاعات مربوط به مراکز توزیع

مرکز توزیع	مثال اول				مثال دوم				مثال سوم				قابلیت اطمینان		
	هزینه	هزینه	هزینه	ظرفیت	هزینه	هزینه	هزینه	ظرفیت	هزینه	هزینه	هزینه	ظرفیت			
۱	۲۲۰۰۰	۱۵۳۴	۱۲	۶۵	۹۰	۱۲۳۰۰	۱۹۹۸	۷	۷۵	۸۲	۱۸۹۶۰	۱۹۶۳	۱۲	۹۰	۷۹
۲	۱۸۲۴۰	۱۳۲۱	۱۱	۱۰۰	۸۱	۱۶۳۸۰	۱۳۷۵	۸	۹۰	۹۱	۲۱۶۰۰	۱۴۲۰	۱۳	۶۵	۷۲
۳	۱۲۹۶۰	۱۴۱۲	۹	۸۰	۷۵	۱۱۱۸۰	۱۶۶۰	۱۲	۶۵	۸۶	۲۲۴۱۰	۱۶۴۰	۱۴	۵۰	۸۳
۴	۱۶۵۳۰	۱۷۲۰	۸	۷۵	۸۷	۱۵۶۴۰	۱۳۴۰	۵	۱۱۵	۶۸	۱۵۱۲۰	۱۲۲۳	۷	۷۰	۸۴
۵	-	-	-	-	-	۷۵۰۰	۱۵۹۹	۱۰	۵۰	۷۵	۹۶۰۰	۱۹۱۷	۱۰	۷۵	۶۴
۶	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۲۰۶۸۰	۱۷۳۹	۹	۶۵	۹۴

جدول (۶): اطلاعات مربوط به اجزای افزونه

اجزای افزونه	مثال اول				مثال دوم				مثال سوم				
	فضای موردنیاز	هزینه نصب	حداکثر فضای هر جزء	حداکثر فضای هر جزء	فضای موردنیاز	هزینه نصب	حداکثر فضای هر جزء	حداکثر فضای هر جزء	فضای موردنیاز	هزینه نصب	حداکثر فضای هر جزء	حداکثر فضای هر جزء	
۱	۵	۱۹۳۷	۳	۰.۰۰۸۱۸	۲	۱۸۹۷	۳	۰.۰۱۷۳	۲	۲۸۰۸	۴	۰.۰۰۵۹۱	
۲	۵	۱۵۷۶	۸	۰.۰۱۳۳	۳	۲۹۰۵	۵	۰.۰۰۳۳	۱	۱۵۸۰	۶	۰.۰۰۸۸۲	
۳	۵	۲۴۸۹	۵	۰.۰۰۷۴۱	۳	۲۴۵۴	۴	۰.۰۰۲۳	۳	۱۷۱۱	۳	۰.۰۱۹۹۶	
۴	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۷	۲۰۱۵	۷	۰.۰۰۲۲۵

جدول (۷): اطلاعات مربوط به حداکثر فضای در دسترس کارخانه‌ها و زمان انتظار تحویل (LeadTime)

مرکز توزیع	مثال اول				مثال دوم					مثال سوم					
	فضای موجود	فضای موجود	فضای موجود	فضای موجود	فضای موجود	فضای موجود	فضای موجود	فضای موجود	فضای موجود	فضای موجود	فضای موجود	فضای موجود	فضای موجود	فضای موجود	فضای موجود
کارخانه	۱	۲	۳	۴	۱	۲	۳	۴	۵	۱	۲	۳	۴	۵	۶

۱	۳۵	۱۵	۱۱	۱۴	۱۲	۲۰	۱۸	۱۴	۱۷	۱۰	۱۵	۳۴	۱۶	۱۷	۱۹	۱۶	۱۶	۱۴
۲	۴۷	۱۶	۱۸	۱۱	۲۰	۲۵	۱۷	۱۳	۱۶	۱۹	۱۳	۳۲	۱۴	۲۰	۱۹	۱۳	۱۸	۱۳
۳	-	-	-	-	-	۲۲	۲۰	۱۱	۱۲	۱۱	۱۹	۲۸	۱۷	۱۶	۱۹	۱۳	۱۶	۱۲

جدول (۸): اطلاعات مربوط به مختصات تأمین‌کنندگان، مراکز توزیع و خرده‌فروشان

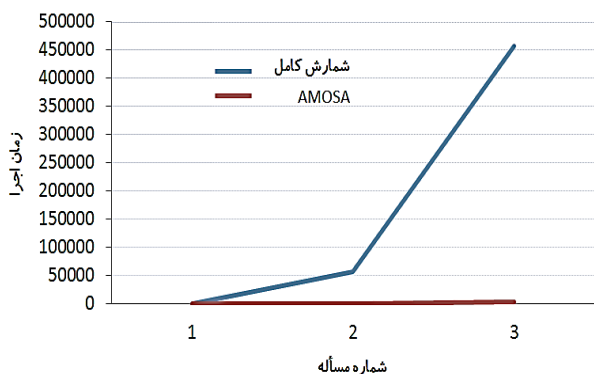
ردیف	مثال اول						مثال دوم						مثال سوم					
	تأمین‌کننده		مرکز توزیع		خرده‌فروش		تأمین‌کننده		مرکز توزیع		خرده‌فروش		تأمین‌کننده		مرکز توزیع		خرده‌فروش	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
۱	۲۹	۱۸	۱۱	۲۹	۲۸	۵۹	۷۸	۲	۶۱	۶۷	۱۹	۸۹	۷۵	۶۷	۳	۴۲	۵۶	۲۹
۲	۹۳	۸۰	۲۶	۵۱	۹۴	۶۳	۹۹	۷	۷	۳۲	۸۴	۵	۱۴	۷۴	۷۷	۹۱	۳۶	۵۱
۳	-	-	۶۷	۱۴	۶۷	۶۷	۳۳	۹۶	۰	۵۴	۸۷	۹۱	۹۱	۵۸	۱۰	۳۵	۷۱	۷۸
۴	-	-	۴۶	۵۲	۲۳	۴۲	-	-	۸۹	۸۵	۲۵	۴	-	-	۹	۲۰	۸۲	۷
۵	-	-	-	-	۴۲	۵۸	-	-	۲۷	۲۴	۳۰	۴۷	-	-	۱۱	۷۲	۵۰	۹۴
۶	-	-	-	-	۸۱	۳۳	-	-	-	-	۹۷	۲۰	-	-	۵۲	۶۲	۳۷	۹
۷	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۳۷	۵۶	-	-	-	-	۸۹	۲۵
۸	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۴۳	۹۲

جدول (۹): تعدادی از جواب‌های نامغلوب مثال اول

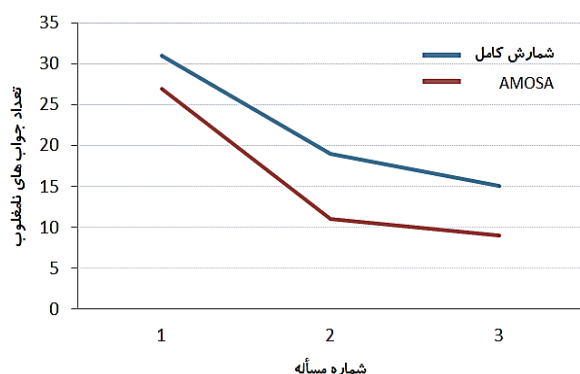
شماره جواب	هزینه	قابلیت اطمینان	شکل نمایش جواب																		
			تعیین باز یا بسته بودن مراکز توزیع			تخصیص مراکز توزیع به خرده‌فروشان			تخصیص تأمین‌کنندگان به مراکز توزیع			تعداد اجزای افزونه برای تأمین‌کننده ۱			تعداد اجزای افزونه برای تأمین‌کننده ۲						
			۱	۰	۱	۱	۴	۲	۱	۴	۲	۱	۰	۱	۱	۳	۲	۲	۲	۳	۱
۱	۱۸۹۹۰۹	۸۹/۵	۱	۰	۱	۱	۴	۲	۱	۴	۲	۱	۰	۱	۱	۳	۲	۲	۲	۳	۱
۲	۱۷۹۸۸۶	۸۸	۱	۰	۱	۱	۱	۴	۳	۱	۴	۳	۱	۰	۱	۳	۲	۲	۲	۲	۱
۳	۱۶۵۰۶۱	۸۵	۰	۱	۱	۱	۲	۴	۲	۲	۴	۲	۰	۱	۱	۳	۲	۱	۲	۳	۱
۴	۱۹۰۸۲۲	۹۰	۱	۱	۰	۱	۲	۴	۲	۱	۴	۲	۱	۱	۰	۳	۲	۲	۲	۲	۲
۵	۱۹۴۸۸۷	۹۰/۴	۱	۱	۰	۱	۲	۴	۲	۱	۴	۲	۱	۱	۰	۳	۲	۲	۲	۳	۳
۶	۱۸۱۴۶۲	۸۸/۵	۱	۰	۱	۱	۱	۴	۳	۱	۴	۳	۱	۰	۱	۳	۲	۲	۲	۳	۱
۷	۱۵۶۵۰۹	۷۳	۰	۱	۱	۱	۲	۴	۲	۲	۴	۳	۰	۱	۱	۲	۱	۱	۱	۱	۱
۸	۱۸۶۴۴۰	۸۹	۱	۰	۱	۱	۱	۴	۳	۱	۴	۳	۱	۰	۱	۳	۲	۲	۲	۳	۳
۹	۱۶۱۵۴۸	۸۱	۰	۱	۱	۱	۲	۴	۲	۲	۴	۳	۰	۱	۱	۳	۲	۱	۱	۲	۱
۱۰	۱۵۴۶۲۹	۶۸	۰	۱	۱	۱	۲	۴	۲	۲	۴	۳	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱

جدول (۱۰): نتایج حاصل از حل سه مسأله نمونه

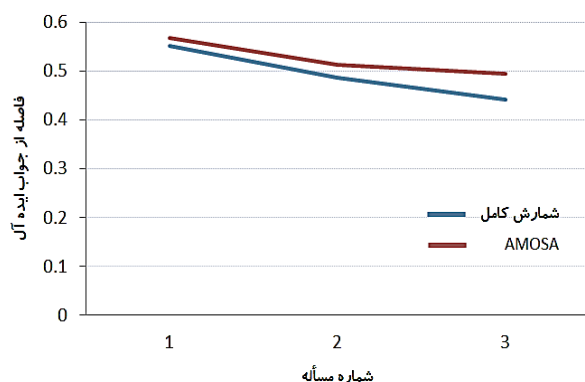
مسأله	روش حل	تعداد کل نقاط شدنی فضای جواب	زمان اجرا (ثانیه)	NPS	MID	SM	MS
۱	شمارش کامل	۱۰۹۵۰۴۰۰	۳۶۹	۳۱	۰.۵۵۱۲۷۳	۰.۰۳۵۸۰۱	۴۱۶۴۲
	AMOSA		۳۲۲	۲۷	۰.۵۶۸۱۴۵	۰.۰۳۴۲۰۴	۴۱۶۴۲
۲	شمارش کامل	۱۲۱۳۱۳۴۷۳۲	۵۷۷۲۱	۱۸	۰.۴۸۵۵۲۱	۰.۰۵۸۹۶۲	۵۴۲۳۵
	AMOSA		۶۶۵	۱۱	۰.۵۱۳۸۶۶	۰.۰۵۱۳۸۲	۵۲۲۳۳
۳	شمارش کامل	۲۴۵۶۷۵۴۶۷۹۲	۴۵۶۴۹۸	۱۵	۰.۴۴۱۱۲۹	۰.۰۶۲۹۸۹	۶۵۱۱۷
	AMOSA		۲۹۵۵	۹	۰.۴۹۴۷۷۶	۰.۰۵۷۶۳۶	۶۲۹۹۷



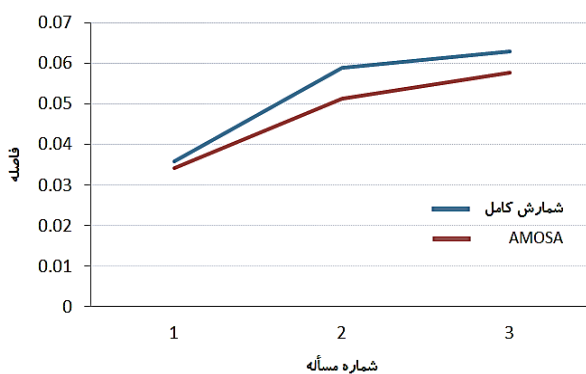
شکل (۶): مقایسه زمان اجرا در روش‌های شمارش کامل و AMOSA



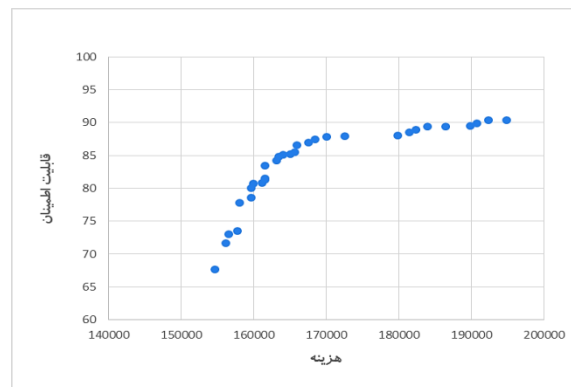
شکل (۷): مقایسه تعداد جواب‌های نامغلوب در روش‌های شمارش کامل و AMOSA



شکل (۸): مقایسه شاخص MID در روش‌های شمارش کامل و AMOSA



شکل (۹): مقایسه شاخص SM در روش‌های شمارش کامل و AMOSA

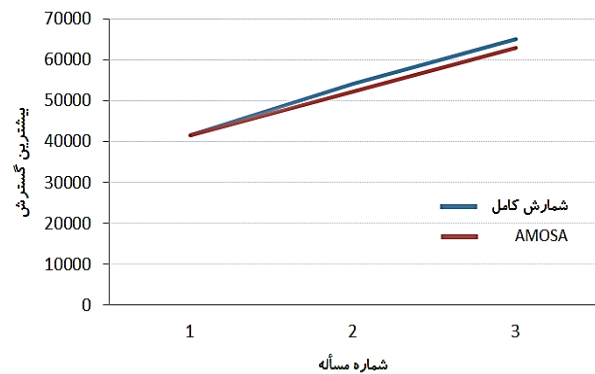


شکل (۵): پراکندگی نقاط پارتو در فضای جواب برای مثال اول

در مثال سوم، با ۳ کارخانه، ۶ مرکز توزیع و ۸ خرده فروش و با در نظر گرفتن ۴ ماشین در هر کارخانه، این زمان به ۴۵۶۴۹۸ ثانیه رسید. که این بیانگر NP-hard بودن مسأله است. بنابراین همانطور که مشاهده شد؛ با افزایش ابعاد مسأله و متعاقباً افزایش زمان‌های حل، استفاده از روش‌های ابتکاری و فراابتکاری اجتناب ناپذیر است. با توجه به فضای رقابتی دنیای امروزی، که ضمن داشتن محدودیت زمان، اغلب با مسائلی روبرو هستیم، که فضای جواب بسیار گسترده‌ای دارند و بررسی تمام جواب‌ها از نظر محاسباتی امکان‌پذیر نیست، استفاده از روش‌هایی مانند AMOSA، جهت بهینه‌سازی همزمان چندین هدف که از نظر محاسباتی معقول و به صرفه باشد، ضروری بوده و می‌تواند به مدیران و تصمیم‌گیرندگان حوزه مدیریت زنجیره تأمین، جهت اتخاذ تصمیمات مناسب و در مدت زمان معقول، کمک شایانی کند.

در مثال اول الگوریتم AMOSA ظرف مدت ۳۲۲ ثانیه توانست ۲۷ نقطه (۸۷٪) از نقاط نامغلوب را شناسایی کند. این تعداد در مثال‌های دوم و سوم به ترتیب برابر با ۱۱ و ۹ جواب و با زمان‌های اجرای ۶۶۵ و ۲۹۵۵ ثانیه بود. همانطور که از شاخص‌های ارائه در جدول (۱۰) پیداست، الگوریتم AMOSA در شاخص‌های MID، SM و MS نیز عملکردی نزدیک به روش شمارش کامل دارد، که این بیانگر عملکرد مناسب الگوریتم در یافتن جواب‌های بهینه است. جهت مقایسه بهتر دو روش، نتایج بدست آمده در جدول (۱۰) به تفکیک هر کدام از شاخص‌ها در شکل (۶) تا شکل (۱۰) نمایش داده شده است. بر این اساس، با مشاهده نتایج حاصل از این مثال‌ها می‌توان نتیجه گرفت که صحت و توانایی الگوریتم در رسیدن به جواب‌های بهینه در مسائل با ابعاد کوچک و متوسط قابل قبول است. لذا انتظار می‌رود که الگوریتم عملکرد مشابهی را نیز در مسائل با ابعاد بزرگ داشته باشد.

- simultaneous inventory control and facility location model with stochastic capacity constraints, *Networks and Spatial Economics*, 6(1), pp.39-53.
- [5] Shu, J. and Sun, J., (2006). Designing the distribution network for an integrated supply chain, *Journal of Industrial and Management Optimization*, 2(3), p.339.
- [6] Tancrez, J.S., Lange, J.C. and Semal, P., (2012). A location-inventory model for large three-level supply chains, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(2), pp.485-502.
- [7] Park, S., Lee, T.E. and Sung, C.S., (2010). A three-level supply chain network design model with risk-pooling and lead times, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(5), pp.563-581.
- [8] Shahabi, M., Akbarinasaji, S., Unnikrishnan, A. and James, R., (2013). Integrated inventory control and facility location decisions in a multi-echelon supply chain network with hubs, *Networks and Spatial Economics*, 13(4), pp.497-514.
- [9] Mousavi, S.M., Alikar, N., Niaki, S.T.A. and Bahreinnejad, A., (2015). Optimizing a location allocation-inventory problem in a two-echelon supply chain network: A modified fruit fly optimization algorithm, *Computers & Industrial Engineering*, 87, pp.543-560.
- [10] Ahmadi-Javid, A. and Hoseinpour, P., (2015). Incorporating location, inventory and price decisions into a supply chain distribution network design problem, *Computers & Operations Research*, 56, pp.110-119.
- [11] Berman, O., Krass, D. and Menezes, M.B., (2016). Directed assignment vs. customer choice in location inventory models, *International Journal of Production Economics*, 179, pp.179-191.
- [12] Ahmadi, G., Torabi, S.A. and Tavakkoli-Moghaddam, R., (2016). A bi-objective location-inventory model with capacitated transportation and lateral transshipments, *International Journal of Production Research*, 54(7), pp.2035-2056.
- [13] Diabat, A., Dehghani, E., Jabbarzadeh, A., (2017). Incorporating location and inventory decisions into a supply chain design problem with uncertain demands and lead times, *Journal of Manufacturing Systems*, 43, pp.139-149.
- [14] Dai, Z., Aqlan, F., Zheng, X., Gaoc, K., (2018). A location-inventory supply chain network model using two heuristic algorithms for perishable products with fuzzy constraints, *Computers & Industrial Engineering*, 119, pp.338-352.
- [15] Rezaeenour, J., Hashempoor, M., Akbari, A.M., (2020). A four-echelon supply chain considering economic, social and regions satisfaction goals, *Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems*, 7(15), pp. 199-217.
- [16] Sadri Esfahani, A., Nakhaeinejad, M., Nabizadeh marziani, S., (2020). Inventory Model and Pricing With Linear Functions Price-Dependent Demand, Time-Dependent Holding Cost and Discount Amount (Purchase Cost), *Journal of Industrial*



شکل (۱۰): مقایسه شاخص MS در روش‌های شمارش کامل و AMOSA

۵. نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

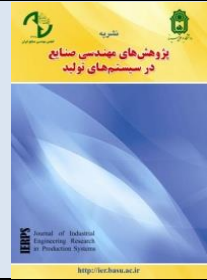
در این پژوهش، مسأله بهینه‌سازی همزمان مکان‌یابی تسهیلات - موجودی - تخصیص افزونگی در یک زنجیره تأمین تک دوره‌ای و سه سطحی شامل تأمین کننده، توزیع کننده و خرده فروش با تقاضای احتمالی مورد بررسی قرار گرفت و یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی جهت بهینه‌سازی هزینه‌های کل زنجیره تأمین و همچنین قابلیت اطمینان آن توسعه داده شد. با توجه به NP-Hard بودن مسأله، از الگوریتم فراابتکاری چند هدفه AMOSA برای حل چند مثال در ابعاد کوچک و متوسط استفاده شد و در نهایت نتایج حاصل از آن با استفاده از نتایج حاصل از روش شمارش کامل مورد ارزیابی و سنجش قرار گرفت. نتایج حاکی از عملکرد مناسب الگوریتم در حرکت به سوی جبهه پارتویی و یافتن جواب‌های نامغلوب است. در ادامه این پژوهش و به عنوان کارهای آتی می‌توان به استفاده از سایر استراتژی‌های تخصیص افزونگی مانند استراتژی آماده به کار و یا استفاده از ساختارهایی دیگر به جز ساختار سیستم های سری - موازی در بحث قابلیت اطمینان اشاره کرد. در نظر گرفتن مسأله به صورت چند دوره‌ای و لحاظ کردن زمان‌های انتظار به صورت غیرقطعی و همچنین استفاده از سایر روش‌های حل تقریبی و ابتکاری دیگر می‌تواند به توسعه مسأله و نزدیک‌تر ساختن آن به مسائل دنیای واقعی کمک کند.

مراجع

- [1] Daskin, M.S., Coullard, C.R. and Shen, Z.J.M., (2002). An inventory-location model: Formulation, solution algorithm and computational results, *Annals of operations research*, 110(1-4), pp.83-106.
- [2] Shen, Z.J.M., Coullard, C. and Daskin, M.S., (2003). A joint location-inventory model, *Transportation science*, 37(1), pp.40-55.
- [3] Miranda, P.A. and Garrido, R.A., (2004). Incorporating inventory control decisions into a strategic distribution network design model with stochastic demand, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 40(3), pp.183-207.
- [4] Miranda, P.A. and Garrido, R.A., (2006). A

- Industrial Engineering, 108 (C), pp.213-224.
- [30] Fakhrzad, M.B., Talebzadeh, P., Goodarzian, F., (2019). The green Closed-Loop Supply Chain Network Design Considering Supply Centers Reliability Under Uncertainty, *Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems*, 7(14), pp.179-197.
- [31] Chern MS., (1992). On the computational complexity of reliability redundancy allocation in a series system, *Operation Research Letters*, 11, pp.309-315.
- [32] Fyffe, D. E., Hines, W. W., and Lee, N. K., (1968). System reliability allocation and a computational algorithm, *IEEE Transactions on Reliability*, 17, pp.64-69.
- [33] Hikita M, Nakagawa Y, Nakashima N, Narihisa H., (1992). Reliability Optimization of Systems by a Surrogate-Constraints Algorithm, *IEEE Transactions on Reliability*, 41(3), pp.127-39.
- [34] Coit DW, Smith A. E., (1996). Reliability optimization of series-parallel systems using a genetic algorithm, *IEEE Transactions on Reliability*, 45(2), pp.254-60.
- [35] Coit, D. W., (2003). Maximization of system reliability with a choice of redundancy strategies, *IIE Transactions*, 35(6), pp.535-544.
- [36] Ramirez-Marquez, J. E., & Coit, D. W., (2004). A heuristic for solving the redundancy allocation problem for multi-state series-parallel systems, *Reliability Engineering and System Safety*, 83, pp.341-349.
- [37] Kulturel-Konak S, Smith A, Coit D. W., (2003). Efficiently solving the redundancy allocation problem using tabu search, *IIE Transactions*, 35(6), pp.515-526.
- [38] Zhao J.H., Liuv Z., Dao MT., (2007). Reliability optimization using multi-objective ant colony system approaches, *Reliability Engineering System Safety*, 92, pp.109-120.
- [39] Taboada HA., Baheranwala F., Coit D.W., Wattanapongsakorn N., (2007). Practical solutions for multi-objective optimization: an application to system reliability design problems, *Reliability Engineering System Safety*, 92, pp.314-322.
- [40] Tavakkoli-Moghaddam R., Safari J., Sassani F., (2008). Reliability optimization of series- parallel systems with a choice of redundancy strategies using a genetic algorithm, *Reliability Engineering & System Safety*, 93, pp.550-560.
- [41] Liang YC., Lo M.H., (2010). Multi-objective redundancy allocation optimization using a variable neighborhood search algorithm, *Journal of Heuristics*, 16, pp.511-535.
- [42] Khalili-Damghani K., Amiri M., (2012). Solving binary-state multi-objective reliability redundancy allocation series-parallel problem using efficient epsilon-constraint, multi-start partial bound enumeration algorithm, and DEA, *Reliability Engineering and System Safety*, 103, pp.35-44.
- [43] Safari, J., (2012). Multi-objective reliability optimization of series-parallel systems with a choice of redundancy strategies, *Reliability Engineering Research in Production Systems*, 7(15), pp. 305-321
- [17] Snyder, L. V., (2003). Supply chain robustness and reliability: Models and algorithms (PHD Thesis), Dept. of Industrial Engineering and Management Sciences. Evanston, IL, Northwestern University. PhD thesis.
- [18] Snyder, L. V. and M. S. Daskin, (2005). Reliability models for facility location: The expected failure cost case, *Transportation Science*, 39(3), pp.400-416.
- [19] Snyder, L. V. and M. S. Daskin, (2007). Models for reliable supply chain network design, *Critical Infrastructure: Reliability and Vulnerability*, A.T. Murray and T.H. Grubestic (eds.), Chapter 13: pp.257-289.
- [20] Snyder, L. V., Scaparra, M.P., M. S. Daskin, Church, R.L., (2006). Planning for disruptions in supply chain networks, *Tutorials in Operations Research: Models, Methods, and Applications for Innovative Decision Making* ISBN, 13, pp.234-257.
- [21] Zhan, R. L., (2007). Models and algorithms for reliable facility location problems and system reliability optimization. Ph.D. dissertation, UNIVERSITY OF FLORIDA.
- [22] Zhan, R. L., Z. J. M. Shen, et al. (2007). System reliability with location-specific failure probabilities, Working paper Department of Industrial Engineering and Operations Research, University of California at Berkeley.
- [23] Lim, M., Daskin, M.S., A. Bassamboo, (2009), Facility location decisions in supply chain networks with random disruption and imperfect information, working paper, Department of Business Administration, University of Illinois.
- [24] Cui, T., Y. Ouyang, et al., (2010). Reliable facility location design under the risk of disruptions, *Operations Research*, 58 (4-Part-1), PP. 998-1011.
- [25] Seifbarghy, M., Jalali, S., Rahmati, S. H., (2012). Reliable Capacitated Facility Location Problem Considering Maximal covering, *World Academy of science, Engineering & Technology*, 6(1), pp.290-293.
- [26] Shishebori, D., Snyder, L. V., Jabalameli, M. J., (2014). A reliable budget-constrained facility location/network design problem with unreliable facilities, *Networks and Spatial Economics*, 14(3-4), pp.549-580.
- [27] Qingwei Li and Savachkin, A., (2015). A Fast Tabu Search Algorithm for the Reliable a P-Median Problem, *Advances in Global Optimization*, pp.417-424.
- [28] Jalali, J., Seifbarghy, M., Sadeghi, J., Ahmadi, S., (2016). Optimizing a bi-objective reliable facility location problem with adapted stochastic measures using tuned-parameter multi-objective algorithms, *Knowledge-Based Systems*, 95, pp.45-57.
- [29] Farahani, M., Shavandi, H., Rahmani, D., (2017). A Location-Inventory Model Considering a Strategy to Reduce Disruption Risk in Supply Chain by substitutable products, *Computers &*

- allocation optimization problem in supply chain management: An NSGA-II with tuned parameters, *Computers & Operations Research*, 41, pp.53-64.
- [48] Sabri-Laghaie, K., Karimi-Nasab, M., (2019). Random search algorithms for redundancy allocation problem of a queuing system with maintenance considerations, *Reliability Engineering & System Safety*, 185, pp. 144-162.
- [49] Mirchandani, P.B., Francis, R.L. (Eds.), (1990). *Discrete Location Theory*, Wiley, New York.
- [50] Kirkpatrick, C. D. Gellat, M. P. Vecchi, (1983). Optimization by simulated annealing, *Scienc*, pp. 671-680.
- [51] Bandyopadhyay, S., Saha, S., Maulik, U., & Deb, K., (2008). A simulated annealing based multi-objective optimization algorithm: AMOSA, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 12(3), pp. 269-283.
- Engineering and System Safety, 108, pp.10-20.
- [44] Chambari, A., Rahmati, S. H. A., Najafi, A. A., Karimi, A., (2012). A bi-objective model to optimize reliability and cost of system with a choice of redundancy strategies, *Computers and Industrial Engineering*, 63, pp.109-119.
- [45] Zoulfaghari, H., Zeinal Hamadani, A., and Abouei Ardakan, M., (2014). Bi-objective redundancy allocation problem for a system with mixed repairable and nonrepairable components, *ISA Transactions*, 53, pp.17-24.
- [46] Zaretalab A, Hajipour V, Sharifi M, Shahriari, M. R., (2015). A knowledge-based archive multi-objective simulated annealing algorithm to optimize series-parallel system with choice of redundancy strategies, *Computers & Industrial Engineering*, 80 pp.33-44.
- [47] Sadeghi, J., Sadeghi, S., Niaki, S. T., (2014). A hybrid vendor managed inventory and redundancy



Location-inventory- redundancy allocation optimization problem in a multi-objective single- period supply chain network with stochastic demand

F. Abdi¹, H. Farughi^{2*}, H. Sadeghi^{3*}, J. Arkat⁴

¹Ph.D student of industrial Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

²Associate Professor, Department of Industrial Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

³Associate Professor, Department of Industrial Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

⁴ Associate Professor, Department of Industrial Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received 29 May 2019

Accepted 3 October 2019

Keywords:

Supply chain management
Location-inventory model
Risk pooling strategy
Redundancy allocation
AMOS algorithm

ABSTRACT

Allocating redundancy components is one of the most efficient and well-known ways to increase the reliability of factories; which plays an important role in responding appropriately to customer demand, timely delivery of products and cost reduction. This leads to the creation of a stable and reliable supply chain. In the present study, the subject of simultaneous optimization of facility location-inventory-redundancy allocation has been investigated. In this regard, a single-period, three-level supply chain including supplier, distributor and retailer is considered. It is assumed that demand for each retailer is stochastic and normally distributed. Also, in order to deal with the fluctuations of demand, the risk pooling strategy has been applied, as a result of which, inventory will be held only in distribution centers. For this purpose, a nonlinear integer programming model is proposed to optimize the total cost of the supply chain as well as its reliability. Due to the complexity and NP-hardness of facility location-inventory and redundancy allocation problems, a multi-objective metaheuristic algorithm based on the simulated annealing algorithm, called AMOSA, was developed to solve the foregoing problem. Finally, to validate and accredit the algorithm, its results are compared with the results of the complete enumeration of all feasible solutions.

* Corresponding author. H. Farughi

Tel.:087-33624017; E-mail address: h.farughi@uok.ac.ir