

ارائه یک الگوریتم ترکیبی برای حل مسئله مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی دوهدفه در زنجیره تأمین با فرض وجود تقاضای تصادفی

ابراهیم تیموری^{۱*}، فاطمه ابوترابیان^۲، محمدحسین بابایی^۳

۱. دانشیار دانشکده صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲. دانشجوی دکتری دانشکده صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۳. دانشجوی دکتری دانشکده صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران

(تاریخ دریافت: ۹۲/۱۰/۲۲، تاریخ دریافت روایت اصلاح‌شده: ۹۵/۱۲/۰۳، تاریخ تصویب: ۹۶/۰۱/۱۴)

چکیده

امروزه رقابت شدید در بازار جهانی، شرکت‌ها را وادار به طراحی و مدیریت بهتر زنجیره‌های تأمین و ایجاد مزیت‌های رقابتی کرده است. یکپارچگی تصمیم‌ها، از عوامل بسیار مهمی است که به میزان زیادی موجب کاهش هزینه‌های زنجیره می‌شود و به افزایش رضایت مشتری می‌انجامد. طراحی شبکه توزیع، براساس سه مسئله عمده انجام گرفته است: تخصیص مکان، مسیریابی وسیله نقلیه و کنترل موجودی. از آنجاکه نقش مؤثر کاهش هزینه‌های توزیع در ادامه حیات زنجیره تأمین پوشیده نیست، در این مقاله، این سه مسئله در قالب یک مدل یکپارچه در شرایط عدم قطعیت تقاضا با یکدیگر ترکیب می‌شوند. این روش، به کاهش هزینه‌های توزیع، افزایش رضایت مشتریان و درنهایت، ایجاد یک زنجیره تأمین کارا منجر می‌شود. همچنین در این پژوهش، علاوه بر کمینه‌کردن مجموع هزینه‌های ثابت ایجاد انبارها، هزینه‌های حمل‌ونقل و هزینه‌های موجودی، رضایت مشتریان اولویت‌دار نیز از طریق کاهش زمان انتظار افزایش می‌یابد. به همین دلیل، یک مدل دوهدفه برنامه‌ریزی غیرخطی مختلط، با فرض پیروی عامل تصادفی (تقاضا) از توزیع شناخته‌شده (نرمال) با استفاده از برنامه‌ریزی شانس محدودیت‌دار ارائه می‌شود. در ادامه برای حل مدل، یک الگوریتم حل ترکیبی بر پایه تیرید شبیه‌سازی‌شده و الگوریتم ژنتیک، ارائه و با استفاده از مجموعه‌ای از مسائل نمونه ارزیابی می‌شود. نتایج محاسباتی، نشانگر کارایی آن برای طیف وسیعی از مسائل با اندازه‌های متفاوت است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم‌های فراابتکاری، زنجیره تأمین یکپارچه، کنترل موجودی، مسیریابی وسیله نقلیه، مکان‌یابی تسهیلات.

مقدمه

نقلیه و کنترل موجودی. در گذشته، این تصمیم‌ها به صورت جداگانه اتخاذ می‌شد و به بهینه‌سازی‌های موضعی و در نتیجه، تحمیل هزینه‌های بسیار زیاد بر سازمان‌های عضو می‌انجامید. در سال‌های اخیر، مدیران و محققان زنجیره تأمین، متوجه اهمیت یکپارچه سازی تصمیم‌های زنجیره تأمین شده‌اند. بسیاری از محققان نشان دادند که در صورت ترکیب تصمیم‌گیری‌های فوق و ایجاد یک مدل یکپارچه، صرفه‌جویی‌های قابل توجهی حاصل خواهد شد [۲]. از این‌رو، چگونگی تعیین محل انبار کالا، مسیریابی وسایل نقلیه و سیاست‌های موجودی، به مسئله‌ای مهم در طراحی سیستم‌های توزیع از جمله صنایع مواد غذایی و نوشیدنی، تحویل به مغازه‌های خرده‌فروشی و توزیع کالاهای مصرف‌کنندگان مختلف تبدیل شده است. با توجه به

در سه دهه اخیر، مفاهیم سیستم‌های لجستیک یکپارچه و یکپارچگی تصمیم‌گیری در زنجیره تأمین، به یکی از مهم‌ترین ابعاد مدیریت زنجیره تأمین تبدیل شده‌اند. این مفاهیم، به بررسی وابستگی‌های میان مکان تسهیلات، تخصیص تأمین‌کنندگان و مشتریان به تسهیلات، ساختار سیستم حمل‌ونقل، سیستم کنترل موجودی‌ها و برنامه‌ریزی و زمان‌بندی تولید می‌پردازند [۱]. شبکه توزیع، مجموعه اقدامات صورت‌گرفته برای تهیه محصولات مورد نیاز مشتریان، انتقال این اقلام از تأمین‌کنندگان به مراکز توزیع، ذخیره‌کردن آن‌ها و درنهایت رساندن آن‌ها به مشتریان است. طراحی شبکه توزیع، براساس سه مسئله عمده صورت گرفته است: تخصیص مکان، مسیریابی وسیله

می‌گیرد. سپس یک الگوریتم ترکیبی برای حل مسئله مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی در محیط زنجیره تأمین پیشنهاد می‌شود. بخش بعدی مقاله، به حل مسائل نمونه و نتیجه‌گیری اختصاص یافته است. در انتها نیز پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی ارائه می‌شود.

مرور ادبیات

در دو دهه گذشته، چندین مسئله طراحی شبکه توزیع یکپارچه در ادبیات موضوع ارائه شده است. با این حال، بسیاری از پژوهش‌های موجود در ادبیات موضوع، تاکنون به ادغام دو نوع از مسائل ذکر شده متمرکز شده‌اند. مسئله مکان‌یابی - مسیریابی، قدیمی‌ترین نوع مسائل یکپارچه است که از اواسط دهه ۱۹۷۰ مطالعه آن آغاز شد. در مقالات مروری مین و همکاران [۴] و ناگی و سالهی [۵]، دسته‌بندی کاملی از پژوهش‌های این حوزه صورت گرفت. در یکی از جدیدترین مقالات منتشر شده در این حوزه، آرخو و همکاران [۶] یک الگوریتم فراابتکاری اریب برای حل مسئله مکان‌یابی - مسیریابی ظرفیت‌دار معرفی کردند که در مرحله اول آن، انبارهای مستقر شده تعیین می‌شوند. سپس مشتریان تخصیص یافته به هر انبار مشخص می‌شوند و با در نظر گرفتن سریع‌ترین مسیر، جواب‌های مسئله مکان‌یابی - مسیریابی به دست می‌آید. در مرحله دوم، با ایجاد آشفتگی در فضای حل، تولید جواب‌های بهبود یافته صورت می‌گیرد و با تکرار این فرایند، جواب‌هایی با کیفیت بسیار مناسب تولید می‌شوند. مثال‌های عددی، بیانگر کارآبودن روش حل پیشنهادی است.

مسئله مسیریابی - موجودی نیز از اوایل دهه ۱۹۸۰ در مقالات متعددی مانند بایتا و همکاران [۷]، جیلت و همکاران [۸]، کلیوگت و همکاران [۹]، آدلمن [۱۰]، گائور و فیشر [۱۱]، ژائو و همکاران [۱۲]، یو و همکاران [۱۳] و دای و همکاران [۱۴] بررسی شد. اندرسون و همکاران (۲۰۱۵) [۱۵] مدلی جدید برای حل مسئله مسیریابی - موجودی در زنجیره تأمین گاز طبیعی مایع ارائه کردند. به منظور نزدیک کردن مدل به شرایط واقعی، مدل آن‌ها بر اساس زمان‌بندی ارائه شده به کشتی‌ها پایه‌ریزی شد و از یک روش حل مبتنی بر شاخه و کران برای حل مدل استفاده شد. نتایج عددی بیانگر عملکرد بهتر الگوریتم حل

اهمیت مسائل یکپارچه لجستیک برای کسب مزیت‌های رقابتی در تجارت دنیای امروز و از آنجا که این روزها رقابت از فضای بین شرکت‌ها به فضای بین زنجیره‌های تأمین گسترش یافته است، در این مقاله، یک مدل ریاضی یکپارچه مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی به منظور افزایش سود زنجیره ارائه می‌شود. شایان ذکر است با توجه به اهمیت حفظ رضایت مشتری در افزایش سود بلندمدت زنجیره، این مدل علاوه بر کمینه‌کردن هزینه‌ها، میزان رضایت مشتریان را نیز از طریق کاهش زمان انتظار حداکثر می‌کند. یکی از عوامل تأثیرگذار در ساختار مدل‌های یکپارچه زنجیره تأمین، نقش تقاضا و خاصیت غیرقطعی آن است. به طور معمول، در مدل‌های متداول برنامه‌ریزی عملیات زنجیره تأمین در شرایط عدم قطعیت تقاضا، از رویکردهای برنامه‌ریزی احتمالی استفاده می‌شود. در این پژوهش، با توجه به مقادیر موجودی‌ها و کنترل پیوسته انبارها، در آخرین حلقه زنجیره تأمین، به مبارزه با عدم قطعیت تقاضا پرداخته می‌شود [۳].

مسئله LRIP^۱ که در این مقاله ارائه شده است، یک شبکه تأمین سه‌لایه، متشکل از یک کارخانه با ظرفیت نامحدود در سطح اول، چند انبار با ظرفیت محدود در سطح دوم و مشتریان در سطح سوم است. مسیرهای بین کارخانه و انبارها مستقیم‌اند و مشاهده مشتری‌های متعدد در حین طی مسیر از انبارها به نقاط تقاضا مجاز است. هدف این مسئله، تعیین محل انبارها، اختصاص مشتریان به انبارها، تعیین مسیر وسایل نقلیه از انبارها به مشتریان و تعیین سیاست موجودی برای انبارهای انتخاب شده است؛ به نحوی که علاوه بر کمینه‌کردن مجموع هزینه‌های ثابت ایجاد انبارها، هزینه‌های حمل‌ونقل و هزینه‌های موجودی، رضایت مشتریان نیز از طریق کاهش زمان انتظار افزایش یابد. دو زیرمسئله اصلی مسئله مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی، مکان‌یابی - تخصیص و مسیریابی وسیله نقلیه هستند. با توجه به اینکه روش‌های سنتی بهینه‌یابی برای حل این دسته از مسائل مناسب نیست، در این مقاله از الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل مسئله استفاده شده است.

در بخش بعدی مقاله، به مرور ادبیات مسئله پرداخته می‌شود، در ادامه، ارائه و تشریح مدل ریاضی صورت

بار یک مسئله یکپارچه مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی در زنجیره تأمین تک‌منبعی ارائه کردند و نشان دادند که مدل آن‌ها، مزیت شایان توجهی را در مقایسه با مدل شن و چی [۲۲] فراهم می‌کند. مسئله در حالت تک‌محصولی و تک‌دوره‌ای با تقاضای احتمالی مشتریان که از توزیع نرمال تبعیت می‌کند، با فرض در نظر گرفتن ظرفیت نامحدود برای تأمین‌کننده، مدل شده است. برای حل مدل ارائه‌شده نیز یک الگوریتم ابتکاری بر مبنای جست‌وجوی ممنوع و شبیه‌سازی تیرید ارائه شد. وانگ و همکارانش (۲۰۰۸) [۲۴] برای نخستین بار، مباحث لجستیک معکوس را در مسائل مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی وارد کردند. سیستم لجستیک حلقه بسته^۲ مورد بررسی، سه‌سطحی بود و شامل یک کارخانه، چندین مرکز لجستیک و چندین نقطه توزیع یا جمع‌آوری می‌شد. هدف از این سیستم، حفاظت محیط‌زیست و صرفه‌جویی در منابع است. سجادی و چراغی (۲۰۱۱) [۲۵] به بررسی یک شبکه توزیع سه‌سطحی چندمحصولی شامل کارخانه‌ها، انبارها و مشتریان پرداختند. در این مدل، فرض شد که شرکت‌های لجستیک شخص ثالث، در صورت نیاز به فضای اضافی برای انبارش مواد، قادر به ارائه انبار هستند، زیرا انبارها دارای ظرفیت محدود فرض شده‌اند. تقاضای مشتریان احتمالی بود و مسئله در حالت تک‌دوره‌ای بررسی شد. این مدل، با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی تیرید حل شد. احمدی جاوید و صدیقی (۲۰۱۱) [۲] نیز مسئله یکپارچه مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی در زنجیره تأمین چندمنبعی را ارائه کردند. رویکرد این مقاله، طراحی مسئله شبکه توزیع چندمنبعی بود که هم‌زمان به ادغام سه‌گانه بهینه‌سازی محل، موجودی و تصمیم‌های مسیریابی پرداخت و هدف آن، به حداقل رساندن مجموع هزینه‌های سالانه در ارتباط با این تصمیم‌ها بود. گوررو و همکارانش (۲۰۱۳) [۲۶] یک الگوریتم ترکیبی برای حل مسئله مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی در حالت وجود چند انبار و چند خرده‌فروش با فرض وجود تقاضای قطعی ارائه دادند. در این پژوهش، مدیریت موجودی‌ها برای یک دوره برنامه‌ریزی با زمان گسسته و با فرض وجود ظرفیت ذخیره محدود انجام شد. شایان ذکر است که برای هر دوره، مقدار کالایی که از تأمین‌کنندگان به انبارها و از انبارها به

ارائه‌شده در مقایسه با روش‌های دقیق موجود در ادبیات موضوع دارد.

داسکین و همکاران (۲۰۰۲) [۱۶] و شن و همکاران (۲۰۰۳) [۱۷] رویکردی جدید برای یکپارچه‌سازی تصمیم‌های مکان‌یابی و موجودی با استفاده از سیاست موجودی مرور پیوسته ارائه کردند. دیابات و همکاران (۲۰۱۳) [۱۸] یک مدل مکان‌یابی - موجودی چنددره‌ای را مطالعه و سپس آن را با استفاده از یک روش آزادسازی لاگرانژی حل کردند. در جدیدترین مقاله این حوزه، پوگا و تانکرز (۲۰۱۶) [۱۹] مسئله مکان‌یابی - موجودی را برای طراحی زنجیره‌های تأمین بزرگ، با در نظر گرفتن عدم قطعیت در تقاضا بررسی کردند. در روش آن‌ها برای حل مسئله، مسئله مکان‌یابی - موجودی، با فرض ثابت نگه‌داشتن برخی پارامترها خطی شد. در ادامه، یک روش ابتکاری برای حل مسئله ارائه شد که در آن، ابتدا مدل خطی حل شد و بر این اساس، تخمین‌هایی برای مقادیر ثابت در تکرارهای بعدی ارائه شد. آن‌ها سپس مفاهیم انباشت ریسک را در مکان‌های توزیع در نظر گرفتند و ثابت کردند که با افزایش موجودی اطمینان می‌توان شرایط عدم قطعیت را بهبود بخشید.

لئو و لی (۲۰۰۳) [۲۰] برای اولین بار به مدل‌سازی مسئله یکپارچه مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی پرداختند و یک روش ابتکاری برای حل مسئله پیشنهاد کردند. لئو و لین [۲۱] در سال ۲۰۰۵ برای حل مدل لئو و لی [۲۰] روش حل جدیدی ارائه دادند. در این پژوهش، مسئله ترکیبی مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی، به دو زیرمسئله تجزیه شد: مسئله مکان‌یابی - تخصیص و مسئله مسیریابی - موجودی. روش ابتکاری برای حل مسئله فوق، شامل دو فاز بود و از ترکیب روش‌های جست‌وجوی ممنوعه و تیرید شبیه‌سازی شده برای بهبود جواب اولیه استفاده شد. اولین پژوهشی که در آن، هزینه‌های مسیریابی و نه تصمیم‌گیری، در یک مسئله مکان‌یابی - موجودی گنجانیده شد، مقاله شن و چی [۲۲] بود. آن‌ها در سال ۲۰۰۷ تقریبی از هزینه‌های مسیریابی را به مدلی که تنها تصمیم‌های مکان‌یابی و موجودی را در تابع هدف در نظر می‌گیرد، اضافه کردند. باین حال، مدل آن‌ها شامل تصمیم‌های مسیریابی نمی‌شد. احمدی جاوید و آزاد (۲۰۱۰) [۲۳]، برای اولین

فاسدشدنی ارائه کردند. مدل آن‌ها، تعداد و مکان انبارهای مورد نیاز، سطح موجودی و مسیری را که هر وسیله نقلیه طی می‌کند، تعیین می‌سازد. علاوه بر این، آن‌ها برای حل مدل، یک الگوریتم ژنتیک با نمایش خاصی از کروموزوم‌ها ارائه کردند و نشان دادند که روش حل پیشنهادی، کارایی مناسبی برای حل مسائل دارد. در جدول ۱ خلاصه‌ای از مقالات ارائه شده در حوزه مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی مشاهده می‌شود.

نویسندگان مختلف برای حل مسائل گوناگون زنجیره تأمین، استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری را به‌عنوان ابزاری کارا تشخیص داده‌اند؛ برای مثال، نوروزی و همکارانش [۳۱] یک الگوریتم رقابت استعماری تلفیقی برای مسئله مکان‌یابی و مسیریابی معرفی کردند. این مدل با خطی کردن عبارت‌های غیرخطی مسئله و با استفاده از نرم‌افزار CPLEX حل می‌شود، اما با توجه به ابعاد بزرگ مسائل واقعی، یک روش فراابتکاری تلفیقی با در نظر گرفتن قدرت جست‌وجوی الگوریتم رقابت استعماری و توانایی الگوریتم ژنتیک در بهبود جواب‌های گسسته ارائه شد. غلامی و هنرور [۳۲] با فرض ثابت بودن تقاضا و میزان تولید و نیز فساد و بهبود کالاها، یک مدل غیرخطی عدد صحیح برای زنجیره تأمین سه‌سطحی مورد بررسی معرفی کردند. برای حل مدل نیز از الگوریتم ژنتیک استفاده شد. نتایج نشان داد که با توجه به ثابت بودن تولید، نرخ فساد و بهبودپذیری کالاها و نیز تعداد خرده‌فروش‌ها، تأثیر بسزایی در جواب‌های بهینه در شرایط مختلف دارد. کیانی و همکاران [۳۳] با در نظر گرفتن موعد خدمت‌دهی به مشتریان و استفاده از وسایل نقلیه با سرعت و هزینه‌های متفاوت، ابتدا مدلی ریاضی برای مسئله ترکیبی نیروی انسانی - مسیریابی وسیله نقلیه ارائه دادند. در این پژوهش، برای حل مدل با تنظیم پارامترها به روش تاگوچی، از روش الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی ذرات انبوه استفاده شد. نتایج محاسباتی، بیانگر کارایی الگوریتم ژنتیک پیشنهادی در کیفیت جواب‌ها و زمان محاسبات است.

با توجه به اینکه مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی، مسئله‌ای نوظهور است، در بیشتر مقالات مورد بررسی در اینجا، پنجره‌های زمانی نامشخص بودند.

مشتریان فرستاده می‌شود، به‌علاوه توالی خدمت‌گیری خرده‌فروش‌ها با استفاده از وسایل نقلیه همگن و انبارهایی که باید باز شوند، تعیین شد. توکلی مقدم و همکارانش [۲۷] برای اولین بار، مفاهیم انباشت ریسک^۳ را در مسئله مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی برای یک سیستم زنجیره تأمین تصادفی سه‌سطحی در نظر گرفتند و آن را به‌وسیله یک مدل دوهدفه برنامه‌ریزی غیرخطی مختلط فرموله کردند. هدف از این مدل، به‌حداقل رساندن هزینه‌های سیستم و زمان حمل‌ونقل بود، با این فرض که وسایل نقلیه مختلفی برای حمل‌ونقل کالا بین تسهیلات وجود دارد.

امروزه با توجه به معیارهای متفاوت تصمیم‌گیری، مدل‌های چندهدفه به‌عنوان ابزاری کاربردی برای مدل‌سازی مسئله و نزدیک کردن مسئله مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی به حالت واقعی به کار می‌رود؛ برای نمونه، توکلی مقدم و رضیعی (۲۰۱۶) [۲۸] یک مدل دوهدفه مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی ارائه دادند. مسئله آن‌ها شامل یک شبکه توزیع دوسطحی چنددوره‌ای چندمحصوله، با فرض وجود وسایل حمل‌ونقل غیرهمگن بود و از رویکرد فازی در مدل‌سازی استفاده کردند تا شرایط عدم قطعیت تقاضا در نظر گرفته شود. هزینه‌ها شامل مصرف سوخت، نگهداری موجودی، حمل‌ونقل و استقرار تسهیلات در تابع هدف اول و هزینه کمبود کالا برای هر مشتری در تابع هدف دوم منظور شد. توران و همکاران (۲۰۱۶) [۲۹] یک مسئله مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی دوسطحی با در نظر گرفتن تقاضای تصادفی ارائه کردند که شامل کالاهای فاسدشدنی بود و باید از یک انبار مرکزی به فروشگاه‌های خرده‌فروشی منتقل می‌شد. برای نزدیک کردن مسئله به حالت واقعی و برخورد بهتر با عدم قطعیت، حمل کالا بین فروشگاه‌ها مجاز است. آن‌ها برای حل مدل، از یک روش جست‌وجوی همسایگی متغیر بهره بردند که برای مدیریت تخصیص، از روش برنامه‌ریزی پویا استفاده می‌کرد. بدین ترتیب، نشان دادند که مدل ارائه شده، بهبودهای شایان توجهی در مقایسه با روش‌های رایج «سفارش‌دهی و حمل‌نکردن کالا بین فروشگاه‌ها» به‌دست می‌دهد. در یکی از آخرین مقالات منتشرشده در این حوزه، هیاست و همکاران (۲۰۱۷) [۳۰] یک مدل ریاضی برای حل مسئله مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی کالاهای

- است و از توزیع نرمال با میانگین μ_i و انحراف معیار δ_i پیروی می‌کند.
۲. مسئله در حالت تک‌دوره‌ای و تک‌محصولی بررسی می‌شود.
 ۳. ظرفیت سرویس کارخانه، نامحدود و انبارها محدود است.
 ۴. تقاضای هر مشتری کمتر از ظرفیت یک کامیون است؛ بنابراین، هر کامیون در هر سفر بیشتر از یک مشتری را ملاقات می‌کند.
 ۵. هر مسیر از یک انبار آغاز و به همان انبار ختم می‌شود.
 ۶. شکاف تقاضا و به‌عبارتی دویخس کردن تقاضا مجاز نیست؛ بنابراین، تقاضای هر مشتری، تنها به وسیله یک انبار تأمین می‌شود.
 ۷. ناوگان حمل مشابهند و ظرفیت سرویس محدود دارند. محدودیتی در تعداد وسایل نقلیه در دسترس نیز وجود ندارد؛ بنابراین، به هر مسیر، یک وسیله نقلیه اختصاص می‌یابد.
 ۸. هر مشتری دقیقاً در مسیر یک خودرو قرار می‌گیرد.
 ۹. مسیر یک وسیله نقلیه، فقط از یک انبار می‌گذرد؛ بنابراین، هیچ اتصالی بین انبارها وجود ندارد.
 ۱۰. پنجره‌های زمانی تحویل کالا به مشتری مشخص است.
 ۱۱. سیستم موجودی در انبارها از سیستم مرور پیوسته پیروی می‌کند. به این ترتیب که هر زمان سطح موجودی به نقطه سفارش‌دهی r رسید، یک سفارش ثابت Q تایی صادر می‌شود تا به حداکثر سطح موجودی $r+Q$ برسد.

نمادها، پارامترها و متغیرهای تصمیم مدل

ریاضی

مجموعه مشتریان:

$$I = \{i; i = 1, 2 \dots n\}$$

مجموعه انبارها:

$$J = \{j; j = 1, 2 \dots m\}$$

مجموعه انبارها و مشتریان:

علاوه‌براین، در مقالات، به بحث اولویت‌دهی در خدمت‌دهی و رضایت مشتریان، کمتر توجه شده است؛ درحالی‌که در دنیای واقعی باید در محدوده زمانی مشخصی به مشتریان خدمت‌رسانی کنیم. تمامی مشتریان، از نظر میزان اهمیت برای ما یکسان نیستند و حداکثرکردن رضایتمندی مشتریان با اولویت بالاتر، تأثیر بیشتری در افزایش سود زنجیره دارد. در این پژوهش، علاوه‌بر کمینه‌کردن مجموع هزینه‌های ثابت ایجاد انبارها، هزینه‌های حمل‌ونقل و هزینه‌های موجودی، رضایت مشتریان اولویت‌دار نیز از طریق کاهش زمان انتظار افزایش می‌یابد. به همین دلیل، یک مدل دوهدفه برنامه‌ریزی غیرخطی مختلط، با فرض پیروی عامل تصادفی (تقاضا) از توزیع شناخته‌شده (نرمال) با استفاده از برنامه‌ریزی شانس محدودیت‌دار^۴ ارائه می‌شود. علاوه‌براین، به‌منظور حل مدل، یک الگوریتم حل ترکیبی کارا بر پایه تریید شبیه‌سازی می‌شود، الگوریتم ژنتیک ارائه می‌شود و ارزیابی آن با مجموعه‌ای از مسائل نمونه صورت می‌پذیرد.

تعریف مسئله و ارائه مدل پیشنهادی

همان‌طور که گفته شد، مسئله پایه مورد بررسی در این مقاله، یک مسئله مکان‌یابی-مسیریابی، متشکل از سه لایه کارخانه (لایه اول)، انبار (لایه دوم) و مشتریان (لایه سوم) است که برای نزدیک‌تر شدن به شرایط واقعی این مسئله با مدل موجودی با خط‌مشی مرور پیوسته (r, Q) یکپارچه شده است. در چنین شبکه‌ای، محصولات از کارخانه به انبار انتقال می‌یابند و از آنجا به مشتریان تحویل داده می‌شوند؛ درحالی‌که مسیرهای کارخانه به انبار مستقیم‌اند و مشاهده مشتری‌های متعدد برای مسیرهای از انبار به نقاط تقاضا مجاز است. هدف، انتخاب مکان برای مراکز توزیع از میان مجموعه‌ای از مکان‌های بالقوه، تخصیص مشتریان به این مراکز، یافتن مسیر وسایل نقلیه از مراکز توزیع به مشتریان و درنهایت، تعیین سیاست‌های موجودی در هر انبار است؛ به‌طوری‌که کل هزینه‌های شبکه به حداقل برسد و به افزایش رضایت مشتریان منجر شود. مفروضات مدل ارائه‌شده به شرح زیر است:

۱. مکان مشتریان از قبل مشخص است، اما تقاضای سالیانه آن‌ها برای محصولات مختلف احتمالی

مدل ریاضی مسئله

تابع هدف اول مسئله، شامل حداقل کردن هزینه‌های کل است. هزینه کل، از بخش‌های زیر تشکیل شده است:

$$1. \text{ هزینه ثابت احداث انبارها: } \sum_{j \in J} F_j X_j$$

۲. متوسط هزینه مسیریابی سالیانه:

$$\sum_{v \in V} \sum_{g \in H} \sum_{h \in I} Z_{ghv} C_{gh} \mu_h \quad (1)$$

۳. هزینه موجودی شامل هزینه سفارش‌دهی سالیانه

$$\sum_{j \in J} h_j \frac{Q_j}{2} \text{، هزینه موجودی در گردش سالیانه } \sum_{j \in J} \frac{D_j}{Q_j} a_j$$

$$\text{هزینه موجودی اطمینان سالیانه } h_j Z_\alpha \sqrt{t_j \sum_{i \in I} \sigma_i^2 Y_{ij}}$$

است که در آن، متوسط تقاضای سالیانه انبار j به صورت

$$D_j = \sum_{i \in I} \mu_i Y_{ij} \text{ محاسبه می‌شود.}$$

۴. متوسط هزینه ارسال مستقیم کالاها از کارخانه به

انبارها.

$$\sum_{j \in J} m_j \sum_{i \in I} Y_{ij} \mu_i \quad (2)$$

تابع هدف دوم: همان‌طور که گفته شد، در این مقاله،

علاوه‌بر کمینه‌کردن هزینه‌ها، حداکثرکردن رضایت

مشتریان از طریق کاهش زمان انتظار، هدف دوم است.

بدیهی است که در این شرایط، همه مشتریان اهمیت

یکسان ندارند و افزایش رضایت بعضی از آن‌ها، دارای

اهمیت بیشتری است. از این‌رو، با اولویت‌بندی مشتریان و

ارائه ضرایب اهمیت، زمان انتظار مشتریان اولویت‌دار حداقل

می‌شود. هر مشتری، یک بازه زمانی انتظار مختص خود را

دارد که شامل حداقل و حداکثر زمان مورد انتظار برای

دریافت خدمت است. این بدان معناست که تولیدکننده

موظف است در بازه زمانی مشخصی به مشتری

خدمت‌رسانی کند.

متوسط زمان انتظار مشتری $E(W)$ برابر با مدتی است

که مشتری از لحظه ارسال سفارش تا دریافت کالا منتظر

می‌ماند. این زمان خدمت‌رسانی نیز برای هر مشتری به

موقعیت انباری که به آن اختصاص یافته و جایگاه او در تور

وسیله نقلیه بستگی دارد. برای محاسبه مدت انتظار هر

مشتری، از رابطه زیر استفاده می‌کنیم:

$$H = I \cup J = \{h; h = 1, 2 \dots n + m\}$$

مجموعه وسایل نقلیه:

$$V = \{v; v = 1, 2 \dots \infty\}$$

F_j : هزینه ثابت احداث انبار در مکان بالقوه j ؛

S_j : ظرفیت سرویس سالیانه انبار j ؛

VC : ظرفیت سرویس سالیانه وسایل نقلیه؛

d_i : متغیر تصادفی میزان تقاضای سالیانه مشتری i که

از توزیع نرمال با میانگین μ_i و انحراف معیار δ_i پیروی می‌کند.

t_{gh} : زمان حمل‌ونقل (برحسب سال) بین دو گره g و h ($g, h \in H$)

m_j : هزینه ارسال مستقیم هر واحد کالا از کارخانه به انبار j ؛

C_{gh} : هزینه حمل‌ونقل یک واحد کالا بین دو گره g و h

($g, h \in H$)

η : ضریب اطمینان محدودیت‌های احتمالی؛

h_j : هزینه نگهداری هر واحد کالا در سال در انبار j ؛

a_j : هزینه ثابت سفارش کالا از انبار j به کارخانه؛

$t_{i \min}$: حداقل زمانی که مشتری i تمایل دارد برای

دریافت هر واحد تقاضا منتظر بماند؛

$t_{i \max}$: حداکثر زمانی که مشتری i تمایل دارد برای

دریافت هر واحد تقاضا منتظر بماند؛

PR_i : ضریب اهمیت مشتری i ؛

t_h : زمان رسیدن وسیله نقلیه به نقطه h ($h \in H$)؛

α : درصدی از تقاضای مشتری که باید برآورده شود؛

t_j : مدت تحویل کالا به انبار j ؛

Q_j : میزان سفارش‌دهی سیستم موجودی انبار j .

$$X_j = \begin{cases} 1 & \text{اگر در مسیر } v, \text{ گره } g \text{ به‌طور مستقیم به گره } h \\ & \text{وصل شده باشد} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

$$Y_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{اگر انبار } j \text{ باز شود} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

$$Z_{ghv} = \begin{cases} 1 & \text{اگر مشتری } i \text{ به انبار } j \text{ تخصیص یابد} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} Z_{jiv} \leq 1 \quad \forall v \in V \quad (12)$$

$$\sum_{g \in R} \sum_{h \in R} \sum_{v \in V} Z_{ghv} \geq 1 \quad \forall (R, \bar{R}) \quad R \subset H, J \subseteq R \quad (13)$$

$$-Y_{ij} + \sum_{h \in H} (Z_{ihv} + Z_{jlv}) \leq 1 \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall v \in V \quad (14)$$

$$Y_{ij} \leq X_j \quad \forall j \in J, \forall i \in I \quad (15)$$

$$Z_{ghv} \in \{0,1\} \quad \forall g, h \in H, \forall v \in V \quad (16)$$

$$Y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (17)$$

$$X_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (18)$$

$$Q_j > 0 \quad \forall j \in J \quad (19)$$

همان‌طور که ذکر شد، مدل دارای دو تابع هدف است. تابع هدف اول شامل حداقل کردن هزینه کل، متشکل از هزینه‌های ثابت احداث انبار، مسیریابی سالیانه و هزینه‌های موجودی، و تابع هدف دوم شامل حداکثرسازی رضایت مشتری است. محدودیت ۸، محدودیت شانس ظرفیت سرویس انبار است. با استفاده از این محدودیت، مقادیر Y_{ij} به‌نحوی تعیین می‌شوند که حداقل در η درصد مواقع، مجموع تقاضای سالیانه مشتریان اختصاص یافته به انبار، از ظرفیت انبار کمتر باشد. محدودیت ۹ بیانگر محدودیت شانس ظرفیت سرویس وسیله نقلیه است. با استفاده از این محدودیت، مقادیر Y_{ij} به‌نحوی تعیین می‌شوند که حداقل در η درصد مواقع، مجموع تقاضای سالیانه مشتریان اختصاص یافته به یک مسیر (وسیله نقلیه) از ظرفیت آن وسیله نقلیه کمتر باشد. از طریق محدودیت ۱۰ اطمینان حاصل می‌شود که هر مشتری، فقط در یک مسیر قرار می‌گیرد. محدودیت ۱۱ تضمین می‌کند که تعداد کمان‌های ورودی و خروجی به هر گره با هم برابرند. در هر مسیر، فقط یک انبار وجود دارد و تنها یک بار خروج از آن انبار صورت می‌گیرد؛ بنابراین، محدودیت ۱۲، از سفر به

$$E(W_i) = \sum_{v \in V} \sum_{h \in H} Z_{hiv} (t_h + t_{hi}) \quad (3)$$

این رابطه نشان می‌دهد مدتی که هر مشتری منتظر دریافت کالا می‌ماند، برابر است با زمانی که وسیله نقلیه به مشتری قبل در توالی خدمت‌رسانی کرده است، به‌علاوه مدت حمل‌ونقل بین این دو مشتری. در ادامه، تابع ریاضی رضایت مشتری تعریف می‌شود:

تابع رضایت مشتری

$$F(t_i) = \begin{cases} 1 & E(W_i) < t_{i_{\min}} \\ \frac{t_{i_{\max}} - E(W_i)}{t_{i_{\max}} - t_{i_{\min}}} & t_{i_{\min}} < E(W_i) < t_{i_{\max}} \\ 0 & E(W_i) > t_{i_{\max}} \end{cases} \quad (4)$$

بنابراین، تابع هدف دوم به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$MaxZ_2 = \sum_{i \in I} \frac{PR_i F(t_i)}{\sum_{i \in I} PR_i} \quad (5)$$

با توجه به توضیحات ارائه‌شده، مسئله به‌صورت زیر مدل‌سازی می‌شود:

$$MinZ_1 = \sum_{j \in J} (F_j X_j + h_j \frac{Q_j}{2} + \frac{\sum_{i \in I} \mu_i Y_{ij}}{Q_j} a_j) + h_j Z_\alpha \sqrt{t_j \sum_{i \in I} \sigma_i^2 Y_{ij}} + \sum_{v \in V} \sum_{g \in H} \sum_{h \in H} Z_{ghv} C_{gh} \mu_h + \sum_{j \in J} m_j \sum_{i \in I} Y_{ij} \mu_i \quad (7)$$

$$MaxZ_2 = \sum_{i \in I} \frac{PR_i F(t_i)}{\sum_{i \in I} PR_i} \quad \text{Subject to} \quad (8)$$

$$Prob(\sum_{i \in I} \sum_{h \in H} d_i Z_{ihv} \leq VC) \geq \eta \quad \forall v \in V \quad (9)$$

$$Prob(\sum_{i \in I} d_i Y_{ij} \leq S_j) \geq \eta \quad \forall j \in J \quad (10)$$

$$\sum_{v \in V} \sum_{h \in H} Z_{ihv} = 1 \quad \forall i \in I \quad (11)$$

$$\sum_{\substack{g \in H \\ g \neq h}} Z_{ghv} - \sum_{\substack{g \in H \\ g \neq h}} Z_{hgv} = 0 \quad \forall h \in H, \forall v \in V \quad (11)$$

با جایگذاری این مقدار در رابطه ۶، مسئله به صورت زیر فرموله می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{Min} Z_1 &= \sum_{j \in J} (F_j X_j + \sqrt{2 \sum_{i \in I} \mu_i Y_{ij} a_j h_j} + h_j Z_\alpha \sqrt{t_j \sum_{i \in I} \sigma_i^2 Y_{ij}}) \\ &+ \sum_{v \in V} \sum_{g \in H} \sum_{h \in I} Z_{ghv} C_{gh} \mu_h + \sum_{j \in J} m_j \sum_{i \in I} Y_{ij} \mu_i \\ \text{Max} Z_2 &= \sum_{i \in I} \frac{PR_i F(t_i)}{\sum_{i \in I} PR_i} \end{aligned}$$

Subject to (9)-(20)

Where (3)-(4)

روش حل ترکیبی

دو زیرمسئله اصلی مسئله مکان‌یابی- مسیریابی- موجودی، مسائل مکان‌یابی- تخصیص و مسیریابی وسیله نقلیه هستند. از آنجاکه هر دو زیرمسئله مذکور NP-Hard هستند، مسئله مکان‌یابی- مسیریابی نیز NP-Hard محسوب می‌شود [۳۴]. از این‌رو، مسئله مکان‌یابی- مسیریابی- موجودی هم که پیچیده‌تر از مسئله مکان‌یابی- مسیریابی است، در دسته مسائل NP-Hard قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه روش‌های سنتی بهینه‌یابی برای حل مسائل NP-Hard مناسب نیستند و به دست آوردن حل بهینه برای مسائل مورد نظر در ابعاد بالا در زمان، به وسیله رویکردهای سنتی و ابزارهای بهینه‌یابی متداول بسیار دشوار است، از الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل آن استفاده می‌شود [۳۵]. در این پژوهش، یک الگوریتم فراابتکاری ترکیبی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و تبرید شبیه‌سازی شده ارائه شده است. این روش ترکیبی، براساس این واقعیت ایجاد شده است که در مورد یک فضای جست‌وجوی بزرگ، الگوریتم ژنتیک ممکن است قادر به همگراشدن به جواب بهینه نباشد، زیرا این الگوریتم، به بررسی بیش‌از حد بسیاری از زیربخش‌های فضای جست‌وجو می‌پردازد و این امر نیز زمان اجرای زیادی را می‌طلبد؛ در حالی که روش تبرید شبیه‌سازی شده ممکن است قادر نباشد که همه فضای جست‌وجو را به خوبی کاوش کند و در نتیجه، به یک بهینه محلی همگرا شود [۳۶]. از این‌رو، در این مقاله، از الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده به عنوان

سایر مشتریانی که در همان مسیر قرار دارند، جلوگیری می‌کند و نیز مانع از این می‌شود که بیش از یک انبار به آن مسیر اختصاص یابد. محدودیت ۱۳ که به محدودیت اتصال شهرت دارد، بیانگر آن است که حداقل یک اتصال از یک مجموعه شامل انبارها و مشتریان، به مجموعه‌ای از سایر مشتریان وجود دارد. محدودیت ۱۴ نیز وظیفه اتصال تصمیم‌های مسیریابی به تخصیص را برعهده دارد؛ یعنی اگر یک مسیر از یک مشتری به انبار وجود داشته باشد، آن مشتری حتماً باید به آن انبار تخصیص داده شود. محدودیت ۱۵ نیز تضمین می‌کند که مشتریان، تنها به انبارهای باز شده تخصیص می‌یابند. محدودیت‌های ۱۶ تا ۱۹ نیز نوع متغیرها و دامنه تعریف آن‌ها را معرفی می‌کنند.

تبدیل محدودیت‌های احتمالی به محدودیت‌های قطعی

دارای توزیع نرمال با میانگین $\sum_{i \in I} d_i Y_{ij}$ و واریانس $\sum_{i \in I} \sigma_i^2 Y_{ij}^2$ است. از آنجاکه Y_{ij} یک متغیر باینری است، $Y_{ij} = Y_{ij}^2$ ، محدودیت احتمالی γ به محدودیت قطعی زیر تبدیل می‌شود:

$$\sum_{i \in I} \mu_i Y_{ij} + (\Phi^{-1}(\eta)) \cdot \sqrt{\sum_{i \in I} \sigma_i^2 Y_{ij}} \leq S_j \quad (20)$$

به همین ترتیب، برای محدودیت ظرفیت وسیله نقلیه داریم:

$$\sum_{i \in I} \sum_{h \in H} \mu_i Z_{ihv} + (\Phi^{-1}(\eta)) \cdot \sqrt{\sum_{i \in I} \sum_{h \in H} \sigma_i^2 Z_{ihv}} \leq VC \quad (21)$$

در مدل ارائه شده، متغیر تصمیم Q_j ، تنها در تابع هدف وجود دارد. از این‌رو، از آنجاکه تابع هدف به ازای مقادیر $Q_j > 0$ محدب است، می‌توان با مشتق گرفتن از تابع هدف نسبت به Q_j ، مقدار بهینه آن را به صورت زیر محاسبه کرد:

$$Q_j^* = \sqrt{\frac{2 \sum_{i \in I} \mu_i Y_{ij} a_j}{h_j}} \quad (22)$$

برای محاسبه نقطه سفارش‌دهی هر انبار داریم:

$$r_j = \sum_{i \in I} d_i Y_{ij} + Z_\alpha \sqrt{t_j \sum_{i \in I} \sigma_i^2 Y_{ij}} \quad (23)$$

بردار $A(x) = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ نشانگر مجموعه انبارهای باز شده و مشتریان اختصاص یافته به آن هاست (n تعداد مشتری هاست)؛ برای مثال، $a_1=1$ به این معناست که مشتری ۱ به انبار ۱ تخصیص یافته است.

بردار $P(x) = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ بردار جایگشتی است که رتبه مشتریان را در یک مسیر مشخص تعیین می کند. شکل ۱ دربرگیرنده یک مثال ساده به منظور نشان دادن نحوه نمایش جواب است. فرایند رمزگشایی کروموزوم نیز شامل موارد زیر می شود:

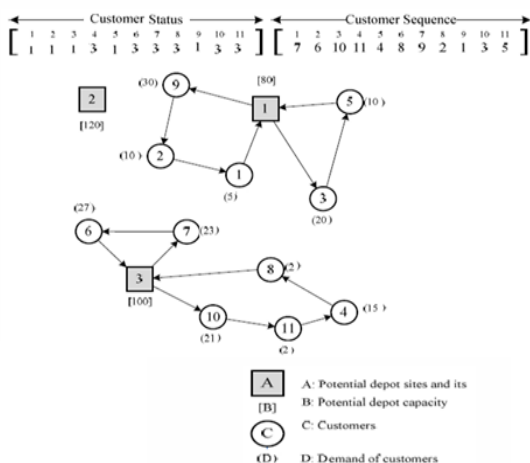
تعیین انبارهای باز شده و تخصیص مشتریان از طریق

بردار $A(x)$

تعیین مسیرها از طریق بردار $P(x)$

در مثال شکل ۱، مشتری های ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ به انبار ۱ و مشتری های ۶، ۷، ۸، ۹ و ۱۰ به انبار ۲ اختصاص یافته اند و انبار ۳ باز نشده است. برای تعیین مسیر تحویل تقاضای مشتریان تخصیص یافته، برای مثال به انبار ۱ به صورت زیر عمل می شود. بدین صورت که رتبه مشتریان اختصاص یافته به این انبار، یعنی مشتری های ۱، ۲، ۳ و ۵ از بردار $P(x)$ استخراج می شود:

$1 \rightarrow 9, 2 \rightarrow 8, 3 \rightarrow 10, 4 \rightarrow 5, 5 \rightarrow 11$



شکل ۱. نحوه نمایش جواب

توالی مشتریان، به ترتیب رتبه آن ها به صورت صعودی در بردار جایگشت $P(x)$ تعیین می شود؛ یعنی ابتدا مشتری ۹ خدمت می گیرد، بعد مشتری ۲ و به همین ترتیب

یک جست و جوگر محلی برای پالایش فضای جست و جوی الگوریتم ژنتیک، از طریق تکرارهای پی در پی و به حداکثر رساندن شانس همگرایی به یک راه حل بهینه استفاده شده است. در ادامه، طرح کلی الگوریتم ترکیبی GA و SA ارائه می شود. این ترکیب، امکان استفاده از ویژگی های الگوریتم SA را به منظور بهبود جمعیت تولید شده در GA فراهم می کند و به این ترتیب، روند جست و جوی الگوریتم ژنتیک بهبود می یابد.

Algorithm 1: Combination of Genetic Algorithm with Simulated Annealing

- 1 Define Initial Parameters (Popsiz, Pd, Pc, NonImproveNumber, Sigma);
- 2 $F_{EVAL(best)} \leftarrow \infty$;
- 3 Create Initial Population;
- 4 While termination criterion is not satisfied do
- 5 Select parents for Crossover;
- 6 Apply Crossover to parents;
- 7 Let S_{new} be the new obtained child;
- 8 Apply mutation to S_{new} ;
- 9 if $F_{EVAL}(S_{new}) < (1+\sigma) F_{EVAL}(best)$
- 10 Apply Simulated Annealing with S_{new} ;
- 11 Update $F_{EVAL}(best)$;
- 12 Apply Replacement to pop;

الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک، در واقع استخوان بندی اولیه الگوریتم ترکیبی را تشکیل می دهد که در ادامه تشریح می شود:

پارامترهای اولیه الگوریتم ژنتیک

Popsiz: اندازه جمعیت

Pd: احتمال جهش در بردار انبار

Pc: احتمال جهش در بردار مشتری

NonImproveNumber: تعداد تکرارهای بدون بهبود در

الگوریتم (شرط خاتمه)

Sigma(σ): درصد فاصله قابل قبول با بهترین جواب

تولید شده به منظور اجرای الگوریتم تبرید شبیه سازی شده بر

یک جواب معین از الگوریتم ژنتیک

نحوه نمایش جواب

هر جواب x ، یعنی یک کروموزوم، با استفاده از دو بردار $A(x)$ و $P(x)$ نمایش داده می شود.

$$L=3, L'=5$$

3	2	4	5	8	6	7	1
---	---	---	---	---	---	---	---

3	2	5	8	4	6	7	1
---	---	---	---	---	---	---	---

شکل ۳. نحوه اجرای عملیات جهش بر بردار مسیر P (در شرایط $L < L'$)

$$L=6, L'=2$$

3	2	4	5	8	6	7	1
---	---	---	---	---	---	---	---

3	6	2	4	5	8	7	1
---	---	---	---	---	---	---	---

شکل ۴. نحوه اجرای عملیات جهش بر بردار مسیر P (در شرایط $L > L'$)

تابع برازندگی

همان‌طور که اشاره شد، مسئله مورد نظر، از دو تابع با رویکرد حداقل کردن هزینه‌ها (Z_1) و حداکثر کردن رضایت مشتری (Z_2) تشکیل شده است. مقدار تابع برازندگی برای مقایسه کیفیت دو جواب منحصربه‌فرد، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$F_{evaluation}(x) = (1-wZ_2)Z_1 \quad (24)$$

که در آن، تصمیم‌گیرنده مقدار w را انتخاب می‌کند.

$$= Cost(x) + Penalty(x) Z_1 \quad (25)$$

$Cost(x)$ هزینه کل حل مسئله LRIP است که به وسیله جواب منحصربه‌فرد x به دست آمده است و $Penalty(x)$ نیز جریمه تخطی از محدودیت‌های ظرفیت سرویس انبار و ظرفیت سرویس وسیله نقلیه است. از تابع جریمه به این منظور استفاده می‌شود که جواب منحصربه‌فرد x تا حد ممکن نزدیک به ناحیه شدنی باشد.

(۲۶)

$$Penalty(x) = \sum_{j \in J} \theta \cdot \max\left\{ \left(\sum_{i \in I} \mu_i Y_{ij} + (\phi^{-1}(\eta)) \sqrt{\sum_{i \in I} \sum_{h \in H} \sigma_i^2 Y_{ij} - S_j} \right), 0 \right\} + \sum_{j \in J} \theta \cdot \max\left\{ \left(\sum_{i \in I} \mu_i Z_{ihv} + (\phi^{-1}(\eta)) \sqrt{\sum_{i \in I} \sum_{h \in H} \sigma_i^2 Z_{ihv} - VC} \right), 0 \right\}$$

که در این رابطه، θ پارامتری ثابت و منعکس‌کننده درجه جریمه‌ای است که یک جواب نشدنی بر تابع هزینه تحمیل می‌کند. η نیز مقدار سطح اطمینان محدودیت شانس است.

نحوه انتخاب والدین

انتخاب والدین، به روش رتبه‌ای صورت می‌گیرد. در این روش، ابتدا جمعیت براساس مقادیر برازندگی افراد مرتب می‌شود و

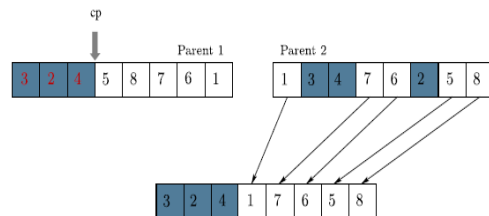
مشتریان ۱ و ۳ و ۵ مشتریان بعدی دریافت‌کننده خدمت هستند. تخصیص مشتریان به هر مسیر نیز تا زمانی انجام می‌شود که ظرفیت وسیله نقلیه (در این مثال ۵۰) اجازه تخصیص مشتریان را به مسیر می‌دهد.

تولید جمعیت اولیه

تولید جمعیت اولیه به صورت تصادفی انجام می‌شود. هر مشتری، به صورت تصادفی به یکی از انبارهای موجود اختصاص می‌یابد و بردار $A(x)$ ایجاد می‌شود. بردار جایگشت $P(x)$ نیز با تولید یک توالی تصادفی از n مشتری به دست می‌آید. این کار به اندازه تعداد افراد جمعیت تکرار می‌شود تا جمعیت اولیه الگوریتم ژنتیک ایجاد شود.

عملیات تقاطع

برای بهبود بردار تخصیص A ، از عملیات تقاطع تک‌نقطه‌ای استفاده می‌شود. نقطه تقاطع c_p به طور یکنواخت از بازه ۱ تا n (تعداد مشتریان) انتخاب می‌شود. برای انجام دادن عملیات تقاطع بردار مسیر، از روش تقاطع ترتیبی استفاده شده است. نقطه تقاطع c_p به طور یکنواخت از بازه ۱ تا n (تعداد مشتریان) انتخاب می‌شود. شکل ۲، نحوه اجرای عملیات تقاطع را بر بردار مسیر P نشان می‌دهد.



شکل ۲. نحوه اجرای عملیات تقاطع بر بردار مسیر P

عملیات جهش

برای اجرای عملیات جهش در بردار تخصیص A ، یک مشتری به تصادف انتخاب می‌شود و به انبار دیگری از فهرست انبارهای بالقوه اختصاص می‌یابد. در این حالت، امکان بازشدن انبار جدید نیز وجود دارد که خود به متنوع کردن فضای جست‌وجو می‌انجامد. برای اجرای عملیات جهش بردار مسیر $P(x)$ ، یک مشتری P_L و یک مکان جدید L' برای این مشتری به صورت تصادفی انتخاب می‌شود. مثال شکل ۳، نشانگر نحوه اجرای عملیات جهش بر بردار مسیر P است.

14 if $\Delta s \leq 0$
 15 Solution=Newsolution;
 16 elseif rand< exp (- Δs /Temperature)
 17 Solution=Newsolution
 18 End for
 19 Update Temperature

جواب اولیه الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده، به وسیله عملگرهای ژنتیک محاسبه می‌شود. در صورتی که فرزند تولید شده، به وسیله عملگرهای ژنتیک کوچک‌تر از $1+\sigma$ برابر بهترین جواب به دست آمده باشد، الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده، به عنوان یک جست‌وجوگر محلی عمل می‌کند.

پارامترهای اولیه الگوریتم تبرید شبیه‌سازی -

شده

T0: دمای اولیه

Tfinal: دمای نهایی

Beta: بتا (نرخ کاهش دما)

Iteration: تعداد تکرارها در هر دما

نحوه تولید همسایگی

در الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده در این مقاله، از پنج ساختار همسایگی $N1$ ، $N2$ ، $N3$ ، $N4$ و $N5$ برای تولید همسایگی از جواب فعلی استفاده می‌شود.

ساختار همسایگی $N1$: در ساختار همسایگی $N1$ ، دو مشتری به تصادف انتخاب می‌شوند. این دو مشتری ممکن است به دو انبار یکسان یا دو انبار متفاوت اختصاص داشته باشند یا متعلق به دو مسیر یکسان یا متفاوت باشند. سپس جای این دو مشتری با هم عوض می‌شود.

ساختار همسایگی $N2$: یک مشتری به تصادف انتخاب می‌شود و از یک انبار به صورت تصادفی به یکی از انبارهای باز شده تخصیص می‌یابد.

ساختار همسایگی $N3$: یک مسیر به تصادف انتخاب می‌شود و یک مشتری بین دو مشتری دیگر قرار می‌گیرد.

ساختار همسایگی $N4$: یک انبار باز شده به تصادف انتخاب و جای دو مشتری آن با هم عوض می‌شود.

در هر تکرار از الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده، همسایگی‌های جواب فعلی با استفاده از راهبردهای حرکت $N1$ ، $N2$ ، $N3$ و $N4$ تولید می‌شود و بهترین آن‌ها به عنوان

سپس به هر کروموزوم احتمال انتخابی براساس رتبه آن در جمعیت نسبت داده می‌شود. این احتمال برابر است با:

$$P([k]) = \frac{2k}{M(M+1)} \quad (27)$$

که در آن، M تعداد افراد جمعیت و K رتبه فرد در جمعیت است. سپس با استفاده از روش چرخ رولت، ۲ والد برای تولید نسل بعدی انتخاب می‌شوند.

عملیات جایگذاری

عملیات جایگذاری، آخرین مرحله الگوریتم ژنتیک است که برای ثابت نگه داشتن اندازه جمعیت به کار می‌رود. رویکرد به کاررفته در این مقاله به این صورت است که فرزند جدید تولید شده (از طریق عملگرهای الگوریتم ژنتیک یا بهبود یافته آن از طریق الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده)، با بدترین جواب موجود در جمعیت مقایسه می‌شود و هر کدام که برازندگی کمتری دارد، از جمعیت حذف می‌شود.

معیار خاتمه

در صورتی که در تعداد مشخصی تکرار بهبودی در جواب حاصل نشود، الگوریتم متوقف می‌شود.

الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده

الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده به عنوان یک الگوریتم جست‌وجوی محلی، به منظور بهبود فرزندان تولید شده به وسیله اپراتورهای ژنتیک به کار می‌رود و به هدایت بهتر فرایند جست‌وجو می‌انجامد. شبه‌کد این الگوریتم، در ادامه قابل مشاهده است.

Algorithm 2: Simulated Annealing

- 1 Define Initial Parameters
- 2 Let X_0 be an initial solution producing by Genetic Operators;
- 3 Solution = X_0 ;
- 4 Temperature = T_0
- 5 While Temperature $\geq T_{final}$ Do
- 6 for $i=1$: Iteration Do
- 7 Generate neighbors of the current solution by using ($N1$, $N2$, $N3$ and $N4$) moving strategies
- 8 Choose the best one among the ($N1$, $N2$, $N3$ and $N4$) neighbors as a NewSolution for the problem
- 9 if $F_{EVAL}(\text{NewSolution}) < F_{EVAL}(\text{Solution})$
- 10 Generate neighbor of NewSolution by $N5$
- 11 Update NewSolution
- 12 End if
- 13 $\Delta S = F_{EVAL}(\text{NewSolution}) - F_{EVAL}(\text{Solution})$;

تنظیم پارامترها

انتخاب مقادیر مناسب برای پارامترها ممکن است بر کیفیت نتایج محاسباتی تأثیر بگذارد. برای تنظیم پارامترها، مطابق آنچه یو و همکاران [۳۷] و تینگ و چن [۳۸] به ترتیب در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۳ انجام دادند، از مجموعه‌ای از آزمایش‌های اولیه روی داده‌های موجود در ادبیات برای شناسایی تنظیمات پارامتر مناسب استفاده شد که به‌طور کلی در بیشتر موارد به نتایج خوب منجر شدند (حتی اگر آن تنظیمات بهینه برای همه موارد نباشند). نحوه انجام گرفتن کار به این صورت بود که با ثابت در نظر گرفتن تمامی پارامترها و سپس تغییر یکی از آن‌ها، مقدار مناسب هر پارامتر، در شرایطی که به‌طور کلی در بیشتر موارد به نتایج خوب انجامید، استخراج و گزارش شد. در الگوریتم ترکیبی ارائه‌شده، تعداد زیادی پارامتر وجود داشت که مقادیری از آن‌ها که در آزمایش‌ها به کار گرفته شد، در جدول ۲ ارائه می‌شود. این جدول، نشانگر بازه مقادیر تست‌شده برای هر پارامتر و مقدار نهایی استفاده‌شده در الگوریتم است که در اجراهای مختلف، به ایجاد بهترین جواب‌ها منجر شده است. شایان ذکر است از آنجاکه در این الگوریتم خواستار تولید جواب‌های شدنی هستیم، مقدار θ در تابع پنالیتی برابر با یک مقدار بزرگ (۱۰۰۰) قرار دادیم تا الگوریتم را مجبور به تولید جواب‌های شدنی کنیم. علاوه بر این، سطح اطمینان محدودیت شانس $0.9 = \phi^{-1}$ فرض شده است. در نتیجه، مقادیر $1.28 = \phi^{-1}(0.9)$ و $-0.046 = \log(0.9)$ در رابطه ۲۶ جایگذاری شده‌اند.

راه‌حل جدید مسئله (New Solution) انتخاب می‌شود. در صورتی که بهترین جواب جدید تولیدشده به‌وسیله راهبردهای همسایگی $N1, N2, N3$ و $N4$ از جواب فعلی بهتر بود، نوبت به ایجاد همسایگی $N5$ می‌رسد.

ساختار همسایگی $N5$: در ساختارهای همسایگی فوق، حرکت‌های محلی، تنها مرتبط با انبارهای باز است. در واقع، به‌طور منطقی، حرکت محلی به سمت یک انبار بسته به دلیل داشتن هزینه‌های احداث عمدتاً بالا ممکن است به بدتر شدن تابع ارزیابی منجر شود. در عین حال، باز شدن یک انبار بسته نیز ممکن است در ایجاد تنوع در بردار جواب مؤثر باشد. در این ساختار، یک انبار باز بسته می‌شود و مشتری‌های آن به صورت تصادفی به یک انبار دیگر (باز یا بسته) اختصاص می‌یابند. این کار، موجب افزایش تنوع فضای جست‌وجو می‌شود. در واقع، این ساختار همسایگی، نقش ایجاد آشفتگی در فضای جست‌وجو را دارد و تنها زمانی استفاده می‌شود که به بهبود در جواب بینجامد.

تنظیم دما

برای کاهش دما در هر مرحله از الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده، از تابع کاهش دمای هندسی $T_k = \beta * T_{k-1}$ استفاده می‌کنیم. در این تابع، β نرخ کاهش دماست.

نتایج محاسباتی

الگوریتم پیشنهادی که در قسمت قبل به‌طور کامل تشریح شد، با استفاده از زبان برنامه‌نویسی متلب کدنویسی شده و در کامپیوتری با مشخصات Intel Core 2 Duo CPU GHz و تحت ویندوز ویستا با حافظه 3 GB اجرا شده است.

جدول ۲. تنظیم پارامترها

مقدار برگزیده	بازه تست‌شده	نماد پارامتر در الگوریتم
پارامترهای الگوریتم ژنتیک		
۲۰	[۱۰, ۵۰]	Popsize
۰/۹	[۰/۸۵, ۰/۹۵]	Pd
۰/۷	[۰/۶۵, ۰/۸۵]	Pc
۱۰۰۰	[۱۰۰, ۱۰۰۰]	NonImprove Number
۰/۱	[۰/۱, ۰/۹]	(σ) Sigma
پارامترهای الگوریتم تبرید شبیه‌سازی‌شده		
۳۰۰	[۱۰۰, ۶۵۰]	T_0
۰/۱۵	[۰/۰۵, ۰/۲۰]	Tfinal
۰/۹۵	[۰/۸, ۰/۹۹]	Beta
۱۰	[۱۰, ۱۰۰]	Iteration

جدول ۳. نتایج مسائل نمونه بار تو

SA-GA		Gra sp + ILP		SA		MA PM		BKS	ظرفیت وسیله نقلیه	مسئله نمونه
Gap	Cost	Gap	Cost	Gap	Cost	Gap	Cost			
۰	۵۶۵/۶	۰/۷۸	۵۷۰/۰	۰	۵۶۵/۶	۰	۵۶۵/۶	۵۶۵/۶	۱۶۰	Ch69 50x5
۰	۸۴۴	۰	۸۴۴	۰/۴۳	۸۴۸	۲/۵۷	۸۶۶/۸	۸۴۴/۴	۱۶۰	Ch6 9 75x1 0
۰/۴۴	۸۳۷/۸	۱	۸۴۱/۷	۰/۵۹	۸۳۸/۳	۲/۰۱	۸۵۰/۸	۸۳۳/۴	۲۰۰	Ch69 100x1 0
۰	۲۵۵/۸	۰	۲۵۵/۸	۰	۲۵۵/۸	۰	۲۵۵/۸	۲۵۵/۸	۹۰۰۰۰۰۰	Da95 88x8
۰/۶۹	۴۳۳۵/۸	۰/۵۹	۴۳۱۷/۰	۲/۷۱	۴۵۱۰/۰	۰/۲۱	۴۴۰۱/۷	۴۳۱۹/۹	۸۰۰۰۰۰۰	Da95 150x10
۰	۴۲۴/۹	۰	۴۲۴/۹	۰	۴۲۴/۹	۰	۴۲۴/۹	۴۲۴/۹	۶۰۰۰	Ga67 21x5
۰	۵۸۵/۸	۰	۵۸۵/۸	۰	۵۸۵/۸	۴/۵۶	۶۱۷/۸	۵۸۵/۸	۴۵۰۰	Ga67 22x5
۰	۵۱۲/۸	۰	۵۱۲/۸	۰	۵۱۲/۸	۰	۵۱۲/۸	۵۱۲/۸	۴۵۰۰	Ga67 29x5
۰	۵۲۲/۲	۰	۵۲۲/۲	۰	۵۲۲/۲	۱/۷۲	۵۷۱/۹	۵۶۲/۲	۸۰۰۰	Ga67 32x5
۰	۵۰۴/۳	۰	۵۰۴/۳	۰	۵۰۴/۳	۶/۰۳	۵۳۲/۷	۵۰۲/۳	۱۱۰۰۰	Ga67 32x5
۰	۴۶۰/۴	۰	۴۶۰/۴	۰	۴۶۰/۴	۵/۴۳	۴۸۵/۴	۴۶۰/۴	۲۵۰	Ga67 36x5
۰	۳۰۶۲/۰	۰	۳۰۶۲/۰	۰	۳۰۶۲/۰	۰	۳۰۶۲/۰	۳۰۶۲/۰	۲۵۰۰	Min92 27x5
۰	۵۷۰۹/۰	۰/۱۸	۵۷۱۹/۳	۰	۵۷۰۹/۰	۴/۲۲	۵۹۵/۰	۵۷۰۹/۰	۸۵۰	Min92 134x8
۰	۲۰۴/۰	0	۲۰۴/۰	۰	۲۰۴/۰	-	-	۲۰۴/۰	۱۴۰	Per83 12x2
۰/۰۴	۱۱۱۲/۵	۰/۰۴	۱۱۱۲/۳	۰/۰۶	۱۱۱۲/۸	-	-	۱۱۱۲/۸	۱۲۰	Per83 55x15
۰/۰۸	۱۶۳۳/۸	۰/۰۹	۱۶۳۳/۹	0	۱۶۳۳/۵	-	-	۱۶۳۳/۵	۱۶۰	Per83 85x7
۰/۰۸		۰/۱۷		۰/۲۴		۲/۰۵				Ave Gap

نمونه‌های تستی

به منظور ارزیابی الگوریتم حل ارائه شده، تست‌های محاسباتی روی نمونه مسائل بار تو [۳۹] در ادبیات مسئله مکان‌یابی - مسیریابی ظرفیت‌دار انجام گرفت. در این مجموعه، میزان تقاضا و مختصات مکانی مشتریان، ظرفیت و مختصات مکانی انبارها و ظرفیت وسایل نقلیه ارائه شد. فاصله بین دو گره، با استفاده از فاصله مختصاتی محاسبه شد. اجرای هر نمونه، ۱۰ بار به وسیله الگوریتم صورت گرفت و بهترین جواب به دست آمده گزارش شد. الگوریتم ارائه شده در این مقاله، با سه روش موجود در ادبیات مسئله مکان‌یابی - مسیریابی ظرفیت‌دار مقایسه و نتایج در جدول ۳ منعکس شد. این سه روش عبارت‌اند از: الگوریتم ممتیک با مدیریت جمعیت ۵ (MAPM) در [۴۰]، الگوریتم ابتکاری تیرید شبیه‌سازی شده (SA) در [۳۷] و الگوریتم ترکیبی جست‌وجوی حریم‌ساز^۶ و برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح (GRASP + ILP) در [۴۱]. در جدول ۳ هزینه هر راه‌حل، با بهترین جواب موجود در ادبیات مسئله^۷ مقایسه شده و انحراف راه‌حل به دست آمده از BKS با استفاده از رابطه زیر محاسبه شده است.

(۲۸)

$$Gap(BKS) = \frac{Cost - BKS}{BKS} * 100$$

همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، با این روش حل می‌توان بهترین جواب را برای ۱۲ نمونه تولید کرد. در سایر موارد، نه تنها جواب به دست آمده به بهترین جواب موجود بسیار نزدیک است، بلکه پایین‌ترین مقدار انحراف از آن را در میان سایر الگوریتم‌ها دارد که این امر بیانگر کارایی الگوریتم پیشنهادی برای طیف وسیعی از مسائل با اندازه‌های متفاوت است.

ارائه مثال عددی

به منظور نشان دادن کارایی مدل و الگوریتم پیشنهادی در حل مسئله مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی، در این بخش، یک مسئله نمونه ارائه و حل می‌شود. یک شرکت محصولات آشامیدنی در حال حاضر، نوعی نوشیدنی را در تنها یک کارخانه تولید می‌کند. ظرفیت‌های تولید محصول برای پر کردن تقاضای بازار، به اندازه کافی بالاست.

است و مقدار β_j ، به صورت تصادفی در بازه $[0.18, 1.2]$ تولید می‌شود. محاسبه هزینه ثابت احداث هر انبار نیز به صورت زیر صورت می‌گیرد:

$$F_j = [1.1 \times k'_j]$$

که در آن، مقدار k'_j به صورت تصادفی در بازه $[200, 400]$ تولید می‌شود. هزینه نگهداری، سفارش‌دهی و ارسال مستقیم هر انبار نیز با استفاده از توزیع یکنواخت، به ترتیب در بازه‌های $[0.1, 0.2]$ ، $[3, 5]$ و $[0.03, 0.05]$ تولید می‌شود. شایان ذکر است از آنجا که هدف، تولید جواب‌های شدنی است، مقدار θ در تابع جریمه و مقدار η (ضریب اطمینان محدودیت‌های احتمالی) به ترتیب برابر با مقادیر بزرگ ۱۰۰۰ و ۰.۹ تنظیم می‌شوند تا الگوریتم مجبور به تولید جواب‌های شدنی شود. مقدار α یعنی درصدی از تقاضای مشتری که باید برآورده شود، برابر ۹۷/۵ درصد قرار گرفته است. در نتیجه خواهیم داشت $Z_\alpha = 1.96$. از آنجا که در صنعت محصولات مصرفی مانند نوشابه، کسب رضایت مشتری از طریق تحویل به موقع کالا اهمیت زیادی دارد، $w=1$ قرار داده می‌شود.

یادآوری می‌شود w نمایانگر درصد اهمیت میزان رضایت مشتری در مسئله است و با افزایش w الگوریتم به سمت جواب‌هایی حرکت خواهد کرد که به افزایش هرچه بیشتر رضایت مشتریان منجر شود. مسئله ده بار به وسیله روش حل پیشنهادی، اجرا و بهترین نتیجه در جداولی مانند ۴ و ۵ گزارش می‌شود. شایان ذکر است که در این نتایج، گره‌های ۱ تا ۲۷ نشانگر گره‌های مشتریان و گره‌های ۲۸ تا ۳۲ به ترتیب نشان‌دهنده گره‌های انبارهای ۱ تا ۵ هستند.

۲۷ خرده فروش فعال (مشتریان) خواستار محصولات آشامیدنی وجود دارد. مختصات مکان انبارها و مشتریان، با استفاده از توزیع یکنواخت در بازه $[250, 1250]$ (برحسب کیلومتر) تولید می‌شود. محاسبه مسافت‌ها به صورت اقلیدسی صورت می‌گیرد. همچنین برای تبدیل مسافت‌های میان هر دو گره (d_{gh}) به زمان و هزینه، از روابط زیر استفاده می‌کنیم:

$$t_{gh} = \frac{d_{gh}}{24 \times 365 \times V_{gh}} \quad (29)$$

$$C_{gh} = d_{gh} Ck_{gh} \quad (30)$$

که در این روابط، V_{gh} سرعت وسیله نقلیه است که به صورت تصادفی در بازه $[30, 35]$ برحسب کیلومتر بر ساعت تولید شده است و Ck_{gh} هزینه حمل و نقل بین دو گره g و h به ازای واحد مسافت (کیلومتر) است که به صورت تصادفی در بازه $[0.005, 0.01]$ تولید می‌شود. ظرفیت سرویس سالیانه هر وسیله نقلیه نیز ۶۰۰ واحد کالا فرض می‌شود. میانگین و انحراف معیار تقاضا نیز به ترتیب با استفاده از توزیع یکنواخت در بازه $[20, 150]$ ، $[4, 12]$ (برحسب تعداد جعبه) تولید می‌شود. حداقل و حداکثر زمان انتظار مورد قبول هر مشتری و مدت تحویل نیز به ترتیب با استفاده از توزیع یکنواخت در بازه‌های $[1, 2]$ ، $[3, 5]$ و $[4, 5]$ تولید شده است. ضریب اولویت هر مشتری نیز برابر درصدی از متوسط میزان سفارش آن مشتری از متوسط کل سفارش‌های موجود است. $PR_i = \frac{\mu_i}{\sum_i \mu_i}$. میزان ظرفیت هر انبار با استفاده از رابطه $S_j = 2.5 \times [\beta_j \times \frac{D}{|J|}]$ محاسبه می‌شود که در آن، D برابر مجموع تقاضای همه مشتریان

جدول ۴. توالی خدمت‌گیری مشتریان در مسئله نمونه

	توالی خدمت‌گیری مشتریان								
۱	۳۰	۳	۹	۱۰	۱۱	۲۶	۲۷	۳۰	۱
۲	۳۰	۷	۸	۲	۱	۳۰			۲
۳	۳۲	۵	۶	۴	۱۷	۱۶	۲۴	۲۲	۳۲
۴	۳۲	۱۵	۱۴	۱۲	۱۳	۲۰	۱۹	۱۸	۳۲
۵	۳۲	۲۵	۳۲						

جدول ۵. خروجی‌های مسئله نمونه

انبارهای باز شده	نقطه سفارش‌دهی	میزان سفارش‌دهی	هزینه کل	درصد رضایت مشتری	تابع ارزیابی
۳	۶/۹۰	۲۹۸/۴	۱۱۹۴	۸۷/۵۸	۱۴۸/۴۳
۵	۷/۷۱	۳۵۷/۲			

نتیجه‌گیری

در این مقاله، مسئله مکان‌یابی-مسیریابی-موجودی با در نظر گرفتن تقاضای احتمالی بررسی شد و هدف آن بود که علاوه بر کمینه‌کردن مجموع هزینه‌های ثابت ایجاد انبارها، هزینه‌های حمل‌ونقل و هزینه‌های موجودی، افزایش رضایت مشتریان اولویت‌دار نیز از طریق کاهش زمان انتظار صورت پذیرد. به همین دلیل، یک مدل دوهدفه برنامه‌ریزی غیرخطی مختلط با فرض پیروی عامل تصادفی (تقاضا) از توزیع شناخته‌شده (نرمال) با استفاده از برنامه‌ریزی شانس محدودیت‌دار ارائه شد. علاوه بر این، به منظور حل مسئله ایجاد شده نیز با توجه به پیچیدگی‌های ذاتی آن، از یک الگوریتم ترکیبی ژنتیک/تبرید شبیه‌سازی شده استفاده شد. نتایج محاسباتی، بیانگر کارآبودن الگوریتم پیشنهادی در حل طیف گسترده‌ای از مسائل است. روند تحقیقاتی مقالات مربوط به مسئله مکان‌یابی-مسیریابی-موجودی نشان می‌دهد که در این حوزه، فرضیات ساده‌کننده بسیاری در مقالات در نظر گرفته شده که با وجود ساده‌تر شدن مسئله، آن را از شرایط واقعی دور می‌کند.

محدودیت‌های زیر را می‌توان به منظور انطباق هرچه بیشتر مسئله با مسائل دنیای واقعی در مطالعات آتی در نظر گرفت.

۱. دردسترس نبودن وسایل نقلیه و مسیرها در زمان‌های مشخص؛
 ۲. استفاده از ناوگان حمل غیرهمگن؛
 ۳. فرض وجود پنجره‌های زمانی سخت؛
 ۴. امکان وجود چندین سفر به ازای یک وسیله نقلیه؛
 ۵. وابستگی تقاضای مشتریان به یکدیگر؛
 ۶. وجود دوره‌های مختلف برنامه‌ریزی براساس شرایط متفاوت زنجیره در بازه‌های زمانی گوناگون.
- علاوه بر این، از آنجاکه الگوریتم به کاررفته در این مقاله تک‌هدفه بوده و دو تابع هدف به صورت ترکیبی تعریف شده است، ارائه روش حل به صورت چندهدفه برای به‌دست‌آوردن جواب‌های پارتو و همچنین استفاده از سایر الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل مسئله LRIP را نیز می‌توان به عنوان پیشنهادی برای مطالعات آتی در نظر گرفت.

مراجع

1. Salhi, S. and Rand, G. K. (1989). "The effect of ignoring routes when locating depots", *European Journal of Operational Research*, Vol. 39, No. 2, PP. 150–156.
2. Ahmadi Javid, A. and Seddighi, A. H. (2012). "A location-routing-inventory model for designing multisource distribution networks", *Engineering Optimization*, Vol. 44, No. 6, PP. 637–656.
3. Teimoury, E., Modarres, M., Ghasemzadeh, F. and Fathi, M. (2010). "A queueing approach to production-inventory planning for supply chain with uncertain demands: Case study of PAKSHOO Chemicals Company", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 29, No. 2, PP 55–62.
4. Min, H., Jayaraman, V. and Srivastava, R. (1998). "Combined location-routing problems: A synthesis and future research directions", *European Journal of Operational Research*, Vol. 108, No. 1, PP. 1–15.
5. Nagy, G. and Salhi, S. (2007). "Location-routing: Issues, models and methods", *European Journal of Operational Research*, Vol. 177, No. 2, PP. 649–672.
6. Quintero-Araujo, C. L., Caballero-Villalobos, J. P., Juan, A. A. and Montoya-Torres, J. R. (2016). "A biased-randomized metaheuristic for the capacitated location routing problem", *International Transactions in Operational Research*, Vol. 24, No. 5, PP. 1079-1098.

7. Baita, F., Ukovich, W., Pesenti, R. and Favaretto, D. (1998). "Dynamic routing-and-inventory problems: a review", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 32, No. 8, PP. 585–598.
8. Jaillet, P., Bard, J. F., Huang, L. and Dror, M. (2002). "Delivery cost approximations for inventory routing problems in a rolling horizon framework", *Transportation Science*, Vol. 36, No. 3, PP. 292–300.
9. Kleywegt, A. J., Nori, V. S. and Savelsbergh, M. W. (2002). "The stochastic inventory routing problem with direct deliveries", *Transportation Science*, Vol. 36, No. 1, PP. 94–118.
10. Adelman, D. (2004). "A price-directed approach to stochastic inventory/routing", *Operations Research*, Vol. 52, No. 4, PP. 499–514.
11. Gaur, V. and Fisher, M. L. (2004). "A periodic inventory routing problem at a supermarket chain." *Operations Research*, Vol. 52, No. 6, PP. 813–822.
12. Zhao, Q. H., Chen, S. and Zang, C. X. (2008). "Model and algorithm for inventory/routing decision in a three-echelon logistics system", *European Journal of Operational Research*, Vol. 191, No. 3, PP. 623–635.
13. Yu, Y., Chen, H. and Chu, F. (2008). "A new model and hybrid approach for large scale inventory routing problems", *European Journal of Operational Research*, Vol. 189, No. 3, PP. 1022–1040.
14. Day, J. M., Wright, P. D., Schoenherr, T., Venkataramanan, M. and Gaudette, K. (2009). "Improving routing and scheduling decisions at a distributor of industrial gasses", *Omega*, Vol. 37, No. 1, PP. 227–237.
15. Andersson, H., Christiansen, M. and Desaulniers, G. (2016). "A new decomposition algorithm for a liquefied natural gas inventory routing problem", *International Journal of Production Research*, Vol. 54, No. 2, PP. 564–578.
16. 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*, Vol. 110, No. 1, PP. 83–106.
17. Shen, Z. J. M., Coullard, C. and Daskin, M. S. (2003). "A joint location-inventory model", *Transportation Science*, Vol. 37, No. 1, PP. 40–55.
18. Diabat, A., Richard, J. P. and Codrington, C. W. (2013). "A Lagrangian relaxation approach to simultaneous strategic and tactical planning in supply chain design", *Annals of Operations Research*, Vol. 203, No. 1, PP. 55–80
19. Puga, M. S. and Tancrez, J. S. (2017). "A heuristic algorithm for solving large location–inventory problems with demand uncertainty", *European Journal of Operational Research*, Vol. 259, No. 2, PP. 413–423.
20. Liu, S. C. and Lee, S. B. (2003). "A two-phase heuristic method for the multi-depot location routing problem taking inventory control decisions into consideration", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 22, No. 11, PP. 941–950.
21. Liu, S. C. and Lin, C. C. (2005). "A heuristic method for the combined location routing and inventory problem", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 26, No. 4, PP. 372–381.
22. Shen, Z. J. M. and Qi, L. (2007). "Incorporating inventory and routing costs in strategic location models", *European Journal of Operational Research*, Vol. 179, No. 2, PP. 372–389.
23. Javid, A. A. and Azad, N. (2010). "Incorporating location, routing and inventory decisions in supply chain network design", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 46, No. 5, PP. 582–597.
24. Wang, C., Ma, Z. and Li, H. (2008, October). "Stochastic dynamic location-routing-inventory problem in closed-loop logistics system for reusing end-of-use products." In *Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA)*, 2008 International Conference (Vol. 2, PP. 691–695). IEEE.
25. Sajjadi, S. R. and Cheraghi, S. H. (2011). "Multi-products location–routing problem integrated with inventory under stochastic demand", *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, Vol. 7, No. 4, PP. 454–476.
26. Guerrero, W. J., Prodhon, C., Velasco, N. and Amaya, C. A. (2013). "Hybrid heuristic for the inventory

- location-routing problem with deterministic demand”, *International Journal of Production Economics*, Vol. 146, No. 1, PP. 359–370.
27. Tavakkoli-Moghaddam, R., Forouzanfar, F. and Ebrahimnejad, S. (2013). “Incorporating location, routing, and inventory decisions in a bi-objective supply chain design problem with risk-pooling”, *Journal of Industrial Engineering International*, Vol. 9, No. 1, PP. 9-19
 28. Tavakkoli-Moghaddam, R. and Raziei, Z. (2016). “A New Bi-Objective Location-Routing-Inventory Problem with Fuzzy Demands”, *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 49, No. 12, PP. 1116–1121.
 29. Turan, B., Minner, S. and Hartl, R. F. (2017). “A VNS approach to multi-location inventory redistribution with vehicle routing”, *Computers and Operations Research*, Vol. 78, February 2017, PP. 526–536.
 30. Hiassat, A., Diabat, A. and Rahwan, I. (2017). “A genetic algorithm approach for location-inventory-routing problem with perishable products”, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 42, January 2017, PP. 93–103.
 31. Norouzi, N., Tavakkoli, M. R., Sadegh, A. M. and Khaefi, S. (2015). “New mathematical modeling for a facilities location and vehicle routing problem solving by a hybrid imperialist competitive algorithm.” Vol. 49, No. 1, PP. 129–137.
 32. Gholami, M. and Honarvar, M. (2015). “Developing a Mathematical Model for Vendor Managed Inventory Considering Deterioration and Amelioration Items in a Three-Level Supply Chain”, *Journal of Industrial Engineering*???, Vol. 49, No. 2, PP. 237–256.
 33. Kiani, M., Seidgar, H., Mahdavi, I. and Tavakkoli, M. R. (2015), “An Efficient Genetic Algorithm for a Vehicle Routing Problem Considering the Competency of Working Teams”, *Journal of Industrial Engineering*, Vol. 49, No. 2, PP. 257–271.
 34. Cordeau, J. F., Laporte, G., Savelsbergh, M. W. P. and Vigo, D. (2006). “Vehicle Routing”, in *Handbook of Operations Research and Management Science*, Transportation, C. Barnhart and G. Laporte, Editors, Elsevier: Amsterdam, PP. 367–428.
 35. Megiddo, N. and Supowit, K. J. (1984). “On the complexity of some common geometric location problems”, *SIAM Journal on Computing*, Vol. 13, No. 1, PP. 182–196.
 36. Derbel, H., Jarboui, B., Hanafi, S. and Chabchoub, H. (2012). “Genetic algorithm with iterated local search for solving a location-routing problem”, *Expert Systems with Applications*, Vol. 39, No. 3, PP. 2865–2871.
 37. Vincent, F. Y., Lin, S. W., Lee, W. and Ting, C. J. (2010). “A simulated annealing heuristic for the capacitated location routing problem”, *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 58, No. 2, PP. 288–299.
 38. Ting, C. J. and Chen, C. H. (2013). “A multiple ant colony optimization algorithm for the capacitated location routing problem”, *International Journal of Production Economics*, Vol. 141, No. 1, PP. 34–44.
 39. Barreto, S., Ferreira, C., Paixao, J. and Santos, B. S. (2007). “Using clustering analysis in a capacitated location-routing problem”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 179, No. 3, PP. 968–977.
 40. Prins, C., Prodhon, C. and Calvo, R. W. (2006, April). “A memetic algorithm with population management (MA| PM) for the capacitated location-routing problem.” In *European Conference on Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization* (PP. 183–194). Springer Berlin Heidelberg.
 41. Contardo, C., Cordeau, J. F. and Gendron, B. (2014). “A GRASP+ ILP-based metaheuristic for the capacitated location-routing problem”, *Journal of Heuristics*, Vol. 20, No. 1, PP. 1–38.

واژه‌های لاتین به ترتیب استفاده در متن

1. Location Routing Inventory Problem
2. Closed-loop Logistics System
3. Risk-pooling

4. Chance Constrained Programming
 5. The Memetic Algorithm with Population Management
 6. Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (Grasp)
 7. Best Known Solution (BKS)
-