

چشم‌انداز مدیریت صنعتی

سال یازدهم، شماره ۴۲، تابستان ۱۴۰۰

شاپا چاپی: ۹۸۷۴-۲۲۵۱، شاپا الکترونیکی: ۴۱۶۵-۲۶۴۵

ص ص ۶۴ - ۳۹

ارائه مدل و حل مسئله مکان‌یابی انبارهای متقاطع و زمان‌بندی وسایل نقلیه در زنجیره تأمین چندمحصولی با امکان برداشت و تحویل گسسته

سهیلا قربانی*، بهروز افشار نجفی**

چکیده

در این پژوهش مسائل مکان‌یابی انبارهای متقاطع، مسیریابی و زمان‌بندی وسایل نقلیه را به‌طور هم‌زمان در یک زنجیره تأمین سه‌سطحی با امکان برداشت و تحویل گسسته، با هدف کمینه‌سازی مجموع هزینه‌ها (هزینه احداث انبارهای متقاطع، هزینه‌های ثابت و متغیر حمل‌ونقل و جریمه تأخیر و تعجیل)، مورد مطالعه قرار گرفته و یک مدل برنامه‌ریزی ترکیبی عدد صحیح غیرخطی برای آن ارائه شده است. در این مدل تصمیم‌گیری در خصوص تخصیص وسایل نقلیه ناهمگن به فرآیند برداشت و تحویل و انتخاب مکان و تعداد انبارهای متقاطع برای احداث از میان مکان‌های بالقوه موجود پس از حل مدل صورت می‌گیرد. فرض چندمحصولی بودن شامل تک‌تک تأمین‌کنندگان، انبارهای متقاطع و مشتریان می‌شود. برای تحویل هر نوع از کالاها در محل هر یک از مشتریان یک پنجره زمانی نرم در نظر گرفته شده است و علاوه بر جریمه تأخیر، جریمه تعجیل در تحویل کالاها متناسب با مدت‌زمان و مقدار کالای مواجهه‌شده با تأخیر/تعجیل محاسبه می‌شود. سه دسته مسئله در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ به‌صورت تصادفی تولید و با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید حل شده‌اند. برای مسائل کوچک، جواب حاصل از روش‌های حل دقیق با نتایج الگوریتم شبیه‌سازی تبرید مقایسه شده است.

کلیدواژه‌ها: برنامه‌ریزی ریاضی؛ مکان‌یابی انبارهای متقاطع؛ مسیریابی وسایل نقلیه؛
برداشت و تحویل گسسته؛ الگوریتم شبیه‌سازی تبرید.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۱۳، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۸/۰۵.

* دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین.

** دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین (نویسنده مسئول).

Email: afsharnb@alum.sharif.edu

۱. مقدمه

درصد زیادی از قیمت تمام‌شده اغلب محصولات به هزینه‌های حمل‌ونقل و توزیع مربوط است. با طراحی مناسب شبکه توزیع محصول، به‌عنوان بخشی مهمی از زنجیره تأمین، می‌توان این هزینه‌ها را کاهش داد. استفاده از انبارهای متقاطع بین تأمین‌کنندگان و مشتریان راهکاری است که به‌منظور کاهش هزینه‌ها در بسیاری از صنایع کاربرد دارد. انبار متقاطع به‌عنوان یک استراتژی لجستیک جدید، شامل تسهیلاتی بین تأمین‌کنندگان و مشتریان است که به‌منظور کاهش هزینه‌ها از طریق کاهش موجودی و حذف انبار مورد استفاده قرار می‌گیرد. کالاهای مختلف توسط وسایل نقلیه ورودی به انبار متقاطع تحویل و پس از تفکیک، ادغام و دسته‌بندی بر اساس مقصد، در مدت‌زمانی کوتاه برای ارسال با وسایل نقلیه خروجی آماده می‌شوند؛ بنابراین هزینه انبارداری که در روش‌های سنتی معمول است، می‌تواند کاهش یابد. در سال‌های اخیر انواع مختلفی از مسائل زمان‌بندی مسیریابی و مکان‌یابی معرفی و بررسی شده‌اند که هر یک با محدودیت‌ها و شرایط خود از زاویه جدیدی به این مسائل نگریده و به کاربردی‌تر شدن هرچه بیشتر مدل‌ها در دنیای واقعی کمک کرده‌اند.

پژوهش جاری به دنبال ارائه و حل مدلی برای مسئله مکان‌یابی و زمان‌بندی مسیریابی در زنجیره تأمین چندمحصولی با انبارهای متقاطع است که سعی دارد با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از مفروضات و محدودیت‌ها در قالب یک مدل یکپارچه با هدف کمینه‌سازی کل هزینه‌های حمل‌ونقل و جریمه‌های تأخیر و تعجیل بتواند به حل دسته‌ای از مسائل واقعی حمل‌ونقل در زنجیره‌های تأمین کمک کند. در پژوهش حاضر بر خلاف اغلب پژوهش‌های گذشته که مسائل مکان‌یابی، مسیریابی و زمان‌بندی را به‌صورت دو یا چندمرحله‌ای مدل‌سازی یا حل کرده‌اند، مدل پیشنهادی به دنبال یافتن جواب بهینه مکان‌یابی انبارهای متقاطع و مسیریابی و زمان‌بندی سفر به‌صورت هم‌زمان است. کاربرد مدل پیشنهادی در افزایش اثربخشی توزیع در زنجیره‌های تأمین چندمحصولی، مانند توزیع مواد مصرفی در فروشگاه‌های زنجیره‌ای و توزیع دارو در داروخانه‌ها و مراکز درمانی است که در همه این موارد، توزیع تنوعی از محصولات از طریق انبارهای متقاطع، مسیریابی وسایل نقلیه، و برداشت و تحویل گسسته بطور هم‌زمان مطرح هستند.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

مسئله مسیریابی وسایل نقلیه، به‌ویژه در صنایع، بسیار مورد توجه قرار گرفته است و به‌طور کلی به مسائل بهینه‌سازی اطلاق می‌شود که به طراحی مجموعه‌ای از مسیرها برای یک ناوگان از وسایل نقلیه می‌پردازد که شروع و پایان مسیرها و گره‌هایی که باید در طول مسیر ملاقات و سرویس‌دهی شوند، مشخص بوده و هدف حداقل کردن هزینه کل سرویس‌دهی است. گاهی ممکن است اتصال مستقیم زوج گره‌های مبدأ و مقصد به‌دلیل هزینه‌های عملیاتی و

سرمایه‌گذاری بالا امکان‌پذیر نبوده و یا غیراقتصادی باشد؛ بنابراین در مسیر بین مبدأ و مقصد از تسهیلاتی استفاده می‌شود که به‌عنوان نقاط دریافت، ادغام، دسته‌بندی و آماده‌سازی محصولات برای ارسال، به‌صورت واسطه به کار گرفته می‌شوند که در مبانی نظری موضوع با عنوان «انبارهای متقاطع» شناخته می‌شوند. انبارهای متقاطع می‌توانند نقش مهمی در زنجیره‌های تأمین داشته باشند؛ زیرا قادر هستند موجب کاهش زمان تحویل سفارش‌ها، هزینه‌های نگهداری موجودی و هزینه‌های حمل‌ونقل شوند. ایده ترکیب مسائل مسیریابی و مکان‌یابی تسهیلات از حدود ۵۰ سال پیش مطرح شده است [۷، ۱۵، ۲۴، ۲۵، ۲۶]. پژوهش حاضر از سه مسئله مکان‌یابی، مسیریابی و زمان‌بندی تشکیل شده و دربردارنده سه سطح تصمیم‌گیری استراتژیکی (مکان‌یابی انبارهای متقاطع)، تاکتیکی (مسیریابی وسایل نقلیه) و عملیاتی (زمان‌بندی حمل‌ونقل) است که هر یک به‌تنهایی مسائلی پیچیده و دارای کاربردهای مختلف در دنیای واقعی هستند. برای هر یک از این کاربردها و به فراخور محدودیت‌های خاص آن، دسته‌ای از مسائل به‌وجود آمده و پژوهش‌های بسیاری در هر یک از زمینه‌ها صورت گرفته است [۶، ۱۲، ۱۳، ۲۰].

نیکولوپولو و همکاران^۱ (۲۰۱۷)، مسئله برداشت و تحویل کالا را با هدف مقایسه رویکردهای مختلف انتقال کالا از تأمین‌کننده به مشتری از طریق ارزیابی روش تحویل مستقیم و استفاده از انبارهای متقاطع از منظر اثربخشی هزینه بررسی کردند. نتایج نشان داد در صورتی که محل تأمین‌کنندگان و مشتریان در دو منطقه جغرافیایی جدا از هم باشد، استراتژی انبارهای متقاطع ارجحیت دارد؛ در حالی که در سایر موارد تحویل مستقیم هزینه کمتری خواهد داشت [۱۹]. در پژوهش یادشده هزینه‌های سفارش‌دهی و مدیریت رسید و تحویل و جابه‌جایی کالاها در محل مشتری در نظر گرفته نشده است.

نیکجو و جوادیان (۱۳۹۷)، مسئله مکان‌یابی و مسیریابی را در شرایط بحران (زلزله) در نظر گرفتند و به‌منظور تعیین محل بهینه تسهیلات امدادی، توزیع بهینه کالا بین این تسهیلات، تخصیص مصدومان به بیمارستان‌ها و همچنین مسیریابی وسایل نقلیه امدادی در قالب یک مدل ریاضی چندهدفه لجستیک را مدل‌سازی کردند. مسیریابی برای سه جریان شامل جریان‌های کالا، مصدومان و نیروهای امدادی و مکان‌یابی برای انبارهای موقت، مراکز توزیع و بیمارستان‌ها انجام می‌گیرد. با توجه به احتمالی بودن ماهیت شدت حادثه، میزان تقاضای تجهیزات و نیروی انسانی غیرقطعی در نظر گرفته شده و با استفاده از روش استوارسازی در مدل لحاظ شده است. در نهایت مدل در یک مطالعه موردی (استان مازندران) و با استفاده از نرم‌افزار GAMS اجرا و بررسی شده است [۴].

حسنى گودرزى و توكللى مقدم (۲۰۱۲)، مسئله مسيريابى وسايل نقليه گسسته با محدوديت ظرفيت انبار متقاطع با چند محصول را بررسى كردند. در مسيريابى وسايل نقليه با امكان برداشت و تحويل گسسته، تأمين‌كنندگان و مشتريان تمايل به ارسال و دريافت كالاها طى چند محموله را دارند و هر گره مى‌تواند توسط چند وسيله نقليه ملاقات شود. آن‌ها اين مسئله را با در نظر گرفتن تنها يك انبار متقاطع به صورت برنامه‌ريزى عدد صحيح تركيبى، به منظور تعيين بهترين مسير حركت و تعداد بهينه وسايل نقليه با هدف كمينه‌سازى مجموع هزينه‌ها، در نرم‌افزار GAMS فرمول‌بندى و حل كردند [۱۱]. در اين پژوهش و پژوهش مقدم و همكاران (۲۰۱۴)، مكان يابى انبارهاى متقاطع مورد بحث قرار نگرفته است؛ بلكه مسئله مسيريابى و زمان‌بندى وسايل نقليه با پنجره زمانى سخت و امكان برداشت و تحويل گسسته با فرض اينكه هر گره مى‌تواند توسط چند وسيله نقليه ملاقات شود، مورد بحث واقع شده است. مقدم و همكاران (۲۰۱۴) علاوه بر گره‌هاى تأمين‌كنندگان و مشتريان، چهار انبار متقاطع را در نظر گرفتند؛ به طورى كه دو مركز، محل شروع كليه مسيرها و دو مركز ديگر، محل پايان مسيرها بودند. آن‌ها فرمول‌بندى رياضى اين مسئله را به صورت برنامه‌ريزى عدد صحيح تركيبى غيرخطى ارائه دادند و به منظور حل مسئله از دو الگوريتم شامل الگوريتم شبیه‌سازى تبريد و يك الگوريتم پيشنهادهى تركيبى از شبیه‌سازى تبريد و كلونى مورچگان استفاده كردند كه نتايج محاسباتى نشان‌دهنده كارايى بهتر الگوريتم تركيبى نسبت به الگوريتم شبیه‌سازى بود [۱۶].

موسوى و توكللى مقدم (۲۰۱۳)، مسئله مكان يابى انبارهاى متقاطع و مسيريابى و زمان‌بندى وسايل نقليه را به طور هم‌زمان و در دو سطح شامل سطح استراتژيک و سطح تاکتيكى در نظر گرفتند و براى آن يك مدل برنامه‌ريزى عدد صحيح تركيبى دومرحله‌اى ارائه كردند. طبق مدل دومرحله‌اى، ابتدا محل احداث انبارهاى متقاطع از ميان مكان‌هاى بالقوه انتخاب مى‌شود (مرحله نخست) و سپس بر اساس نتايج مرحله نخست، مسيريابى و زمان‌بندى سفر وسايل نقليه در فرايندهاى برداشت و تحويل انجام مى‌پذيرد (مرحله دوم). آن‌ها براى حل مدل، الگوريتم جديدى بر پايه شبیه‌سازى تبريد تركيب يافته با يك فهرست ممنوع برگرفته از الگوريتم جست‌وجوى ممنوع به منظور حل مدل ارائه شده پيشنهاده دادند [۱۸].

جوانفر و همكاران (۱۳۹۶)، يك مسئله مكان يابى - مسيريابى با انبارهاى عبورى در يك زنجيره تأمين سه سطحى شامل تأمين‌كنندگان، انبارهاى عبورى و مشتريان (برگرفته از صنعت توزيع و پخش مواد غذايى فاسدشدى) را در حالت چندمحصولى با وسايل نقليه ناهمگن در نظر گرفتند و يك مدل رياضى يكپارچه غيرخطى عدد صحيح مختلط براى آن ارائه كردند. در اين مدل برداشت و تحويل در چند بار مجاز است و وسايل نقليه در حمل نوع محصول داراى محدوديت هستند. هدف مدل، كمينه‌سازى مجموع هزينه تاسيس انبارهاى عبورى و هزينه‌هاى حمل و نقل (هزينه توزيع، هزينه عملياتى) است. پژوهش اخير كه به لحاظ مفروضات مسئله

شباهت زیادی به مسئله پژوهش حاضر دارد، شامل زمان‌بندی حمل‌ونقل نیست و زمان‌های سفر، سرویس‌دهی، تخلیه و بارگیری در نظر گرفته نشده است؛ بنابراین پنجره زمانی تعریف نشده و فرض شده است که فرآیند برداشت و تحویل محصولات به انبارهای عبوری در نیمه اول روز و تحویل به مشتریان در نیمه دوم روز انجام می‌گیرد. برای حل مدل، یک الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات ارائه شده است [۳].

اسلامی‌نیا و عظیمی (۱۳۹۸)، مسیریابی را با وسایل نقلیه الکتریکی و محدودیت‌های مربوط به آن‌ها، مانند محدودیت حجم باری و ظرفیت محدود باتری، در نظر گرفتند و یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط با هدف کمینه‌سازی مجموع مسافت طی‌شده برای توزیع کالا ارائه و آن را با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید حل کردند [۲].

کیو و همکاران^۱ (۲۰۱۸)، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای مسئله مسیریابی چندوسیله‌ای و چندمحصولی با هزینه راه‌اندازی ارائه دادند که توسعه‌ای از مدل مسئله مسیریابی چندوسیله‌ای و تک‌محصولی و همچنین تعمیم‌یافته مدل مسیریابی موجودی چندوسیله‌ای و چندمحصولی با ترکیب تصمیم‌های تولید است. در مسئله مسیریابی چندوسیله‌ای و چندمحصولی باید میزان استفاده چند محصول از ظرفیت به‌دقت مدل‌سازی شود؛ بنابراین متغیرهای راه‌اندازی برای مدل‌سازی ظرفیت استفاده‌شده یا هزینه متحمل‌شده در زمان شروع تولید هر دسته محصول یا در زمان تغییر وضعیت از تولید یک محصول به محصول دیگر، موردنیاز است. آن‌ها برای حل این مدل یک الگوریتم شاخه و کران توسعه دادند [۲۱].

مرتضوی و سیف برقی (۱۳۹۷)، به مطالعه مسئله مکان‌یابی - تخصیص در زنجیره تأمین سبز پرداختند. آن‌ها مدل ریاضی قابل‌حلی برای زنجیره تأمین سه‌سطحی شامل تولیدکنندگان، انبارها و خرده‌فروشان با در نظر گرفتن سیستم حمل‌ونقل و انتشار گاز دی‌اکسید کربن ارائه دادند و آن را با استفاده از روش برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای مدل‌سازی و حل کرده و سپس با نتایج حاصل از روش محدودیت اِپسیلون مقایسه کردند [۵].

رهبری و همکاران (۲۰۱۹)، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط دوهدفه برای مسئله مسیریابی و زمان‌بندی وسایل نقلیه با انبارهای متقاطع و کالاهای فاسدشدنی ارائه دادند. نتایج نشان داد که در نظر گرفتن فقط یک هدف، هدف دیگر را نیز تأمین می‌کند. دو مدل قوی در حالتی که زمان سفر وسایل نقلیه خروجی و مدت تازگی محصولات غیرقطعی است، توسعه داده شده‌اند. نتایج این پژوهش نشان داد که تأثیر غیرقطعی بودن زمان سفر در بدتر شدن اهداف مسئله بیشتر از تأثیر غیرقطعی بودن مدت تازگی محصولات است. با استفاده از مدل ارائه‌شده تازگی محصولات تحویل‌شده بدون افزایش هزینه توزیع، به‌طور میانگین به میزان ۷۴ درصد

1. Qiu et al.

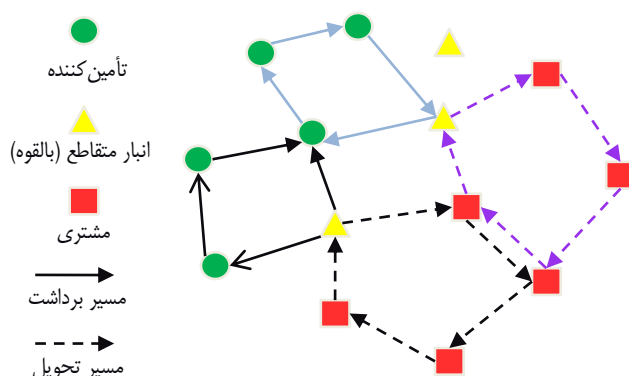
افزایش یافت که می‌تواند موجب کاهش ضایعات شود [۲۲].

عمادآبادی و همکاران (۱۳۹۸)، مسئله مکان‌یابی - تخصیص را در طراحی شبکه زنجیره تأمین چنددوره‌ای و چندمحصولی با در نظر گرفتن اختلال در تسهیلات و مسیرهای ارتباطی مدنظر قرار دادند و یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط ارائه کردند. آن‌ها هزینه اختلال و احتمال وقوع آن را به‌عنوان عامل تأثیرگذار بر استراتژی انتخابی (۱). انتخاب بین بازار لحظه‌ای یا پذیرش کمبود، ۲. استفاده از قراردادهای دوجانبه، ۳. تأسیس تسهیلات) در نظر گرفتند و به طراحی شبکه برای زنجیره‌های تأمین حساس به زمان و بدون انبار، با هدف حداکثرسازی رضایت مشتری در یک زنجیره تأمین چهارسطحی شامل تأمین‌کننده، مرکز ادغام، توزیع‌کننده و مشتریان با مطالعه موردی در طرح اشتراک نسیات پرداختند [۱].

با مرور پژوهش‌های انجام‌شده مشاهده شد که برای مسائل مختلف با در نظر گرفتن مجموعه‌های متفاوتی از محدودیت‌ها، مدل‌های متنوعی ارائه شده و برای حل آن‌ها نیز روش‌های مختلفی متناسب با ویژگی‌های مدل به کار رفته است. در پژوهش حاضر با اعمال مجموعه‌ای از مفروضات و محدودیت‌ها که با فرض شرایط موجود در دنیای واقعی در نظر گرفته شده‌اند، مدلی بهبودیافته برای کاربرد در مسائل دنیای واقعی ارائه می‌شود. نوآوری مدل پیشنهادی در لحاظ کردن مجموعه‌ای از مفروضات و محدودیت‌های منطبق با واقعیت‌های توزیع در فروشگاه‌های زنجیره‌ای و داروخانه‌ها است که به مدل‌سازی یکپارچه و حل مسئله به‌طور هم‌زمان در سه سطح مکان‌یابی، مسیریابی و زمان‌بندی سفر و تخصیص کالاها با امکان برداشت و تحویل می‌پردازد. برخی از موارد لحاظ‌شده در مدل پیشنهادی با انطباق شرایط دنیای واقعی به‌منظور طراحی یک سیستم توزیع تکرارپذیر و مستمر عبارت‌اند از: لحاظ کردن جریمه تأخیر و تعجیل و متناسب‌بودن آن‌ها با مقدار کالا علاوه بر مدت‌زمان تأخیر یا تعجیل، در نظر گرفتن زمان تخلیه، بارگیری و سرویس‌دهی و ناهمگن بودن وسایل نقلیه. نزدیک‌ترین مقاله به پژوهش حاضر، پژوهش مختاری‌نژاد و همکاران (۲۰۱۵) است که در آن مدلی بر اساس یادگیری برای بهینه‌سازی هم‌زمان تصمیم‌های مربوط به مکان‌یابی، مسیریابی و زمان‌بندی توسعه داده شده است [۱۷]. در این پژوهش وسایل نقلیه همگن در نظر گرفته شده‌اند، مشتری و بارانداز هر یک وسایل نقلیه مخصوص به خود را دارند، ابتدا محل بهینه باراندازها مشخص می‌شود و سپس گره‌های تولیدکننده و مشتری به این باراندازها تخصیص داده می‌شوند، حمل مستقیم از تولیدکننده به مشتری مجاز است، هر تولیدکننده تنها یک محصول مشخص را تولید می‌کند و فرآیند تحویل پس از رسیدن کلیه وسایل نقلیه به بارانداز آغاز می‌شود. به‌منظور حل مدل توسعه‌داده‌شده نیز پس از مطالعه الگوریتم‌های فراابتکاری موجود و کاربرد آن‌ها در مسائل مشابه و شناخت مزایا و معایب نسبی هر یک، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید به‌منظور حل مدل انتخاب شده است [۸، ۹، ۱۰، ۱۴، ۲۳].

۳. روش‌شناسی پژوهش

در پژوهش حاضر مسائل مکان‌یابی، مسیریابی و زمان‌بندی سفر در قالب مدلی یکپارچه برای بهینه‌سازی هم‌زمان در نظر گرفته شده‌اند (شکل ۱). علاوه بر لحاظ هم‌زمان دو مسئله مکان‌یابی و مسیریابی، وسایل نقلیه از قبل به فرآیند برداشت یا تحویل تخصیص نیافته‌اند و وسیله تخصیص یافته به هر مسیر (برداشت یا تحویل) پس از حل مدل مشخص می‌شود؛ همچنین تعیین تعداد و محل احداث انبارهای متقاطع و به عبارت دیگر انتخاب از میان مکان‌های بالقوه با حل مدل یکپارچه محقق می‌شود. سایر مفروضات مسئله در ادامه بیان شده است.



شکل ۱. شبکه توزیع در زنجیره تأمین با انبارهای متقاطع در مدل پیشنهادی

مفروضات مسئله:

- تعدادی مکان بالقوه برای احداث انبارهای متقاطع وجود دارد.
- برداشت و تحویل به صورت مقادیر گسسته انجام می‌شود.
- زنجیره تأمین چندمحصولی است.
- وسایل نقلیه انواع مختلف دارند و حداکثر تعداد وسایل نقلیه موجود از هر نوع محدود است.
- هر نوع وسیله نقلیه قادر به حمل انواع مشخصی از کالاها است.
- هر مسیر از یک انبار متقاطع آغاز و به همان انبار ختم می‌شود.
- تمامی پارامترها قطعی و غیراحتمالی هستند.
- ارتباط مستقیم بین تأمین‌کنندگان و مشتریان مجاز نیست.
- تقاضای مشتری باید به‌طور کامل برآورده شود.
- مقدار کالای برداشت‌شده از هر نوع برابر با مقدار کالایی است که باید تحویل شود.
- برای تحویل کالا به مشتریان پنجره زمانی نرم در نظر گرفته شده است.
- جریمه تأخیر/تعمیل هم با مقدار و هم با مدت‌زمان تأخیر/تعمیل متناسب است.

مدل پیشنهادی

مجموعه‌ها و اندیس‌ها:

S : مجموعه گره‌های برداشت (تأمین‌کنندگان)

C : مجموعه گره‌های تحویل (مشتریان)

R : مجموعه انبارهای متقاطع

N : مجموعه انواع کالاها

A : مجموعه کلیه وسایل نقلیه $\{1, 2, \dots, N_{k_1}, N_{k_1} + 1, \dots, N_{k_2}, \dots\}$ که وسایل نقلیه $l = 1, \dots, N_{k_1}$ از نوع ۱، وسایل نقلیه $l = N_{k_1} + 1, \dots, N_{k_2}$ از نوع ۲ و ... هستند. (N_k : تعداد وسیله نقلیه موجود از نوع k)

$E = \{(n, l) | n \in N, l \in A, \text{ است } k \text{ از نوع } l \}$

پارامترها:

V_l : ظرفیت وسیله نقلیه l

Q_r : ظرفیت انبار متقاطع r

V_n : حجم هر واحد کالای نوع n

TC : حداکثر مجموع هزینه‌های اولیه برای احداث انبارهای متقاطع و به‌کارگیری وسایل نقلیه

FC_r : هزینه ثابت احداث انبار متقاطع r

VC_l : هزینه ثابت اولیه برای به‌کارگیری وسیله نقلیه l

tc_l : هزینه حمل‌ونقل توسط وسیله نقلیه l به‌ازای هر واحد زمان سفر

D_{nj} : کل تقاضای مشتری زام از کالای n

S_{ni} : کل کالای نوع n عرضه‌شده توسط تأمین‌کننده i

tt_{ij} : زمان سفر از گره i به گره j

st_{nr} : مدت‌زمان سرویس‌دهی برای کالای نوع n در انبار متقاطع r

t_n^l : مدت‌زمان بارگیری / تخلیه هر واحد کالای نوع n توسط وسیله نقلیه l (امکانات بارگیری / تخلیه در تمام گره‌ها یکسان فرض شده است و زمان بارگیری و تخلیه به نوع کالا و نوع وسیله نقلیه بستگی دارد)

α_{ni} : زودترین زمان مناسب برای رسیدن کالای n به گره i

β_{ni} : دیرترین زمان مناسب برای رسیدن کالای n به گره i

ep_{ni} : جریمه تعجیل در تحویل هر واحد کالای نوع n به گره i به‌ازای هر واحد زمانی تعجیل

lp_{ni} : جریمه تأخیر در تحویل هر واحد کالای نوع n به گره i به‌ازای هر واحد زمانی تأخیر

M : یک عدد مثبت بزرگ

متغیرهای تصمیم:

$$x_{ij}^l = \begin{cases} 1 & \text{اگر وسیله نقلیه } l \text{ از گره } i \text{ به گره } j \text{ حرکت کند} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

$$z_r = \begin{cases} 1 & \text{اگر مرکز واسطه } r \text{ احداث شود} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

p_{ni}^l : مقدار کالای نوع n برداشت‌شده از گره i توسط وسیله نقلیه l ($(n, l) \in E$)

d_{nj}^l : مقدار کالای نوع n تحویل‌شده در گره j توسط وسیله نقلیه l ($(n, l) \in E$)

AT_i^l : زمان رسیدن وسیله نقلیه l به گره i در مسیر برداشت

DT_i^l : زمان ترک گره i توسط وسیله نقلیه l در مسیر برداشت

$AT_i'^l$: زمان رسیدن وسیله نقلیه l به گره i در مسیر تحویل

$DT_i'^l$: زمان ترک گره i توسط وسیله نقلیه l در مسیر تحویل

E_{ni} : مقدار کل تعجیل در تحویل کالای نوع n در گره i

L_{ni} : مقدار کل تعجیل در تحویل کالای نوع n در گره i

متغیرهای کمکی: u_i, y_i^l

تابع هدف:

$$\begin{aligned} \min W = & \sum_{r \in R} FC_r z_r + \sum_{i \in S} \sum_{j \in (RUS)} \sum_{l \in A} (tc_l \cdot tt_{ij}) x_{ij}^l & (1) \\ & + \sum_{i \in C} \sum_{j \in (RUC)} \sum_{l \in A} (tc_l \cdot tt_{ij}) x_{ij}^l \\ & + \sum_{r \in R} \sum_{i \in S} \sum_{l \in A} (tc_l \cdot tt_{ri} + VC_l) x_{ri}^l \\ & + \sum_{r \in R} \sum_{j \in C} \sum_{l \in A} (tc_l \cdot tt_{rj} + VC_l) x_{rj}^l \\ & + \sum_{n \in N} \sum_{i \in C} (ep_{ni} E_{ni} + lp_{ni} L_{ni}) \end{aligned}$$

محدودیت‌ها:

$$u_i - u_j + n(S) \sum_{l \in A} x_{ij}^l \leq n(S) - 1 \quad \forall i, j \in S, \quad i \neq j \quad (2)$$

$$u_i - u_j + n(C) \sum_{l \in A} x_{ij}^l \leq n(C) - 1 \quad \forall i, j \in C, \quad i \neq j \quad (3)$$

$$\sum_{l \in A} x_{ij}^l = 0 \quad \forall i, j \in R \quad (۴)$$

$$\sum_{r \in R} z_r \geq 1 \quad (۵)$$

$$\sum_{r \in R} FC_r \cdot z_r + \sum_{l \in A} (VC_l \cdot \sum_{r \in R} \sum_{i \in SUC} x_{ri}^l) \leq TC \quad (۶)$$

$$\sum_{i \in SUR} x_{im}^l = \sum_{j \in SUR} x_{mj}^l \quad \forall m \in S, i \neq j, j \neq m, l \in A \quad (۷)$$

$$\sum_{i \in CUR} x_{im}^l = \sum_{j \in CUR} x_{mj}^l \quad \forall m \in C, i \neq j, j \neq m, l \in A \quad (۸)$$

$$\sum_{i \in S} x_{ir}^l = \sum_{j \in S} x_{rj}^l \quad \forall r \in R, l \in A \quad (۹)$$

$$\sum_{i \in C} x_{ir}^l = \sum_{j \in C} x_{rj}^l \quad \forall r \in R, l \in A \quad (۱۰)$$

$$\sum_{i \in C} \sum_{l \in A} x_{ir}^l \leq M \cdot \sum_{j \in S} \sum_{l \in A} x_{rj}^l \quad \forall r \in R \quad (۱۱)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{l \in A} x_{ir}^l \leq M \cdot \sum_{j \in C} \sum_{l \in A} x_{rj}^l \quad \forall r \in R \quad (۱۲)$$

$$\sum_j x_{ij}^l = y_i^l \quad \forall i \in SUCUR \quad (۱۳)$$

$$\sum_{r \in R} y_r^l \leq 1 \quad \forall l \in A \quad (۱۴)$$

$$y_i^l \leq 1 \quad \forall i \in SUCUR, l \in A \quad (۱۵)$$

$$\sum_{l \in A} y_r^l \leq M \cdot z_r \quad \forall r \in R \quad (۱۶)$$

$$\sum_{l \in A} y_r^l \geq z_r \quad \forall r \in R \quad (۱۷)$$

$$\sum_{n \in N, (n,l) \in E} p_{ni}^l \geq y_i^l \quad \forall i \in S, l \in A \quad (۱۸)$$

$$\sum_{n \in N, (n,l) \in E} d_{nj}^l \geq y_j^l \quad \forall j \in C, l \in A \quad (۱۹)$$

$$\sum_{n \in N, (n,l) \in E} p_{nr}^l \geq \sum_{j \in C} x_{rj}^l \quad \forall r \in R, l \in A \quad (۲۰)$$

$$\sum_{n \in N, (n,l) \in E} d_{nr}^l \geq \sum_{i \in S} x_{ir}^l \quad \forall r \in R, l \in A \quad (۲۱)$$

$$\sum_{n \in N, (n,l) \in E} p_{ni}^l \leq M \cdot y_i^l \quad \forall i \in SUR, l \in A \quad (۲۲)$$

$$\sum_{n \in N, (n,l) \in E} d_{nj}^l \leq M \cdot y_j^l \quad \forall j \in CUR, l \in A \quad (۲۳)$$

$$\sum_{n \in N, (n,l) \in E} (\sum_{i \in S} p_{ni}^l) \cdot \gamma_n \leq V_l \quad \forall l \in A \quad (۲۴)$$

$$\sum_{l \in A, (n,l) \in E} p_{ni}^l = S_{ni} \quad \forall i \in S, n \in N \quad (۲۵)$$

$$\sum_{l \in A, (n,l) \in E} d_{nj}^l = D_{nj} \quad \forall j \in C, n \in N \quad (۲۶)$$

$$d_{nr}^l = y_r^l \cdot \sum_{i \in S} p_{ni}^l \quad \forall r \in O, n \in N, l \in A, (n,l) \in E \quad (۲۷)$$

$$p_{nr}^l = y_r^l \cdot \sum_{j \in C} d_{nj}^l \quad \forall r \in O, n \in N, l \in A, (n, l) \in E \quad (28)$$

$$\sum_{n \in N, (n, l) \in E} p_{nr}^l \leq M \cdot (1 - \sum_{i \in S} x_{ri}^l) \quad \forall r \in O, l \in A \quad (29)$$

$$\sum_{n \in N, (n, l) \in E} d_{nr}^l \leq M \cdot (1 - \sum_{i \in C} x_{ir}^l) \quad \forall r \in O, l \in A \quad (30)$$

$$\sum_{l \in A, (n, l) \in E} p_{nr}^l = \sum_{l \in A, (n, l) \in E} d_{nr}^l \quad \forall r \in O, n \in N \quad (31)$$

$$\sum_{n \in N, (n, l) \in E} (\sum_{l \in A} d_{nr}^l) \cdot \gamma_n \leq Q_r \cdot z_r \quad \forall r \in O \quad (32)$$

$$DT_r^l = 0 \quad \forall r \in R, l \in A \quad (33)$$

$$AT_j^l \geq \sum_{i \in S \cup R} x_{ij}^l \cdot (DT_i^l + tt_{ij}) \quad \forall j \in S, i \neq j, l \in A \quad (34)$$

$$DT_i^l \geq AT_i^l + \sum_{n \in N, (n, l) \in E} (vt_n^l \cdot p_{ni}^l) \quad \forall i \in S, l \in A \quad (35)$$

$$AT_r^l \geq \sum_{i \in S} x_{ir}^l \cdot (DT_i^l + tt_{ir}) \quad \forall r \in R, l \in A \quad (36)$$

$$DT_r^l \geq (\sum_{j \in C} x_{rj}^l) \cdot \max_{l \in A} (y_r^l \cdot (AT_r^l + \sum_{n \in N, (n, l) \in E} st_{nr} \cdot d_{nr}^l)) \quad \forall r \in R, l \in A \quad (37)$$

$$AT'_j{}^l \geq \sum_{i \in C \cup R} x_{ij}^l \cdot (DT'_i{}^l + tt_{ij}) \quad \forall j \in C, i \neq j, l \in A \quad (38)$$

$$DT'_j{}^l \geq AT'_j{}^l + \sum_{n \in N, (n, l) \in E} (t_n^l \cdot d_{nj}^l) \quad \forall j \in C, l \in A \quad (39)$$

$$AT'_r{}^l \geq \sum_{i \in C} (x_{ir}^l \cdot (DT'_i{}^l + tt_{ir})) \quad \forall r \in R, l \in A \quad (40)$$

$$E_{ni} = \sum_{l \in A, (n, l) \in E} (d_{ni}^l \cdot \max\{0, \alpha_{ni} - AT'_i{}^l\}) \quad (41)$$

$$\forall i \in C, n \in N, (n, l) \in E$$

$$L_{ni} = \sum_{l \in A, (n, l) \in E} (d_{ni}^l \cdot \max\{0, AT'_i{}^l - \beta_{ni}\}) \quad \forall i \in C, n \in N, (n, l) \in E \quad (42)$$

$$E_{ni}, L_{ni} \geq 0 \quad (43)$$

$$p_{ni}^l, d_{nj}^l \in \mathbb{Z}^+ \cup \{0\} \quad (44)$$

$$x_{ij}^l, z_r \in \{0, 1\} \quad (45)$$

$$AT_j^l, DT_i^l, AT'_r{}^l, DT'_i{}^l \geq 0 \quad (46)$$

$$u_i, u_j \leq n(S) \quad \forall i, j \in S \quad (47)$$

$$u_i, u_j \leq n(C) \quad \forall i, j \in C \quad (48)$$

در مدل بالا رابطه ۱، تابع هدف مسئله است که مجموع هزینه احداث انبارهای متقاطع، هزینه سفر میان تأمین‌کنندگان، مشتریان و انبارهای متقاطع در صورت احداث، هزینه ثابت اولیه به‌کارگیری وسایل نقلیه و جریمه تأخیر و تعجیل در تحویل کالاها به مشتریان را دربرمی‌گیرد. روابط ۲ و ۳، محدودیت‌های حذف مسیرهای فرعی و محدودیت ۴، مانع از ایجاد مسیر بین انبارهای متقاطع است. محدودیت ۵، موجب می‌شود حداقل یک انبار متقاطع احداث شود. محدودیت بودجه برای احداث انبارهای متقاطع و به‌کارگیری وسایل نقلیه در رابطه ۶، نشان داده شده است.

محدودیت‌های ۷ تا ۱۷، محدودیت‌های مربوط به مسیر هستند؛ یعنی هر وسیله نقلیه که به یک تأمین‌کننده یا مشتری وارد می‌شود باید از آن خارج شود (محدودیت‌های ۷ و ۸) و هر وسیله نقلیه که از یک انبار متقاطع خارج می‌شود، باید به همان انبار برگردد (محدودیت‌های ۹ و ۱۰). اگر هیچ تأمین‌کننده‌ای به یک انبار متقاطع تخصیص نیابد، هیچ مشتری‌ای هم نباید به آن تخصیص یابد (محدودیت ۱۱) و در صورتی که تأمین‌کننده‌ای به یک انبار متقاطع تخصیص یابد، حداقل یک مشتری به آن مرکز تخصیص می‌یابد (محدودیت ۱۲) و برعکس. محدودیت ۱۳، متغیری را تعریف می‌کند که نشان‌دهنده تعداد دفعاتی است که وسیله نقلیه i از گره i خارج می‌شود.

محدودیت ۱۴، نشان می‌دهد هر وسیله نقلیه تنها با یک انبار متقاطع مرتبط است؛ به عبارت دیگر هر وسیله نقلیه به یک انبار متقاطع اختصاص دارد که از پارکینگ آن خارج می‌شود و به همان مرکز بازمی‌گردد. از طرفی هر وسیله نقلیه هر گره را یک‌بار ملاقات می‌کند که در محدودیت ۱۵، نشان داده شده است. محدودیت‌های ۱۶ و ۱۷، تضمین می‌کنند که حداقل یک وسیله نقلیه به انبار متقاطع i تخصیص می‌یابد؛ اگر و تنها اگر این انبار متقاطع احداث شده باشد. محدودیت‌های ۱۸ تا ۳۲، محدودیت‌های مربوط به برداشت و تحویل کالا هستند. محدودیت‌های ۱۸ تا ۲۱، تضمین می‌کنند که اگر وسیله نقلیه‌ای گره i را ملاقات کند، باید برداشت/ تحویلی در آن گره انجام شود. محدودیت‌های ۲۲ و ۲۳، تضمین می‌کنند اگر وسیله نقلیه i گره i را ملاقات نکند، برداشت و تحویلی انجام نمی‌شود. رابطه ۲۴، محدودیت ظرفیت وسیله نقلیه را نشان می‌دهد. محدودیت‌های ۲۵ و ۲۶، پایستگی کالا در زنجیره تأمین را تضمین می‌کنند و نشان می‌دهند کالایی بیش از مقدار عرضه‌شده/ تقاضاشده توسط گره تأمین‌کننده/ مشتری، برداشت/ تحویل نمی‌شود. به عبارتی مجموع کالای نوع n برداشت‌شده از تأمین‌کننده i با وسایل نقلیه مختلف باید برابر با مقدار کالای نوع n عرضه‌شده توسط تأمین‌کننده z و مجموع مقدار کالای نوع n تحویل‌شده به مشتری z با وسایل نقلیه مختلف باید برابر با تقاضای مشتری z از کالای نوع n باشد. طبق محدودیت ۲۷، تمام محصول برداشت‌شده توسط وسیله نقلیه i از گره‌های تأمین‌کننده در انبار متقاطعی که آن را ملاقات می‌کند تحویل می‌شود و طبق محدودیت

۲۸، تمام محصول برداشت‌شده توسط وسیله نقلیه l از انبار متقاطع، به گره‌های مشتری تحویل می‌شود.

محدودیت ۲۹، نشان می‌دهد وسایل نقلیه در مسیر برداشت به هنگام خروج از انبار متقاطع کالایی با خود حمل نمی‌کنند و به‌طور مشابه محدودیت ۳۰، تضمین می‌کند وسایل نقلیه در مسیر تحویل به هنگام بازگشت به انبار متقاطع کالایی با خود حمل نمی‌کنند (کلیه کالاها تحویل شده است). در انبار متقاطع r مجموع کالای تحویل‌شده با مجموع کالای برداشت‌شده از همان نوع برابر است که این موضوع در محدودیت ۳۲، عنوان شده است. ظرفیت انبار متقاطع در محدودیت ۳۲، نشان داده شده است که این محدودیت در صورت احداث انبار متقاطع عمل می‌کند و در غیر این صورت هرگونه تحویل کالا و به‌تبع آن برداشت کالا از انبار متقاطع (مکان بالقوه انبار متقاطع) غیرمجاز خواهد بود.

محدودیت‌های ۳۳ تا ۴۲، مربوط به زمان‌بندی سفر هستند. محدودیت‌های ۳۳ تا ۳۶، زمان‌های ترک و رسیدن به گره‌های برداشت و انبارهای متقاطع در مسیر برداشت کالا و محدودیت‌های ۳۷ تا ۴۰، زمان‌های ترک و رسیدن به گره‌های تحویل و انبارهای متقاطع در مسیر تحویل کالا و محدودیت‌های ۴۱ و ۴۲، میزان تأخیر و تعجیل در رسیدن به گره‌های مشتری را محاسبه می‌کنند. محدودیت‌های ۴۳ تا ۴۸، مقادیر مجاز برای متغیرهای تصمیم و کمکی را تعریف می‌کنند.

روش حل مدل پیشنهادی. مسئله مکان‌یابی و مسیریابی در این پژوهش متشکل از دو مسئله NP-hard مکان‌یابی تسهیلات و زمان‌بندی وسایل نقلیه است. برای حل مدل پیشنهادی از دو روش حل دقیق و فراابتکاری استفاده می‌شود. با توجه به غیرخطی بودن مدل، روش‌های حل دقیق و نرم‌افزارهای مربوط به آن نمی‌توانند رسیدن به جواب بهینه کلی را تضمین کنند. از طرفی به دلیل پیچیدگی مسئله و تعداد زیاد پارامترها و محدودیت‌ها، با بالا رفتن اندازه مسئله، حجم و زمان محاسبات به قدری بالا می‌رود که عملاً استفاده از این روش‌ها را غیراقتصادی و یا حتی به دلیل محدودیت‌های نرم‌افزاری غیرممکن می‌سازد؛ از این رو کاربرد ابزارهای حل دقیق (مانند نرم‌افزار GAMS) به منظور بررسی امکان‌پذیری مدل و وجود جواب شدنی در مسائلی با ابعاد کوچک و الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای حل هر سه دسته مسائل کوچک، متوسط و بزرگ بوده است. بررسی جواب‌های به‌دست‌آمده از حل مدل در نرم‌افزار GAMS نشان می‌دهد تمام محدودیت‌ها و مفروضات موردنظر مسئله در مدل برآورده شده است.

الگوریتم شبیه‌سازی تبرید نسبت به الگوریتم‌هایی مانند الگوریتم ژنتیک که لزوماً در جمعیتی از جواب‌ها به‌طور هم‌زمان به جست‌وجو بپردازند، همچنین نسبت به الگوریتم‌های دارای حافظه مانند جست‌وجوی ممنوع و بهینه‌سازی مورچگان، از سرعت بالاتری برخوردار است و حافظه رایانه‌ای کمتری اشغال می‌کند. در عین حال به دلیل وجود روند تصادفی هدایت‌شده (احتمال

پذیرش کمتر برای جواب‌های غیربهبینه) دارای توانایی گذر از بهینه محلی است. نتایج پژوهش‌های گذشته حاکی از آن است که این الگوریتم در مسائل حمل‌ونقل و مسیریابی نسبت به سایر الگوریتم‌های پرکاربرد عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد [۸، ۹، ۱۰، ۱۴، ۲۳]

ویژگی‌های الگوریتم شبیه‌سازی تبرید به کاررفته. الگوریتم شبیه‌سازی تبرید با تولید یک جواب اولیه به صورت تصادفی آغاز می‌شود و به جواب‌های همسایه حرکت می‌کند. در هر گام، یک حالت همسایه را در نظر می‌گیرد و به صورت احتمالی بین جابه‌جایی به حالت جدید یا ماندن در حالت قبلی تصمیم‌گیری می‌کند. این مرحله تا جایی تکرار می‌شود که سیستم به حالت تعادل (جواب معقول) برسد و یا اعمال محاسباتی از حد مشخصی عبور کند. در اینجا نمایش جواب (مسیرها) به صورت ماتریس صفر و یک است و برای حرکت به جواب‌های همسایه، تعدادی از خانه‌های ماتریس به تصادف انتخاب و تغییر می‌یابند. نحوه نمایش جواب (مسیر) و تولید جواب‌های جدید در شکل ۲، نشان داده شده است. در اینجا هر مسیر به صورت یک ماتریس $i \times j$ درآمده است که l وسایل نقلیه و i و j زهر دو اجتماع مجموعه گره‌های تأمین‌کنندگان، انبارهای متقاطع و مشتریان را نشان می‌دهند. برای مثال، اگر مسئله دارای چهار تأمین‌کننده، سه محل بالقوه انبار متقاطع و پنج مشتری و چهار وسیله نقلیه باشد، یک ماتریس $4 \times 12 \times 12$ ایجاد خواهد شد؛ به طوری که شماره گره‌های تأمین‌کننده از ۱ تا ۴، انبارهای متقاطع از ۵ تا ۷ و مشتری از ۸ تا ۱۲ است. حال اگر در این ماتریس آرایه [۱، ۲، ۵] برابر یک باشد، به این معنا است که برای وسیله نقلیه ۱ از گره ۲ (تأمین‌کننده) به گره ۵ (انبار متقاطع) مسیری وجود دارد؛ به عبارت دیگر تأمین‌کننده شماره ۲ به انبار متقاطع شماره ۵، اختصاص یافته است. بدین ترتیب به طور ضمنی مشخص می‌شود که کدام یک از محل‌های بالقوه برای احداث انبارهای متقاطع انتخاب شده‌اند؛ زیرا اگر حداقل یک تأمین‌کننده / مشتری به یک انبار متقاطع بالقوه تخصیص یابد، بدین معنا است که آن مرکز باید احداث شود. برای جلوگیری از به وجود آمدن جواب‌های نشدنی در ماتریس مسیر، جواب‌های جدید پس از تولید اصلاح و مسیرهای غیرمجاز حذف می‌شوند (برای مثال، آرایه‌های مربوط به ارتباط بین دو مرکز واسطه یا ارتباط مستقیم تأمین‌کننده و مشتری صفر می‌شوند).

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۱ | ۰ | ۰ | ۱ | ۰ |
| ۱ | ۱ | ۱ | ۰ | ۰ | ۰ |

شکل ۲. سازوکار تولید جواب در الگوریتم شبیه‌سازی تبرید به کاررفته

ماتریس برداشت به صورت $i \times n \times i$ و ماتریس تحویل به صورت $i \times n \times j$ تعریف شده است که l وسیله نقلیه، n نوع کالا و i شماره گره در فرآیند برداشت (تأمین‌کننده یا انبار متقاطع) و j شماره گره در فرآیند تحویل (انبار متقاطع یا مشتری) را نشان می‌دهند. برای مثال اگر آرایه [۱،۲،۳] برابر ۳۰ باشد به این معناست که ۳۰ واحد کالا از نوع ۲ توسط وسیله نقلیه ۱ از گره ۳ برداشت می‌شود. مقادیر آرایه‌های این ماتریس‌ها اعداد صحیح هستند و متناسب با ماتریس مسیر (با افزایش و کاهش مقادیر صحیح تصادفی) تغییر می‌کنند؛ لذا مسیریابی که یک وسیله نقلیه خاص در آن تردد ندارد (یعنی عناصر برای آن وسیله نقلیه در ماتریس مسیر صفر هستند)، آرایه مربوط به آن وسیله در آن مسیرها در ماتریس برداشت و تحویل نیز صفر خواهد بود و بالعکس. سایر محدودیت‌های مربوط به برداشت و تحویل (مانند ظرفیت وسایل نقلیه و گره‌ها) از طریق جریمه در تابع انرژی لحاظ می‌شوند.

اجزای اصلی تشکیل‌دهنده الگوریتم شبیه‌سازی تبرید عبارت‌اند از:

تابع انرژی: یکی از مهم‌ترین بخش‌های الگوریتم فراابتکاری است که سهم عمده‌ای از زمان اجرای الگوریتم را به خود اختصاص می‌دهد. وظیفه این تابع یافتن میزان مطلوبیت هریک از جواب‌ها است. با توجه به اینکه در این پژوهش، هدف، بهینه‌سازی مجموع هزینه‌های حمل‌ونقل و احداث انبارهای متقاطع است، تابع انرژی به صورت مجموع هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌گذاری حمل‌ونقل و احداث انبارهای متقاطع (مشابه تابع هدف مسئله) به علاوه جریمه عدم‌ارضای محدودیت‌های مسئله تعریف شده است.

تابع پذیرش: احتمال قبول جواب‌های بد را مشخص می‌کند. در اینجا از تابع بولتزمن طبق رابطه ۴۹، به عنوان تابع پذیرش استفاده شده است که در آن T دما، k ثابت بولتزمن، ΔE تغییر در تابع انرژی ناشی از جواب تولیدشده است.

$$P(\Delta E) = e^{-\Delta E/kT} \quad (49)$$

با توجه به تابع بولتزمن مشاهده می‌شود که اگر دمای اولیه بسیار بالا باشد، جست‌وجوی تصادفی با تکرارهای زیاد و پراکندگی جواب‌ها و دمای اولیه بسیار پایین موجب تبدیل شدن الگوریتم به جست‌وجوی محلی می‌شود. بنابراین باید بین این دو حالت تعادل برقرار شود. **حالت تعادل:** برای رسیدن به تعادل در هر دما باید چندین تکرار انجام گیرد. تعداد تکرارها با توجه به اندازه نمونه مسئله تعیین می‌شود و باید نسبت قابل قبولی از اندازه همسایه باشد. در اینجا به طور تجربی مشاهده شد که اگر تعداد همسایه‌ها در هر دما بسیار زیاد باشد، عملاً در کیفیت جواب نهایی تأثیر نخواهد داشت و تنها زمان اجرای الگوریتم طولانی‌تر خواهد شد؛ بنابراین در صورتی که تعداد همسایگان از حد مشخصی (می‌تواند از طریق تعدادی آزمایش و سعی و خطا به دست آید) فراتر رود، به عنوان پارامتر اقتصادی مطرح خواهد بود.

تابع تبرید: در الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، دما به صورت تدریجی به گونه‌ای کاهش می‌یابد که کیفیت جواب‌ها و سرعت تبرید نسبت به هم حالت معکوس داشته باشند. اگر دما بسیار آرام کاهش یابد، جواب‌های بهتری به دست می‌آید؛ اما زمان محاسبات بالا می‌رود. تابع تبرید می‌تواند اشکال مختلفی داشته باشد. در این پژوهش تابع تبرید مناسب از میان دو تابع تبرید خطی و غیرخطی انتخاب شده است. در تابع خطی (جدول ۱) که پرکاربردترین تابع کاهش دما است، با افزایش تعداد تکرارها دما به صورت یکنواخت کاهش می‌یابد؛ در حالی که در تابع غیرخطی (جدول ۱) سرعت کاهش دما در تکرارهای اولیه بیشتر است و به تدریج کاهش می‌یابد.

شرایط خاتمه: در حالت نظری پایان الگوریتم در زمان صفر شدن دما است؛ اما در عمل می‌توان جست‌وجو را زمانی متوقف کرد که احتمال پذیرش جواب، بسیار کوچک و ناچیز شود و یا تعداد تکرارهای الگوریتم به حد مشخصی برسد. در اینجا شرط توقف، ثابت‌بودن بهترین مقدار تابع برازش در ۲۰۰ تکرار متوالی و یا رسیدن به حداکثر تعداد تکرارهای حلقه اصلی الگوریتم (در اینجا ۱۰۰۰ تکرار) در نظر گرفته شده است.

نرخ تغییر: درصد خانه‌های صفر و یک را که باید برای تغییر انتخاب شوند (شکل ۲)، مشخص می‌کند.

تعداد الگوریتم‌های موازی: در الگوریتم شبیه‌سازی تبرید به کاررفته در این پژوهش، در هر اجرا ۱۰ الگوریتم با جواب اولیه یکسان به طور موازی اجرا می‌شوند.

جدول ۱. سطوح عوامل (پارامترهای) الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

| تعداد همسایگی | تابع تبرید | دمای نهایی | دمای اولیه | ضریب بولتزمان | نرخ تغییر | عامل سطح |
|---------------|--|------------|------------|---------------|-----------|----------|
| ۱۰ | خطی: $d = \frac{T_0 - T_f}{N}$ $T_n = T_{(n-1)} - d$ | ۱ | ۱۰۰۰۰ | ۱ | ۰/۱ | ۱ |
| ۲۰ | غیرخطی: $A = \frac{(T_0 - T_f) \times (N - 1)}{N}$ $B = T_0 - A$ $T_n = \left(\frac{A}{n + 1}\right) + B$ | ۱۰ | ۵۰۰۰۰ | ۳ | ۰/۱۵ | ۲ |
| | | | ۱۰۰۰۰۰ | ۵ | ۰/۲ | ۳ |

با توجه به اینکه کارایی الگوریتم شبیه‌سازی تبرید به پارامترهای آن وابستگی زیادی دارد [۶]، بنابراین طبق مطالعات گذشته، برای هر یک از پارامترهای مهم الگوریتم که به‌عنوان عامل اقتصادی مطرح نیستند و نیاز به برقراری تعادل در مقدار آن‌ها است، به کمک روش تاگوچی بهترین سطوح تعیین می‌شوند. با توجه به تعداد عوامل (پارامترهای الگوریتم SA) و تعداد سطوح هر یک که در جدول ۱، مشخص شده است، سه پارامتر دوسطحی و سه پارامتر سه‌سطحی وجود دارد و طرح تاگوچی مناسب L36 است؛ بنابراین برای هر یک از آزمایش‌های طرح یادشده، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید با پنج بار تکرار بر روی مسئله‌ای با ۱۰ گره (شامل سه تأمین‌کننده، سه مکان بالقوه انبارهای متقاطع و چهار مشتری)، سه نوع محصول و شش وسیله نقلیه از سه نوع مختلف اجرا شد که به‌صورت تصادفی تولید و امکان‌پذیری جواب آن با نرم‌افزار GAMS آزمایش شده است. برای انتخاب بهترین سطوح پارامترها ابتدا بهترین سطح هر یک از پارامترها بدون در نظر گرفتن تأثیر متقابل آن‌ها تعیین و سپس با در نظر گرفتن اثرات متقابل عوامل، بازنگری شده و در اجرای الگوریتم به کار رفته‌اند که نتایج در جدول ۲، ارائه شده است.

جدول ۲. سطوح عوامل (پارامترهای) الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

| عامل | حالت مطلوب بدون در نظر گرفتن | | حالت مطلوب با در نظر گرفتن | |
|---------------|------------------------------|--------|----------------------------|--------------------|
| | سطح | مقدار | اثرات متقابل عوامل | اثرات متقابل عوامل |
| نرخ تغییر | ۲ | ۰/۱۵ | سطح | مقدار |
| ضریب بولتزمان | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ |
| دمای اولیه | ۲ | ۵۰۰۰۰ | ۲ | ۵۰۰۰۰ |
| دمای نهایی | ۲ | ۱۰ | ۲ | ۱۰ |
| تابع تبرید | ۲ | غیرخطی | ۲ | غیرخطی |
| تعداد همسایگی | ۲ | ۲۰ | ۱ | ۱۰ |

۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

پس از تنظیم پارامترهای الگوریتم، مسائل نمونه در قالب سه دسته کوچک (با ۱۰ گره)، متوسط (با ۲۰ گره) و بزرگ (با ۳۰ گره) تولید و حل شده‌اند. برای هر دسته از مسائل، تعداد ۱۰ مسئله با ویژگی‌هایی که در جدول ۳، عنوان شده، به‌عنوان نمونه تولید شده است. برخی پارامترها مانند مقدار عرضه و تقاضا از هر کالا در هر گره به‌گونه‌ای تعریف شده‌اند که ضمن حفظ ویژگی تصادفی بودن، مسئله دارای جواب شدنی باشد (شکل ۳).

| | | | |
|-------|-------|-------|-------|
| | n_1 | n_2 | n_3 |
| i_1 | a1 | a2 | a3 |
| i_2 | b1 | b2 | b3 |
| i_3 | c1 | c2 | c3 |

مقدار تقاضا در گره های مشتری که مقدار آنها به صورت تصادفی تعریف می‌شود.

| | | | |
|-------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | n_1 | n_2 | n_3 |
| j_1 | d1 | d2 | d3 |
| j_2 | e1 | e2 | e3 |
| j_3 | f1 | f2 | f3 |
| j_4 | $g1=(a1+b1+c1) - (d1+e1+f1)$ | $g2=(a2+b2+c2) - (d2+e2+f2)$ | $g3=(a3+b3+c3) - (d3+e3+f3)$ |

مقدار عرضه در گره های تأمین کننده که مقدار آنها به صورت تصادفی تعریف می‌شود. j_4 → گره تأمین کننده که در آن، مقدار عرضه براساس سایر مقادیر تصادفی محاسبه می‌شود.

شکل ۳. نحوه تولید پارامترهای عرضه و تقاضا با حفظ ویژگی تصادفی بودن

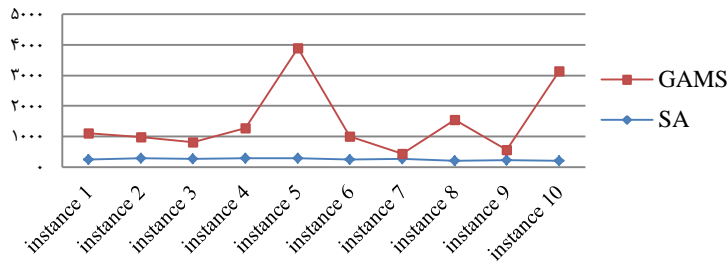
پس از تولید مسائل نمونه، الگوریتم SA با پارامترهای تنظیم شده (مطابق جدول ۲)، برای هر مسئله پنج بار اجرا شده است. برای این منظور الگوریتم در نرم‌افزار MATLAB8.3.0.532 (R2014a) کدنویسی شده و در رایانه قابل حمل با پردازنده مرکزی intel core i5 2.5 گیگاهرتز، ۶۴ بیتی با ۴ گیگابایت حافظه داخلی با سیستم‌عامل Windows7 Home Premium اجرا شده است. همچنین نرم‌افزار GAMS23.6 برای مسائل کوچک در رایانه یادشده مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۳. شیوه تولید پارامترهای مسائل تصادفی

| بزرگ | متوسط | کوچک | ابعاد مسئله پارامتر |
|---|---|---|------------------------|
| ۱۰ | ۶ | ۳ | $n(S)$ |
| ۹ | ۶ | ۳ | $n(R)$ |
| ۱۱ | ۸ | ۴ | $n(C)$ |
| ۱۰ | ۱۰ | ۵ | N |
| ۴۰ | ۴۰ | ۲۰ | $n(A)$ |
| $\sim \text{uniform}(15,40)$ | $\sim \text{uniform}(5,70)$ | $\sim \text{uniform}(5,30)$ | D_{nj} |
| $\sim \text{uniform}(15,35)$ | $\sim \text{uniform}(5,80)$ | $\sim \text{uniform}(10,30)$ | S_{ni} |
| $\sim \text{uniform}(1,30)$ | $\sim \text{uniform}(1,15)$ | $\sim \text{uniform}(1,15)$ | y_i و x_i |
| $\sim \text{uniform}(1000,2000)$ | $\sim \text{uniform}(500,1000)$ | $\sim \text{uniform}(100,300)$ | FC_r |
| $\sim \text{uniform}(FC_r - 100, FC_r + 100)$ | $\sim \text{uniform}(FC_r - 50, FC_r + 50)$ | $\sim \text{uniform}(FC_r - 10, FC_r + 10)$ | Q_r |
| | $\sim \text{uniform}(5000,10000)$ | | TC |
| | $\sim \text{uniform}(0,1]$ | | V_n |
| | $\sim \text{uniform}(0,1]$ | | sl_{nr} |

| بزرگ | متوسط | کوچک | ابعاد مسئله پارامتر |
|------|--|------|------------------------|
| | $\sim \text{uniform}(0,1]$ | | t_n^l |
| | $\sim \text{uniform}(0,1]$ | | tc_l |
| | $\sim \text{uniform}(1,100)$ | | α_{ni} |
| | $\sim \text{uniform}(1,100) + \alpha_{ni}$ | | β_{ni} |
| | $\sim \text{uniform}[0,1)$ | | ep_{ni} |
| | $\sim \text{uniform}(0,1]$ | | lp_{ni} |

به دلیل ماهیت و پیچیدگی مسئله با اندک افزایشی در ابعاد مسئله زمان حل بسیار بالا می‌رود و نرم‌افزار GAMS تنها قادر به حل مسائل کوچک است؛ بنابراین با استفاده از نرم‌افزار GAMS ابتدا مسائل کوچک حل و از وجود جواب شدنی برای آن‌ها اطمینان حاصل می‌شود و نیز مبنایی برای مقایسه کارایی الگوریتم به‌دست می‌آید. مسائل متوسط و بزرگ به دلیل محدودیت‌های نرم‌افزاری و زمانی، امکان حل در نرم‌افزار GAMS در زمان معقول را ندارند. با توجه به اینکه این پژوهش با یک مدل ترکیبی عدد صحیح غیرخطی مواجه است، نرم‌افزارهایی مانند GAMS که از روش‌های حل دقیق استفاده می‌کنند، رسیدن به بهترین جواب موجود را تضمین نمی‌کنند و فرآیند حل، زمانی متوقف می‌شود که در الگوریتم شاخه و کران جواب‌ها به‌سوی بدتر شدن پیش روند. در جدول ۴، زمان حل و جواب به‌دست‌آمده با استفاده از GAMS و میانگین زمان حل و بهترین جواب حاصل از SA برای مسائل کوچک ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در تمامی موارد نتایج حاصل از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید بسیار بهتر از جواب‌های GAMS و زمان حل نیز کوتاه‌تر بوده است. در واقع با توجه به اینکه مدل توسعه‌داده‌شده غیرخطی است، نتایج حاصل از گمز که در جدول ۴، گزارش شده است، جواب‌های بهینه موضعی هستند. مقایسه میانگین زمان حل در SA و GAMS که در شکل ۴، ارائه شده است، نشان می‌دهد میانگین زمان حل در SA بر خلاف GAMS به پارامترهای مسئله وابسته نیست و با توجه به ابعاد مسئله و پارامترهای الگوریتم می‌تواند تغییر کند.

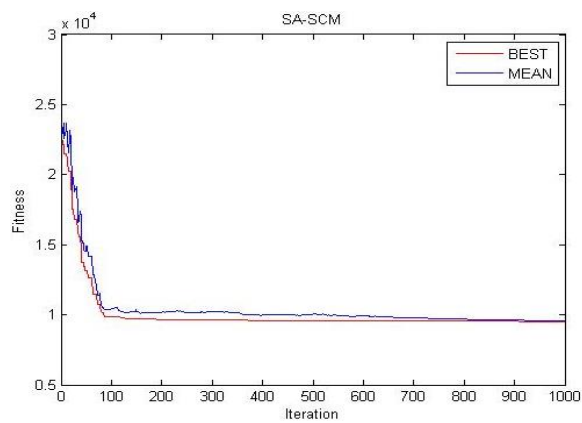


شکل ۴. مقایسه زمان حل (ثانیه) در SA و GAMS

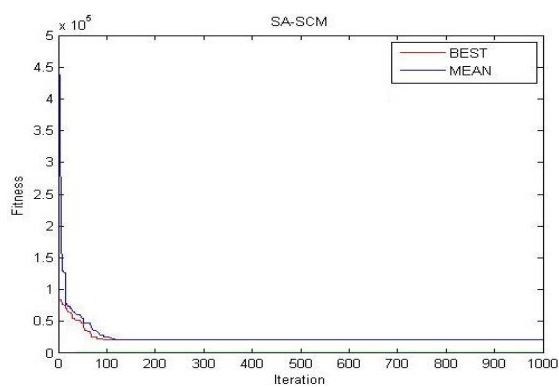
جدول ۴. مقایسه زمان حل و جواب‌ها در نرم‌افزار GAMS و الگوریتم SA

| شماره نمونه | GAMS | | SA | |
|-------------|-----------------|-------|-------------------------|-------------------------|
| | زمان حل (ثانیه) | جواب | میانگین زمان حل (ثانیه) | بهترین جواب به دست آمده |
| ۱ | ۸۴۹/۳۴۰ | ۳۸۸۲۷ | ۲۵۲/۹۹۳ | ۹۵۲۵ |
| ۲ | ۶۹۷/۳۲۹ | ۲۱۶۶۱ | ۲۸۷/۹۸۹ | ۱۷۳۷ |
| ۳ | ۵۳۴/۱۸۳ | ۲۰۷۷۵ | ۲۶۸/۰۷۸ | ۱۰۷۳ |
| ۴ | ۱۰۰۱/۵۰۹ | ۸۱۵۴ | ۲۷۹/۵۰۱ | ۱۰۸۶ |
| ۵ | ۳۶۰۳/۰۰۰ | ۲۶۹۶۵ | ۲۹۰/۵۹۲ | ۴۲۵۷ |
| ۶ | ۷۴۱/۰۰۰ | ۲۵۸۸۹ | ۲۵۳/۰۷۰ | ۵۸۴۶ |
| ۷ | ۱۸۶/۹۹۱ | ۲۵۲۶۰ | ۲۵۷/۱۸۶ | ۵۲۳۴ |
| ۸ | ۱۳۳۵/۶۶۱ | ۹۴۴۰ | ۲۰۶/۵۰۶ | ۶۱۳۰ |
| ۹ | ۳۳۵/۱۹۹ | ۹۸۹۴ | ۲۱۶/۵۷۴ | ۶۱۹۲ |
| ۱۰ | ۲۹۳۹/۸۵۶ | ۳۳۴۶۸ | ۱۹۵/۰۰۸ | ۷۱۷۹ |

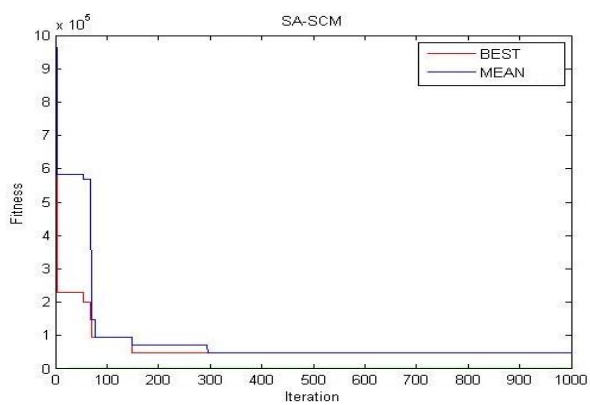
برای مشاهده وضعیت همگرایی و عملکرد الگوریتم در مسائل کوچک، متوسط و بزرگ، نمودار مربوط به حل نمونه اول از هر یک از سه دسته به ترتیب در شکل‌های ۵ تا ۷، نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سرعت بهبود جواب‌ها و روند همگرایی به‌ویژه در مسائل کوچک و متوسط قابل قبول و منطقی است.



شکل ۵. حل نمونه اول از دسته مسائل کوچک توسط SA با تنظیم پارامتر

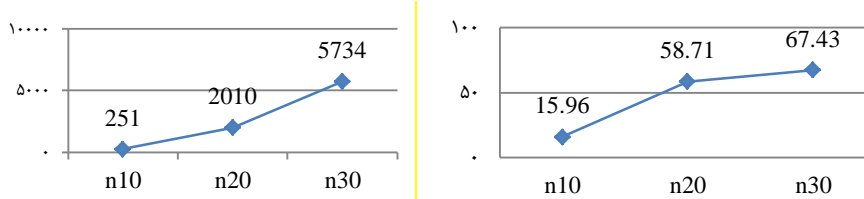


شکل ۶. حل نمونه اول از دسته مسائل متوسط توسط SA با تنظیم پارامتر



شکل ۷. حل نمونه اول از دسته مسائل بزرگ توسط SA با تنظیم پارامتر

برای هر دسته از مسائل، نمودار میانگین انحراف معیار نمونه در شکل ۸ و میانگین زمان حل در شکل ۹، گزارش شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود با بالا رفتن اندازه مسئله انحراف معیار نمونه و زمان حل بیشتر می‌شود و سرعت افزایش زمان حل نیز بیشتر است.



شکل ۸. میانگین انحراف معیار نمونه در مسائل دارای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ گره

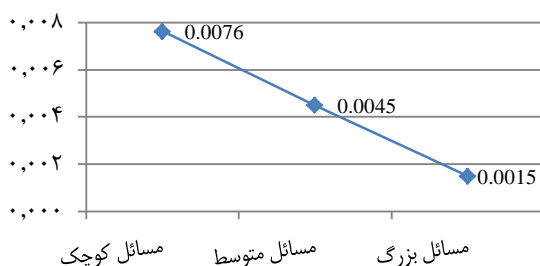
شکل ۹. میانگین زمان حل در مسائل دارای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ گره

باید توجه داشت که افزایش اندازه مسئله موجب بالا رفتن مقدار جواب‌ها می‌شود که می‌تواند بر ابعاد انحراف معیار تأثیر بگذارد. برای مثال، مفهوم یک واحد فاصله از میانگین جواب‌ها در مسائل کوچک با همین میزان فاصله از میانگین در مسائل بزرگ متفاوت است؛ بنابراین برای از بین بردن تأثیر ابعاد مسئله از شاخص ضریب تغییرات (CV) استفاده و نتیجه در شکل ۱۰، ارائه شده است؛ همچنین با توجه به اینکه مبنایی برای جواب بهینه وجود ندارد از شاخص میانگین RPD (رابطه ۵۰) برای سنجش فاصله جواب‌ها از بهترین جواب به دست آمده، به عنوان معیاری از کیفیت جواب‌ها و پایداری الگوریتم در دستیابی به جواب‌های مطلوب استفاده و نتایج در شکل ۱۱، گزارش شده است. در رابطه ۵۰، مقدار جواب به دست آمده در اجرای زام الگوریتم برای مسئله نام است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میانگین ضریب تغییرات و میانگین RPD هر دو با افزایش اندازه مسئله کاهش می‌یابند که می‌تواند نشان‌دهنده افتادن در دام بهینه محلی و کاهش کارایی الگوریتم در حل مسائل بزرگ باشد که این موضوع از شکل ۷، واضح است.

$$RPD_{i,j} = \frac{y_{i,j} - \min_j(y_{i,j})}{\min_j(y_{i,j})} \quad (50)$$



شکل ۱۰. میانگین ضریب تغییرات جواب‌ها در مسائل دارای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ گره



شکل ۱۱. میانگین RPD برای مسائل دارای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ گره

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

داشتن بینش کلی برای بهینه‌سازی تصمیم‌ها در سطوح استراتژیکی، تاکتیکی و عملیاتی در یک زنجیره تأمین و برنامه‌ریزی پیش از اجرا، هدف کلان این پژوهش بود که سعی شد از طریق ارائه و حل مدلی برای مسئله بتوان به برنامه‌ریزی مؤثر و کارا در مسائل واقعی حمل‌ونقل در زنجیره‌های تأمین کمک کرد. نیاز صنایع توزیعی و تولیدی به کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل و قیمت تمام‌شده محصولات در مقصد و افزایش سودآوری و همچنین کاهش استهلاک وسایل نقلیه در مسیرهای ناکارآمد و طولانی، افزایش سرعت در عرضه محصولات، به‌ویژه محصولات فاسدشدنی، دارای نیاز فصلی یا ارسال فوری و همچنین نیاز به برنامه‌ریزی پیش از احداث انبارهای متقاطع برای جلوگیری از هدررفت سرمایه از ضرورت‌های ارائه مدلی قابل‌حل برای پاسخگویی به نیازهای دنیای واقعی است. با حل این مدل تعداد و محل انبارهای متقاطع که باید احداث شوند، سهم هر انبار متقاطع از تأمین و عرضه هر یک از محصولات، مناسب‌ترین مسیرهای حمل‌ونقل و زمان‌بندی سفرها مشخص می‌شود؛ همچنین به علت جدیدبودن مدل، کارایی الگوریتم شبیه‌سازی تبرید در حل این مدل محک خورده است.

نبودن جواب بهینه یا حد پایینی برای مقایسه جواب‌ها از محدودیت‌های این پژوهش بود؛ زیرا مسائل محک که تمامی پارامترهای مسئله شامل پارامترهای مربوط به مکان‌یابی انبارهای متقاطع، مسیریابی حمل‌ونقل، زمان‌بندی سفر و عرضه و تقاضا را با محدودیت‌ها و شرایط این مسئله به‌صورت یکجا دارا باشند، وجود ندارد. از طرفی به دلیل غیرخطی بودن مدل، نرم‌افزارهایی که از روش‌های حل دقیق مانند الگوریتم‌های شاخه و کران استفاده می‌کنند، نمی‌توانند ارائه جواب بهینه کلی برای مسئله را تضمین کنند و با بدترشدن جواب‌ها در روش شاخه و کران و یا رسیدن به حد مشخصی از محاسبات یا زمان حل، متوقف می‌شوند.

با توجه به جدیدبودن مدل و محدودیت‌های پژوهش، یکی از مفیدترین توسعه‌ها بر پژوهش حاضر، استفاده از چند الگوریتم فراابتکاری برای حل مدل و مقایسه کارایی آن‌ها است. در توسعه

دیگر می‌توان با مجاز کردن حمل مستقیم کالا از تأمین‌کننده به مشتری در موارد نیاز از انبارهای متقاطع استفاده کرد و به‌طور ضمنی مقایسه‌ای بین استراتژی انبارهای متقاطع و حمل مستقیم انجام خواهد گرفت. توسعه مسئله با پارامترهای غیرقطعی احتمالی یا فازی برای مثال فازی بودن پنجره زمانی یا میزان جریمه تأخیر و تعجیل یا احتمالی بودن مقدار عرضه یا تقاضای کالا می‌تواند موضوع چندین پژوهش جداگانه باشد.

منابع

1. Emadabadi, A.A., Teimoury, E., & Pishvae, M.S. (2019). Design of Multi-Periodical and Multi-Product Supply Chain Network with Regard to Disruption of Facilities and Communication Paths (Case Study: Subscription Plan for Publications). *Journal of Industrial Management Perspective*, 35, 135-163. (In Persian)
2. Eslaminia, A., & Azimi, P. (2020). Solving the Electric Vehicle Routing Problem Considering the Vehicle Volume Limitation Using a Simulated Annealing Algorithm. *Journal of Industrial Management Perspective*, 36, 165-188. (In Persian)
3. Javanfar, E., rezaeian, j., Shokoufi, K., & Mahdavi, I. (2017). Multi-Product Cross-Docks Location - Routing Problem Considering Heterogeneous Capacitated Vehicles and Capability of Pick-up and Delivery in Several Times in a Multi-level Supply Chain Network. *Transportation Engineering*, 4, 603-627. (In Persian)
4. Nikjoo, N., & Javadian, N. (2019). A Multi-Objective Robust Optimization Logistics Model in Times of Crisis under Uncertainty. *Journal of Industrial Management Perspective*, 32, 121-147. (In Persian)
5. Seif Barghy, M., & Mortazavi, S. (2018). Tow-Objective Modeling of Location-Allocation Problem in a Green Supply Chain Considering Transportation System and CO2 Emission. *Journal of Industrial Management Perspective*, 29, 163-185. (In Persian)
6. Zare', Y., Barghi, Sh., & Momeni, H. (2011). Using Simulated Annealing Metahuristic Method to Solve the Supply Chain Problems. *Journal of Operations Research and Applications*, 30, 1-24. (In Persian)
7. Agustina, D., Lee, C.K.M., & Piplani, R. (2010). A review: mathematical models for cross-docking planning. *International Journal of Engineering Business Management*, 2, 47-54.
8. Birim, S. (2016). Vehicle routing problem with cross docking: A simulated annealing approach. *The 12th International Strategic Management Conference (ISMC 2016)*, Antalya, Turkey, 149-158.
9. Ferreira, K.M., & Queiroz, T.A. (2018). Two effective simulated annealing algorithms for the Location-Routing Problem, *Applied Soft Computing*, 70, 389-422.
10. Gutierrez-Rodríguez, A.E., Conant-Pablos, S.E., Ortiz-Bayliss, J.C., & Terashima-Marín, H. (2019). Selecting meta-heuristics for solving vehicle routing problems with time windows via meta-learning. *Expert Systems with Applications*, 118, 470-481.
11. Hasani-Goodarzi, A., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2012). Capacitated vehicle routing problem for multi-product cross-docking with split deliveries and pickups. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 62, 1360 -1365.
12. Laporte, G. (1992). The Vehicle Routing Problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*, 59, 345-358.
13. Laporte, G. (2009). Fifty years of vehicle routing. *Transportation Science*, 43, 408-416.
14. Liao, C.J., Lin, Y., Shih, S.C. (2010). Vehicle routing with cross-docking in the supply chain. *Expert Systems with Applications*, 37, 6868-6873.

15. Maranzana, F. (1964). On the location of supply points to minimize transport costs. *Journal of the Operational Research Society*, 15, 261-270.
16. Moghadam, S.S., Fatemi-Ghomi, S.M.T., Karimi, B. (2014). Vehicle routing scheduling problem with cross-docking and split deliveries. *Computers and Chemical Engineering*, 69, 98-107.
17. Mokhtarinejad, M., Ahmadi, A., Karimi, B., Rahmati, S.H.A. (2015). A novel learning based approach for a new integrated location-routing and scheduling problem within cross-docking considering direct shipment. *Applied Soft Computing*, 34, 274-285.
18. Mousavi, S.M., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2013). A hybrid simulated annealing algorithm for location and routing scheduling problems with cross-docking in the supply chain. *Journal of Manufacturing Systems*, 32, 335-347.
19. Nikolopoulou, A.I., P., Repoussis, P.P., Tarantilis, C.D., & Zachariadis, E.E. (2017). Moving products between location pairs: cross-docking versus direct-shipment. *European Journal of Operational Research*, 256, 803-819.
20. Prodhon, C., Prins, C. (2014). A survey of recent research on location-routing problems. *European Journal of Operational Research*, 238, 1-17.
21. Qiu, Y., Wang, L., Xu, X., Fang, X., Pardalos, P.M. (2018). Formulations and branch-and-cut algorithms for multi-product multi-vehicle production routing problems with startup cost. *Expert Systems with Applications*, 98, 1-10.
22. Rahbari, A., Nasiri, M.M., Werner, F., Musavi, M.M., Jolai, F. (2019). The vehicle routing and scheduling problem with cross-docking for perishable products under uncertainty: Two robust bi-objective models. *Applied Mathematical Modelling*, 70, 605-625.
23. Sandhya, Katiyar, V. (2015). Relative performance of certain metaheuristics on vehicle routing problem with time windows. *International Journal of Information Technology and Computer Science*, 12, 40-49.
24. Von Boventer, E. (1961). The relationship between transportation costs and location rent in transportation problems. *Journal of Regional Science*, 3, 27-40.
25. Watson-Gandy, C.D.T., & Dohrn, P.J. (1973). Depot location with van salesmen – A practical approach. *Omega*, 1, 321-329.
26. Webb, M.H.J. (1968). Cost functions in the location of depots for multi-delivery journeys. *Operational Research Society*, 19, 311-320.

Modeling and Solving the Cross-Docking Centers Location and Vehicle Scheduling Problem in a Multi-Product Supply Chain with Discrete Pick-up and Delivery

Soheyla Ghorbani^{*}, Behrouz Afshar-Nadjafi^{}**

Abstract

This research studies cross-docking centers location and vehicles routing scheduling problems simultaneously in a three-level supply chain with discrete pick-up and delivery. The proposed problem is formulated as a mixed-integer nonlinear programming model with the aim of reducing total cost includes cross-docking centers construction cost, transportation fixed and variable costs, earliness and tardiness penalty costs. In this supply chain model, vehicles start from a cross-docking center and pick up different products from various suppliers and after classifying and preparing products at cross-docking centers, a different group of vehicles are sent to deliver products to customers. For delivering any kind of product to each customer, a soft time window is considered. Herein, three types of small, medium and large size instances have been generated randomly and solved by using the proposed simulated annealing algorithm. For small problems, the results from simulated annealing algorithm are compared with the solutions obtained by the exact methods.

Keywords: Mathematical Programming; Cross-Docking Location; Vehicle Routing; Discrete Pick-up and Delivery; Simulated Annealing Algorithm.

Received: Mar. 03, 2020; Accepted: Oct. 26, 2020.

* MSc, Islamic Azad University, Qazvin Branch.

** Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial and Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Qazvin Branch (Corresponding Author).

Email: afsharnb@alum.sharif.edu.