مهندسی صنایع و مدیریت شریف، (تابستان ۱۳۹۷)
دوره‌ی ۱-۳۴، شماره‌ی ۱/۱، ص. ۱۴۷-۱۵۵، (یادداشت فنی)

Research Note

مدل‌سازی و حل مسئله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه (VRP) در بخش توزیع زنجیره‌ی تأمین با درنظرگرفتن محدودیت تردد

سید محمدحسن حسینی * **(استادیار)**
علی‌اکبر حسنی (استادیار)
دانشکده‌ی مهندسی صنایع و مدیریت، دانشگاه صنعتی شاهرود

مسئله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه، یکی از مهم‌ترین مسائل مدیریت زنجیره‌ی تأمین است. این اهمیت از آنجا ناشی می‌شود که تخصیص مطلوب وسایل به مسیرهای مختلف، تأثیر بسیار زیادی بر کاهش هزینه‌ها دارد. در تحقیق حاضر، این مسئله با درنظرگرفتن شرایط دنیای واقعی ازجمله محدودیت تردد وسایل بررسی می‌شود. پس از تشریح مسئله و تعریف متغیرها و پارامترهای آن، مدل ریاضی این مسئله توسعه داده می‌شود. باتوجه به NP − hard بودن مسئله، ابتدا جواب بهینه‌ی مسئله در ابعاد کوچک مشخص می‌شود. به‌منظور حل این مسئله در ابعاد متوسط و بزرگ، مدلی مبتنی بر الگوریتم کلونی مورچگان توسعه داده می‌شود. به‌منظور اطمینان از عملکرد مدل پیشنهادی، مسائل متنوعی برای آزمون آن طراحی می‌شود و نتایج مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. همچنین عملکرد الگوریتم پیشنهادی با نتایج حاصل از دو الگوریتم جست‌وجوی ممنوع (TS) و ژنتیک (GA) نیز مقایسه می‌شود.

واژگان کلیدی: مسیریابی وسایل نقلیه، سیستم زنجیره‌ی تأمین، توزیع، الگوریتم کلونی مورچگان.

sh.hosseini@shahroodut.ac.ir
aa.hasani@shahroodut.ac.ir

۱. مقدمه

در دنیای رقابتی امروز، یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های مدیران تولید، کاهش هزینه‌های تولید و بهبود مستمر بهره‌وری است و هر سازمانی در تلاش است تا با ارائه‌ی راه حل‌های مطلوب به رفع این نیازها بپردازد. از این‌رو هر روز روش‌های جدیدی در مدیریت و کنترل تأمین، تولید و موجودی‌ها، و تحویل به مشتریان مطرح می‌شود. از جمله تلاش‌های چشمگیری که در چند سال اخیر در همین راستا صورت گرفته برنامه‌ریزی برای کاهش هزینه‌های مربوط به زنجیره‌ی تأمین است.[۱] مدیریت زنجیره‌ی تأمین (SCM)[۱] یکی از مسائلی است که در سال‌های اخیر اهمیت ویژه‌یی یافته است. زیرا سازمان‌ها دریافته‌اند که برنامه‌ریزی و مدیریت مطلوب زنجیره‌ی تامین اثرات بسیار زیادی در کاهش هزینه‌ها و افزایش رضایت مشتریان دارد که به‌دنبال آن افزایش سهم بازار را در پی خواهد داشت.

در دهه‌ی ۱۹۸۰ میلادی به همراه بهبود در فرایندهای تولید و به‌کارگیری الگوهای مهندسی مجدد، مدیران بسیاری از صنایع دریافتند که برای ادامه‌ی حضور در بازار فقط بهبود فرایندهای داخلی و انعطاف‌پذیری در توانایی‌های شرکت کافی نیست بلکه تأمین‌کنندگان قطعات و مواد نیز باید موادی با بهترین کیفیت و کمترین هزینه تولید کنند. توزیع‌کنندگان محصولات نیز باید ارتباط نزدیکی با سیاست‌های توسعه‌ی بازار تولیدکننده داشته باشند. با چنین نگرشی، رویکردهای زنجیره‌ی تأمین و مدیریت آن پا به عرصه وجود نهاد. از طرف دیگر با توسعه‌ی سریع فنّاوری اطلاعات در سال‌های اخیر و کاربرد وسیع آن در مدیریت زنجیره‌ی تأمین، بسیاری از فعالیت‌های اساسی مدیریت زنجیره با روش‌های جدید در حال انجام است.

با طرح نظریات جدید در ارتباط با رضایت مشتریان، تولید براساس درخواست و نیازهای مشتریان و مسائل رقابتی در بازار و همچنین گسترش و نفوذ فنّاوری اطلاعات و ارتباطات و نوع همبستگی‌هایی که بین تأمین‌کنندگان و تولیدکنندگان بزرگ وجود دارد، این بحث را به بحثی جامع تبدیل کرده است. تأثیرگذاری و تأثیرپذیری تولیدکنندگان، تأمین‌کنندگان، و مشتریان بر یکدیگر و نیز نتیجه‌ی این آثار که در نهایت در هزینه‌ها، کیفیت، زمان تولید، و تحویل نمایان می‌شوند، باعث شده است تا زنجیره‌ی تامین به‌عنوان یک نظام یکپارچه مطرح شود.

مسئله‌ی مسیریابی برای وسایل نقلیه (VRP)[۲] در شبکه‌ی توزیع زنجیره‌ی تأمین، یکی از زیرمسائل مدیریت زنجیره‌ی تأمین محسوب می‌شود که در صدد انتخاب و تخصیص مسیرهای ممکن به وسایل نقلیه دردسترس برای توزیع و تحویل کالا به مراکز پخش یا مشتریان است به‌طوری‌که هزینه‌های مربوطه کمینه شود. حل مطلوب این مسئله ضمن کاهش هزینه‌های توزیع، موجب تحویل به موقع کالاها،

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۶/۲۸، اصلاحیه ۱۳۹۵/۲/۲۷، پذیرش ۱۳۹۵/۵/۶.
DOI:10.24200/J65.2018.5551

کاهش نیاز به انبار و نگه‌داری کالا، و همچنین افزایش رضایت مشتریان نیز می‌شود.

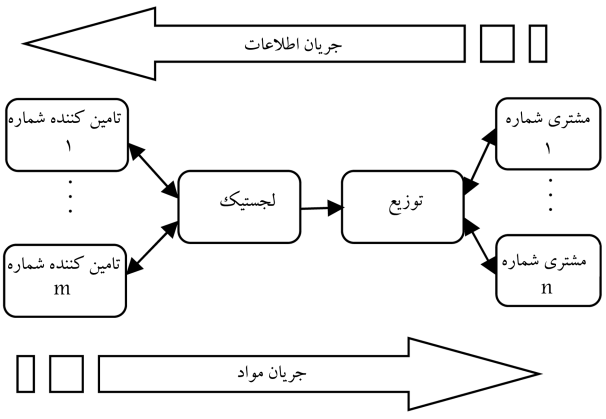
در این مقاله، مسئله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه در شبکه‌ی توزیع زنجیره‌ی تأمین با درنظرگرفتن شرایط دنیای واقعی و محدودیت‌های موجود از جمله محدودیت تردد وسایل نقلیه بررسی می‌شود. بنابراین، ضمن تشریح پارامترهای مؤثر بر مسئله و متغیرهای آن، مدل ریاضی مسئله توسعه داده می‌شود. با توجه به اینکه مسئله‌ی مورد بررسی در رده‌ی مسائل $NP-hard$ قرار دارد، به‌منظور حل این مسئله در ابعاد متوسط و بزرگ، مدلی مبتنی بر الگوریتم کلونی مورچگان (AC)[3] توسعه داده می‌شود.

ساختار ادامه‌ی این مقاله به شرح زیر خواهد بود: در بخش ۲، مبانی نظری و پیشینه‌ی تحقیق تشریح می‌شود. در بخش ۳ به تشریح دقیق مسئله پرداخته و مدل ریاضی مسئله همراه با پارامترهای مؤثر و متغیرهای آن ارائه می‌شود. سپس در بخش ۴، مدل پیشنهادی حل مسئله با استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان توسعه داده می‌شود. طراحی مسائل نمونه و ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی در قالب نتایج محاسباتی در بخش ۵ ارائه می‌شود. در بخش ۶ ضمن جمع‌بندی و نتیجه‌گیری از تحقیق انجام‌شده، زمینه‌های تحقیقاتی آتی معرفی می‌شود.

۲. پژوهش‌های پیشین

افزایش تولید و عرضه‌ی محصولات نسبت به تقاضا، از ویژگی‌های بازار رقابتی امروزی محسوب می‌شود. در چنین شرایطی موفقیت در یک صنعت وابسته به مدیریت زنجیره‌ی تأمین آن صنعت است. مدیریت زنجیره‌ی تأمین تقریباً یک اصطلاح جدید است که درباره‌ی مفهوم برنامه‌ریزی تجارت جامع شکل گرفته است و توسط کارشناسان لجستیک، راهبردی و متخصصان عملیاتی حمایت می‌شود. زنجیره‌ی تأمین مجموعه‌یی از امکانات، تأمین‌کنندگان، مشتریان، محصولات و روش‌هایی از کنترل موجودی، خرید و توزیع است. این زنجیره به‌طور کلی تأمین‌کنندگان را به مشتریان نهایی[4] (مصرف‌کنندگان) متصل می‌کند. بنابراین، زنجیره‌ی تأمین با تولید مواد خام توسط تأمین‌کنندگان شروع می‌شود و با مصرف محصولات توسط مشتریان نهایی به پایان می‌رسد. نوعی از مدل مفهومی زنجیره‌ی تأمین در شکل ۱ نشان داده شده است.

انگیزه‌ی توجه ویژه به مدیریت زنجیره‌ی تأمین توسط مدیران شرکت‌ها و صنایع تولیدی این بود که آنها دریافتند که برای بقا و توسعه، تنها بهبود فرایندهای داخلی و انعطاف‌پذیری در توانایی‌های داخل شرکت کافی نیست، بلکه تأمین‌کنندگان قطعات



شکل ۱. مدل مفهومی سیستم زنجیره‌ی تأمین.[2]

و مواد نیز به‌عنوان یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار باید مواد و قطعاتی با بهترین کیفیت و کمترین هزینه را تأمین کنند. توزیع‌کنندگان محصولات نیز باید ارتباط نزدیکی با سیاست‌های توسعه بازار تولیدکننده داشته باشند. با چنین نگرشی، رویکردهای زنجیره‌ی تأمین و مدیریت آن پا به عرصه وجود نهاد.

مدیریت زنجیره‌ی تأمین با مفاهیم فعلی، برای اولین بار توسط هولی‌هان در سال ۱۹۸۵ معرفی شد،[3] که پیشرفت مهمی در امر لجستیک محسوب می‌شود. در مراحل اولیه، مدیریت زنجیره‌ی تأمین فقط در فنّاوری صنعت دینامیکی برای فرایند عملکرد توزیع فیزیکی، عملیات انتقال و... قابل استفاده بود. جنز و ریلی در سال ۱۹۸۵[4] مدیریت زنجیره‌ی تأمین را برای یکپارچه‌سازی فعالیت‌های برنامه‌ریزی و کنترل عملیات لجستیک از تأمین‌کنندگان تا مشتریان مطرح کردند.

روش‌های زیادی برای حل مسئله‌ی زنجیره‌ی تأمین وجود دارد که از جمله می‌توان به مدل‌سازی ریاضی، روش‌های ابتکاری، و الگوریتم‌های فرا‌ابتکاری اشاره کرد. در ادامه برخی از تحقیقات صورت‌گرفته پیرامون مسئله‌ی مورد بررسی در این تحقیق ارائه می‌شود.

بررسی مسئله‌ی مکان‌یابی ـ مسیریابی[5] با درنظرگرفتن اثر عوامل محیطی از قبیل ساختار هزینه، شکل هندسی توزیع، و تعداد مراکز توزیع و نیز فرضیه‌ی وجود تفاوت بین روش‌های هم‌زمان و متوالی تحت شرایط گوناگون توسط سریواستاوا و همکاران بررسی شده است.[5] کوهن و مون با ارائه‌ی یک مدل مختلط صفر و یک سعی کردند جریان مواد، محصولات و ترکیب تولید محصولات در یک شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین با ساختار ثابت را بهینه کنند.[6] چانگ و راسل یک روش فرا‌ابتکاری برای حل مسئله‌ی مسیریابی با پنجره‌ی زمانی منعطف ارائه دادند. در آنجا سه هدف با معیار تعداد خودروها، کل مسافت پیموده‌شده، و کل زمان صرف‌شده کمینه شد.[7] چاندار و فیشر در سال ۱۹۹۴ مدلی با عنوان برنامه‌ریزی هماهنگ تولید و توزیع ارائه کردند. در این مدل تقاضا برای هر محصول در یک دوره برای هر خرده‌فروش مشخص است. تابع هدف این مدل به دنبال کمینه‌کردن هزینه‌ی کل است که شامل هزینه‌های راه‌اندازی، تولید، حمل‌ونقل محصولات تولیدی به خرده‌فروشان و هزینه‌های موجودی‌هاست.[8]

پیرکول و جایارامان، مدلی یکپارچه از برنامه‌ریزی مختلط صفر و یک را ارائه کردند. تابع هدف در این مدل به‌دنبال کمینه‌کردن هزینه‌های کل زنجیره است که این هزینه شامل هزینه‌ی ثابت استقرار، عملیات و انبارها، هزینه‌ی متغیر تولید و توزیع، هزینه‌ی حمل‌ونقل مواد اولیه از فروشندگان به مراکز تولید و در نهایت حمل‌ونقل محصولات نهایی به مشتریان از انبارهاست.[9] پاک و کوهن یک مدل یکپارچه‌ی تولید ـ توزیع از نوع احتمالی ارائه دادند که تابع هدف مدل هزینه‌های ناشی از تولید و توزیع را کمینه می‌کند. در این تحقیق، محدودیت تقاضا و ظرفیت مراکز نیز درنظر گرفته شده است.[10] سبری و بیومن یک مدل چندهدفه برای برنامه‌ریزی راهبردی و عملیاتی در زنجیره‌ی تأمین ارائه دادند. هدف مدل استراتژیک کمینه‌کردن هزینه‌های زنجیره‌ی تأمین است و در سطح عملیاتی سعی کردند با استفاده از فرمول‌های تعیین مقیاس‌های اقتصادی، مقدار خرید مواد اولیه و توزیع را مشخص کنند.[11] ژو و همکارانش مدلی از نوع برنامه‌ریزی آرمانی برای صنایع با فرایندهای پیوسته در راستای بهینه‌سازی کل زنجیره‌ی تأمین از مرحله‌ی خرید مواد اولیه تا توزیع ارائه کردند؛ مدل آنها داری چهار هدف اقتصادی، اجتماعی، هدف مرتبط با منابع، و هدف مرتبط با محیط است.[12]

جایارمان و همکاران در تحقیق دیگری به ارائه‌ی مدل PLANWAR پرداختند. این مدل علاوه‌بر حل مسائل قبلی به جایابی کارخانه‌ها و انبارها با درنظرگرفتن محدودیت‌های ظرفیت کمک می‌کند.[13] لی و کیم نیز با درنظرگرفتن محدودیت‌های

منابع مختلف، ساختار سیستم تولید و توزیع چندکارخانه‌یی، چندمحصولی، و چنددوره‌یی را ارائه کردند.[۱۴]

در مسئله‌ی کلاسیک مسیریابی وسایل نقلیه، خدمت‌دهی به مجموعه‌یی از مشتریان با تقاضای معین، توسط یک ناوگان از وسایل نقلیه، از یک مرکز توزیع مدنظر است. در این مسئله، ابتدا و انتهای مسیر همان انبار مرکزی است و هدف این‌گونه مسائل عموماً کمینه‌کردن تعداد وسایل حمل‌ونقل، کمینه‌کردن مسافت پیموده‌شده توسط هر وسیله‌ی حمل یا کمینه‌کردن کل هزینه‌ی سیستم است.[۱۵] تارانتیلیس و همکاران برای حل مسئله‌ی مسیریابی با مسیر باز از روش فراابتکاری تک‌پارامتری استفاده کردند که مقادیر آستانه را در روش جست‌وجوی محلی به‌کار می‌گیرد.[۱۶] تعمیم دیگری از مسئله را کریبسپسن و همکاران با عنوان مسئله‌ی مسیریابی با بازگشت ارائه کردند. در این مسئله علاوه‌بر توزیع، عمل بارگیری در محل مشتریان نیز مورد توجه قرارگرفته است.[۱۷]

کو و همکاران شبکه‌ی توزیعی شامل یک انبار مرکزی و تعدادی تأمین‌کننده را بررسی کرده‌اند. در این تحقیق، میزان تقاضا غیرقطعی است و از یک سیاست تغییریافته از مرور دوره‌یی برای کنترل موجودی‌ها استفاده می‌شود.[۱۸]

چان و همکاران مسئله‌یی را برای پیدا کردن تورهای جدا از هم برای وسایل نقلیه در شبکه‌ی توزیع کالا از انبارها به نقاط تقاضا با مقادیر احتمالی طراحی کرده‌اند. این مسئله با استفاده از یک الگوریتم ژنتیک ترکیبی حل شده است.[۱۹]

اخیراً تحقیقاتی نیز پیرامون مسئله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه ظرفیت‌دار با محدودیت‌های بارگذاری انجام شده است که از آن جمله می‌توان به تحقیقات وی و همکاران اشاره کرد. ایشان در مطالعه‌ی خود یک مسئله‌ی مسیریابی برای ناوگان ناهمگون با محدودیت بارگذاری سه بعدی (.(3L- -HFVRP) را بررسی کرده و یک روش جست‌وجوی همسایگی برای حل ان ارائه کرده‌اند.[۲۰] آنها در تحقیقی همین مدل را برای حل مسئله‌ی مسیریابی وسایل حمل ظرفیت‌دار و با لحاظ محدودیت بارگذاری دو بعدی (.(2L- -CVRP) توسعه دادند.[۲۱]

مطالعه‌ی پیشینه‌ی تحقیق نشان می‌دهد که بررسی و مدل‌سازی مسئله‌ی مسیریابی وسایل حمل ظرفیت‌دار با محدودیت تردد در شبکه‌ی توزیع زنجیره‌ی تأمین تاکنون بررسی نشده است. در این مقاله ضمن تشریح کامل این مسئله همراه با تعریف پارامترها و متغیرهای مسئله، یک مدل ریاضی برای آن توسعه داده شده است و به‌منظور حل مسئله در ابعاد بزرگ یک مدل حل پیشنهادی مبتنی‌بر الگوریتم کلونی مورچگان ارائه می‌شود.

لذا ازجمله نوآوری‌های این مقاله می‌توان به مدل‌سازی و حل مسئله‌ی مسیریابی وسایل حمل ظرفیت‌دار با محدودیت تردد در شبکه‌ی توزیع زنجیره‌ی تأمین اشاره کرد. بدیهی است درنظرگفتن این شرایط و محدودیت‌ها، مسئله را به شرایط دنیای واقعی و کاربردی نزدیک‌تر خواهد کرد.

۳. بیان مسئله

۱.۳. کلیات مسئله‌ی مورد بررسی

مسئله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه که یکی از مهم‌ترین مسائل در توزیع و لجستیک زنجیره‌ی تأمین است، شامل یک ناوگان از وسایل نقلیه با ظرفیت مشخص، یک یا چند انبار، چند مرکز تقاضا، و مسیرهایی بین انبار تا مراکز تقاضاست.

در بخش توزیع زنجیره‌ی تأمین، هر وسیله‌ی نقلیه برای تأمین تقاضا از یک گره مشترک به نام انبار شروع به حرکت می‌کند و ضمن مراجعه به محل‌های تقاضا (گره‌ها)، این تقاضاها را تأمین می‌کند. در تعریف کلاسیک این مسئله: ۱. هر مرکز تقاضا فقط به‌وسیله یک وسیله‌ی نقلیه ملاقات می‌شود؛ ۲. تقاضای هر مرکز کمتر از ظرفیت وسایل نقلیه است؛ ۳. هیچ‌کدام از وسایل نقلیه بیشتر از ظرفیت Q بارگذاری نمی‌شوند. هدف این مسئله کمینه‌سازی هزینه برای کل مسیر پیموده‌شده به‌وسیله ناوگان وسایل نقلیه است. همچنین در این تحقیق این مسئله از نوع بسته بررسی می‌شود که در آن هر وسیله نقلیه بعد از ارضای تقاضاهای مشتریان، مسیر خود را به انبار به پایان می‌رساند.

درواقع مسئله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه (VRP)، یک مدل ساده اما واقع‌بینانه از مسئله‌ی توزیع زنجیره‌ی تأمین است که در آن هر وسیله‌ی حمل ظرفیت بار محدودی دارد و مسافت محدودی را طی می‌کند. این مسئله مجموعه O_D از n سفارش تحویل‌داده‌شده توسط وسایل حمل $i = ۱, ۲, ۳, ..., s$ را بررسی می‌کند. تابع هدف مجموع هزینه‌های مسیر منحصربه‌فرد توسط هر وسیله حمل i از تعداد کل وسایل حمل مورد نیاز s برای تحویل همه‌ی n سفارش را کمینه می‌کند، پس هزینه‌ی مسیر به‌صورت زیر کمینه می‌شود:

$$\text{Minimize } f_D = \sum_{u=۰}^{n}\sum_{v=۰}^{n}\sum_{i=۰}^{s} w_{uv}^{i} x_{uv}^{i}$$

که در آن وقتی که وسیله‌ی نقلیه i مسیر بین مشتریان u و v را طی می‌کند مقدار متغیر x_{uv}^{i} برابر با ۱ می‌شود و در غیر این‌صورت صفر است. همچنین پارامتر w_{uv}^{i} بیان‌گر هزینه‌ی تردد وسیله‌ی نقلیه‌ی i در مسیر بین مشتریان u و v بر حسب واحد مسافت یا واحد پولی است. در بخش بعدی، این مسئله را با توجه به شرایط کلی مسئله‌ی VRP و محدودیت‌های تردد وسایل حمل، مدل‌سازی می‌کنیم که در آن در تابع هدف علاوه‌بر هزینه‌ی متغیر w_{uv}^{i} یک هزینه‌ی ثابت f_i نیز درنظر گرفته می‌شود.

اجزای مسئله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه را در حالت معمولی می‌توان به مجموعه‌ی مشتریان، مجموعه‌ی وسایل نقلیه (خودروها، ناوگان حمل‌ونقل) و شبکه‌ی جاده‌یی (مسیرها) تقسیم‌بندی کرد. هریک از این اجزا خصوصیاتی دارند که به‌عنوان فرض‌های مسئله و پارامترهای ورودی مد نظر قرار می‌گیرند. در این مقاله علاوه‌بر فرض‌ها و خصوصیات عمومی مسئله‌ی مکان‌یابی ـ مسیریابی، وسایل نقلیه نیز به‌صورت مختلف و متنوع درنظرگرفته شده‌اند و برای تردد وسایل نقلیه نیز محدودیت‌هایی لحاظ می‌شود به‌طوری‌که برخی از وسایل نقلیه امکان تردد در بعضی مسیرها را ندارند. ازجمله کاربردهای این مسئله می‌توان به تعیین مراکز فروش و توزیع محصولات کارخانه‌ها و مسیرهای مربوط اشاره کرد. در چنین شرایطی که در دنیای واقعی نیز بسیار مرسوم است، در برخی مسیرها صرفاً با قطار امکان جابه‌جایی کالا وجود دارد، در برخی مسیرها نیز صرفاً از طریق خودروهای باری امکان توزیع محصولات وجود دارد. حالت اخیر نیز خود در شرایط مختلف می‌تواند بررسی شود؛ مثلاً در برخی مسیرها امکان تردد وسایل حمل سنگین وجود ندارد و فقط وسایل حمل‌ونقل سبک مانند وانت و نیسان امکان تردد دارند.

۲.۳. مدل ریاضی مسئله

در این بخش پارامترها و متغیرهای مسئله‌ی مورد نظر تشریح می‌شود و سپس مدل ریاضی آن با لحاظ شرایط واقعی ازجمله محدودیت تردد وسایل حمل به‌صورت یک مدل برنامه‌ریزی خطی صحیح مختلط مدل‌سازی می‌شود. در این تحقیق به‌منظور ارائه‌ی مدل مسئله VRP از گراف $G(V, A)$ استفاده شده است که در آن $V = \{۱, ۲, ..., n\}$ مجموعه‌ی گره‌ها و $A = \{(u, v) | u, v \in V, u \neq v\}$

مجموعه‌ی یال‌های موجود در آن است. در این مسئله هر یک از گره‌های u، به غیر از گره 0 که نشان‌دهنده‌ی گره انبار مرکزی است، یک مرکز تقاضا (مشتری) را نشان می‌دهد و دارای مقدار تقاضای q_u است. همچنین به هرکمان موجود در A فاصله‌ی d_{uv} متناظر شده است که برای هر $0 \leq u \leq n$ مقدار $d_{uv=0}$ است.

از طرف دیگر ناوگانی از i نوع وسیله‌ی نقلیه متفاوت در مبدأ قرار دارد به‌طوری‌که هر وسیله‌ی نقلیه ظرفیت بار Q_i، هزینه‌ی ثابت f_i، و هزینه‌ی متغیر α_i را دارد، و نیز تعداد n_i وسیله‌ی نقلیه از نوع iام در ناوگان وجود دارد. هزینه‌ی متغیر هزینه‌ی طی یک واحد مسافت توسط یک وسیله‌ی نقلیه است به‌طوری که هزینه‌ی طی هر کمان (u,v) توسط وسیله‌ی نقلیه iام برابر با $w^i_{uv} = d_{uv} \times \alpha_i$ است. بنابراین در مسئله‌ی VRP، i ماتریس هزینه‌یی وجود دارد که متقارن است، به‌علاوه مقدار کالایی که وسیله‌ی نقلیه‌ی iام هنگام سفر از گره u به گره v حمل می‌کند با y^i_{uv} نشان داده می‌شود.

تعریف کامل پارامترهای مؤثر بر مسئله‌ی مورد بررسی و همچنین متغیرهای اصلی مسئله در ادامه آمده است.

۱.۲.۳. تعریف پارامترهای مسئله

i: انواع وسایل نقلیه، $i = 1, 2, 3, ..., s$؛

n_i: تعداد وسیله‌ی نقلیه موجود از نوع iام؛

Q_i: ظرفیت بار وسیله‌ی نقلیه iام؛

f_i: هزینه‌ی ثابت به‌کارگیری وسیله‌ی نقلیه‌ی iام؛

α_i: هزینه‌ی متغیر به‌کارگیری وسیله‌ی نقلیه‌ی iام برای هر واحد طولی از مسافت طی شده؛

V: مجموعه‌ی گره‌ها، $V = \{1, 2, 3, ..., n\}$؛

A : مجموعه کمان‌های بین هر دو گره، $A = \{(u,v) | u, v \in V, u \neq v\}$؛

I^-_{uv}: مجموعه‌ی وسایل نقلیه‌ی i که امکان تردد بین دو گره u و v را ندارند؛

q_u: مقدار تقاضای گره u؛

d_{uv}: فاصله‌ی بین دو گره u و v؛

w^i_{uv}: هزینه‌ی طی مسافت کمان بین دو گره u, v توسط وسیله‌ی نقلیه iام، $w^i_{uv} = d_{uv} \times \alpha_i$.

۲.۲.۳. تعریف متغیرهای مسئله

x^i_{uv}: متغیر صفر و یک است. اگر وسیله‌ی نقلیه‌ی iام به‌طور مستقیم از گره u به گره v حرکت کند مقدار آن ۱ و در غیر این‌صورت صفر خواهد بود؛

y^i_{uv}: مقدار کالایی که وسیله‌ی نقلیه‌ی iام هنگام سفر از گره u به گره v حمل می‌کند.

باتوجه به پارامترها و متغیرهای تعریف‌شده برای مسئله، مدل ریاضی مسئله‌ی مورد نظر در این تحقیق مطابق زیر است.

$$\text{Minimize } f_D = \sum_{i=1}^{s} f_i \sum_{v=1}^{n} x^i_{.v} + \sum_{i=1}^{s} \sum_{u=0}^{n} \sum_{v=0}^{n} w^i_{uv} x^i_{uv} \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^{s} \sum_{u=0}^{n} x^i_{uv} = 1 \quad \forall v = 1, 2, 3, ..., n \quad (2)$$

$$\sum_{u=o}^{n} x^i_{uv} - \sum_{u=o}^{n} x^i_{vu} = 0 \quad \forall v = 1, 2, 3, ..., n, \quad \forall i = 1, 2, 3, ..., s \quad (3)$$

$$\sum_{v=0}^{n} x^i_{.v} \leq n_i \quad \forall i = 1, 2, 3, ..., s \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^{s} \sum_{u=1}^{n} y^i_{uv} - \sum_{i=1}^{s} \sum_{u=1}^{n} y^i_{vu} = q_v \quad \forall v = 1, 2, 3, ..., n \quad (5)$$

$$q_v x^i_{uv} \leq y^i_{uv} \leq (Q_i - q_u) x^i_{uv} \quad \forall u, v = 0, 1, 2, ..., n, \quad u \neq v \quad \forall i = 1, 2, 3, ..., s \quad (6)$$

$$x^i_{uv} \leq 0 \quad \text{for } i \in \{I^-_{uv}\} \quad \forall u, v = 0, 1, 2, ..., n, \quad u \neq v \quad (7)$$

$$y^i_{uv} \geq 0 \quad \forall u, v = 0, 1, 2, ..., n, \quad u \neq v \quad (8)$$

$$x^i_{uv} \in \{0, 1\} \quad \forall u, v = 0, 1, 2, ..., n, \quad u \neq v \quad (9)$$

در این مدل ریاضی، رابطه‌ی ۱ تابع هزینه را نشان می‌دهد که مجموع هزینه‌های ثابت و متغیر وسایل نقلیه را کمینه می‌کند. رابطه‌ی ۲ تضمین می‌کند که هر مشتری فقط توسط یک وسیله‌ی نقلیه سرویس‌دهی می‌شود. رابطه‌ی ۳ نشان می‌دهد که هر وسیله‌ی نقلیه i به هر گره‌یی که وارد می‌شود باید از آن خارج شود (تضمین قید پیوستگی مسیرها). رابطه‌ی ۴ نشان می‌دهد که تعداد وسایل نقلیه‌ی به‌کاررفته از نوع iام باید حداکثر n_i باشد. رابطه‌ی ۵ تضمین می‌کند که تقاضای هر مشتری به‌طورکامل برآورده می‌شود. رابطه‌ی ۶ محدودیت ظرفیت هر وسیله‌ی نقلیه را نشان می‌دهد. رابطه‌ی ۷ محدودیت تردد وسایل نقلیه در برخی مسیرها را تضمین می‌کند. و در نهایت رابطه‌های ۸ و ۹ دامنه‌ی متغیرها را مشخص می‌کنند.

مسئله‌ی VRP شامل تعیین مجموعه‌یی از مسیرها و تخصیص آنها به وسایل نقلیه‌ی موجود است. در این مسئله هدف کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های مسیرهای طی‌شده توسط این وسایل نقلیه است به‌طوری که شرایط و محدودیت‌های زیر برقرار باشد:

- تقاضای همه مشتریان برآورده شود.
- در خدمت‌دهی به مشتریان فقط از وسایل نقلیه‌ی موجود استفاده شود.
- تقاضای هر مشتری توسط یک وسیله‌ی نقلیه و در یک ملاقات برآورده شود.
- هیچ‌کدام از تقاضاهای مشتریان نباید بیشتر از ظرفیت مجاز برای خدمت‌دهنده‌ها باشد، یعنی برای هر $0 \leq u \leq n$، باید حداقل یک i وجود داشته باشد که $q_u \leq Q_i$ باشد.
- خدمت‌دهنده iام در طول مسیر مجاز نیست که بیشتر از ظرفیت معین Q_i بارگذاری کند.
- همه‌ی وسایل نقلیه در ابتدا و انتهای الگوریتم باید در نقطه‌ی 0 باشد.

۴. الگوریتم پیشنهادی

همان‌طورکه عنوان شد مسئله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه درزده‌ی مسائل $NP-hard$ قرار دارد و بدیهی است که این مسئله با افزودن محدودیت حرکت وسایل نیز $NP-hard$ خواهد بود. در چنین شرایطی مدل ریاضی بیشتر به‌منظور درک کامل مسئله و حل آن در ابعاد کوچک مطرح می‌شود و برای حل مسئله با ابعاد بزرگ و در زمانی قابل قبول ناگزیر هستیم از روش‌های دیگر ازجمله الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده کنیم. در این قسمت به‌منظور حل مسئله در ابعاد بزرگ و در زمانی قابل قبول، یک مدل حل مبتنی‌بر الگوریتم کلونی مورچگان (ACS) ارائه می‌شود.

۱.۴. کلونی مورچگان

یکی از کارآمدترین روش‌ها مبتنی بر پیاده‌سازی سیستم کلونی مورچگان، بهینه‌سازی کلونی مورچگان ACO است که کوتاه‌ترین مسیر را بین لانه و منبع غذایی پیدا می‌کند. این روش برای اولین بار توسط کلورنی و همکارانش در سال ۱۹۹۱ معرفی شد.[۲۲] این الگوریتم ابتدا برای حل مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد به‌کار می‌رفت. بعد از آن دریگو در سال ۱۹۹۲ آن را برای حل مسائل دیگر نیز توسعه داد.[۲۳] بهینه‌سازی کلونی مورچگان (ACO) یک روش مؤثر برای حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی $NP-hard$ است و کاربردی مؤثر در حل مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد (TSP)[۶]، مسئله‌ی تخصیص درجه (QAP)[۷]، و مسئله‌ی چندهدفه‌ی حمل‌ونقل (VRP) دارد.[۲۴] اخیراً این الگوریتم برای حل مسائل تصحیح خطا بادقت بالا توسط سیستم ماشین کنترل عددی[۲۵] و حل مسائل کنترل فازی[۲۶] نیز توسعه داده شده است.

مورچگان به‌صورت تکی توانایی خاصی در یافتن مسیر کوتاه ندارند، آنها با همدیگر از طریق ماده‌ی شیمیایی فرمون ارتباط برقرار می‌کنند. این نوع ارتباط این امکان را می‌دهد که کلونی به‌صورت یکپارچه وظایف پیچیده‌یی را همچون ایجاد کوتاه‌ترین مسیر از لانه تا منبع غذایی انجام دهند.

عوامل کلیدی در طراحی یک مسئله‌ی مسیریابی مبتنی‌بر بهینه‌سازی کلونی مورچگان به‌شرح زیر است:

- مسئله را به مدل خاصی که مورچه‌های مصنوعی در جست‌وجوی راه حل هستند تبدیل کنیم. معمولاً مدل به‌صورت نمودار یا گراف یا نوعی از آرایش و ترتیب است که مورچه‌های مصنوعی می‌توانند در آن حرکت کنند.
- به یک تابع ابتکاری نیاز داریم که مورچه‌ها را برای جست‌وجوی بهترین راه حل هدایت کند.
- تصمیم‌گیری درباره‌ی اینکه مورچه‌ها چگونه باهم در تعامل و ارتباط هستند.

مورچه‌های واقعی ابتدا به‌طور تصادفی به این سو و آن سو می‌روند تا غذا بیابند سپس به لانه برمی‌گردند، آنها حس بویایی دارند و یک ردی از یک ماده‌ی شیمیایی به نام فرمون از خودشان به‌جا می‌گذارند و با یکدیگر اطلاعاتی را در مورد اینکه از کدام مسیر پیروی کنند، تبادل می‌کنند. مورچه‌های دیگر وقتی که این مسیر فرمونی را پیدا می‌کنند، آن را دنبال می‌کنند و اگر به غذا برسند به خانه برمی‌گردند و از خود ردی از فرمون در کنار رد دیگر می‌گذارند، به‌عبارت دیگر مسیر قبل را تقویت می‌کنند. فرمون یک ماده‌ی شیمیایی است که مورچه‌ها هنگام حرکت از خود به‌جا می‌گذارند و آنها بر حسب روش مبتنی‌بر احتمال مسیری را ترجیح می‌دهند که فرمون زیادی دارد. فرمون به مرور زمان تبخیر می‌شود که ۳ مزیت اساسی دارد:

- مسیر طولانی جذابیت کمتری برای مورچه‌های بعدی خواهد داشت. از آنجا که یک مورچه در مدت زمان طولانی راه‌های کوتاه‌تر را بیش‌تر طی می‌کند و تقویت می‌کند هر راهی بین خانه و غذا که کوتاه‌تر (بهینه) باشد بیشتر تقویت می‌شود و آنکه دورتر است کمتر.
- اگر فرمون اصلاً تبخیر نمی‌شد، مسیرهایی که چند بار طی می‌شدند، بیش از حد جذاب می‌شدند و جست‌وجوی تصادفی برای غذا را بسیار محدود می‌کردند.
- اگر فرمون تبخیر نمی‌شد، وقتی غذای انتهای یک مسیر جذاب تمام می‌شد رد همچنان باقی می‌ماند.

در کلونی مورچگان، مورچه‌ها از مسیری تبعیت می‌کنند که فرمون زیادی دارد و این مسیر کوتاه‌ترین مسیر بین لانه و منبع غذایی است و به اصطلاح مسیر بهینه شده است.[۲۵]

در ACO، کلونی از مورچگان مصنوعی در شبکه‌یی با n گره و کمان‌هایی بین لانه و منبع غذایی با فرمون مصنوعی بر روی رئوس حرکت می‌کنند. لانه‌ها با رأس آغازین، و منبع غذا با رأس نهایی نشان داده می‌شود. مورچه‌ها یک رأس را برای پیش‌روی به جلو با یک قاعده‌ی تصمیم‌گیری احتمالی انتخاب می‌کنند که تابعی از میزان فرمون روی رأس است. راهی که مورچگان انتخاب می‌کنند با یک ماتریس فرمون (PM) نشان داده می‌شود که شامل فرمون مربوط به هر رأس است. مسئله مجموعه‌یی از تابع‌های هدف و محدودیت‌هاست. به‌منظور اینکه نتایج مسیرها شدنی باشند، محدودیت‌های مسئله توسط مورچه‌ها ارزیابی می‌شود و آنها تصمیم می‌گیرند که کدام رأس را به‌عنوان رأس بعدی انتخاب کنند. کلونی‌هایی از مورچگان پی‌درپی برای یافتن فضای راه حل و برای بهترکردن راه حل مسئله در جست‌وجو هستند. در کل الگوریتم‌های ACO رویکردهای جالبی برای حل مسائلی دارند که در جست‌وجوی کمترین هزینه از یک ساختار نموداری هستند؛ مخصوصاً زمانی که مسائل پویا باشد. یک چارچوب کلی از الگوریتم می‌تواند به شرح زیر تعریف شود:

بررسی مسئله‌یی که شامل جست‌وجوی مسیری با کمترین هزینه روی یک نمودار است. برای یک مورچه‌ی مفروض k که در گره n قرار دارد، محتمل‌ترین انتخاب برای رفتن مورچه به گره v از رابطه‌ی ۱۰ به‌دست می‌آید.

$$p_{uv}^{k}(t)=\begin{cases}\frac{\tau_{uv}^{\alpha}\eta_{uv}^{\beta}}{\sum_{w\in N^{k}}\tau_{uv}^{\alpha}\eta_{uv}^{\beta}} & v\in N^{k}\\ 0 & \text{other}\end{cases} \qquad (۱۰)$$

که در آن τ_{uv} شدت غلظت فرمون یال (u,v) است، η_{uv} یک تابع ابتکاری (هیورسیتیک) است که جست‌وجو را با برخی از اطلاعات و مفروضات ارزشمند در مورد مسئله تحت بهینه‌سازی بررسی می‌کند و N^{k} فهرست گره‌های قابل قبول برای مورچه‌ی k است که شامل همه‌ی گره‌هایی است که مورچه می‌تواند انتخاب کند و به‌عنوان حافظه‌یی از مورچه عمل می‌کند. پارامترهای α و β به‌ترتیب اهمیت نسبی شدت غلظت فرمون مسیر و اطلاعات و مفروضات هیوریستیکی را اندازه‌گیری می‌کنند. یک تور یک مسیر یا یک راه کامل بین لانه و منبع غذایی طی‌شده توسط مورچه است. تکرار t مجموعه‌یی از تورهای طی‌شده توسط همه‌ی g مورچه است. بعد از تکمیل‌شدن یک تکرار، مورچگان فرمون‌هایی را روی یال‌های مطابق مسیر منحصربه‌فرد خودشان به‌جا می‌گذارند. غلظت فرمون در هر تور با رابطه‌ی ۱۱ بهنگام می‌شود.

$$\tau_{uv}(t+1)=\tau_{uv}(t)\times(1-\rho)+\sum_{k=1}^{g}\Delta\tau_{uv}^{k} \qquad (۱۱)$$

در رابطه‌ی ۱۱ عبارت $\rho\in[0,1]$ یک مقدار ثابت است که نرخ تبخیر فرمون را در هر مرحله نمایش می‌دهد و $\sum_{k=1}^{g}\Delta\tau_{uv}^{k}$ مقدار فرمون به‌جا مانده روی یال (u,v) توسط همه‌ی g مورچه بعد از یک تور کامل است که مطابق رابطه‌ی ۱۲ تعیین می‌شود.

$$\Delta\tau_{uv}^{k}=\begin{cases}\frac{1}{f^{k}} & \text{اگر یال } (u,v) \text{ توسط مورچه‌ی } k \text{ طی شود}\\ 0 & \text{در غیر این‌صورت}\end{cases} \qquad (۱۲)$$

قابل توجه است که f^{k} مقدار ارزیابی تابعی از مورچه‌ی k در یک مسئله‌ی کمینه‌سازی است و هزینه‌ی بهترین تور پیدا شده از زمان شروع الگوریتم است. بنابراین فرمون

بهنگام‌شده در هر تکرار به‌جای بررسی همه‌ی مورچه‌ها فقط عملکرد بهترین مورچه q را بررسی می‌کند (بهنگام‌سازی سراسری). پیچیدگی الگوریتم از مرتبه‌ی زمانی $O(g \times n \times N_{\max}) \approx (N_{\max}^{۳})$ است که در آن g تعداد مورچه‌ها، n تعداد گره‌ها و $N_{\max}$ بیشترین مقدار تکرارهاست.

۲.۴. مدل پیشنهادی بهینه‌سازی سیستم توزیع‌کنندگان

مدل پیشنهادی را برای بهینه‌کردن سیستم توزیع زنجیره‌ی تأمین با استفاده از مسئله‌ی حمل‌ونقل (VRP) ارائه می‌کنیم. برای حل مسئله‌ی حمل‌ونقل (VRP) با استفاده از کلونی مورچگان، انبار مرکزی در واقع همان لانه و مشتریان همان غذا هستند. مورچه‌های مصنوعی با انتخاب‌های پی‌درپی مشتریان برای ملاقات، راه حل‌ها را می‌سازند که یک تور کامل است. یک مورچه در هر تکرار مشتری‌های جدیدی را انتخاب می‌کند و این انتخاب‌ها تا زمانی ادامه می‌یابد که همه‌ی مشتریان بررسی شده باشند، سپس همه‌ی سفارش‌ها را تحویل می‌دهند. سفارشات n مشتری باید از یک انبار منحصربه‌فرد توزیع شود. هنگامی‌که انتخاب یک موقعیت به‌دلیل ظرفیت یک وسیله حمل یا طول مسافت کل مسیر باعث ایجاد یک راه‌حل غیرممکن شود، انبار انتخاب‌شده به‌عنوان موقعیت نهایی مسیر را می‌بندد و مسیر جدید با یک وسیله‌ی حمل جدید شروع می‌شود.

مفروضات ابتکاری تابع پس‌انداز وزنی مطابق رابطه‌ی ۱۳ مشخص می‌شود.

$$s_{uv} = w_{.u} + w_{.v} - a w_{uv} + b\,|w_{.u} - w_{.v}| \qquad (۱۳)$$

در این رابطه پارامتر w_{uv} هزینه‌ی مسافت بین مشتریان u و v است، $w_{.u}$ و $w_{.v}$ هزینه‌ی مسافت بین مشتریان u و v و مرکز انبار 0 است. برای پیاده‌سازی قرار می‌دهیم $a = ۲$ و $b = ۱$. ماتریس ابتکاری یک مدل نرمال‌شده از رابطه‌ی ۱۳ است که مطابق رابطه‌ی ۱۴ بیان می‌شود.

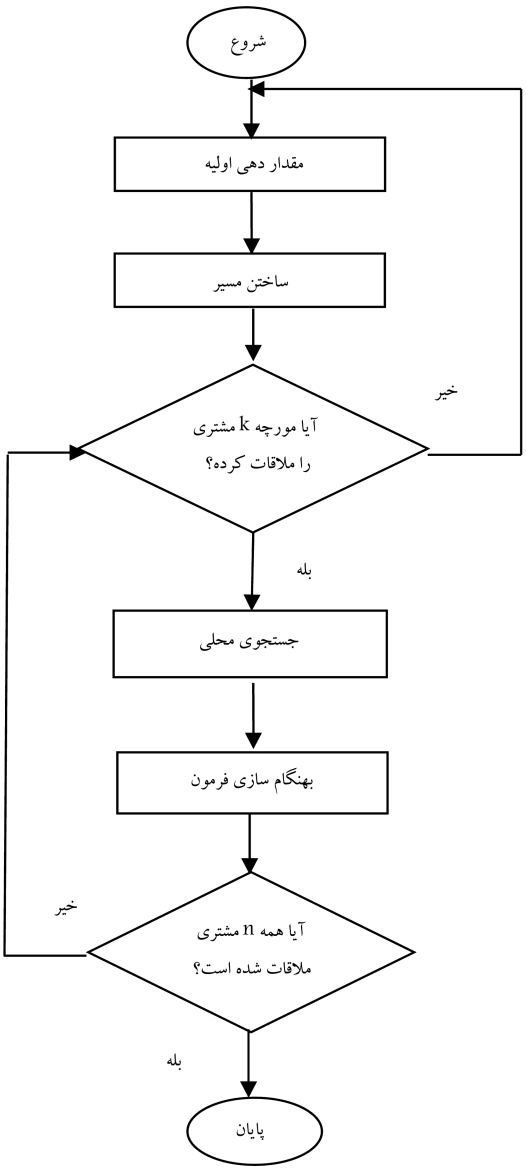
$$\eta_{uv} = \frac{s_{uv} - \min(s_{uv})}{\max(s_{uv}) - \min(s_{uv})} \qquad (۱۴)$$

همه g مورچه از گره صفر (انبار مرکزی) شروع می‌کنند، سپس مورچه‌ها مشتریان مختلف را برای بررسی بر اساس فرمول رابطه‌ی ۱۲ انتخاب می‌کنند. هنگامی‌که مورچه‌ی k نتواند هیچ مشتری را ملاقات کند، به‌منظور جلوگیری از خطای هریک از محدودیت‌ها یعنی بیشینه‌ی مقدار هزینه‌ی مسیر و بیشینه مقدار ظرفیت بار، مورچه‌ها به گره صفر برمی‌گردند و در فهرست، گره‌های قابل قبول N^k را بهنگام می‌کنند. در گام بعدی نیز مورچه‌ها از گره صفر شروع می‌کنند و این رویه را برای باقی مشتریان تکرار می‌کنند تا زمانی‌که همه‌ی مشتریان را بررسی کنند. در انتها راه حل مورچه‌ی k یک دنباله از الگوی $(۰, u, ..., ۰, v, ..., ۰)$ خواهد بود.

به‌منظور افزایش کارایی مدل پیشنهادی حل و با توجه به رابطه‌های ۱۰ و ۱۱ باید بهترین مقادیر ممکن برای پارامترهای α، β و ρ لحاظ شود. بر همین اساس طی حل چند مسئله‌ی نمونه و پس از انجام ارزیابی‌های لازم و تحلیل حساسیت، بهترین مقدار برای این سه پارامتر مطابق جدول ۱ مشخص شد. روند و مراحل کلی الگوریتم پیشنهادی مطابق شکل ۲ است.

جدول ۱. مقادیر پارامترهای الگوریتم.

پارامترها	α	β	ρ
مقادیر	۱٫۵	۵	۰٫۵



شکل ۲. فلوچارت الگوریتم پیشنهادی.

۵. حل مسائل نمونه و ارزیابی عملکرد الگوریتم

در این قسمت مسائل آزمون نمونه با مدل ریاضی، الگوریتم پیشنهادی، و الگوریتم‌های جست‌وجوی ممنوع و ژنتیک حل می‌شود. سپس عملکرد الگوریتم پیشنهادی در حل مسائل کوچک با نتایج بهینه‌ی حاصل از حل مدل ریاضی مقایسه می‌شود. همچنین درخصوص مسائل بزرگ، عملکرد الگوریتم پیشنهادی با نتایج الگوریتم‌های فرا‌ابتکاری جست‌وجوی ممنوع و ژنتیک مقایسه می‌شود.

۱.۵. طراحی مسائل

مسائل آزمون نمونه مطابق جدول ۲ است. این مسائل نمونه قبلاً توسط برخی محققان ازجمله تایلارد و لی طراحی شده‌اند و مناسب‌بودن آنها برای ارزیابی و آزمون الگوریتم‌های حل نشان داده شده است.[۲۷،۲۸]

همچنین به‌منظور اعمال محدودیت تردد وسایل نقلیه، هر وسیله نقلیه از نوع

جدول ۲. مشخصات مثال‌ها.

شماره‌ی مسئله	n	i	p_i	Q_i	f_i	α_i	n_i
۱	۵۰	۱	۰	۲۰	۲۰	۱	۴
۲	۵۰	۱	۰	۱۲۰	۱۰۰	۱	۴
۳	۵۰	۲	۰٫۱	۳۰	۳۵	۱٫۱	۲
۴	۵۰	۲	۰٫۱	۱۶۰	۱۵۰۰	۱٫۱	۲
۵	۵۰	۳	۰٫۱	۴۰	۵۰	۱٫۲	۴
۶	۵۰	۳	۰٫۱	۳۰۰	۳۵۰۰	۱٫۴	۱
۷	۵۰	۴	۰٫۲	۷۰	۱۲۰	۱٫۷	۴
۸	۵۰	۵	۰٫۲	۱۲۰	۲۲۵	۲٫۵	۲
۹	۵۰	۶	۰٫۲	۲۰۰	۴۰۰	۳٫۲	۱
۱۰	۷۵	۱	۰	۱۲۰	۸۰	۱٫۲	۴
۱۱	۷۵	۲	۰٫۱	۲۰۰	۱۵۰	۱٫۵	۲
۱۲	۷۵	۳	۰٫۱	۳۵۰	۳۲۰	۱٫۸	۱
۱۳	۲۰۰	۱	۰	۵۰	۲۰	۱	۸
۱۴	۲۰۰	۲	۰٫۱	۱۰۰	۳۵	۱٫۱	۶
۱۵	۲۰۰	۳	۰٫۱	۲۰۰	۵۰	۱٫۲	۴
۱۶	۲۰۰	۴	۰٫۲	۵۰۰	۱۲۰	۱٫۷	۳
۱۷	۲۰۰	۵	۰٫۲	۱۰۰۰	۲۲۵	۲٫۵	۱
۱۸	۲۸۰	۱	۰	۵۰	۱۰۰	۱	۱۰
۱۹	۲۸۰	۲	۰٫۱	۱۰۰	۲۵۰	۱٫۱	۵
۲۰	۲۸۰	۳	۰٫۱	۲۰۰	۵۰	۱٫۲	۵
۲۱	۲۸۰	۴	۰٫۲	۵۰۰	۱۲۰	۱٫۷	۴
۲۲	۲۸۰	۵	۰٫۲	۱۰۰۰	۲۲۵	۲٫۵	۲

i با احتمالی معادل پارامتر p_i ممنوع خواهد بود. مقدار این پارامتر نیز برای مقادیر $i = ۱$ برابر با صفر، برای مقادیر $۱ \prec i \preceq ۳$ برابر با ۰٫۱، و برای مقادیر $i \succ ۳$ برابر با ۰٫۲ لحاظ شده است.

الگوریتم پیشنهادی در محیط MATLAB ۷/۱۰/۰/۴۹۹ (R۲۰۱۰a) کدنویسی شده و همه‌ی مدل‌ها و الگوریتم‌ها در رایانه‌ی شخصی با پردازشگر ۲٫۰ GHz Intel Core ۲ Duo و حافظه‌ی جانبی ۱ GB اجرا شده است.

۲.۵. ارزیابی بهینگی الگوریتم پیشنهادی

در این قسمت نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی با جواب‌های بهینه‌ی به‌دست آمده از حل مدل ریاضی را برای مسائل با ابعاد کوچک مقایسه می‌کنیم. بنابراین فقط مسائلی که شامل ۵۰ گره و حداکثر دو نوع وسیله‌ی نقلیه هستند، با مدل ریاضی و الگوریتم پیشنهادی حل و نتایج مطابق جدول ۳ مقایسه شده است.

جدول ۳ نشان می‌دهد که عملکرد الگوریتم پیشنهادی در حل مسائل نمونه‌ی کوچک قابل قبول است، زیرا انحراف جواب حاصل از آن با جواب بهینه کمتر از ۳ درصد بوده است. این نتایج همچنین نشان می‌دهد که مقدار تابع هدف نسبت به تغییرات هزینه‌ی ثابت به‌کارگیری هر وسیله و همچنین ظرفیت وسایل حمل حساسیت زیادی داشته و در همین نوع مسائل مقدار انحراف جواب حاصل از الگوریتم پیشنهادی نسبت به حل دقیق نسبت به سایر حالات بیشتر است.

جدول ۳. ارزیابی بهینگی الگوریتم پیشنهادی.

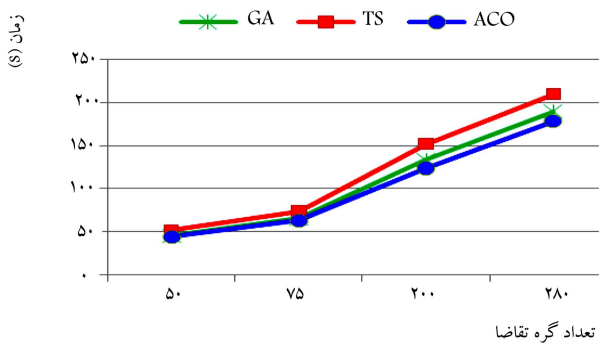
شماره‌ی مسئله	n	i	n_i	Q_i	f_D^*	جواب الگوریتم	D (٪)
۱	۵۰	۱	۴	۲۰	۲۵۶	۲۵۶	۰٫۰۰
۲	۵۰	۱	۴	۱۲۰	۳۹۸	۴۰۹	۲٫۷۶
۳	۵۰	۲	۲	۳۰	۳۵۱	۳۵۳	۰٫۵۷
۴	۵۰	۲	۲	۱۶۰	۲۹۸۸	۳۰۷۵	۲٫۹۱

جدول ۴. نتایج حاصل از حل مسائل نمونه.

شماره‌ی مسئله	n	i	p_i	Q_i	f_i	α_i	n_i	f_D
۱	۵۰	۱	۰	۲۰	۲۰	۱	۴	۲۵۶
۲	۵۰	۱	۰	۱۲۰	۱۰۰	۱	۴	۴۰۹
۳	۵۰	۲	۰٫۱	۳۰	۳۵	۱٫۱	۲	۳۵۳
۴	۵۰	۲	۰٫۱	۱۶۰	۱۵۰۰	۱٫۱	۲	۳۰۷۵
۵	۵۰	۳	۰٫۱	۴۰	۵۰	۱٫۲	۴	۴۶۵
۶	۵۰	۳	۰٫۱	۳۰۰	۳۵۰۰	۱٫۴	۱	۷۱۵۹
۷	۵۰	۴	۰٫۲	۷۰	۱۲۰	۱٫۷	۴	۵۴۶
۸	۵۰	۵	۰٫۲	۱۲۰	۲۲۵	۲٫۵	۲	۶۸۵
۹	۵۰	۶	۰٫۲	۲۰۰	۴۰۰	۳٫۲	۱	۸۹۵
۱۰	۷۵	۱	۰	۱۲۰	۸۰	۱٫۲	۴	۱۴۱۰
۱۱	۷۵	۲	۰٫۱	۲۰۰	۱۵۰	۱٫۵	۲	۲۵۰۱
۱۲	۷۵	۳	۰٫۱	۳۵۰	۳۲۰	۱٫۸	۱	۳۴۹۱
۱۳	۲۰۰	۱	۰	۵۰	۲۰	۱	۸	۵۳۵۰
۱۴	۲۰۰	۲	۰٫۱	۱۰۰	۳۵	۱٫۱	۶	۷۸۹۱
۱۵	۲۰۰	۳	۰٫۱	۲۰۰	۵۰	۱٫۲	۴	۹۷۴۸
۱۶	۲۰۰	۴	۰٫۲	۵۰۰	۱۲۰	۱٫۷	۳	۱۸۹۱۵
۱۷	۲۰۰	۵	۰٫۲	۱۰۰۰	۲۲۵	۲٫۵	۱	۲۸۹۳۵
۱۸	۲۸۰	۱	۰	۵۰	۱۰۰	۱	۱۰	۱۳۲۹۸
۱۹	۲۸۰	۲	۰٫۱	۱۰۰	۲۵۰	۱٫۱	۵	۱۷۸۹۲
۲۰	۲۸۰	۳	۰٫۱	۲۰۰	۵۰	۱٫۲	۵	۱۲۴۵۱
۲۱	۲۸۰	۴	۰٫۲	۵۰۰	۱۲۰	۱٫۷	۴	۲۳۱۸۵
۲۲	۲۸۰	۵	۰٫۲	۱۰۰۰	۲۲۵	۲٫۵	۲	۳۴۹۵۶

۳.۵. ارزیابی الگوریتم پیشنهادی در حل مسائل بزرگ

در این قسمت عملکرد الگوریتم پیشنهادی در حل مسائل بزرگ از طریق مقایسه با دو الگوریتم معروف جست‌وجوی ممنوع (TS) و ژنتیک (GA) ارزیابی می‌شود. این دو الگوریتم که در این قسمت مورد استفاده قرار می‌گیرند، قبلاً توسط براندو در سال ۲۰۱۱ معرفی شده‌اند. الگوریتم TS روی هر مثال یک‌بار و الگوریتم GA پنج‌بار اجرا شده و بهترین نتیجه ارائه شده است؛ الگوریتم پیشنهادی نیز پنج‌بار روی هر مثال اجرا شده و بهترین مقدار به‌عنوان جواب نهایی در نظر گرفته شده است. جزئیات نتایج حاصل از حل مسائل نمونه توسط الگوریتم پیشنهادی در جدول ۴ نشان داده شده است. همچنین خلاصه‌ی این نتایج و مقایسه‌ی آنها با نتایج حاصل از دو الگوریتم TS و GA نیز در جدول ۵ ارائه شده است. این مقایسه نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی رقابت خوبی با الگوریتم جست‌وجوی ممنوعه دارد.



شکل ۳. زمان اجرای الگوریتم‌ها.

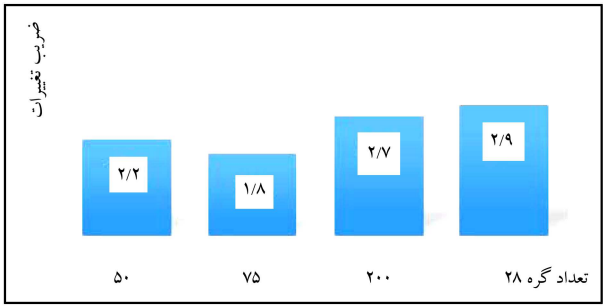
جدول ۵. ارزیابی بهینگی الگوریتم پیشنهادی.

شماره‌ی مسئله	n	ACO	TS	GA
۱ – ۹	۵۰	۱۵۳۸٫۱	۱۵۳۸٫۱	۱۵۹۸٫۲
۱۰ – ۱۲	۷۵	۲۴۶۷٫۳	۲۴۶۷٫۳	۲۵۰۸٫۹
۱۳ – ۱۷	۲۰۰	۱۴۱۶۷٫۸	۱۴۲۱۹٫۲	۱۴۴۱۱٫۸
۱۸ – ۲۲	۲۸۰	۲۰۳۵۶٫۴	۲۰۸۴۶٫۱	۲۱۱۰۵٫۴

شکل ۳ مقایسه‌ی عملکرد الگوریتم پیشنهادی با دو الگوریتم دیگر را بر اساس زمان اجرا نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است، چهار دسته مسئله با تعداد گره متفاوت توسط این الگوریتم‌ها حل شده و نتایج نشان‌دهنده‌ی برتری الگوریتم پیشنهادی نسبت به دو الگوریتم TS و GA است. یکی از دلایل این موضوع نیز این است که الگوریتم کلونی مورچگان باتوجه به ماهیت آن به‌طور کلی در حل مسائل مسیریابی کارایی بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها دارد. همچنین الگوریتم جست‌وجوی ممنوع باتوجه به حجم محاسبات و داشتن حافظه و همچنین فرایند به‌روزرسانی فهرست ممنوع نسبت به سایر الگوریتم‌ها نیازمند زمان محاسباتی بیشتری بوده است.

باتوجه به احتمال پراکندگی بالا در جواب‌های مسائل بزرگ و به‌منظور اطمینان از حفظ کارایی مناسب الگوریتم در حل این‌گونه مسائل، وضعیت شاخص ضریب تغییرات (CV) در حل مسائل مختلف را نیز بررسی می‌کنیم. شاخص ضریب تغییرات بیان‌گر میزان پراکندگی یک متغیر به‌ازای یک واحد از میانگین آن است؛ پس مقدار این شاخص از تقسیم انحراف معیار بر میانگین مطابق فرمول زیر به دست می‌آید:

$$CV = \delta/\mu \times ۱۰۰$$



شکل ۴. مقادیر شاخص ضریب تغییرات.

از این‌رو از هر دسته از مسائل کوچک تا بزرگ یک مسئله انتخاب و هر مسئله ۳۰ مرتبه با الگوریتم پیشنهادی حل شده و بر اساس آن، دو پارامتر میانگین و انحراف معیار محاسبه شده است. شکل ۴ مقادیر ضریب پراکندگی نهایی را نشان می‌دهد. این نتایج نشان‌دهنده‌ی مناسب‌بودن عملکرد الگوریتم در شاخص ضریب تغییرات و ثبات آن در حل مسائل با ابعاد مختلف است.

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله مسئله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه در شبکه‌ی توزیع زنجیره‌ی تأمین با اعمال محدودیت تردد وسایل بررسی و مدل ریاضی همراه با پارامترها و متغیرهای مربوط به آن تشریح شد. سپس برای حل این مسئله با ابعاد بزرگ، یک مدل پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم کلونی مورچگان توسعه داده شد. در الگوریتم پیشنهادی از یک ماتریس فرمون برای نگه‌داری اطلاعات ثبت‌شده طی فرایند بهینه‌سازی استفاده شد. با این ماتریس، این امکان به‌وجود می‌آید که اطلاعات بین فرایند بهینه‌سازی مختلف تبادل شود و به یک سازوکار مشارکت و همکاری برسد. این الگوریتم به بهبود عملکرد مرحله‌ی توزیع یک زنجیره‌ی تأمین کمک می‌کند و با مسیریابی مناسب برای وسایل نقلیه، به بهبود کلی سیستم زنجیره‌ی تأمین، کاهش هزینه، تحویل به موقع کالا، و افزایش رضایت مشتریان کمک می‌کند.

ارزیابی بهینگی الگوریتم پیشنهادی و همچنین مقایسه‌ی عملکرد آن در حل مسائل بزرگ با دو الگوریتم TS و GA نشان داد که این الگوریتم هم در ارائه‌ی جواب و هم در زمان اجرا عملکرد خوبی دارد.

برای تحقیقات آتی، می‌توان این مسئله را با درنظرگرفتن چند انبار مرکزی بررسی کرد. همچنین حل همین مسئله در حالت مسیر باز (عدم الزام بازگشت وسایل به انبار) نیز می‌تواند موضوع مناسب دیگری برای تحقیقات آتی باشد.

پانوشت‌ها

1. suply chein management (SCM)
2. vehicle routing problem (VRP)
3. ant colony (AC)
4. end user
5. location routing problem (LRP)
6. travelling salesman problem
7. quadratic assignment problem

منابع (References)

1. Bullnheimer, B., Hartl, R.F. and Strauss, C. "Applying the ant system to the vehicle routing problem",

Meta-Heuristics: Advances and Trends in Local Search Paradigms for Optimization, pp. 109-120 (1999).

2. Silva, C.A., Sousa, J.M.C., Runkler, T. and Costa, J.M.G. "Distributed optimization of a logistic system and its suppliers using ant colonies", *International Journal of Systems Science*, **37**(8), pp. 503-512 (2006).
3. Houlihan, J.B. "International supply chain management", *International Journal of Physical Distribution and Materials Management*, **15**(1), pp. 22-38 (1985).
4. Jones, T.C. and Riley, D.W. "Using inventory for competitive advantage through supply chain management", *International Journal of Physical Distribution and Materials Management*, **15**(5), pp. 16-26 (1985).
5. Srivastava, R. and Benton, W.C. "The location-routing problem:considerations in physical distribution system design", *Computers & Operations Research*, **17**(5), pp. 427-435 (1990).
6. Cohen, M.A. and Moon, S. "An integrated plant loading model with economice of scale and scope", *European Journal of Operation Research*, **50**, pp. 266-276 (1991).
7. 7.Chiang, W.C., Russell, R.A. "A metaheuristic for the vehicle-routing problem with soft time windows", *Journal of the Operational Research Society*, **5**, PP. 1298-1310 (2004).
8. Chandra, P. and Fisher, M. "Coordi nation of production and distribution planning", *European Journal of Oper ation Research*, **72**, pp. 503-517 (1994).
9. Pirkul, H. and Jayaraman, V. "A multi commodity,multi-plant,capacitated facility location problem: Formulation and efficieient heuristic solution", *Journal of Operation Research*, **25**(10), pp. 869-878 (1998).
10. Pyke, D.F. and Cohen, M.A. "Multiproduct integrated production-distribution systems", *European Journal of Operational Research*, **74**, PP. 18-49 (1994).
11. Sabri, H.E. and Benita, M. "A moultiobjective approach to simultaneous sterategic and operationa l planning in supply chain design", *Omega*, **28**, pp. 581-598 (2000).
12. Zhou, Z., Siwei, C. and Ben, H. "Supply chain optimization of process industries with sustainability consideration", *Computer and Chemical Engineering,* **24**, pp. 1151-1158 (2000).
13. Jayaraman, V. and Pirkul, H. "Planning and coordination of production and distribution facilities for multiple commodities", *European Journal of Operation Research*, **133**, pp. 394-408 (2001).
14. Lee, Y.H. and Kim, S.H. "Production-distribution planning in supply chain considering capacity constraints", *Computer and Industrial Engineering*, **43**, pp. 169-190 (2002).
15. Liao, C.J., Lin, Y. and Shih, S.C. "Vehicle routing with cross-docking in the supply chain", *Expert Systems with Applications*, **37**, pp. 6868-6873 (2010).
16. Tarantilis, C.D., Ioannou, G., Kiranoudis, C.T. and Prastacos, G.P. "Solving the open vehicle routing problem via a single parameter metaheuristic algorithm", *Journal of the Operational Research Society,* **56**, pp. 588-596 (2005).
17. Crispim, J. and Brandao, J. "Metaheuristic applied to mixed and simultaneous extensions of vehicle routing probem with backauls", *Journal of the Operational Research Society*, **56**, pp. 1296-1302 (2005).
18. Qu, W.W., Bookbinder, J.H. and Iyogun, P. "An integrated inventorytransportation system with modified periodic policy for multiple products", *European Journal of Operational Research*, **115**, pp. 254-269 (1999).
19. Chan, F.T.S., Chung, S.H. and Wadhwa, S. "A hybrid genetic algorithm for production and distribution", *Omega*, **33**(4), pp. 345-355 (2005).
20. Wei, L., Zhang, Z. and Lim, A. "An adaptive variable neighborhood search for a heterogeneous fleet vehicle routing problem with three-dimensional loading Constraints", *IEEE Computational Intelligence Magazine*, **9**, pp. 18-30 (2014).
21. Wei, L., Zhang, Z. and Lim, A. "A variable neighborhood search for the capacitated vehicle routing problem with two-dimensional loading constraints", *European Journal of Operational Research,* **3**(16), pp. 798-814 (2015).
22. Stutzle, Th. and Hoos, H.H. "Max min ant system", *Journal of Future Generation Computer Systems,* **8**(16), pp. 889-914 (2000).
23. Colorni, A., Dorigo, M. and Maniezzo, V. "Distributed optimization by ant colonies", In: Varela, F.J., Bourgine, P. (Eds.), Toward a Practice of Autonomous Systems, *Proceedings of the First European Conference on Artificial Life. Elsevier,* Amsterdam, pp. 134-142 (1992).
24. Dorigo, M., Bonabeau, E. and Theraulaz, G. "Ant algorithms and stigmergy", *Future Generation Computer Systems,* **16**, pp. 851-871 (2000).
25. Zeng, H., Sun, Y. and Zeng, X. "A new approach of error compensation on NC machining based on memetic computation", *Telkomnika Indonesian Journal of Electrical Engineering*, **11**(4), pp. 2148-2156 (2013).
26. Guoqiang, Zh., Zhao, L. and Jishun, L. "Optimizati on of an intelligent controller for parallel autonomous parking", *Telkomnika Indonesian Journal of Electrical Engineering,* **11**(2), pp. 1069-1075 (2013).
27. Taillard, E.D. "A heuristic column generation method for th e heterogeneous fleet VRP", *RAIRO Operations Research*, **33**, pp. 1-14 (1999).
28. Li, F., Golden, B.L. and Wasil, E.A. "A record-to-record travel algorithm for solving the heterogeneous fleet vehi cle routing problem", *Computers and Operations Research*, **34**, PP. 2734-2742 (2007).