KNO-1004-4201

بهینه‌سازی مسیریابی حمل‌ونقل در زنجیره تأمین با 40 گره با استفاده از الگوریتم ژنتیک

علیرضا محمودی‌فرد[1*] alireza10.m10@gmail.com
نگار مظفر قدیرلی[2] negar.mozzafar@gmail.com

[1]دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت صنعتی (و مدرس دانشگاه‌ها)، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران
[2]دانشجوی کارشناسی مهندسی صنایع، موسسه ابرار، تهران، ایران

چکیده: در طی سال‌های گذشته، تلاش‌های زیادی به جهت کاهش هزینه حمل‌ونقل با استفاده از مدل‌های متفاوت مسئله مسیریابی وسیله نقلیه صورت گرفت؛ در واقع، افزایش در هزینه‌های حمل‌ونقل بسیاری را تشویق کرد که هزینه حمل‌ونقل مرتبط با حرفه خود را با بهره‌گیری از سیستم مسیریابی و سیله نقلیه کاهش دهند. در این پژوهش، مسئله مسیریابی حمل‌ونقل در زنجیره تأمین برای 40 گره، مورد بررسی قرار گرفته است؛ مسئله مسیریابی وسایل نقلیه که از انبارها حرکت نموده، دسته‌ای از مشتریان را ملاقات کرده و به انبار بر می‌گردند. هر وسیله نقلیه دارای یک ظرفیت ثابت است و هر مشتری دارای تقاضای مشخص است که باید کاملا ارضا شود. مسئله شامل ترکیب انتخاب ملاقات برای هر مشتری و تعیین مسیرهای وسایل نقلیه بر اساس قوانین مسئله مسیریابی وسیله نقلیه است؛ به‌طوری‌که کل مسافت طی شده توسط هر وسیله نقلیه و کل زمان‌های زودکرد و دیرکرد و در مجموع کل هزینه کمینه شود.
از آنجائی‌که مسئله مسیریابی وسیله نقلیه، یک مسئله متعلق به کلاس NP-Hard است، مسئله مسیریابی وسیله نقلیه (VRP) جزء مسائل پیچیده و متعلق به کلاس NP-Hard است و برای حل آن از رویکردهای فرابتکاری استفاده می‌شود. در این کار، الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله مسیریابی وسیله نقلیه پیشنهاد شده است و سعی شده است با استفاده از نرم‌افزار MATLAB به حل پرداخته و به جواب بهینه دست یافته شود.

کلیدواژه: *مسیریابی وسایل نقلیه، الگوریتم ژنتیک، زنجیره تأمین، حمل‌و نقل، مدل ریاضی، هدف، بهینه‌سازی، نرم‌افزار MATLAB*

1. مقدمه

در دنیای کنونی تجارت و توزیع کالاها، بهینه سازی عملیات حمل‌ونقل کالاها در زنجیره‌تأمین، اهمیت بسیاری دارد. با توجه به افزایش پیچیدگی و حجم رشد این صنعت‌ها، مسائل مسیریابی حمل‌ونقل کالا به‌عنوان یکی از مسائل اساسی در مدیریت زنجیره‌تأمین مطرح می‌شوند؛ این مسائل در واقعیت با ترکیب عوامل متعددی از جمله محدودیت‌های زمانی، محدودیت‌های ظرفیت،

تقاضاهای متغیر و تعداد زیادی مکان‌ها و منابع حمل‌ونقل، به یک مسئله بهینه‌سازی پیچیده تبدیل می‌شوند.
در دهه‌های اخیر، جهان صنعتی امروز که رقابت تنگاتنگی میان شرکت‌ها و تولیدکنندگان وجود دارد، برآورده کردن نیازهای مشتریان که کالاهایی متنوع با کیفیت بالا و در عین‌حال، قیمت مناسب با توجه به توان خرید مشتری است؛ یکی از اهداف کلیدی مدیریت زنجیره تأمین به‌شمار می‌رود؛ رقابت میان شرکت‌ها در رقابت میان اجزای آن‌ها است [1].
مسئله مسیریابی وسایل نقلیه (VRP)[1] مهم‌ترین و پرهزینه‌ترین بخش در لجستیک می‌باشد و امروزه به‌علت کاربردهای واقعی در مسائل صنعتی، توجه زیادی به آن شده است؛ اولین بار این مسئله را دانتزیگ و رامسر مطرح کردند؛ این مسئله در زمینه‌های حمل‌ونقل و مسیریابی توزیع و لجستیک مهم است [2].
وسایل نقلیه‌ای که موظف‌اند برای برآورده کردن تقاضا مشتریان، از انبار به‌سمت آن‌ها حرکت نمایند و پس از خدمت به تمامی مشتریان دوباره به انبار بازگردند، در مسائل VRP بررسی می‌شوند که با اضافه شدن محدودیت‌ها و مفروضات به این نوع مسائل منجر به پیدایش نسخه‌های متفاوت آن گردیده و کاربرد آن را در حوزه‌های مختلف توسعه داده است.
در این پژوهش، هدف ارائه جواب‌های مقاوم برای حل مسائل VRP در شرایط عدم قطعیت با استفاده از الگوریتم فراابتکاری ژنتیک (GA)[2] است که بتواند بهینگی خود را حفظ نماید.
اضافه شدن یک‌سری از محدودیت‌ها باعث ایجاد انواع مختلف VRP می‌گردد؛ در این پژوهش، با اضافه شدن یکی از مهم‌ترین عوامل عدم قطعیت به مسئله VRP که «نامعلوم بودن تقاضا مشتری» است، سبب ایجاد VRP با تقاضا کاملاً تصادفی (VRPSD)[3] گردیده است؛ به VRPSD مسئله مسیریابی وسایل حمل‌ونقل احتمالی (PVRP)[4] نیز گفته می‌شود.
وقوع عدم قطعیت تقاضای مشتریان به این صورت است که میزان تقاضا نامشخص است تا هنگامی‌که وسیله نقلیه به محل مشتری برسد؛ چنانچه میزان تقاضا کمتر از بار موجود در وسیله نقلیه باشد، مشتری سرویس می‌گیرد و وسیله نقلیه برای خدمت، به مشتری بعدی می‌رود؛ در غیر این‌صورت برای مشتری کنونی یک هزینه منفی در نظر گرفته می‌شود و وسیله نقلیه پس از رفتن به انبار و بارگیری مجدد به مشتری بعد از مشتری کنونی می‌رود. تابع هدف روش پیشنهادی، علاوه‌بر هزینه‌ی منفی ناشی از عدم سرویس به مشتریان، شامل هزینه‌ی سفر بین مشتریان و همچنین انبار می‌باشد.

2. متن بررسی

1.2. بیان دقیق مسئله

[1] Vehicle Routing Problem (VRP)
[2] Tabu Search
[3] VRP with Stochastic Demand
[4] Probabilistic Vehicle Routing Problem

مسائل NP [5] که تاکنون راه‌حل سریع و قابل انجام در زمان معقولی، برایشان پیدا نشده است و احتمالاً در آینده نیز یافت نخواهد شد، شامل چند هزار مسئله مختلف با کاربردهای بسیار است، که البته اثبات شده است که اگر فقط برای یکی از این مسائل راه‌حل سریع پیدا شود، باعث حل بقیه مسائل نیز خواهد شد؛ این مسائل عملاً پیچیده بوده و راه‌حل سریعی ندارند (منظور از راه‌حل سریع، رابطه چند جمله‌ای بین زمان انجام آن مسئله با اندازه ورودی‌های مسئله است) [3].

مسئله مسیریابی وسیله نقلیه VRP یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین مسائل NP تام[6] است که تنوع نسخه‌های گوناگون این مسئله آن‌قدر زیاد است که دسته‌بندی آن‌ها و بیان حالت‌های مختلفی که در آن رخ می‌دهد، بسیار مشکل و زمان‌گیر است که امروزه بسیار مورد توجه محققین و دانشمندان قرار می‌گیرد. از زمانی که این مسئله در دهه 60 مورد بررسی قرار گرفت، گسترش‌های بسیاری از آن بر اساس کاربردهای متفاوتی که در دنیای واقعی داشتند، مشتق شدند [4].

مدیریت بهینه منابع و عملیات حمل‌ونقل کالا در زنجیره تامین، عامل اساسی در بهبود عملکرد صنایع و کاهش هزینه‌ها می‌باشد. یکی از مسائل اساسی که در این زمینه مطرح می‌شود، مسئله مسیریابی حمل‌ونقل کالا می‌باشد؛ این مسئله در واقعیت با متغیرهای متعددی از جمله مکان‌های مختلف، مسافت‌ها، زمان‌ها، نیازهای متغیر و محدودیت‌های منابع حمل‌ونقل مواجه است.

در پژوهش حاضر، هدف اصلی ما این است که مسیریابی حمل‌ونقل کالا در زنجیره‌تأمین بهبود یابد و با بهره‌گیری از الگوریتم‌های فراابتکاری، بهینه سازی این عملیات انجام شود. الگوریتم‌های فراابتکاری به‌عنوان روش‌های پرکاربرد در بهینه سازی مسائل پیچیده شناخته می شوند و قدرت زیادی در مواجهه با مسائل دارای تعداد زیاد متغیر و محدودیت دارند. با توجه به پیچیدگی این مسئله و تاثیر آن بر بهره‌وری و سودآوری شرکت‌ها، مطالعه و بهینه‌سازی مسیریابی حمل‌ونقل کالا تبدیل به یک چالش بزرگ در زنجیره‌تأمین شده است؛ بنابراین، این پژوهش تلاش می‌کند تا با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری، عملکرد عملیاتی و هزینه‌های حمل‌ونقل را بهبود دهد و راهکارهای بهینه‌سازی را برای این مسئله ارائه نماید.

مسئله مسیریابی وسیله نقلیه VRP به‌علت سهم قابل توجه هزینه توزیع کالا از هزینه تولید، امروزه بسیار در لجستیک و زنجیره تأمین مورد توجه قرار می‌گیرد. شاید بتوان گفت بسیاری از مسائل حوزه توزیع کالا را می‌توان به یکی از نسخه‌های این مسئله تبدیل کرد و سپس آن را مورد بررسی قرار داد؛ به‌علاوه این مسئله بیشتر در بخش‌های صنعت و خدمات کاربردهای گسترده‌ای دارد، زیرا بهبود کارایی در حمل‌ونقل کالاها باعث صرفه‌جویی قابل توجه در قیمت تمام شده آن‌ها می‌شود و سبب می‌گردد شرکت‌های صنعتی و خدماتی قابلیت بیشتری برای رقابت در برابر رقبای خود داشته باشند و بتوانند با قیمت کمتری کالای خود را به دست خریداران رسانده و از این طریق بازار کالای خود را گسترش داده و سود بیشتری را به‌دست آورند. اهمیت این مسئله در دنیای واقعی سبب شده است که این مسئله در زندگی روزمره بسیار مورد توجه قرار بگیرد [5].

از طرف دیگر، بنا بر توضیحات داده شده چون مسئله مسیریابی وسیله نقلیه جزء مسائل سخت دسته‌بندی می شود و الگوریتم‌هایی دقیق با پیچیدگی چندجمله‌ای برای مسئله وجود ندارد، تمایل به یافتن روش‌های ابتکاری و فراابتکاری در کنار روش‌های دقیق برای این مسئله گسترش یافت؛ به‌خصوص در دهه گذشته و با افزایش سرعت کامپیوترهای شخصی، استفاده از این روش‌ها بسیار فراگیر شده به‌طوری‌که روش‌های بسیار زیادی برای این مسئله پیشنهاد شدند که بعضی از مهم‌ترین آن‌ها جستجوی ممنوعه [6]، شبیه‌سازی آنیلی [7]، الگوریتم رقابت استعماری [4]، الگوریتم مورچگان [8]، الگوریتم ممتیک [9]، جستجوی پراکنده [10]، ترکیبی نزدیک‌ترین همسایه با جستجوی ممنوعه [11]، الگوریتم شبه آهنربایی [12]، الگوریتم کاهنده متغیرهای همسایه [13]، جستجوی همسایگی بزرگ تطابقی [14] و الگوریتم همسایه متغیر [15] می‌باشند.

کاربردهای ذکر شده باعث شده است که محققین، الگوریتم‌هایی زیادی برای حل این مسئله ارائه کنند که می‌توان به‌طور کلی این الگوریتم‌ها را به دو دسته دقیق و تخمینی تقسیم‌بندی کرد؛ در دسته اول که برای مسائل با ابعاد کوچک مورد استفاده قرار می‌گیرد، جواب بهینه مسئله در یک زمان بسیار زیاد به‌دست می‌آید؛ باید توجه کرد که الگوریتم‌های ابتکاری و تخمینی خود نیز به دو دسته الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری تقسیم‌بندی می‌شوند؛ در روش‌های فراابتکاری که میزان اجرای الگوریتم، برخلاف روش‌های ابتکاری، به تصمیم کاربر وابسته است، جواب‌ها تقریباً در یک زمان بیشتر از الگوریتم‌های ابتکاری و کمتر از روش‌های دقیق به‌دست می‌آیند؛ اگرچه معمولاً جواب‌های این روش‌ها از جواب‌های روش‌های ابتکاری بهتر است و این‌گونه از الگوریتم‌ها از راهکارهایی استفاده می‌کنند که تا حد ممکن در بهینه‌های محلی گیر نیفتند، اما

[5] Non deterministic polynomial
[6] NP-Complete Problems

پارامترهای زیادی در این الگوریتم‌ها وجود دارند که باید تو سط کاربر به صورت تجربی به‌د ست آیند؛ این حجم زیاد پارامترها سبب می شوند که الگوریتم‌ها نتوانند در تکرارهای م شابه جواب‌های یکسانی به‌د ست آورند؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که این‌گونه الگوریتم‌ها دارای یک روال ثابت برای رسیدن به جواب نبوده و پارامترهای تصادفی نقش زیادی را در این الگوریتم‌ها بازی می‌کنند.

2.2. ضرورت پژوهش

زمینه زنجیره‌تأمین و مسئله مسیریابی حمل‌ونقل کالا به‌عنوان یکی از مسائل بحرانی و پیچیده در مدیریت عرصه تجارت و توزیع کالاها از اهمیت بسیاری برخوردار است. با توجه به افزایش پیچیدگی و حجم زیاد کالاها و نیاز به کاهش هزینه‌ها و بهبود کارایی در زنجیره‌تأمین، بهینه‌سازی مسائل مسیریابی حمل‌ونقل، امری ضروری و حیاتی تلقی می‌شود.

عواملی چون تغییرات در تقاضا، تغییرات در تأمین‌کنندگان، محدودیت‌های منابع و نوسانات قیمت‌ها باعث می‌شوند که مسائل مسیریابی در زنجیره‌تأمین به پیچیدگی بیشتری برخورد کنند؛ این پیچیدگی‌ها می‌توانند منجر به افت هزینه‌های عملیاتی، افزایش زمان تحویل کالاها و افت کیفیت خدمات شوند. این پژوهش از اهمیت بالایی برخوردار است، چرا که اهداف اصلی آن شامل توسعه مدل‌های بهینه سازی برای حل مسائل مسیریابی در زنجیره‌تأمین، بهره‌برداری از تکنیک‌های یادگیری تقویتی جهت بهبود تصمیم‌گیری‌های مسیریابی و ارزیابی دقیق عملکرد الگوریتم‌ها و مدل‌های پیشنهادی است.

این پژوهش با ارتقاء کارایی در مسائل مسیریابی حمل‌ونقل کالا، بهبود خدمات زنجیره‌تأمین و کاهش هزینه‌های مرتبط با حمل‌ونقل کالاها کمک می‌کند؛ با توجه به روند رو به افزایش تجارت و حجم روزافزون کالاها، پژوهش‌ها در این زمینه از اهمیت بیشتری برخوردار است؛ این پژوهش امکان تسهیل عملکرد زنجیره‌تأمین‌های جهانی و بهبود کارایی سیستم‌های حمل‌ونقل را ایجاد می‌کند و به سازمان‌ها و شرکت‌های تولیدی و توزیعی کمک می‌کند تا رقابتی‌تر باشند و بهترین خدمات را به مشتریان خود ارائه دهند.

برای کاهش قیمت‌ها و افزایش رقابت‌پذیری، فشار زیادی بر صنایع وارد شده است؛ در این راستا، مدیران از روش‌های مختلفی چون برنامه‌ریزی و زمان‌بندی تولید استفاده کرده‌اند و تمرکز آن‌ها به درون بنگاه برای کاهش هزینه‌ها بوده است؛ ولی سازمان‌ها برای ادامه حیات و بقا، ناچار به تعامل با سایر سازمان‌ها هستند؛ از این‌رو برای کاهش هزینه‌ها باید دید فرا سازمانی داشت؛ بنابراین بررسی نحوه مسیریابی حمل‌ونقل کالا در شرایط عدم قطعیت، توجه بسیاری از مدیران را به خود جلب کرده است؛ زیرا این تصمیماتی که در مسأله مسیریابی گرفته می‌شود، روی تصمیمات مسائل دیگر اثرگذار است؛ لذا این پژوهش، مسیریابی حمل‌ونقل در یک زنجیره‌تأمین را با در نظر گرفتن شرایط بررسی می‌کند.

3.2. اهداف پژوهش

هدف اصلی پژوهش درباره مسیریابی حمل‌ونقل کالا در زنجیره تأمین در شرایط عدم قطعیت با استفاده از الگوریتمی فراابتکاری و یافتن و مسیریابی بهینه‌تر و بهتری برای حمل‌ونقل زنجیره تأمین شرکت‌ها و تولیدکنندگان است که با کمترین هزینه و سودآوری بیشتر بتوانند تقاضا و نیاز مشتری را برطرف کنند و برای مشتری ارزش‌آفرینی کنند؛ برخی از اهداف ذکر شده در زیر می‌توانند به‌عنوان مثال از این پژوهش باشند:

1. مسیریابی بهینه و مقاوم برای حمل‌ونقل کالا در زنجیره تأمین شرکت‌ها و تولیدکنندگان.
2. راهکارهای بهبود عملکرد، برطرف کردن تقاضا و نیازهای مشتری.
3. انتخاب بهترین مسیر با کمترین هزینه و بیشترین سودآوری برای شرکت‌ها و تولیدکنندگان.
4. استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل مشکلات سازمانی.
5. تلفیق و استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری در مسائل حمل‌ونقل و زنجیره تأمین.
6. بررسی مسئله مسیریابی حمل‌ونقل کالا در زنجیره تامین و تحلیل نیازها و چالش‌های مرتبط.
7. انتخاب روش‌های بهینه‌سازی برای حل مسئله مسیریابی حمل‌ونقل کالا با توجه به ویژگی‌های مسئله.
8. ارائه توضیحات دقیق در مورد الگوریتم‌های فراابتکاری و نحوه کار آن در بهینه‌سازی مسائل مسیریابی.
9. پیاده‌سازی الگوریتم‌های فراابتکاری به‌صورت دقیق در محیط نرم‌افزار MATLAB.
10. تنظیم پارامترهای مرتبط با الگوریتم‌های فراابتکاری برای بهینه‌سازی عملکرد در مسئله مسیریابی حمل‌ونقل.

11. اجرای آزمایش‌های متعدد بر روی داده‌های واقعی و مصنوعی به‌منظور ارزیابی کارایی الگوریتم‌های فراابتکاری.
12. تحلیل نتایج آزمایش‌ها و مقایسه عملکرد الگوریتم‌های استفاده شده در این پژوهش با روش‌های دیگر مانند الگوریتم‌های ترتیبی.
13. ارائه نکات و استنباط‌های کلیدی از نتایج به‌دست آمده.
14. ارائه پیشنهاداتی برای بهبود عملکرد الگوریتم‌ها و کاربردهای آینده در مسائل مسیریابی حمل‌ونقل کالا.
15. بررسی تطبیق‌پذیری روش بهینه‌سازی در صنایع مختلف و مقایسه عملکرد آن در موارد متنوع.
16. با تحلیل و شناخت دقیق‌ترین مسیریابی حمل‌ونقل کالا در زنجیره تأمین با استفاده از الگوریتم ژنتیک و سایر روش‌ها، شرکت‌ها می‌توانند بهبود و توسعه حرفه‌ای‌تر و رقابتی‌تر را در عرصه تجارت و اقتصاد جستجو کرده و به نتایج بهتری دست پیدا کنند.

4.2. روش پژوهش

در فرآیند پژوهش برای ارتقاء کارایی و بهبود مسائل مسیریابی حمل‌ونقل کالا در زنجیره‌تأمین، از یک روش پژوهش سیستماتیک و جامع استفاده شد. در خصوص مدل سازی مسئله باید گفت که این مدل شامل تعریف متغیرها، توابع هدف و محدودیت‌ها برای بهینه سازی مسیریابی کالاها در زنجیره‌تأمین می‌باشد؛ از اصول بهینه‌سازی ریاضی برای توسعه این مدل استفاده شد.

مقصود این است که الگوریتم‌های فراابتکاری هوشمندی برای بهینه سازی مسائل مسیریابی حمل‌ونقل کالا به‌کار روند و مدل مسئله مسیریابی حمل‌ونقل کالا در نرم‌افزار MATLAB اعمال شود؛ با این روش به بهبود تصمیم‌گیری‌های مسیریابی پرداخته می شود؛ این تکنیک این امکان را می‌دهد که با توجه به تغییرات مکرر در شرایط ورودی، تصمیم‌گیری‌های بهتری ایجاد شود.

در این پژوهش، تقاضای مشتریان از قبل شناخته شده نیست و هنگام رسیدن وسیله نقلیه به محل مشتری، این تقاضا تعیین می‌گردد؛ به همین دلیل VRP در این پژوهش به‌صورت پویا در نظر گرفته شده است. برای برآورده کردن تقاضاها، مسئله باید به‌گونه‌ای تعریف شده باشد که قدرت پاسخ دادن در برابر این تقاضاهای نامعلوم را داشته باشد؛ همین توان پاسخ‌گویی سبب گردیده تا مسئله به یک مسئله پایدار تبدیل گردد.

این الگوریتم‌های همچون جستجوی ممنوعه، برای حل مسئله VRP غیر قطعی ارائه شده است که در آن سعی می شود جواب‌های مقاومی برای این مسئله با استفاده از نرم‌افزار متلب[7] یافت شود که در مواجهه با تغییرات، بهینگی خود را حفظ کند.

در این پژوهش طراحی صورت مسئله و بعد فرمول پیشنهادی VRPSD مطرح می شود؛ سپس اجزای الگوریتم‌ها که روش‌های پیشنهادی حل مسئله VRP در این پژوهش است، با استفاده از نرم‌افزار MATLAB شرح داده می‌شود.

5.2. ابزار پژوهش

در این پژوهش، از نرم‌افزار MATLAB به‌عنوان ابزار اصلی برای انجام پژوهش‌ها و تجزیه و تحلیل داده‌ها استفاده گردید. از الگوریتم‌های بهینه سازی خاصی همچون جستجوی ممنوعه، به‌منظور بهبود عملکرد و یافتن جواب بهینه برای مسئله‌ی مورد بررسی استفاده شد؛ این الگوریتم‌ها با دقت بسیار بالا در محیط MATLAB پیاده‌سازی گردیده و تحت پارامترهای دقیق و تنظیم‌های دقیقی اجرا گردیدند. تجربیات عملی نشان داد که ترکیب این الگوریتم‌های بهینه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB منجر به بهبود قابل توجهی در حل مسئله و کاهش قابل ملاحظه‌ای در معیارهای ارزیابی موردنظر ما شده است؛ نتایج به‌دست آمده تایید می‌کند که استفاده از این روش‌های ترکیبی، توانایی حل مسائل پیچیده‌تر را با دقت و کارآیی بالا ارتقاء داده است و به‌عنوان یک ابزار مؤثر در زمینه‌ی مسیریابی حمل‌ونقل کالا در زنجیره‌تأمین عرفی می‌شوند.

6.2. بیان نوآوری پژوهش

نوآوری پژوهش در پنج شاخه اصلی مورد بررسی قرار می‌گیرد:

[7] MATLAB

1. مدل سازی چند سطح: در این پژوهش بهبودهای مهمی در مدل سازی چند سطحی مسئله حمل‌ونقل کالا در نظر گرفته شده است؛ در این شاخه از پژوهش، یک مدل چندسطحی برای مسئله مسیریابی حمل‌ونقل کالا در زنجیره تامین ایجاد شده است؛ این مدل نه تنها به ما امکان می‌دهد تا جزئیات مرتبط با مسیریابی محصولات را مدیریت کنیم، بلکه تغییرات در سطوح مختلف زنجیره تأمین را در نظر می‌گیرد؛ به‌طور مثال، ما می‌توانیم تأثیر تغییر تقاضا یا تغییرات در تأمین‌کنندگان را در این مدل در نظر بگیریم و تصمیم‌گیری‌های مسیریابی را بر اساس این تغییرات بهبود بخشیم.

2. یادگیری تقویتی: از تکنیک‌های یادگیری تقویتی به‌منظور تجزیه و تحلیل عملکرد و بهبود پیشنهادهای مسیریابی استفاده شده است؛ این رویکرد به ما این امکان را می‌دهد تا در زمان واقعی به شناخت الگوهای بهینه و بهبود پیشنهادهای مسیریابی بپردازیم؛ در این بخش از پژوهش، ما از تکنیک‌های یادگیری تقویتی به‌منظور بهبود و بهینه‌سازی پیشنهادهای مسیریابی استفاده کردیم.

3. الگوریتم‌های فراابتکاری: الگوریتم‌های فراابتکاری هوشمندی برای بهینه‌سازی مسائل پیچیده مسیریابی حمل‌ونقل کالا در این پژوهش استفاده شده است؛ این الگوریتم‌ها به ما امکان می‌دهند تا جواب‌های بهینه تقریبی در زمان کوتاه‌تری بیابیم؛ این الگوریتم‌ها به ما این امکان را می‌دهند که به‌طور جستجوگرانه به‌دنبال جواب‌های بهینه در فضای مسئله بگردیم؛ برای مثال، الگوریتم‌های ژنتیک، مورچگان، زنبورعسل و جستجوی ممنوعه به ما کمک می‌کنند تا ترکیب‌های بهینه از مسیرها را پیدا کنیم.

4. ارزیابی دقیق عملکرد: برای عملکرد الگوریتم‌ها می‌توان پیشنهاد داد که مساله را در شرایط واقعی توسعه دهید؛ این ارزیابی‌ها نه تنها به ارائه جواب‌های بهتر کمک می‌کنند، بلکه در مدیریت و بهینه‌سازی زنجیره تامین نقش مهمی ایفا می‌کنند.

5. پیاده سازی عملی: نرم‌افزار تخصصی MATLAB برای اجرای مسائل مسیریابی حمل‌ونقل کالا با استفاده از این نوآوری‌های پژوهشی به‌گونه‌ای توسعه یافته است؛ این پیاده‌سازی‌ها به صنایع و سازمان‌های زنجیره تامین کمک می‌کنند تا بهبودهای محسوسی در عملکرد حمل‌ونقل خود داشته باشند.

در بررسی‌های به عمل آمده، به این نتیجه رسیدیم که تاکنون آنچنان مقاله‌هایی در خصوص حل مسئله مسیریابی حمل‌ونقل کالا در زنجیره تأمین با استفاده از چهار الگوریتم کلونی مورچگان، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم زنبور عسل و الگوریتم جستجوی ممنوعه نوشته نشده است.

7.2. سوالات پژوهش

*** سوالات اصلی**

1) مسیریابی بهینه و مقاوم برای حمل‌ونقل کالا در زنجیره تأمین شرکت ها و تولیدکنندگان کدام است؟
2) بهترین نوع مسیریابی برای حمل‌ونقل کدام است؟
3) الگوریتم‌های فراابتکاری در مسیریابی چیستند و چگونه کار می‌کنند؟
4) با تعداد گره‌های بیشتر نیز الگوریتم‌های فراابتکاری به جواب بهینه می‌رسند؟

*** سوالات فرعی**

1) آیا استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری در مسئله مسیریابی به ما کمک می‌کنند؟
2) چه مزایا و معایبی برای استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری در حمل‌ونقل کالا وجود دارد؟
3) نوع داده‌ها و اطلاعاتی که برای اجرای الگوریتم‌های فراابتکاری در مسیریابی نیاز داریم، چیست؟
4) چگونه می‌توان الگوریتم‌های فراابتکاری را برای بهینه‌سازی مسیرهای حمل‌ونقل کالا در زنجیره‌تأمین استفاده کرد؟

8.2. توصیف

یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های مدیران تولید در دنیای رقابتی امروز، بهبود مستمر بهره‌وری است؛ از این‌رو هر روزه 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 است، برنامه‌ریزی برای کاهش هزینه‌های مربوط به زنجیره تأمین است [16].

امروزه خواست مشتری بر کیفیت بالا و خدمت رسانی سریع، موجب افزایش فشارهایی در سازمان‌ها شده است که قبلا وجود نداشته است؛ در نتیجه، شرکت‌ها بیش از این نمی‌توانند به تنهایی از عهده تمامی کارها برآیند. فعالیت‌هایی نظیر برنامه‌ریزی عرضه و تقاضا، تهیه مواد اولیه، تولید، کنترل کیفیت، برنامه‌ریزی محصول یا خدمت، نگهداری کالا و کنترل موجودی، بازاریابی، توزیع کالا و خدمات، تحویل و خدمت به مشتری که قبلا همگی در سطح شرکت انجام می شد، اینک به سطح زنجیره تأمین انتقال یافته است. مسأله کلیدی در یک زنجیره تأمین، مدیریت و کنترل هماهنگ تمامی این فعالیت‌ها است، به‌طوری‌که مشتریان یک شرکت بتوانند خدمات خود را با بالاترین سطح اطمینان خاطر، سرعت، کیفیت و هزینه مناسب دریافت کنند [17].

با طرح نظریات جدید در ارتباط با رضایت مشتریان در یک سازمان، مسئله مسیریابی برای وسایل نقلیه در شبکه‌ی توزیع زنجیره تأمین مهم محسوب می شود که درصدد انتخاب و تخصیص مسیرهای ممکن به وسایل نقلیه در دسترس برای توزیع و تحویل کالا به مراکز پخش مشتریان است، به‌طوری‌که هزینه‌های مربوطه کمینه شود؛ حل این مسئله ضمن کاهش هزینه‌های توزیع، موجب تحویل به‌موقع کالاها و همچنین رضایت مشتریان نیز می‌شوند [18].

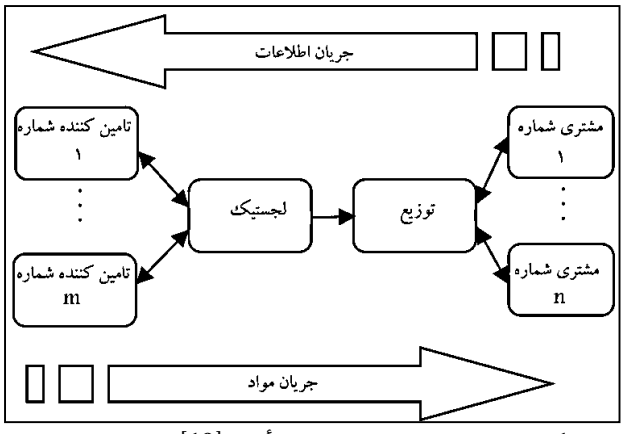
لجستیک و زنجیره تأمین لفظی است که در چند سال اخیر در کشورمان و به‌ویژه این روزها تحت‌عنوان‌هایی نظیر «مدیریت زنجیره تأمین»، «لجستیک ناب» و «انجمن لجستیک و زنجیره تأمین» بسیار شنیده می‌شود.

مدیریت زنجیره‌ی تأمین شامل یک زنجیره از فرایندهای کلیدی است که در کسب‌وکارهای مختلف از تأمین‌کنندگان اصلی تا مصرف‌کنندگان نهایی در این زنجیره قرار می‌گیرند. زنجیره‌ی تأمین محصولات، خدمات و اطلاعاتی را در برمی‌گیرد که برای مشتریان و همچنین برای سهامداران ایجاد ارزش افزوده می‌کند.

9.2. زنجیره تأمین (SC)[8]

در دهه 1980 میلادی به همراه بهبود در فرآیندهای تولید و به‌کارگیری مجدد الگوهای مهندسی، مدیران دریافتند که برای ادامه‌ی حضور در بازار فقط بهبود فرآیندهای داخلی و انعطاف‌پذیری در توانایی‌های شرکت کافی نیست، بلکه توزیع‌کنندگان محصولات نیز باید ارتباط نزدیکی با سیاست‌های توسعه‌ی بازار تولیدکننده داشته باشند؛ با چنین نگرشی، رویکردهای زنجیره تأمین و مدیریت ایجاد شد [18].

زنجیره تأمین شامل تمام فعالیت‌های مرتبط با جریان و تبدیل کالاها از مرحله ماده خام (استخراج) تا تحویل به مصرف‌کننده نهایی و نیز جریان‌های اطلاعاتی مرتبط با آن‌ها می‌باشد؛ این فعالیت‌ها شامل منبع‌یابی برای تأمین مواد اولیه، مدیریت سیستم‌ها، مونتاژ، فروش و غیره می‌باشد [1, 17]. در شکل 1 یک مدل مفهومی سیستم زنجیره تأمین نشان داده شده است.



شکل 1: مدل مفهومی سیستم زنجیره تأمین [19]

[8] Supply Chain

مدیریت زنجیره تأمین یکی از قدرتمندترین عوامل بهبود مزیت رقابتی سازمان‌های تولیدی و خدماتی محسوب می‌شود. زنجیره تأمین شامل تمامی بخش‌هایی است که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم در تأمین خواسته‌ی مشتریان با یکدیگر در ارتباط هستند؛ این بخش‌ها شامل تولیدکننده، تأمین‌کننده، بخش حمل‌ونقل، انبارها، خرده‌فروشی‌ها و مشتریان هستند و فعالیت‌هایی چون توسعه محصول جدید، بازاریابی، عملیات اجرایی، توزیع، خدمات مالی، خدمات مشتری و موارد دیگر را دربر می‌گیرند. زنجیره تأمین یک مجموعه‌ی پویا از جریان اطلاعات، محصول و سرمایه در بین سطوح مختلف خود است، که مشتری تنها یک جزء درگیر و درونی در زنجیره تأمین است؛ طبق این گفته‌ها اولین هدف زنجیره تأمین ایجاد رضایت در راستای رفع نیازهای مشتریان در فرایند تأمین و همچنین ایجاد سود برای خود زنجیره تأمین است [20].

10.2. عوامل یا محرک‌های زنجیره تأمین (SCD)[9]

در زنجیره تأمین چهار محرک اصلی، مطرح است [21]:

- تسهیلات: اشاره به تجهیزات و امکاناتی دارد که در اماکنی که محصول نگهداری (مثل فضای انبارش و انبارهای نگهداری کالا) و یا کالا تولید می‌شود (مانند کارخانه‌هایی که مواد اولیه را گرفته‌اند و روی آن‌ها کارهایی انجام می‌شود، تا به محصول تبدیل شود) مورد استفاده قرار گرفته و به‌کار می‌روند [21].
- انبار: نقش انبار در زنجیره‌تأمین، افزایش رضایتمندی تقاضا از طریق تضمین موجود بودن محصول است [21].
- اطلاعات: در یک زنجیره‌تأمین، مراحل مختلفی از تأمین مواد اولیه، حمل، انبارداری و تولید گرفته تا توزیع و رساندن به مشتری، وجود دارد که این مراحل مختلف از طریق «اطلاعات» به همدیگر مرتبط و هماهنگ می‌شوند [21].
- حمل‌ونقل: نقش حمل‌ونقل در زنجیره تأمین، انتقال محصول، چه مواد اولیه و چه محصول نیمه‌تمام و چه محصول تمام شده تا مرحله‌ی توزیع و رساندن آن به دست مشتری می‌باشد [21].

11.2. مدیریت زنجیره تأمین (SCM)[10]

مدیریت زنجیره تأمین، یکی از مسائلی است که در سال‌های اخیر اهمیت ویژه‌ای یافته است؛ زیرا امروزه سازمان‌ها با برنامه‌ریزی و مدیریت مطلوب زنجیره‌ی تأمین اثرات بسیار زیادی در کاهش هزینه‌ها و افزایش رضایت مشتریان داشته‌اند که به‌دنبال آن افزایش سهم بازار را درپی خواهد داشت؛ از طرف دیگر با توسعه سریع فناوری اطلاعات در سال‌های اخیر و کاربرد وسیع آن در مدیریت زنجیره تأمین، بسیاری از فعالیت‌های اساسی مدیریت زنجیره تأمین با روش‌های جدید در حال انجام است [18].

مسئله کلیدی در یک زنجیره تأمین، مدیریت و کنترل هماهنگِ تمامی فعالیت‌هایی نظیر توزیع، تحویل و خدمت به مشتری است. در مدیریت زنجیره تأمین، هدف این است که به‌گونه‌ای جریان اطلاعات مالی و مواد با هم هماهنگ شوند، که مشتریان بتوانند خدمت خود را با بالاترین سطح اطمینان، سرعت، کیفیت و هزینه مناسب دریافت کنند [1].

مدیریت زنجیره‌ی تأمین عبارت است از انتقال و ذخیره‌سازی مواد خام، موجودی در جریان ساخت و کالای تمام شده از نقطه و ذخیره‌سازی مواد خام، موجودی در جریان ساخت و کالای تمام شده از نقطه تولید به نقطه مصرف. مدیریت زنجیره تأمین مجموعه‌ای است از راهکارها جهت یکپارچه‌سازی اعضای زنجیره‌ی تأمین (تأمین‌کنندگان، توزیع‌کنندگان، خرده‌فروشی‌ها و مشتری نهایی) است که هدف آن کاهش هزینه‌های سیستم و نیز افزایش سطح خدمت‌رسانی به مشتریان است [22].

12.2. مسئله مسیریابی وسایل نقلیه (VRP)

امروزه ترابری بخش قابل توجهی از تولید ناخالص ملی هر کشوری را به خود اختصاص می‌دهد؛ بنابراین نمی‌توان از انتخاب درست و هوشمندانه مسیر در امر ترابری چشم‌پوشی کرد. یکی از مباحث مهم که در چند دهه اخیر کاربرد بسیار بالایی در عمل داشته و به‌منظور افزایش کارایی و

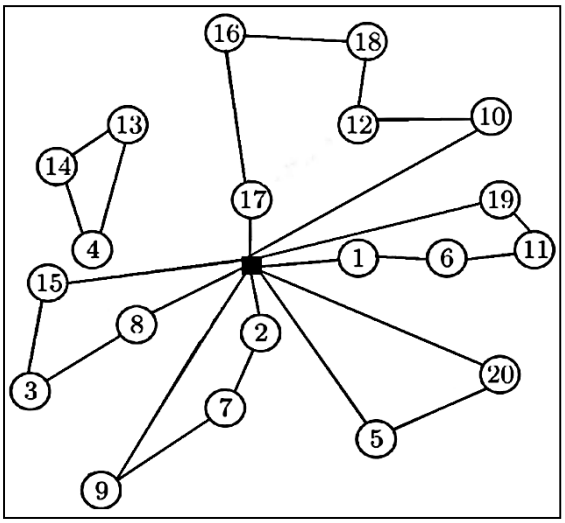
[9] Supply Chain Drivers
[10] Supply Chain Management

بهره‌وری سیستم‌های ترابری مطرح شده است، بحث مسیریابی وسایل نقلیه (VRP) است؛ مسئله مسیریابی وسایل نقلیه یکی از مسائل بسیار مهم در شاخه مسائل ترکیباتی است که تاکنون الگوریتم‌های زیادی برای حل آن پیشنهاد شده است [23].

در واقع مسئله مسیریابی وسیله نقلیه یکی از چالش‌برانگیزترین مسائل بهینه‌سازی ترکیبی است و یک موضوع پژوهشی داغ در چند دهه گذشته بوده است. برای اولین بار دنتزیگ و رامسر در سال 1959 این مسئله را در قالب «مسئله اعزام کامیون» بیان کردند [2]. پس از آن، با توجه به کاربرد گسترده‌ی مسئله مسیریابی وسیله نقلیه و اهمیت اقتصادی آن در کاهش هزینه‌های عملیاتی در سیستم‌های توزیع شده، مسئله VRP به یک حوزه‌ی پژوهشی تبدیل شد [24, 25].

اولین مسئله کلاسیک در این زمینه مسئله فروشنده دوره‌گرد (TSP)[11] بود که در آن یک فروشنده یا توزیع‌کننده باید به چند شهر مراجعه و به آن‌ها خدمتی ارایه کند. در ادامه مسئله مسیریابی و سایل نقلیه که در قلب مدیریت توزیع واقع شده است، به‌عنوان مسئله‌ای که روزانه هزاران سازمان و کمپانی برای تحویل و جمع‌آوری کالا یا افراد با آن مواجه هستند مطرح شد [26].

مسئله VRP اولیه از مجموعه‌ای از وسایل‌نقلیه، مشتریان و انبار تشکیل شده است. مسئله VRP را می‌توان به‌عنوان مسئله‌ای از طراحی مسیرهایی با حداقل هزینه برای وسایل‌نقلیه یکسان با ظرفیت‌های شناخته شده تعریف کرد؛ این وسایل‌نقلیه از یک انبار مرکزی به‌سوی مجموعه‌ای از مشتریان که از لحاظ موقعیت جغرافیایی پراکنده‌اند و دارای تقاضاهای غیر منفی هستند، روانه می شوند. هر مشتری دقیقا یک‌بار (به‌طور معمول توسط یک وسیله نقلیه) سرویس می‌گیرد؛ تقاضای کل و طول مسیر نباید از ظرفیت کل تجاوز کند؛ این وسایل‌نقلیه پس از این‌که به مشتریانی که به آن‌ها اختصاص داده شده‌اند، خدمت کردند به انبار باز می‌گردند [24]. در شکل 2 نمونه‌ای از یک حل غیر قابل قبول مسئله مسیریابی وسیله نقلیه است.



شکل 2: نمونه‌ای از یک حل غیرقابل قبول مسئله مسیریابی وسیله نقلیه

13.2. الگوریتم ژنتیک (GA)

1.13.2. تبیین

الگوریتم ژنتیک یک تکنیک جستجو و بهینه‌سازی مبتنی‌بر اصول ژنتیک و انتخاب طبیعی است. اگوریتم ژنتیک این امکان را می‌دهد که جمعیتی متشکل از تعداد زیادی از افراد طبق قوانین خاص مربوط به انتخاب، به وضعیتی درآیند که «برازندگی»[12] را حداکثر کند (یعنی تابع هزینه را حداقل کند). این روش توسط «جان هالند»[13] طی دهه‌های 1960 و 1970 میلادی ارائه شد و سرانجام توسط یکی از شاگردانش به‌نام «دیوید

[11] Traveling Salesman Problem- TSP
[12] Fitness
[13] John Holland

گلدبرگ»[14] که توانست مسئله‌ی دشوار مربوط به «کنترل خطوط لوله‌ی انتقال گاز» را برای رساله‌اش حل کند، تعمیم داده شد؛ کار اصلی «هالند» در کتابش خلاصه شده است؛ او اولین کسی بود که سعی کرد با استفاده از تئوری خود به‌نام «نظریه الگو»[15]، یک مبنای نظری برای GA توسعه دهد. پژوهشات «دژونگ»[16] (1975) فواید GA را برای بهینه‌سازی تابع نشان داد و اولین تلاش منسجم برای یافتن پارامترهای GA بهینه محسوب می‌شوند؛ شاید بتوان گفت که با کاربردهای موفق و کتاب بسیار خوبش، بیش‌ترین کمک را به GA کرد؛ از آن به بعد، بسیاری از برنامه‌نویسی‌های تکاملی با میزان موفقیت‌های متفاوت مورد آزمون قرار گرفتند [74].

به‌طور کلی روند حل مسأله به روش الگوریتم ژنتیک را می‌توان به‌صورت مراحل زیر بیان کرد [75]:

1) کد کردن یا کدگذاری: این مرحله شاید مشکل‌ترین مرحله‌ی حل مسئله به روش الگوریتم ژنتیک باشد. الگوریتم ژنتیک به‌جای این‌که بر روی پارامترها یا متغیرهای مسئله کار کند، با شکل کد شده‌ی آن‌ها سر و کار دارد. تعداد بیت‌هایی که برای گدگذاری متغیرها استفاده می‌شود، به دقتِ مورد نظر برای جواب‌ها، محدوده تغییر پارامترها و رابطه‌ی بین متغیرها وابسته است. رشته یا دنباله‌ای از بیت‌ها که به‌عنوان شکل کدشده یک جواب از مسأله مورد نظر می‌باشد، «کروموزوم» نامیده می‌شود؛ در حقیقت بیت‌های یک کروموزوم نقش ژن‌ها در طبیعت را بازی می‌کنند [76]. انواع کدینگ (کدگذاری) عبارتند از: کدینگ باینری، کدینگ جایگشتی، کدینگ مقدار و کدینگ درختی.
2) ایجاد جمعیت اولیه (مجموعه‌ای از جواب‌های شدنی): در الگوریتم ژنتیک به‌عنوان اولین مرحله، لازم است مجموعه‌ای از جواب‌های ممکن به‌عنوان جمعیت اولیه ایجاد شود؛ اعضای این مجموعه معمولا به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شوند، اما در الگوریتم‌های بهینه، از قیدهایی استفاده می‌شود تا جمعیت، پراکندگی بیش از حد نداشته باشد. تعداد اعضای جمعیت به نوع مسأله بستگی دارد [76].
3) تعیین تابع برازندگی: یک «تابع هزینه»، خروجی را بر اساس مجموعه‌ای از متغیرهای ورودی تولید می‌کند. تابع هزینه ممکن است یک تابع ریاضی، یک آزمایش تجربی و یا حتی یک بازی باشد. هدف، اصلاح خروجی به‌صورت مطلوب با استفاده از یافتن مقادیر مناسب برای متغیرهای ورودی می‌باشد. ما در زندگی روزانه خود با این گونه مسائل روبرو هستیم؛ به‌عنوان یک مثال ساده، هنگام پُر کردن وان حمام با آب، این کار را انجام می‌دهیم، بدون آن‌که تا به حال فکر کرده باشیم که نوعی بهینه‌سازی در حال انجام است؛ در این مثال، هزینه همان اختلاف بین دمای آب مورد نظر و دمای آب پُر شده در وان می‌باشد؛ متغیرهای ورودی عبارتند از میزان باز کردن شیرهای آب سرد و گرم؛ در این حالت، تابع هزینه نتیجه عملی به‌دست آمده از فرو بردن دست به درون آب داخل وان می‌باشد؛ بنابراین می‌بینیم که تعیین یک تابع هزینه‌ی مناسب و تصمیم‌گیری درباره‌ی این که کدام‌یک از متغیرها را تغییر دهیم، به شدت به‌هم وابسته‌اند. در کتب و مقالات مربوط به الگوریتم ژنتیک، بسیاری برای خروجی تابع هدف[17] (تابع هدف یعنی تابعی که قرار است بهینه شود)، از اصطلاح شایستگی (برازندگی) استفاده کرده‌اند [74]؛ به‌عبارت دیگر، تابع برازندگی از اِعمال تبدیل مناسب بر روی تابع هدف یعنی تابعی که قرار است بهینه شود، به‌دست می‌آید؛ این تابع هر رشته را با یک مقدار عددی ارزیابی می‌کند که کیفیت آن را مشخص می‌نماید؛ هر چه کیفیت رشته جواب بالاتر باشد، مقدار برازندگی جواب بیشتر است و احتمال مشارکت برای تولید نسل بعدی نیز افزایش خواهد یافت [75]
4) اعمال عملگرهای ژنتیکی: در الگوریتم ژنتیک، سه عملگر ژنتیک انتخاب، ترکیب یا ادغام و جهش وجود دارد [75].
5) جایگزینی جمعیت جدید: بعد از این‌که عملگرهای ژنتیکی شامل انتخاب، ادغام و جهش بر روی جمعیت کنونی اِعمال شد، این فرآیند باعث به‌وجود آمدن نسل جدیدی از کروموزوم‌هایی می‌شود که با نسل قبلی متفاوت است و به‌عبارت دیگر، جمعیت جدید به‌وجود می‌آید؛ پس از آن، جمعیت جدید جایگزین جمعیت پیشین می‌شود و این چرخه ادامه می‌یابد، تا این‌که به آخرین مرحله برسیم؛ معمولا جمعیت جدید برازندگی بیشتری دارد و این بدان‌معناست که از نسلی به نسل دیگر جمعیت بهبود می‌یابد [75].
6) بررسی همگرایی: برای این‌که تشخیص دهیم چه موقع الگوریتم از اجرا متوقف شود، یا به‌عبارت دیگر برای محک اختتام اجرای الگوریتم ژنتیک، از شیوه‌های مختلفی می‌توان استفاده کرد؛ رسیدن به جواب، ساده انگارانه‌ترین روش است و در صورتی‌که کروموزوم به

[14] David Goldberg
[15] Schema Theorem
[16] De Jong
[17] Goal Function

مناسب‌ترین حد رسید، الگوریتم متوقف می‌شود؛ به‌عنوان نمونه می‌توان همگرا شدن کل جمعیت را در نظر گرفت و یا این‌که فاصله ارزیابی (برازندگی) بهترین فرد جمعیت از متوسط ارزیابی‌ها (برازندگی‌ها) را در نظر گرفت که در این حالت باید از حد مشخصی کوچک‌تر باشد؛ یا مقدار تابع هدف از حد مشخصی بیشتر باشد، یا می‌توان تعداد نسل‌های مشخصی را به‌عنوان محک اختتام در نظر گرفت [75].

7) تکرار رویه

برای حل مسئله مسیریابی در زنجیره‌تأمین یک سازمان با استفاده از الگوریتم‌های گفته شده T تعداد گره‌ها[18] یا به‌اصطلاح محل تقاضاهایی که انتظار برآورده‌شدن دارند، تعداد دستگاه‌های حمل‌ونقل متناسب با این گره‌ها توسط الگوریتم مشخص می‌شوند، تعداد انبار[19] و میزان تقاضا در هر گره را در نظر می‌گیریم، آنگاه با تلفیق حل توسط الگوریتم‌های معرفی شده، برای مسئله مسیریابی حمل‌ونقل کدنویسی را انجام داده و با استفاده از نرم‌افزار MATLAB نتایج را به دو صورت نمودار بهترین هزینه[20] و نمودار شبیه‌سازی مسیریابی نشان می‌دهیم.

2.13.2. انواع الگوریتم ژنتیک (GA)

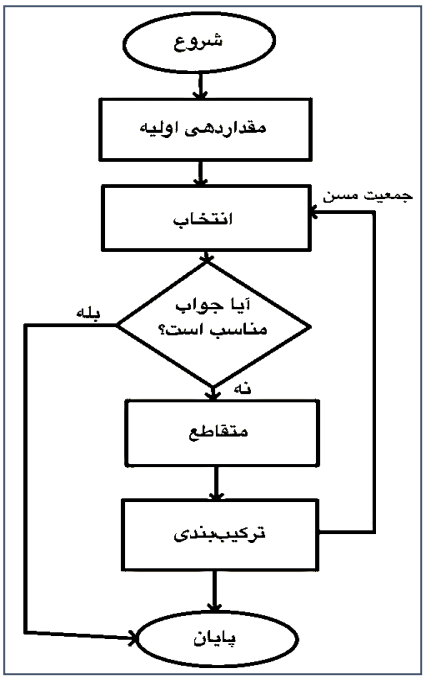
الگوریتم‌های ژنتیک که نمونه اولیه آن توسط «هالند» در سال 1975 ارائه شد، تکامل طبیعی را در سطح ژن و کروموزوم شبیه‌سازی می‌کند. انواع بسیاری برای GA شناخته شده است که در این‌جا به سه نوع از پرکاربردترین آن‌ها، اشاره می‌شود [76]:

- الگوریتم ژنتیک گسسته[21]: این الگوریتم، متغیرها را به‌صورت رشته‌های دودویی کدگذاری شده نمایش می‌دهد و برای حداقل کردن هزینه، با رشته‌های دودویی کار می‌کند و به همین دلیل به آن، «الگوریتم ژنتیک دودویی»[22] نیز گفته می‌شود.
- الگوریتم ژنتیک پیوسته[23]: برای به‌دست آوردن مقدار دقیق متغیرهای یک مسئله که از نوع پیوسته می‌باشند، چه باید کرد؟ در چنین مسئله‌ای، برای نمایش هر متغیر به تعداد بسیار زیادی بیت نیاز خواهد بود. اگر تعداد متغیرها زیاد باشد، آن‌گاه اندازه کروموزوم هم بزرگ خواهد شد. واضح است که تنها راه نمایش یک متغیر، استفاده از 0 و 1 نیست، بلکه می‌توان از هر نوع نمایش امکان‌پذیر، برای کدگذاری متغیرها استفاده کرد؛ هم‌چنین الگوریتم ژنتیک پیوسته، اساسا سریع‌تر از الگوریتم ژنتیک گسسته است، زیرا برای ارزیابی تابع هزینه، نیازی به رمزگشایی متغیرها ندارد.
- الگوریتم ژنتیک جایگشتی[24]: جایگشت، در قلمرو ترکیباتی آن، به‌معنی مرتب‌سازی یا تغییر ترتیب اعضای یک مجموعه می‌باشد. ممکن است این چیدمان، خطی و یا غیرخطی (مثلا دور یک دایره که در این حالت «جایگشت دوری»[25] نامیده می‌شود) صورت گیرد؛ اعضای مجموعه نیز می‌توانند هر چیزی باشند؛ مثلا شی یا عدد یا حرف و هم‌چنین می‌توانند تکراری باشند یا متمایز؛ در هر مورد، مهم، تعداد طرق چیدن این اعضا است.

3.13.2. روش حل مسئله مسیریابی حمل‌ونقل با الگوریتم ژنتیک

برای حل مسئله بهینه سازی مسیریابی حمل‌ونقل و سایل نقلیه از مدل پیشنهاد شده الگوریتم ژنتیک استفاده شده است که روندنمای الگوریتم GA را در شکل 3 نشان داده است.

[18] Nodes
[19] Depot
[20] Best Cost
[21] Discrete GA
[22] Binary GA
[23] Continuous GA
[24] Permutation GA
[25] Circular Permutation



شکل 3: روندنمای الگوریتم ژنتیک

14.2. مسئله مسیریابی

مساله مسیریابی، یکی از مهم‌ترین مسائل موجود است که کاربردهای زیادی دارد.

1.2.14. موقعیت مکانی گره‌های مسئله مسیریابی

در این قسمت طبق جدول 1، مختصات موقعیت گره‌های مسئله ارائه شده است.

برای حل مسئله مسیریابی در زنجیره تأمین یک سازمان با استفاده از الگوریتم‌های گفته‌شده تعداد گره‌ها یا به‌اصطلاح محل تقاضاهایی که انتظار برآورده شدن دارند، را افزایش داده و با 2 برابر کردن گره‌های مسئله اولیه مبنا، اعتبارسنجی الگوریتم‌ها بررسی می‌شوند؛ تعداد دستگاه‌های حمل‌ونقل، متناسب با این گره‌ها توسط الگوریتم مشخص می‌شوند؛ تعداد انبار و میزان تقاضا در هر گره را در نظر گرفته، آنگاه با تلفیق حل توسط الگوریتم‌های معرفی شده، برای مسئله مسیریابی حمل‌ونقل کدنویسی را انجام داده و با استفاده از نرم افزار MATLAB نتایج به دو صورت نمودار بهترین هزینه و نمودار شبیه‌سازی مسیریابی نشان داده می‌شوند.

جدول 1: مختصات موقعیت گره‌های مسئله

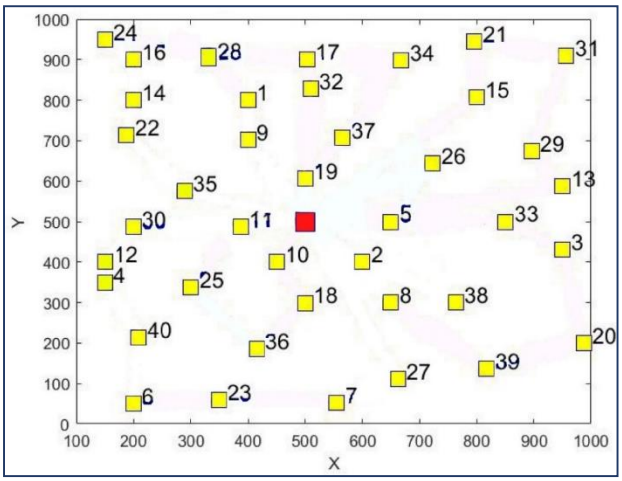
گره‌ها	X	Y	مقدار تقاضا
1	400	800	14
2	600	400	67
3	950	432	74
4	150	350	12
5	650	500	44
6	200	50	32
7	555	53	50
8	650	300	23
9	400	701	10
10	450	400	87
11	387	487	22

12	150	400	90
13	950	587	17
14	200	800	70
15	800	808	67
16	200	900	4
17	503	901	51
18	500	299	30
19	500	606	16
20	987	200	97
21	796	945	67
22	187	714	18
23	349	59	17
24	150	950	80
25	300	337	92
26	723	643	58
27	662	111	19
28	332	903	85
29	896	675	40
30	200	486	36
31	956	910	77
32	510	828	12
33	850	500	14
34	668	899	70
35	289	576	64
36	415	186	57
37	565	706	76
38	763	301	74
39	817	136	81
40	209	214	36
انبار	500	500	0
مجموع تقاضا			1950

در جدول 1 مختصات X و Y در نمودار را نشان داده است که بیان‌گر موقعیت گره‌های مسئله که گره‌های تقاضا و یک گره انبار است را نشان می‌دهد و همچنین مقدار تقاضاهای هر گره را مشخص می‌کند، زیرا که برای مسیریابی مقدار ظرفیت وسیله‌نقلیه مهم است که بیش‌از حد ظرفیت وسیله حمل‌ونقل، تقاضاها را برآورده نکند و هم کمترین هزینه را برای زنجیره‌تأمین پرداخت کنند.

در شکل 4 موقعیت این گره‌ها را در نرم‌افزار MATLAB در یک نمودار X و Y به صورت مربع‌های زرد رنگ که برای گره‌های تقاضا است و تک مربع قرمز که مربوط به انبار می‌شود، را نشان می‌دهد.

این مسیریابی با توجه به الگوریتم‌ها پیشنهاد تعداد و سیله‌نقلیه و شرایط پاسخ به نیاز را انجام می‌دهد، که همگی از مربع قرمز که مربوط به انبار می‌شود شروع به حرکت بین مربع‌های زرد که همان گره‌های مسئله است می‌کنند؛ این حرکت بین گره‌ها باید به‌گونه‌ای باشند که کمترین هزینه و بیشترین مقدار تقاضا را برآورده کنند.



شکل 4: موقعیت 40 گره تقاضا و گره انبار در نرم‌افزار MATLAB

2.14.2. اطلاعات تکمیلی مسئله مسیریابی

در نرم افزار MATLAB مسئله مسیریابی حمل‌ونقل کالا را با الگوریتم ژنتیک، حل و جواب بهینه را به‌دست آوردیم (البته ما در پژوهش خود، با سه روش دیگر نیز کار کرده‌ایم و در تمامی این چهار الگوریتم، بهترین هزینه که هزینه سفر میان گره‌ها است، یعنی کمترین فاصله میان گره‌ها با 100 تکرار (IT)[۲۶] به‌دست آمده است). الگوریتم ژنتیک با مشخص کردن مقدار تعداد ارزیابی عملکرد (NFE)[۲۷] سعی در رسیدن به بهترین هزینه سفر میان گره‌ها داشته است. الگوریتم‌ها با حل و رسیدن به بهترین جواب سعی در محاسبه بهینه وسایل نقلیه مورد استفاده در مسئله داشته‌اند که با افزایش گره‌ها تعداد وسایل نقلیه به مراتب افزایش پیدا می‌کند تا به بهترین جواب برسد.

3.14.2. مدل ریاضی مسئله بهینه‌سازی مسیریابی حمل‌ونقل کالا

فرض کنید $G = (V, A)$ یک گراف کامل باشد به‌طوری‌که $V = \{1,2, \dots, n\}$ مجموعه نقاط تقاضا و A نیز مبین مجموعه کمان‌ها یا مسیرهای شبکه است، که نقاط را به هم متصل می‌کند. رأس $i = 1,2, \dots, n$ به مشتریان باز می‌گردد که هر کدام یک تقاضای مشخص غیرمنفی دارند $(q_i \geq 0)$؛ همچنین رأس 0 به مبدأ باز می‌گردد. یک هزینه غیرمنفی مرتبط با هر کمان اندازه هزینه‌ی سفر از نقطه‌ی i به نقطه j را نشان می‌دهد (همچنین t_{ij} طول کمان یا فاصله زمانی بین رئوس i و j را نشان می‌دهد). اگر مقدار هزینه $c_{ij} = c_{ji}$ را برای تمامی i و j ها را برقرار سازیم، آنگاه مسئله تبدیل به یک مسئله VRP تبدیل می‌شود.

به مسیر بسته‌ای که از تمام رئوس گراف دقیقا یک بار عبور کند، یک تور[۲۸] یا دور یا مسیر کامل گویند و به مسیر بسته‌ای شامل فقط زیر مجموعه‌ای (زیر مجموعه سره) از رئوس باشد، زیر تور[۲۹] می‌گویند که باید از ایجاد زیرتورهای متعدد جلوگیری کنیم؛ به همین علت در محدودیت مسئله با روش MTZ [۳۰] به حذف زیر تورها نیز پرداخته می‌شود [94, 95].

اندیس‌های مسئله:

i و j: گره‌های مسئله، محل تقاضاهایی که باید برطرف شود و محل انبار i و $j = 1.2 \dots . n$

v : وسیله نقلیه $v = 1.2 \dots . NV$

پارامترهای مسئله:

C_{ij}: هزینه سفر (فاصله) بین گره‌های تقاضا و انبار

$d(i)$: تقاضای هر گره i

Cap : ظرفیت وسیله نقلیه $Cap \leq 300$

[26] Iteration
[27] Number of function evaluations
[28] Tour
[29] Sub-Tour
[30] Miller, Tucker, Zelmin (MTZ)

متغیرهای تصمیم:

x_{ij}^{v} : اگر وسیله نقلیه v سفرش از گره i به گره j باشد 1 در غیر این‌صورت 0 در نظر گرفته می‌شود.

u_{ij} : بازدید سفارشات (برای حذف زیرتور استفاده می‌شود).

M : مسئله دارای زیرتوری به طول M می‌باشد.

مدل‌سازی ریاضی:

$$Min \;\; Z = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\sum_{v=1}^{NV} C_{ij}X_{ij}^{V} \qquad (1)$$

St.

$$\forall \mathrm{j} \in \{2.3 \ldots . n\} \sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{n}} \sum_{\mathrm{v}=1}^{\mathrm{NV}} X_{ij}^{V} = 1 \qquad (2)$$

$$\mathrm{p} = \{1. \ldots . \mathrm{n}\}. \forall \mathrm{v} \qquad \sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{n}} \mathrm{X}_{\mathrm{ip}}^{\mathrm{v}} - \sum_{\mathrm{j}=1}^{\mathrm{n}} \mathrm{X}_{\mathrm{pj}}^{\mathrm{v}} = 0 \qquad (3)$$

$$v = 1.2 \ldots . NV \sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{n}} \left[\sum_{\mathrm{j}=1}^{\mathrm{n}} d_i X_{ij}^{V}\right] \leq \mathrm{Cap} \qquad (4)$$

$$\sum_{\mathrm{j}=2}^{\mathrm{n}} X_{1j}^{V} \leq 1 \qquad v = 1.2 \ldots . NV \qquad (5)$$

$$\forall \mathrm{i}. \mathrm{j} = 2.3 \ldots . \mathrm{n} \quad \forall_v = 1 \ldots NV u_{iv} - u_{iv} + d_j \leq M\left(1 - x_{ijv}\right) \qquad (6)$$

$$x_{ij}^{v} \in (0.1) \cdot u_{ij} \geq 0 \qquad (7)$$

تابع هدف مسأله (1) هزینه کل مسافت طی شده توسط خودروها را کمینه می‌کند.

محدودیت (2) تضمین می‌کند که هر گره یا نقطه تقاضا فقط و تنها فقط از یک وسیله سرویس دریافت کنند.

محدودیت (3) تضمین می‌کند که اگر خودرویی به گره‌ای وارد شود، بایستی از آن خارج گردد و به این ترتیب پیوستگی مسیرها برقرار می‌شود.

محدودیت (4) مربوط به حداکثر ظرفیت خودروها است.

محدودیت (5) نیز تضمین می‌کند که هر خودرویی باید سرویس خود را از مبدأ آغاز و در همان مکان ختم کند و در غیر این‌صورت مورد استفاده قرار نخواهد گرفت (غیرفعال محسوب می‌شود).

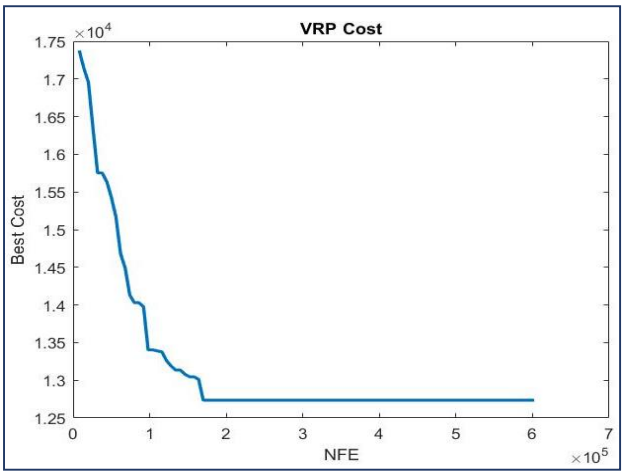
رابطه (6) مربوط به حذف زیرتورها به روش MTZ می‌باشد. محدودیت (7) متغیر باینری را ارائه می‌کند.

15.2. حل مسئله مسیریابی

در این قسمت، مساله مسیریابی با الگوریتم ژنتیک حل شده است.

1.15.2. نمودار بهترین هزینه مسئله مسیریابی با الگوریتم ژنتیک

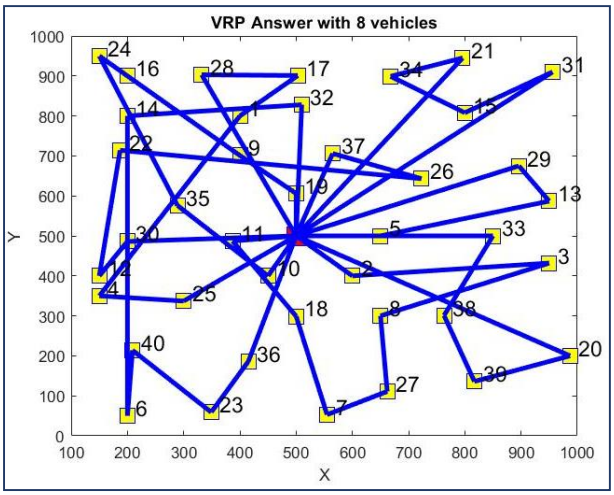
در شکل 5، نمودار بهترین هزینه مسئله مسیریابی با استفاده از اگوریتم ژنتیک ارائه شده است.



شکل 5: نمودار بهترین هزینه مسئله مسیریابی با الگوریتم ژنتیک

2.15.2. نمودار شبیه‌سازی مسئله مسیریابی با الگوریتم ژنتیک

در شکل 6، نمودار شبیه‌سازی مسئله مسیریابی با روش GA آمده است.



شکل 6: نمودار شبیه‌سازی مسئله مسیریابی با الگوریتم GA

در جدول 2، ردیابی تقاضاهای برآورده شده توسط وسایل نقلیه با الگوریتم GA ارائه شده است.

جدول 2: ردیابی تقاضاهای برآورده شده توسط وسایل نقلیه با روش GA

وسیله نقلیه	گره‌ها	مجموع تقاضا برآورده شده توسط وسیله نقلیه
1	31-15-34-21	281
2	29-13-5	101
3	20-39-38-33	266
4	11-18-7-27-8-3-2	285
5	32-14-6-40-23-36	224
6	19-9-16-24-35-10	261
7	37-26-22-12-30	278
8	28-17-1-4-25	254
مجموع	40	1950

3. نتیجه‌گیری

مسئله مسیریابی وسایل نقلیه از مسائل مهم و پرکاربرد در دنیای واقعی به‌ویژه در کاهش هزینه‌ها و افزایش بهروری سیستم‌های توزیع تأمین شرکت‌ها و سازمان‌ها است که به‌علت گستردگی و تنوع کاربردهای آن همواره مورد توجه محققان قرار گرفته است.

در این پژوهش، مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با هدف حداقل نمودن کل مسافت طی شده توسط وسایل نقلیه و در نتیجه کمینه شدن هزینه های حمل‌ونقل پیشنهاد شده و همچنین مدل ریاضی از این مسئله ارائه شده است، که در آن محدودیت برگشت به انبار ابتدای حرکت حذف و دیگر برگشت به انبار ابتدای مسیر حرکت، برای وسایل نقلیه نیاز نمی‌باشد و حالتی در نظر گرفته شد که انبار ابتدایی و انتهایی مسیر می‌تواند متفاوت از هم باشند؛ به‌منظور حل مدل پیشنهادی با توجه به NP-Hard بودن، الگوریتمی فراابتکاری برای حل مسئله ارائه شده است. در این مقاله، برای مساله با 40 گره، الگوریتم ژنتیک مورد نظر قرار گرفته و استفاده شد.

4. پیشنهادات

- می‌توان این پژوهش را برای اجرا و تحلیل در پروژه‌های واقعی سیستم‌های پخش فرآورده‌های نفتی، دارویی، مواد غذایی و صنایع بزرگ کشور جهت سامان‌دهی سیستم اتوبوس‌رانی و حمل‌ونقل مانند صنایع نفت و فولاد و سرویس‌های رفت و برگشت پیشنهاد می‌گردد.
- در نظر گرفتن مسیر واقعی خودروها در خیابان و در نظر گرفتن یک طرفه بودن یا دو طرفه بودن خیابان‌ها بر واقعی‌شدن مسأله تاثیرگذار است.
- مسئله مفروض را می‌توان با هر یک از موارد تقسیم‌بندی مسئله VRP ترکیب کرده و موضوعات جالب و کاربردی را پیشنهاد نمود.
- استفاده از سایر الگوریتم‌های هوشمند بهینه سازی مانند الگوریتم شبیه سازی تبرید، الگوریتم جهش قورباغه، الگوریتم رقابت استعماری، الگوریتم کرم شب‌تاب و ... برای تعداد گره‌های متفاوت و مختلف.
- استفاده از سایر الگوریتم‌های هوشمند بهینه سازی مانند الگوریتم شبیه سازی تبرید، الگوریتم جهش قورباغه، الگوریتم رقابت استعماری، الگوریتم کرم شب‌تاب و... برای تعداد گره‌های متفاوت و مختلف.
- می‌توان مسئله مسیریابی حمل‌ونقل را در فازهای تصمیم‌گیری مورد بررسی قرار داد.
- می‌توان تعداد گره‌های مسئله را افزایش داد و یا اینکه با تغییر مکان انبار مسئله حمل‌ونقل را حل کرد.

مراجع

[1] م. ا. ا. مهیار، "۴ ستراتژی‌های عملیاتی کنترل عدم اطمینان در مدیریت زنجیره تامین"، فصلنامه اطلاع رسانی، آموزشی و پژوهشی، شماره7 و 8، بازیابی شده در 1392/3/1، صفحه 117-121، (1383).

[2] G. B. Dantzig, and J. H. Ramser, "The Truck Dispatching Problem," *Management Science*, vol. 6, no. 1, pp. 80-91, 1959/10/01, 1959.

[3] م. بابائی و م. شویدی نوش آبادی، "مسائل Np کامل (Np complete problems)"، هفتمین کنفرانس بین‌المللی فناوری اطلاعات، کامپیوتر و مخابرات، 1398.

[4] M. K. Yousefikhoshbakht1, E., "Solving the vehicle routing problem by a hybrid meta-heuristic algorithm.," Journal of Industrial Engineering International, (2012).

[5] M. Yousefikhoshbakht, Didehvar, F., Rahmati, R. & Sedighpour, M., "An effective imperialist competitive algorithm for solving the open vehicle routing problem.," *Transportation Research Journal*, (2012).

[6] E. E. Zachariadis, Tarantilis, C. D. & Kiranoudis, C. T., "A Guided Tabu Search for the Vehicle Routing Problem with two-dimensional loading constraints.," *European Journal* of Operational Research, (2009).

[7] L. H. Osman, "Metastrategy simulated annealing and tabu search algorithms for the vehicle routing problem.," *Annal Operations Research,*, (1993).

[8] L. Santos, Coutinho-Rodrigues, J. & Current, J. R., "An improved ant colony optimization based algorithm for the capacitated arc routing problem.," *Transportation* Research Part B: Methodological, 44(2), 246-266., (2010).

C. Prins, “Two memetic algorithms for heterogeneous fleet vehicle routing problems.,” Engineering Applications of Artificial Intelligence, 22, 916˚ 928., (2009). [9]

J. Tang, Zhang, J. & Pan, Z., “A scatter search algorithm for solving vehicle routing problem with loading cost.,” Expert Systems with Applications, 37(6), 4073˚ 4083., (2010). [10]

L. H. Du, R., “Combining Nearest Neighbor Search with Tabu Search for Large-Scale Vehicle Routing Problem.,” *Physics Procedia, 25, 1536-1546.*, (2012). [11]

Algorithm for capacitated vehicle routing problems.”, Expert A. E. Yurtkuran, E., “A new Hybrid Electromagnetism-like Systems with Applications, 37(4), 3427-3433. , (2010). [12]

P. Chen, Huang, H. K. & Dong, X. Y., “Iterated variable neighborhood descent algorithm for the capacitated vehicle routing problem.,” *Expert Systems with Applications*, 37(2), 1620-1627 , (2010). [13]

V. C. Hemmelmayr, Cordeau, J. F. & Crainic, T. G., “An adaptive large neighborhood search heuristic for Two-Echelon Vehicle Routing Problems arising in city logistics.,” Computers & Operations Research, 39(12), 3215-3228., (2012.). [14]

A. Imran, Salhi, S. & Wassan, N., “A.A variable neighborhood-based heuristic for the heterogeneous fleet vehicle routing problem,” *European Journal of Operational Research*. 197(2), 509-518. , (2009). [15]

B. Bullnheimer, Hartl, R.F. and Strauss, C., “Applying the ant system to the vehicle routing problem,” *Meta-Heuristics:* Paradigms for Optimization, pp., pp. 109-120, 1999. *Advances and Trends in Local Search* [16]

[17] س. نوروزی، “مدیریت زنجیره تامین”، پایان‌نامه کارشناسی، دانشگاه جامع علمی و کاربردی واحد ابهر، 1388.

[18] س. م. ح. حسینی و ع. ا. حسنی، “مدل‌سازی و حل مسئله مسیریابی وسایل نقلیه (VRP) در بخش توزیع زنجیره تأمین با در نظر گرفتن محدودیت تردد”، مهندسی صنایع و مدیریت شریف، دوره 1-34، شماره 1/1، صفحه 147-155، تابستان 1397.

and its C. A. Silva, Sousa, J.M.C., Runkler, T. and Costa, and J.M.G., “"Distributed optimization of a logistic system suppliers using ant colonies",” International Journal of Systems Science, 37(8), pp. 503-51, 2006. [19]

[20] ج. احمد و م. محمدرضا، “ زنجیره تأمین پایدار” چاپ اول، تهران، مؤسسه کتاب مهربان نشر، 1393.

[21] غ. عبیری، “مدیریت ریسک و عدم اطمینان”، تازه‌های اقتصاد، شماره 47، صفحات 118-110، 1374.

[22] ا. تیموری و م. احمدی، “زنجیره تأمین چیست، مدیریت زنجیره تأمین” تهران، انتشارات دانشگاه علم و صنعت، 1388.

[23] ع. ظفری و ت. هاشمی و م. ی. خوشبخت، “الگوریتم ترکیبی موثر ژنتیک برای حل مسئله، مسیریابی وسیله نقلیه”، مهندسی صنایع و مدیریت تولید، صفحه 76-63، شماره 2، جلد 21، 1389.

A. M. Benjamin, “Metaheuristics the waste collection vehicle routing problrm with time windows.,” *(Doctor of Philosophy), Brunel Univ.*, 2011. [24]

Y. Zheng, “Supply Chain Management under availability & uncertainty constraints.”, *Doctor of Philosophy, Lille Nord-de-France Univ.*, 2012. [25]

B. Bullnheimer, Hartl, R.F., Strauss, C., “An improved ant system algorithm for the vehicle routing problem.,” *Annals of* Operations Research 89, 319˚ 328., 1999. [26]

A Guide to the, 1979. ”M. R. Garey, and D. S. Johnson, “Computers and intractability, [27]

B. Eksioglu, A. V. Vural, and A. Reisman, “The vehicle routing problem: A taxonomic review,” *Computers & Industrial Engineering*, vol. 57, no. 4, pp. 1472-1483, 2009. [28]

K. H. Kang, B. K. Lee, Y. H. Lee, and Y. H. Lee, “A heuristic for the vehicle routing problem with due times,” *Computers & Industrial Engineering*, vol. 54, no. 3, pp. 421-431, 2008. [29]

E. D. Taillard, G. Laporte, and M. Gendreau, “Vehicle routeing with multiple use of vehicles,” *Journal of the Operational research society*, vol. 47, no. 8, pp. 1065-1070, 1996. [30]

C. Gang, "A PSO-GA method to solve a partial shipment and scheduling problem." pp. V10-330-V10-335. [31]

[32] A. Lim, and F. Wang, "Multi-depot vehicle routing problem: A one-stage approach," *IEEE transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 2, no. 4, pp. 397-402, 2005.

[33] C. Archetti, M. W. Savelsbergh, and M. G. Speranza, "Worst-case analysis for split delivery vehicle routing problems," *Transportation science*, vol. 40, no. 2, pp. 226-234, 2006.

[34] م. گ. نخعی کمال آبادی، عیسی، نیکبخش جوادیان و مهدوی ا، "یکپارچه‌سازی زمان‌بندی و حمل‌و نقل در زنجیره تأمین چندکارخانه‌ای، " نخستین کنفرانس بین‌المللی مدیریت زنجیره تامین و سیستم‌های اطلاعات، 1386.

[35] ذ. س. ا. و. ب. ن. محمدعلی، " یکپارچگی زمان‌بندی حمل‌و نقل در زنجیره تامین با وسائط نقلیه دارای ظرفیت‌های متفاوت،" پژوهش‌نامه حمل‌و نقل، 6(3 (پیاپی 20))، 233-244، 1388.

[36] ر. م. س. م. و. ز. کوروش، " ارایه الگوریتم فراابتکاری مبتنی‌بر سیستم کلونی مورچگان برای مساله مکان‌یابی مسیریابی با چندین انبار و فرض تخصیص چندین مسیر به هر وسیله نقلیه،" مدیریت صنعتی، 3(6)، 38-17، 1390.

[37] س. ا. ز. ح. م. ا. م. د. ن. و. ی. خ. مجید، "بهینه‌سازی در مسیریابی باز وسیله نقلیه با استفاده از یک الگوریتم کارای ترکیبی فراابتکاری، " مدیریت صنعتی، 8(24)، 99-112، 1392.

[38] ن. م. د. ا. د. ن. ث. م. ی. خوشبخت، "ترکیب الگوریتم‌های جستجوی ممنوع و جمعیت مورچگان برای مسئله مسیریابی وسیله نقلیه، " فصلنامه مدیریت راهبردی در سیستم‌های صنعتی (مدیریت صنعتی سابق) مقاله 6، دوره 9، شماره 28، 1393.

[39] ج. ع. ت. م. ر. ف. م. و. ع. رحمت، "مدل سازی ریاضی برای مساله مسیریابی وسایل نقلیه با حمل برگشتی و حل آن با الگوریتم کلونی مورچه چندگانه،" مدیریت تولید و عملیات، 7(1 (پیاپی 12))، 234-215، 1395.

[40] م. فرقانی، م. کیایی، م. اوتادی، "تاثیر قابلیت‌های حل مساله مکان‌یابی مسیریابی با استفاده از الگوریتم فراابتکاری مورچگان بر عملکرد مدیریت کسب و کار (مورد مطالعه: گروه فولاد اشتهارد)"، پنجمین همایش ملی پژوهش‌های مدیریت و علوم انسانی در ایران، 1397.

[41] ب. ن. م. ب. ع. ط. م. و. ب. حسام، " مسیریابی وسایل نقلیه در زنجیره تامین چند محصولی با استفاده از الگوریتم شبیه سازی تبرید جمعیتی"، مدیریت تولید و عملیات، 9(1 (پیاپی 16))، 27-1، 1397.

[42] س. حسینی و ع. ا. حسنی، "مدل‌سازی و حل مسئله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه (VRP) در بخش توزیع زنجیره‌ی تأمین با در نظر گرفتن محدودیت تردد"، مهندسی صنایع و مدیریت، دوره 1، شماره 34، صفحه 155-147، 1397.

[43] ا. م. س. ج. م. و. خ. محمدرضا، "ارائه الگوریتم جستجوی گرانشی مقید و حل مساله مسیریابی وسایل نقلیه"، پردازش علایم و داده‌ها، 18(4 (50 پیاپی))، 23-35، 1400.

[44] ع. ع. ع. م. م. س. ا. ش. نی، "طراحی شبکه زنجیره تأمین با رویکرد مسیریابی وسیله نقلیه و پنجره زمانی و استفاده از الگوریتم جستجوی نیروی گرانشی"، نشریه علمی اندیشه آماد/ دوره بیست و یکم/ شماره 1، صفحه 12-4، 1401.

[45] Transportation Research Part B: Methodological", *ISSN 0191-2615*, Problem, G. L. Tolga Bektaş, "The Pollution-Routing vol. Volume 45, Issue 8, 2011.

[46] Christopher Pearson, "Logastik and Supply Chains Martin Education Limited.," 2011.

[47] search approach for the vehicle routing problem with E. E. Zachariadis, and C. T. Kiranoudis, "An effective local backhauls," *Expert Systems with Applications*, vol. 39, no. 3, pp. 3174-3184, 2012.

[48] S. Anbuudayasankar, K. Ganesh, S. L. Koh, and Y. Ducq, "Modified savings heuristics and genetic algorithm for bi-objective vehicle routing problem with forced backhauls," *Expert Systems with Applications*, vol. 39, no. 3, pp. 2296-2305, 2012.

[49] H. Osman, and K. Demirli, "Economic lot and delivery scheduling problem for multi-stage supply chains," *International Journal of Production Economics*, vol. 136, no. 2, pp. 275-286, 2012.

[50] Y. Kuo, and C.-C. Wang, "A variable neighborhood search for the multi-depot vehicle routing problem with loading cost," *Expert Systems with Applications*, vol. 39, no. 8, pp. 6949-6954, 2012.

[51] J. T. Zhang, and L. X. Qiao, "Optimization Mechanism Control Strategy of Vehicle Routing Problem Based on Improved PSO," *Advanced Materials Research*, vol. 681, pp. 130-136, 2013.

[52] I. Averbakh, and M. Baysan, "Approximation algorithm for the on-line multi-customer two-level supply chain scheduling problem," *Operations Research Letters*, vol. 41, no. 6, pp. 710-714, 2013.

[53] J. Ren, D. Du, and D. Xu, "The complexity of two supply chain scheduling problems," *Information Processing Letters*, vol. 113, no. 17, pp. 609-612, 2013.

[54] T. Sawik, "Joint supplier selection and scheduling of customer orders under disruption risks: Single vs. dual sourcing," *Omega*, vol. 43, pp. 83-95, 2014.

[55] E. Selvarajah, and R. Zhang, "Supply chain scheduling at the manufacturer to minimize inventory holding and delivery costs," *International Journal of Production Economics*, vol. 147, pp. 117-124, 2014.

[56] S. Ray, A. Soeanu, J. Berger, and M. Debbabi, "The multi-depot split-delivery vehicle routing problem: Model and solution algorithm," *Knowledge-Based Systems*, vol. 71, pp. 238-265, 2014.

[57] A. Thomas, J. Venkateswaran, G. Singh, and M. Krishnamoorthy, "A resource constrained scheduling problem with multiple independent producers and a single linking constraint: A coal supply chain example," *European Journal of Operational Research*, vol. 236, no. 3, pp. 946-956, 2014.

[58] C. Archetti, Jabali, O., & Speranza, M. G., "Multi-period vehicle routing problem with due dates". ," *Computers & Operations Research*.61, 122-134 . 2015.

[59] K. Braekers, K. Ramaekers, and I. Van Nieuwenhuyse, "The vehicle routing problem: State of the art classification and review," *Computers & industrial engineering*, vol. 99, pp. 300-313, 2016.

[60] B. Yao, B. Yu, P. Hu, J. Gao, and M. Zhang, "An improved particle swarm optimization for carton heterogeneous vehicle routing problem with a collection depot," *Annals of Operations Research*, vol. 242, pp. 303-320, 2016.

[61] M. Avci, and S. Topaloglu, "A hybrid metaheuristic algorithm for heterogeneous vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery," *Expert Systems with Applications*, vol. 53, pp. 160-171, 2016.

[62] A. Gupta, and S. Saini, "On solutions to vehicle routing problems using swarm optimization techniques: a review," *Advances in Computer and Computational Sciences: Proceedings of ICCCCS 2016, Volume 1*, pp. 345-354, 2017.

[63] M. A. Mohammed, M. K. Abd Ghani, R. I. Hamed, S. A. Mostafa, M. S. Ahmad, and D. A. Ibrahim, "Solving vehicle routing problem by using improved genetic algorithm for optimal solution," *Journal of computational science*, vol. 21, pp. 255-262, 2017.

[64] M. Alzaqebah, S. Jawarneh, H. M. Sarim, and S. Abdullah, "Bees algorithm for vehicle routing problems with time windows," *International Journal of Machine Learning and Computing*, vol. 8, no. 3, pp. 234-240, 2018.

[65] P. Vansteenwegen, and A. Gunawan, "Orienteering problems," *EURO Advanced Tutorials on Operational Research*, 2019.

[66] M. Bruglieri, S. Mancini, F. Pezzella, and O. Pisacane, "A path-based solution approach for the green vehicle routing problem," *Computers & Operations Research*, vol. 103, pp. 109-122, 2019.

[67] B. Peng, L. Wu, Y. Yi, and X. Chen, "Solving the multi-depot green vehicle routing problem by a hybrid evolutionary algorithm," *Sustainability*, vol. 12, no. 5, pp. 2127, 2020.

[68] H. Derbel, Jarboui, B., and Siarry, P., "Green Transportation and New Advances in Vehicle Routing Problems, Springer Nature Switzerland.," 2020.

[69] G. D. Konstantakopoulos, S. P. Gayialis, and E. P. Kechagias, "Vehicle routing problem and related algorithms for logistics distribution: A literature review and classification," *Operational research*, pp. 1-30, 2020.

[70] H. Abdullahi, L. Reyes-Rubiano, D. Ouelhadj, J. Faulin, and A. A. Juan, "Modelling and multi-criteria analysis of the sustainability dimensions for the green vehicle routing problem," *European Journal of Operational Research*, vol. 292, no. 1, pp. 143-154, 2021.

[71] L. Cai, W. Lv, L. Xiao, and Z. Xu, "Total carbon emissions minimization in connected and automated vehicle routing problem with speed variables," *Expert Systems with Applications*, vol. 165, pp. 113910, 2021.

[72] I. Kucukoglu, R. Dewil, and D. Cattrysse, "The electric vehicle routing problem and its variations: A literature review," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 161, pp. 107650, 2021.

[73] Z. Gu, Y. Zhu, Y. Wang, X. Du, M. Guizani, and Z. Tian, "Applying artificial bee colony algorithm to the multidepot vehicle routing problem," *Software: Practice and Experience*, vol. 52, no. 3, pp. 756-771, 2022.

[74] ش. ح. ه. شهریار، "الگوریتم‌های تکاملی مبانی، کاربردها، پیاده‌سازی"، دانشگاه علم و صنعت ایران، شماره 590، 1391.

[75] م. عباسی‌کیا، "الگوریتم‌های فرااکتشافی جستجو (الگوریتم ژنتیک)"، مجموعه مقالات همایش ملی ژئوماتیک، سازمان نقشه‌برداری کشور، تهران، ایران، 1388.

[76] خ. ن. م.، "الگوریتم ژنتیک"، پایان‌نامه کارشناسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمین، 1390.

[77] M. Dorigo, V. Maniezzo, and A. Colorni, "Ant system: optimization by a colony of cooperating agents," *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, part b (cybernetics)*, vol. 26, no. 1, pp. 29-41, 1996.

[78] M. DORIGO, "Optimization: learning and natural algorithms," *PhD thesis, Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano*, 1992.

[79] H. Eldem, "Application of ant colony optimization for the solution of 3 dimensional cuboid structures," *Journal of Computer and Communications*, vol. 2, no. 04, pp. 99, 2014.

[80] قادری، اقبال، امینی، پیمان، محمدی‌ملقرنی، عطاالله، نوروش، ایرج، "بررسی دقت شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم بهینه سازی کلونی مورچگان در پیش‌بینی مدیریت سود"، حسابداری مالی دوره 39، شماره 10، صفحه 110-82، 2018.

[81] غ. اسلامی بیدگلی، ا. طیبی ثانی، "بهینه سازی سبد سرمایه‌گذاری بر اساس ارزش در معرض ریسک"، مهندسی مالی و مدیریت اوراق بهادار، دوره 5، شماره 18، صفحه 186-168، 2014.

[82] ن. میکائیل وند، ا. جوادی، اکرم، ح. زاده، "جواب تحلیلی معادلات دیفرانسیل مبتنی‌بر روش فراابتکاری ترکیبی الگوریتم‌های ژنتیک و بهینه‌سازی کلونی مورچگان،" پژوهش‌های نوین در ریاضی، دوره 6، شماره 27، صفحات 40-27، 2020.

[83] ر ضوی، سوخکیان، زیارتی، "ارایه الگوریتم فراابتکاری مبتنی‌بر سیستم کلونی مورچگان برای مسئله مکان‌یابی مسیریابی با چندین انبار و فرض تخصیص چندین مسیر به هر وسیله نقلیه"، مدیریت صنعتی، دوره 3، شماره 1، صفحات 38-17، 2011.

[84] م. حامدی حمزه کلایی، م. شامانی و م. شامانی، "بهینه کردن الگوریتم کلونی مورچگان برای ردیابی آی‌پی حملات انکار سرویس"، پدافند الکترونیکی و سایبری، دوره 1، شماره 4، 2014.

[85] ر. مریم، س. محمدعلی، ز. کوروش، "ارایه الگوریتم فراابتکاری مبتنی‌بر سیستم کلونی مورچگان برای مساله مکان‌یابی مسیریابی با چندین انبار و فرض تخصیص چندین مسیر به هر وسیله نقلیه"، 1390.

[86] D. Karaboga, and B. Basturk, "A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm," *Journal of global optimization*, vol. 39, pp. 459-471, 2007.

[87] م. وفاخواه، ع. دستورانی و ع. م. نیا، "بهینه سازی پارامترهای مدل ماسکینگام غیرخطی با استفاده از الگوریتم کلونی زنبور عسل"، مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، دوره 21، شماره 4، صفحات 267-253، 2014.

[88] زارع، بعنونی، سالم، قنبرزاده و افشین، "طراحی بهینه مبدل گرمایی صفحه‌ای پره‌دار با روش الگوریتم بهینه‌سازی زنبور عسل"، مهندسی مکانیک مدرس، دوره 12، شماره 5، صفحات 29-22، 2013.

[89] ح. سینایی، س. زمانی و ع. مهرابی، "تصمیم‌گیری برای انتخاب سبد سهام؛ مقایسه الگوریتم‌های ژنتیک و زنبور عسل"، پژوهشنامه مدیریت اجرایی، دوره 6، شماره 11، صفحه 4، 2014.

[90] بهرامی، "مدیریت تیم‌های امداد و نجات با استفاده از الگوریتم جستجوی ممنوعه و سیستم اطلاعات مکانی"، نشریه علمی علوم و فنون نقشه‌برداری، دوره 3، شماره 8، صفحه 188-179، 2019.

[91] N. Bahrami, "Using Tabu Search Algorithm and Geospatial Information System for Managing of the Relief and Rescue Teams," *Journal of Geomatics Science and Technology*, vol. 8, no. 3, pp. 179-188, 2019.

[92] و. بیگی و ب. پورحیدری، "واکنش و بهبود در بحران‌ها"، مؤسسه علمی کاربردی هلال ایران و دانشگاه علوم پزشکی بقیه الله، تهران، 2011.

[93] م. چاو شیان، م. ر ضوانی، "حل پازل سودوکو با تلفیقی از الگوریتم جستجوی ممنوعه کلاسیک با الگوریتم قوس سازگار"، کنفرانس بین‌المللی پژوهش در علوم و تکنولوژی، 1395.

[94] ا. خاکبازان و ن. مبصری، "پژوهش در عملیات 2"، صفحه 87-77، 1400.

[95] M. Desrochers, and G. Laporte, “Improvements and extensions to the Miller-Tucker-Zemlin subtour elimination constraints,” *Operations Research Letters*, vol. 10, no. 1, pp. 27-36, 1991.