

# حل مسئله زمان‌بندی و مسیریابی سبز وسایل حمل‌ونقل با ناوگان ناهمگن شامل لجستیک معکوس به شکل جمع‌آوری کالاهای بازگشتی با الگوریتم ژنتیک

عادل اعظمی، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

محمد سعیدی مهرآباد (نویسنده مسئول)، استاد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

E-mail: mehrabad@iust.ac.ir

پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۲۵

دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۱۰

## چکیده

مسئله مسیریابی وسایل نقلیه (VRP)، یافتن مسیرهای بهینه برای ناوگانی از وسایل است که با سفر در آن مسیرها، تقاضای مشتریان برآورده می‌گردد. این مسئله از پرکاربردترین مسائل در حوزه حمل‌ونقل و تدارکات است. در این مقاله، مسئله زمان‌بندی و مسیریابی سبز وسایل حمل‌ونقل با ناوگان ناهمگن شامل لجستیک معکوس به شکل جمع‌آوری کالاهای بازگشتی با پنجره‌های زمانی چندگانه، توسعه داده شده است. این مسئله همراه با هزینه‌های زودکرد و دیرکرد وزن‌دهی شده برای ایجاد تبادلی بین هزینه‌های عملیاتی و زیست‌محیطی و با هدف حداقل‌سازی هم‌زمان به صورت برنامه‌ریزی غیرخطی مختلط، مدل‌سازی شده است. تقاضای مشتریان به صورت تقریبی و مبتنی بر اعداد فازی، در نظر گرفته شده که با توجه به وجود عدم قطعیت در برخی دیگر از پارامترها، از رویکرد برنامه‌ریزی امکانی استوار جهت کنترل، استفاده شده است. به دلیل قرارگیری مسئله موردنظر در رده مسائل NP-hard، الگوریتم ژنتیک جهت حل نزدیک به بهینه برای نمونه‌های ابعاد بزرگ، توسعه داده شده است. در نهایت، عملکرد الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با حل معمولی در ابعاد کوچک با مثال‌هایی، ارزیابی شده است. تحلیل حساسیت و آنالیز نتایج با تعریف دو معیار کیفیت راه‌حل و زمان محاسبات، عملکرد رضایت‌بخش الگوریتم پیشنهادی را در زمان محاسباتی مناسب نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، زمان‌بندی و مسیریابی سبز وسایل، لجستیک معکوس، ناوگان ناهمگن، برنامه‌ریزی

امکانی استوار.

## ۱. مقدمه

موجب افزایش درآمد مستقیم برای تولیدکنندگان شده و نیز سطح رضایت مشتریان را بهبود می‌بخشد.

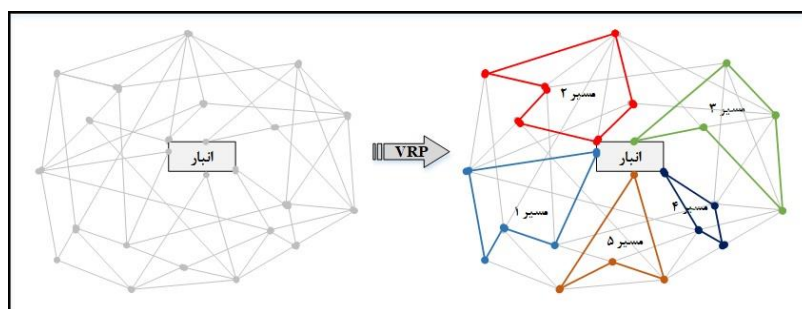
از سوی دیگر، نگرانی‌های زیست محیطی در دو دهه اخیر منجر به دسته‌بندی جدیدی در این زمینه به نام مسیریابی سبز و وسایل شده که به دنبال حداقل‌سازی هزینه‌های زیست محیطی همراه با هزینه‌های عملیاتی مسئله VRP است. یکی از مسائل مهم در ادبیات، مسئله آلودگی مسیریابی<sup>۲</sup> (PRP) است که کل انتشارات را حداقل می‌نماید. اخیراً انتشار گازهای گلخانه‌ای، مخصوصاً کربن دی‌اکسید (CO<sub>2</sub>) شامل ۹۰ درصد از انتشارات گلخانه‌ای، دلیل اصلی گرمای جهانی است. براساس اعلام آژانس بین‌المللی انرژی<sup>۳</sup>، حمل‌ونقل بعد از نسل الکتروسیسته و گرما دومین بخش بزرگ تولید CO<sub>2</sub> در سال ۲۰۱۳ بوده است [Statistics, 2015]. درحالی‌که سه‌چهارم از انتشارات CO<sub>2</sub> توسط بخش حمل‌ونقل جاده‌ای ایجاد می‌شود؛ تحقیقات اندکی برای کاهش این انتشارات بااهمیت، انجام شده است.

در ادامه، اهمیت توجه به بعد زمان‌بندی در VRP، تبیین می‌گردد. وقتی که زمان سفر بین دو گره به مسافت بین آن‌ها و زمان آن روز وابسته باشد؛ مسئله VRP به‌صورت یک مسئله وابسته به زمان<sup>۴</sup> (TDVRP) بیان می‌گردد [Malandraki and Daskin, 1992]. فرض رایج، این است که به هر وسیله اجازه داده می‌شود تا مسافت بین دو گره را در تنها یک دوره زمانی سفر نماید درحالی‌که در عمل به دلایل بسیاری مانند تراکم ترافیک، آن وسیله ممکن است برای سفر به بیشتر از یک دوره زمانی نیاز داشته باشد. مسئله زمان‌بندی و مسیریابی سبز و وسایل نقلیه، این فرض را حذف می‌نماید که سفر بین هر دو گره در بیشتر از دوره زمانی واحد، مجاز است. لذا، در این مقاله، افق زمان‌بندی به چند دوره زمانی تقسیم می‌گردد. این موضوع بدین دلیل است که در مسائل واقعی، سرعت سفر و وسایل در مورد جاده‌های شهری و حومه‌ای به دلیل شرایط جاده، تراکم ترافیک و زمان روز، متغیر است.

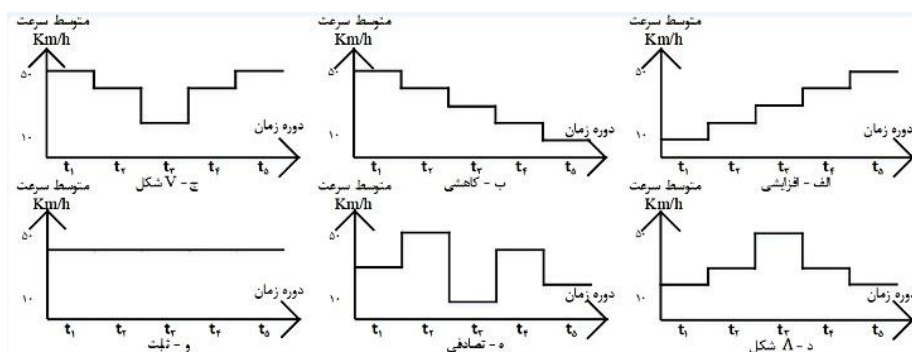
این پژوهش در مورد مفهوم لجستیک به شکل جمع‌آوری محصولات بازگشتی در مسئله زمان‌بندی و مسیریابی سبز و وسایل نقلیه با ناوگان ناهمگن همراه با هزینه‌های زودکرد و دیرکرد وزن دار، است. امروزه، مسائل حمل‌ونقل یکی از مهم‌ترین مسائل در زمینه لجستیک و مدیریت زنجیره تأمین هستند. مسئله مسیریابی وسیله نقلیه (VRP<sup>۱</sup>) یکی از مسائل حمل‌ونقل است. این مسئله، یک مسئله بهینه‌سازی ترکیبی و یک مسئله برنامه‌ریزی عدد صحیح است که مجموعه‌ای بهینه از مسیرها را برای ناوگان ثابتی از وسایل نقلیه به‌منظور پاسخگویی به تقاضای مشتریان پیدا می‌نماید. ثابت شده است که مسئله VRP یک مسئله NP-hard است [Lenstra and Kan, 1981]. فروتن و همکاران، شکل کلاسیک مسئله VRP را ارائه نموده‌اند که در شکل ۱ نشان داده شده است [Foroutan, Rezaeian and Mahdavi, 2020].

هزینه‌های حمل‌ونقل یکی از اصلی‌ترین فاکتورها، به‌طور مؤثری قیمت نهایی محصول و نیز سطح رضایت مشتری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین VRP اخیراً به‌عنوان یکی از روش‌های کاربردی برای کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل، مورد توجه است. از طرف دیگر، لجستیک معکوس بامعنای بازگشت کالاهای نهایی مشتریان به فرآیندهای تدارکات به‌طور فزاینده‌ای به‌وسیله محققان در نظر گرفته شده است. به‌خصوص از زمانی که توانست منجر به توسعه پایدار و حفظ محیط زیست گردد. بنابراین برای طراحی سیستم‌های حمل‌ونقل علاوه بر فاکتورهای معمولی، ملاحظات زیست محیطی نیز در نظر گرفته می‌شوند. جمع‌آوری کالاهای بازگشتی به شکل خدمات پس از فروش می‌تواند به‌عنوان یکی از مشهورترین انواع لجستیک معکوس اشاره شود. این فرآیند پیاده‌سازی شده در مقالات،

حل مسئله زمان‌بندی و مسیریابی سبز وسایل حمل‌ونقل با ناوگان ناهمگن شامل لجستیک ...



شکل ۱. نمایش کلاسیک مسئله VRP [Foroutan, Rezaeian and Mahdavi, 2020]



شکل ۲. الگوهای سرعت وابسته به زمان [Foroutan, Rezaeian and Mahdavi, 2020]

در مورد اهمیت دیرکرد یا زودکرد، در جهان رقابتی امروزی، تقریباً همه مشتریان انتظار دارند که تقاضایشان در زمان مناسب بدون دیرکرد برآورده گردد. بنابراین، در مواردی که تقاضای مشتریان پس از مدت‌زمان دیرکرد معین، برآورده می‌گردد؛ جریمه دیرکردی وارد خواهد شد که متناسب با میزان مهم بودن هر مشتری، متفاوت است. همچنین، از آن‌جا که زودکرد در تحویل تقاضا به دلایل متعدد مانند هزینه‌های نگهداری یا تخصیص منابع انسانی می‌تواند منجر به عدم رضایت مشتری شود؛ لذا یک جریمه زودکرد متناسب با اهمیت هر مشتری می‌تواند برای سفارش‌ها با تحویل زودتر از موعد مشخص، لحاظ شود.

ادامه این پژوهش، بدین‌صورت ساختار یافته است: در بخش بعدی، مروری بر ادبیات تحقیقات مرتبط گذشته انجام و جهت تبیین شکاف تحقیقاتی موجود، ارائه شده است. در بخش سوم، مدل MINLP توسعه یافته همراه با پارامترها و متغیرها

در این مقاله، فرض می‌شود که سرعت سفر وسایل برای هر کمان در هر دوره زمانی، ثابت باشد و برابر با متوسط سرعت در طول آن دوره لحاظ می‌شود. برای هر کمان، وابسته به ماهیت تراکم ترافیک، یکی از ۶ الگوی ترافیک وابسته به زمان شکل ۲، اعمال می‌گردد که توسط فروتن و همکاران، در ادبیات ارائه شده است [Foroutan, Rezaeian and Mahdavi, 2020]. در الگوهای (الف) و (ب)، سرعت سفر به‌طور پیوسته به ترتیب در طول افق زمان‌بندی در حال افزایش و کاهش است. الگوی (ج) شرایط ساعات شلوغی ترافیک را ارائه می‌نماید. الگوی (د) فاصله زمانی بین دو اوج یا پیک ترافیک را شبیه‌سازی می‌نماید. الگوی (ه) سرعت‌های تصادفی سفر را نشان می‌دهد که ممکن است توسط برخی مناطق خاص تعیین‌شده روی مسیر، به دست آید و در نهایت الگوی (و) سرعت ثابت روی جاده را در طول آن افق، توضیح می‌دهد.

است [Kara, Kara and Yetis, 2007; Erdoğan and Miller-Hooks, 2012; Gaur, Mudgal and Singh, 2013]. این مسئله در سه دسته‌بندی اصلی توسط لین و همکاران [Lin, Choy, Ho, et al., 2014] در مرور ادبیات گسترده‌شان دسته‌بندی شده است. (۱) مسئله مسیریابی سبز و وسیله نقلیه<sup>۶</sup> (GVRP) که در رابطه با بهینه‌سازی مصرف انرژی در حمل و نقل است؛ (۲) مسئله VRP در لجستیک معکوس<sup>۷</sup> (VRPRL) که روی بخش توزیع لجستیک معکوس تمرکز می‌کند؛ (۳) مسئله آلودگی مسیریابی (PRP) که حداقل‌سازی انتشار گازهای گلخانه‌ای را در نظر می‌گیرد.

میرزاپور و رکیک، مسئله مسیریابی موجودی را به شکل مدل مختلط فرموله نمودند. آن‌ها، رابطه متقابل بین هزینه‌های حمل و نقل و سطح انتشار را با ملاحظات سبز در نظر گرفتند [Mirzapour Al-e-hashem and Rekik, 2014]. کوالو و همکاران، روش متاهیوریستیکی را الهام گرفته از روش جستجوی همسایگی برای VRP با دریافت و تحویل انتخابی به‌منظور دستیابی به زنجیره تأمین سبز پایدار توسعه دادند [Coelho, Munhoz, Ochi, et al., 2016]. نیو و همکاران، مدلی را برای مسئله مسیریابی سبز با پنجره‌های زمانی براساس مدل جامعی از انتشارات، توسعه دادند. آن‌ها، الگوریتم جست‌وجوی ممنوع ترکیبی را برای حل مسئله پیچیده خود، ارائه نمودند [Niu, Yang, Chen, et al., 2018]. سویسال یک برنامه‌ریزی احتمالی را برای مسئله مسیریابی موجودی حلقه بسته با لجستیک روبه‌جلو و معکوس و شامل عدم قطعیت در تقاضا پیشنهاد کرد. او حداقل‌سازی برخی هزینه‌های عملیاتی را با هزینه زیست‌محیطی مصرف انرژی پیگیری نمود [Soysal, 2016]. عیدی و علوی، VRP را در لجستیک معکوس با تقاضای قطعه‌قطعه به ادبیات افزودند طوری که تقاضای نقاط مختلف می‌تواند بین وسایل با توجه به بهینه‌سازی مصرف سوخت تقسیم گردد. آن‌ها، هزینه سوخت

و رویکردهایی که برای محاسبه انتشارات CO<sub>2</sub> و مصرف سوخت اعمال می‌شوند؛ به‌طور دقیق توضیح داده شده‌اند. سپس در بخش ۴، الگوریتم ژنتیک به‌منظور کارا ساختن مدل برای کاربردهای دنیای واقعی و در واقع حل مدل در زمان محاسباتی معقول، پیشنهاد می‌گردد. بخش ۵، در مورد طراحی آزمایشات و تنظیم پارامترهاست که عملکرد الگوریتم متاهیورستیک پیشنهادی را از نظر کیفیت حل و زمان‌های محاسباتی با در نظر گرفتن چند مثال عددی مختلف، ارزیابی می‌نماید. در نهایت در بخش ۶، نتیجه‌گیری و پیشنهادهای برای تحقیقات آتی در این زمینه، ارائه می‌گردد.

## ۲. مرور ادبیات

مسئله VRP اولین بار توسط دنتزیگ و رامسر به‌عنوان شکل کلی از مسئله فروشنده دوره‌گرد<sup>۸</sup> (TSP) مطرح شد [Dantzig and Ramser, 1959]. آن‌ها رویکردی را برای ناوگان تحویل گازوئیل پیشنهاد کردند. با بررسی ادبیات، به مجموعه وسیعی از مسائل سبز برخورد می‌شود. از اولین مقالات در این زمینه به مقالاتی توسط راوارد و همکاران در سال ۱۹۹۵ و همچنین دانیل و همکاران [Daniel, Diakoulaki and Pappis, 1997] در ۱۹۹۷ می‌توان اشاره کرد. آن‌ها تعامل بین روش‌های مبتنی بر تحقیق در عملیات و مدیریت زیست‌محیطی را بررسی نمودند. مسئله مسیریابی سبز وسایل با هدف ایجاد تبادلی بین هزینه‌های عملیاتی و زیست‌محیطی موضوعی است که از سال ۲۰۰۶ مورد تمرکز محققان قرار گرفت و موضوع قابل‌توجهی در سال‌های اخیر شد. فروتن و همکاران، زمان ظهور مسئله مسیریابی سبز وسایل نقلیه را در جدول زمانی VRP از سال ۱۹۹۹ به بعد، نشان می‌دهند [Foroutan, Rezaeian and Mahdavi, 2020].

با بررسی ادبیات، پی برده می‌شود که مسئله مسیریابی سبز توسط بسیاری از محققان در طول دهه‌های اخیر مطالعه شده

روی **GVRSP**، مدل جدیدی را توسعه دادند که وسایل ناهمگن، تراکم ترافیکی متفاوت با زمان، محدودیت‌های پنجره زمانی مشتریان و وسایل، اثر بار وسایل روی میزان انتشارات و محدودیت‌های ظرفیت را در مسئله در نظر گرفتند. مدل آن‌ها به وسایل اجازه می‌دهد تا جهت کاهش انتشارات، روی کمان‌ها توقف کنند [Xiao and Konak, 2016]. بهشتی‌نیا و قاسمی، یکپارچه‌سازی مسائل زمان‌بندی وسیله و تأمین‌کننده را از نظر تعیین مسیر وسیله برای انتقال مواد از تأمین‌کنندگان به برخی مراکز تولیدی با رویکرد چندهدفه، بررسی نمودند. اهداف به صورت حداقل‌سازی هم‌زمان کل دیرکرد تمام سفارش‌های تخصیص‌یافته به تأمین‌کنندگان و نیز کل مسافت پیموده شده وسایل بوده است [Beheshtinia and Ghasemi, 2018].

بهشتی‌نیا و همکاران، مسئله زمان‌بندی و مسیریابی یکپارچه را در زنجیره تأمین برای یک سیستم تولید چندکارخانه‌ای، به ادبیات افزودند. آن‌ها، یک مدل ریاضی را برای این مسئله با توجه به پیگیری چگونگی تخصیص سفارش‌ها به وسایل، مسیرهای وسایل، توالی تولید و چگونگی تخصیص سفارش به تأمین‌کنندگان، توسعه دادند [Beheshtinia, Ghasemi and Farokhnia, 2018]. ربانی و همکاران، یک مدل چندهدفه جدیدی را برای **GVRSP** تحت شرایط عدم قطعیت ارائه نمودند. آن‌ها، نقاط ترافیکی را به‌عنوان یک نقطه انفعال برای مقابله با زمان رسیدن وسایل در نظر گرفتند. اهداف به‌صورت حداقل‌سازی کل هزینه حمل‌ونقل، آلودگی ترافیکی، عدم رضایت مشتری و حداکثرسازی انعطاف‌پذیری وسایل بوده است [Rabbani, Bosjin, Yazdanparast, et al., 2018]. بورمند و بهشتی‌نیا، رویکرد تصمیم‌گیری یکپارچه‌ای را برای مسئله چندهدفه زمان‌بندی و حمل‌ونقل در یک زنجیره تأمین دوسطحی، پیشنهاد نمودند. توابع هدف به صورت حداقل‌سازی کل دیرکرد تحویل، هزینه تولید و انتشارات

را وابسته به مسیر و مقدار بار در نظر گرفتند. [Eydi and Alavi, 2018].

مسئله آلودگی مسیریابی به‌طور گسترده در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفت. فرانسجتی و همکاران، این مسئله را وابسته به زمان به‌صورت ترکیبی از مسئله آلودگی مسیریابی و **VRP** وابسته به زمان پیشنهاد نمودند [Franceschetti, Honhon, Van Woensel, et al., 2013]. وان و همکاران توسعه‌ای را روی مسئله **VRP** با ناوگان ثابت ناهمگن با در نظر گرفتن انتشارات کربن در تبادل با هزینه‌ها لحاظ نمودند [Kwon, Choi and Lee, 2013]. بیکتاس و لاپورته، یک مسئله آلودگی مسیریابی را با هدف حداقل‌سازی کل هزینه‌های مصرف سوخت و انتشار گازهای گلخانه‌ای با هزینه دستمزد رانندگان ارائه نمودند [Bektaş and Laporte, 2011]. دمیر همراه با بیکتاس و لاپورته، مسئله قبلی را با افزودن محدودیت سرعت توسعه دادند [Demir, Bektaş and Laporte, 2012]. همچنین توسعه دیگری را روی مسئله آلودگی مسیریابی با هدف حداقل‌سازی مصرف سوخت و کل زمان سفر پیشنهاد دادند [Demir, Bektaş and Laporte, 2014b]. کوک و همکاران، یک الگوریتم تکاملی هیبریدی را برای حداقل‌سازی هزینه‌های مصرف سوخت، انتشارات  $CO_2$ ، کل دستمزد و کل هزینه‌های ثابت برای ناوگانی ناهمگن ارائه نمودند [Koç, Bektaş, Jabali, et al., 2015]. فیگلیوزی کل مسافت سفر را به همراه کل زمان‌های گذرانده شده در جاده‌ها، حداقل‌سازی نمود [Figliozzi, 2010].

یکی از جدیدترین مسائل، مسئله زمان‌بندی و مسیریابی سبز وسایل نقلیه<sup>۸</sup> (**GVRSP**) است که توسط شیائو و کوناک برای اولین بار در سال ۲۰۱۵ معرفی شد [Xiao and Konak, 2015]. آن‌ها یک تابع چندهدفه را با هدف اصلی حداقل‌سازی انتشارات  $CO_2$  پیشنهاد کردند و آن را با رویکرد سلسله‌مراتبی حل نمودند. این نویسندگان در ادامه تحقیقات

بر عهده دارد [بهشتی نیا و اعرابی، ۱۳۹۶]. بهشتی نیا و همکاران به ترکیب سه استراتژی نوین در مورد زمان بندی حمل و نقل شامل زمان بندی جامع تولید، استفاده از ناوگان حمل و نقل مشترک برای انتقال قطعات به شرکت سازنده و یکپارچگی تصمیمات در حوزه زمان بندی تولید و حمل و نقل پرداختند. آن ها، فرض نمودند تعدادی سفارش وجود دارد که پس از تولید توسط تأمین کنندگان باید با وسایل به یک شرکت سازنده حمل شوند. هدف، کمینه سازی مجموع زمان های تحویل سفارشات، بوده است [بهشتی نیا و همکاران، ۱۳۹۷].

قنادپور و ضرابی، مدل و رویکرد حل جدیدی را برای مسئله GVRSP چندهدفه با در نظر گرفتن وسایل نقلیه ناهمگن با هدف حداقل سازی انرژی توسعه دادند. آن ها، پنجره های زمانی را در سیستم لجستیک سبز در نظر گرفتند و به اولویت مشتریان در ارائه خدمات، توجه نمودند. در نهایت، رویکرد حل جدیدی را براساس الگوریتم تکاملی، پیشنهاد دادند و با الگوریتم ژنتیک چندهدفه با مرتب سازی غیر مغلوب (NSGA-II)، مقایسه کردند [Ghannadpour and Zarrabi, 2019] لی و همکاران، یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط را برای مسئله GVRSP با بارگیری و تحویل همزمان و در نظر گرفتن پنجره های زمانی، به ادبیات افزودند. به منظور حل مدل، یک الگوریتم هوشمندی را طراحی کردند و با الگوریتم ژنتیک، مقایسه نمودند. [Li, Guo, Zhou, et al., 2019]. لیائو، یک مدل ریاضی جدیدی را برای مسئله VRSP در کراس داک در قالب یکپارچه روی یک پایانه چنددربر، در حالت چندمحصولی، توسعه داده اند. آن ها همچنین یک روش جدیدی از بهینه سازی ترکیبی مبتنی بر تجزیه را برای حل این مدل، پیشنهاد کردند. رویکرد ترکیبی در واقع، زیرمسئله های ایجاد شده را به صورت تکراری با استفاده از جست و جوی حریمانه، حل می نماید [Liao, 2020].

وسایل و حداکثرسازی کیفیت تولید، هستند. آن ها برای حل از الگوریتم ژنتیک به صورت ترکیب با یک روش تصمیم گیری چندمعیاره، بهره گرفتند [Borumand and Beheshtinia, 2018].

با بررسی پژوهش های ژورنال های داخلی، تحقیقات مرتبطی یافت شد. خدابنده و همکاران، مسئله یکپارچه سازی تولید و توزیع را با هدف حداقل سازی مجموع وزنی تعداد کارهای تأخیری و هزینه های حمل و نقل با مسیریابی در زنجیره تأمین بررسی نمودند. در این مسئله، چند مشتری و یک تسهیل تولیدی وجود دارد که کارها پس از پردازش، به صورت مسیریابی و در قالب دسته هایی برای مشتریان ارسال می شوند [خدابنده و همکاران، ۱۳۹۲]. توکلی مقدم و همکاران، حالت جدیدی از ترکیب مسئله مسیریابی را با لحاظ پنجره زمانی در حالت رقابتی به ادبیات افزودند. آن ها، مدلی را ارائه نمودند که با کوتاه ترین مسیر و کمترین هزینه، در زودترین زمان ممکن زودتر از رقبای مشتریان سرویس دهی کند [توکلی مقدم و همکاران، ۱۳۹۳]. نوروزی و همکاران، VRP را با هدف کاهش انرژی مصرفی و زمان های طی مسیر و نیز با سرعت های سفر وابسته به زمان، بررسی نمودند. آن ها، مسیرهای بهینه را برای ناوگانی تعیین نمودند که زمان طی مسیر به زمانی از روز که سفر آغاز می شود؛ وابسته است [نوروزی و همکاران، ۱۳۹۵].

بهشتی نیا و اعرابی، به بررسی مدلی برای یکپارچگی VRP در یک زنجیره تأمین با مسئله تخصیص سفارش ها به تأمین کنندگان و تعیین توالی تولید، پرداختند. زنجیره تأمین مورد مطالعه شامل تأمین کننده، چند وسیله و یک سازنده محصولات نهایی است. در این مقاله، یک ناوگان حمل و نقل متشکل از وسایل نقلیه با ظرفیت ها و سرعت های متفاوت، حمل مواد خریداری شده از تأمین کنندگان و جمع آوری قطعات تکمیل شده از آن ها را با هدف کاهش میزان دیرکرد در تحویل،

[Razmi and Torabi, 2012] مورد استفاده قرار می‌گیرد که درجه استواری قیود فازی به صورت فعالانه<sup>۱</sup> در مدل تنظیم شود. دوم، بر اساس تحقیقات جدید در زمینه مسیریابی تحویل سفارش مشتری، معمولاً مشتریان چندین بازه/پنجره زمانی را به عنوان بازه مطلوب خود پیشنهاد می‌دهند [Li, Qin, Baldacci, et al., 2020; Ferreira, Bogue, Noronha, et al., 2018; Hoogetboom, Dullaert, Lai, et al., 2020]. تاخیر یا تعجیل از هر کدام از این پنجره‌های زمانی ممکن است یکسان و یا متفاوت باشد؛ ولی در عمل چندین اختیار برای بازه تحویل مسئله ایجاد می‌شود. این نوع مسائل به عنوان مسیریابی با پنجره زمانی چندگانه مورد توجه هستند که در این پژوهش، تحویل چندگانه نیز مورد توجه قرار می‌گیرد. سوم، در پژوهش پایه، فرض شده است که اولاً درآمد حاصل از محصولات بازگشتی تمام مشتریان یکسان است و ثانیاً این مقدار قطعی است. این در صورتی است که در عمل ممکن است کیفیت محصولات دریافتی از مشتریان/نواحی مختلف، یکسان نبوده و ارزش متفاوتی داشته باشند؛ همچنین فرض قطعیت در مقدار درآمد یا ارزش کالاهای بازگشتی، ریسک شدیدی بر تصمیم‌گیری ایجاد می‌کند؛ چراکه مقدار این پارامتر معمولاً به طور قطعی قابل بیان نیست. بنابراین، در این پژوهش مقدار این پارامتر اولاً برای مشتریان مختلف، متفاوت است و ثانیاً به صورت تقریبی فاصله‌ای، بیان می‌شود و جهت کنترل، از رویکردهای برنامه‌ریزی استوار فاصله‌ای برتسیماس و سیم [Bertsimas and Sim, 2004] استفاده می‌شود. جدول ۱، تفاوت این پژوهش را با ادبیات، آشکار می‌نماید.

اخیراً فروتن و همکاران، مسئله GVRSP را با در نظر گرفتن وسایل نقلیه ناهمگن و هزینه‌های زودکرد و دیرکرد، توسعه داده‌اند و یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عددصحیح مختلط را ارائه نمودند. آن‌ها، الگوریتم‌های شبیه‌سازی تبرید و ژنتیک را برای حل مدل NP-hard توسعه داده شده، پیشنهاد نمودند و یک آزمون فرضیه آماری را نیز استفاده کردند [Foroutan, Rezaeian and Mahdavi, 2020]. در این مقاله، مدل ریاضی تحقیق اخیر به عنوان یک مدل پایه مناسب، در نظر گرفته می‌شود و مدل ریاضی جدیدی برای مسئله GVRSP مورد بحث، توسعه داده می‌شود. بنابراین، تحقیق اخیر را به عنوان یک پژوهش پایه انتخاب نموده ایم و آن را توسعه داده ایم. در جدول ۱، خلاصه‌ای از مهم‌ترین مشخصات برخی از جدیدترین تحقیقات انجام شده موجود در ادبیات به همراه مقایسه با تحقیق حاضر آورده شده است. با استفاده از این جدول، سعی شده است تا تفاوت‌های مقاله حاضر با تحقیقات موجود، تبیین گردد.

نوآوری‌های اصلی این پژوهش نسبت به ادبیات موجود و خصوصاً در مقایسه با پژوهش پایه، عبارتند از: اول، بسیاری از تحقیقات در زمینه مسئله GVRSP، تقاضای مشتریان را به صورت قطعی در نظر گرفته‌اند؛ درحالی‌که تقاضای مشتریان در واقعیت به صورت قطعی نیست. در این پژوهش، تقاضای مشتریان به صورت تقریبی و مبتنی بر اعداد فازی بیان می‌شود. علاوه بر عدم قطعیت در تقاضای مشتریان، وسیله نقلیه‌ای که مشتری را ملاقات می‌کند؛ باید برای تحویل کل تقاضای آن، آماده شده باشد؛ در غیر اینصورت، جریمه کمبود در نظر گرفته می‌شود. لازم به توضیح است که برای مواجهه با این محدودیت، ما از رویکردهای کلاسیک برنامه‌ریزی با قیود شانس فازی کلاسیک که سطح اطمینان به صورت دستی تنظیم می‌شود؛ استفاده نمی‌کنیم؛ بلکه رویکرد برنامه‌ریزی امکانی استوار<sup>۲</sup> پیشنهادی توسط پیشوایی و همکاران [Pishvaei,

جدول ۱. مقایسه‌ای از برخی مهم‌ترین و جدیدترین تحقیقات موجود در ادبیات

شماره ترتیبی	جریمه‌های			نوع لجستیک	ملاحظات زیست‌محیطی	نوع وسایل		ظرفیت تسهیلات		عدم قطعیت		پنجره‌های زمانی چندگانه	نوع تصمیم‌گیری		پرسندگان
	تحويل	تفاوت ارزش محصول	بازگشتی مشتریان			مستقیم	معکوس	همگن	ناهمگن	محدود	نامحدود		ارزش محصول	تقاضا	
				*	*	*	*	*	*				*		Figliozzi (2010)
*				*	*	*	*	*	*				*		Demir, et al. (2012)
				*	*	*	*	*	*				*		Gaur, et al. (2013)
				*	*	*	*	*	*				*		Mirzapour Al-e-hashem and Rekik (2014)
*	*			*	*	*	*	*	*				*	*	Xiao and Konak (2015)
*	*			*	*	*	*	*	*				*	*	Xiao and Konak (2016)
				*	*	*	*	*	*			*	*		Soysal (2016)
*				*	*	*	*	*	*			*	*		Farahbakhsh, et al. (2017)
*				*	*	*	*	*	*				*		Niu, et al. (2018)
*				*	*	*	*	*	*				*		Eydi and Alavi (2018)
*				*	*	*	*	*	*				*	*	Rabbani, et al. (2018)
*				*	*	*	*	*	*				*	*	Beheshtinia, et al. (2018)
*				*	*	*	*	*	*				*	*	Ghannadpour and Zarrabi (2019)
*				*	*	*	*	*	*			*	*		Hoogeboom et al. (2020)
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*				*	*	Foroutan, et al. (2020)
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	این مقاله



### ۳. بیان مسئله

در این بخش، ابتدا مسئله GVRSP تعریف‌شده در پژوهش پایه این تحقیق که توسط فروتن و همکاران [Foroutan, Rezaeian and Mahdavi, 2020] ارائه شده است؛ مرور می‌شود و سپس توسعه این مسئله ارائه می‌گردد. در مسئله مذکور، ناوگان ناهمگن شامل لجستیک معکوس به شکل جمع‌آوری کالاهای بازگشتی همراه با هزینه‌های زودکرد و دیرکرد وزنی، توصیف می‌گردد. ناوگانی از وسایل نقلیه ناهمگن در یک انبار مرکزی مستقر شده است. فرض می‌شوند که آن‌ها به‌طور کامل، تقاضاهای مجموعه‌ای از مشتریان را دریافت می‌کنند و درعین‌حال، میزان معینی از کالاهای بازگشتی‌شان را جمع می‌نمایند.

مسئله مذکور با استفاده از شبکه  $G(N,A)$  فرموله شده است؛ به‌گونه‌ای که  $N$  مجموعه‌ای از گره‌های مشتری و نیز گره انبار مرکزی را ارائه می‌کند و  $A$  مجموعه‌ای از کمان‌ها یا مسیره‌های بین گره‌هاست. هر مشتری، یک تقاضای قطعی، یک مقدار معین از کالاهای بازگشتی بالقوه و نیز یک زمان تحویل از پیش تعیین شده دارد طوری که هر زودکرد یا دیرکرد روی تحویل تقاضا به جریمه وزنی در تابع هدف براساس اهمیت آن، منجر خواهد شد. همچنین، جهت محاسبه سرعت وسایل نقلیه در هر زمان روی مسیره‌های مختلف، الگوهای ترافیک وابسته به زمان اعمال می‌گردد. هدف تحقیق حاضر، توسعه GVRSP به‌منظور ایجاد تبادلی بین هزینه‌های عملیاتی و زیست‌محیطی و حداقل‌سازی آن‌ها به‌طور هم‌زمان است. هزینه‌های عملیاتی ثابت و متغیر با توجه به تعداد و آن نوع وسیله ای محاسبه می‌شوند که با لحاظ مقدار بارشان روی جاده براساس ظرفیت آن‌ها، تورها را هم برای محصولات جدید و هم برای کالاهای بازگشتی تشکیل می‌دهند. ملاحظات زیست‌محیطی با حداقل‌سازی کل انتشارات  $CO_2$ ، هزینه

مصرف سوخت و حداکثرسازی جمع‌آوری کالاهای بازگشتی در چارچوب لجستیک معکوس، اعمال می‌شود. از جمله مفروضاتی که برای این مسئله اشاره شده است؛ عبارتند از:

- مدل، تک‌محصولی و همه تقاضاها باید ارضا شوند.
- هر تقاضای مشتری باید یک‌بار به‌وسیله یک وسیله، پاسخ داده شود.
- هیچ‌یک از سفارشات نمی‌توانند از ظرفیت همه وسایل نقلیه تجاوز نمایند.
- کل تقاضاهای همه مشتریان نمی‌تواند از کل ظرفیت وسایل نقلیه موجود بیشتر گردد.
- هیچ وسیله نقلیه‌ای مجاز نیست که بیشتر از ظرفیت خود روی مسیر معین، حمل بار نماید.
- وسایل نقلیه مجازند که هر کمان را در بیشتر از یک دوره زمانی، سفر نمایند.
- وسایل نقلیه مجازند که در گره‌ها توقف نمایند اما وقتی که وسیله، یک گره را ترک می‌کند و مسیرش را روی یک کمان شروع می‌کند؛ باید سفر خود را روی آن کمان بدون توقف به پایان برساند.
- سرعت یک وسیله نقلیه روی کمان مشخص وابسته به دوره زمان سفر آن وسیله در آن کمان است.
- سرعت هر وسیله نقلیه در هر دوره زمانی خاص روی کمان مشخص، ثابت بوده و برابر با متوسط سرعت سفر در آن دوره زمانی روی آن کمان است.
- مجموع وزن هر وسیله در طول سفر خود وابسته به کل مقدار محصولات جدید و بازگشتی حمل شده توسط آن، متغیر است.
- هر زودکرد یا دیرکرد در خدمات مشتری با توجه به میزان مهم بودن آن مشتری، جریمه خواهد شد.

قطعیت در مقدار درآمد یا ارزش کالاهای بازگشتی، ریسک شدیدتری بر تصمیم‌گیری ایجاد می‌کند؛ چراکه مقدار این پارامتر معمولاً به طور قطعی قابل بیان نیست. بنابراین، در این پژوهش مقدار این پارامتر اولاً برای مشتریان مختلف، متفاوت است و ثانیاً به صورت تقریبی فاصله‌ای، بیان می‌شود و با استفاده از رویکردهای برنامه‌ریزی استوار فاصله‌ای برتسیماس و سیم [Bertsimas and Sim, 2004] برای ایجاد همتای استوار مدل، استفاده می‌شود.

در ادامه، ابتدا مدل تحقیق پایه با در نظر گرفتن تنوع در پنجره زمانی تحویل، تفاوت در ارزش محصول بازگشتی از هر مشتری، همچنین عدم قطعیت در تقاضای مشتریان و ارزش محصولات بازگشتی، توسعه داده می‌شود و سپس رویکردهای هیبریدی برنامه‌ریزی امکانی استوار و برنامه‌ریزی استوار فاصله‌ای برای مواجهه با عدم قطعیت آن، توسعه داده می‌شود و مورد استفاده قرار می‌گیرد.

#### ۴. مدل‌سازی مسئله در حالت اسمی و استوار

در این بخش، ابتدا مدل بهینه‌سازی مسئله تعریف شده در بخش قبل (همراه با توسعه‌های مذکور) آورده می‌شود؛ سپس رویکرد هیبریدی مواجهه با عدم قطعیت توضیح داده می‌شود و برای توسعه مدل، به کار گرفته می‌شود. نمادها و علائم ریاضی به کار گرفته شده در فرمولاسیون مسئله، به صورت زیر است:

##### مجموعه و اندیس:

$N^0 = N \cup \{0\}$ : مجموعه گره‌های شبکه شامل مشتری‌ها

$N = \{1, 2, \dots, n\}$  و انبار  $\{0\}$  است (اندیس با  $i$ ).

$L$ : مجموعه انواع وسایل نقلیه (اندیس با  $l$ ).

$K$ : مجموعه دوره‌های زمانی (اندیس با  $k$ ).

$TW_i$ : مجموعه پنجره‌های زمانی مطلوب مشتری  $i$  برای تحویل

محصول (اندیس با  $tw$ ).

در این پژوهش، در توسعه مسئله و مدل ارائه‌شده توسط فروتن و همکاران [Foroutan, Rezaeian and Mahdavi, 2020] به موارد زیر پرداخته می‌شود:

(۱) تقاضای مشتریان به صورت قطعی نیست؛ بلکه به صورت تقریبی و مبتنی بر اعداد فازی بیان می‌شود. علی‌رغم عدم قطعیت در تقاضای مشتریان، وسیله نقلیه‌ای که مشتری را ملاقات می‌کند؛ باید برای تحویل کل تقاضای آن، آماده شده باشد؛ در غیر اینصورت، جریمه کمبود در نظر گرفته می‌شود. لازم به توضیح است که برای مواجهه با این محدودیت، ما از رویکردهای کلاسیک برنامه‌ریزی با قیود شانسی فازی کلاسیک که سطح اطمینان به صورت دستی تنظیم می‌شود؛ استفاده نمی‌کنیم؛ بلکه رویکرد برنامه‌ریزی امکانی استوار پیشنهادی توسط پیشوایی و همکاران [Pishvaei, Razmi and Torabi, 2012]، مورد استفاده قرار می‌گیرد که درجه استواری قیود فازی به صورت فعالانه در مدل تنظیم شود.

(۲) بر اساس تحقیقات جدید در زمینه مسیریابی تحویل سفارش مشتری، معمولاً مشتریان چندین بازه/پنجره زمانی را به عنوان بازه مطلوب خود پیشنهاد می‌دهند [Li, Qin, Baldacci, et al., 2020; Ferreira, Bogue, Noronha, et al., 2018; Hoogeboom, Dullaert, Lai, et al., 2020]. تاخیر یا تعجیل از هر کدام از این پنجره‌های زمانی ممکن است یکسان و یا متفاوت باشد؛ ولی در عمل چندین اختیار برای بازه تحویل مسئله ایجاد می‌شود. این نوع مسائل به عنوان مسیریابی با پنجره زمانی چندگانه مورد توجه هستند که در این پژوهش، تحویل چندگانه نیز نسبت به پژوهش پایه، مورد توجه قرار گرفته است.

(۳) در پژوهش پایه، فرض شده است که اولاً درآمد حاصل از محصولات بازگشتی تمام مشتریان یکسان است و ثانیاً این مقدار قطعی است. این در صورتی است که در عمل ممکن است کیفیت محصولات دریافتی از مشتریان/نواحی مختلف، یکسان نبوده و ارزش متفاوتی داشته باشند؛ همچنین فرض

حل مسئله زمان‌بندی و مسیریابی سبز وسایل حمل‌ونقل با ناوگان ناهمگن شامل لجستیک ...

$[ST_{tw}, FT_{tw}]$ : ابتدا و انتهای موعد تحویل سفارش مشتری  $i$

در پنجره زمانی  $tw$

$\bar{\beta}_i$ : ارزش هر واحد محصول جمع‌آوری شده/بازگشتی از گره

$i$  (غیرقطعی فاصله/ی)

$R_i$ : تعداد محصولات بازگشتی بالقوه در گره  $i$

$w$ : وزن یک محصول واحد

$M$ : عددی به‌اندازه کافی بزرگ

متغیرها (خروجی مدل):

$H_{tw}$ : اگر پنجره زمانی  $tw$  برای تحویل سفارش مشتری  $i$

انتخاب شود؛ برابر یک، در غیر این صورت صفر

$X_{ij}^l$ : اگر کمان  $(i, j)$  جهت سفر وسیله نوع  $L$  انتخاب گردد؛

برابر یک، در غیر این صورت صفر

$x_{ij}^{lk}$ : اگر کمان  $(i, j)$  جهت سفر وسیله نوع  $L$  در دوره  $k$

انتخاب گردد؛ برابر یک، در غیر این صورت صفر

$y_{ij}^l$ : مقدار محصولات جدید در حال حمل توسط وسیله نوع

$L$  با سفر از کمان  $(i, j)$

$r_{ij}^l$ : مقدار محصولات بازگشتی در حال حمل توسط وسیله نوع

$L$  با سفر از کمان  $(i, j)$

$BIN_{ij}^l$ : متغیر صفر و یک؛ برابر یک اگر  $r_{ij}^l$  بیشتر از صفر

باشد و در غیر این صورت برابر صفر

$d_{ij}^{lk}$ : مسافت طی شده از کمان  $(i, j)$  توسط وسیله نقلیه نوع

$L$  در دوره  $k$

$t_{ij}^{lk}$ : زمان سفر وسیله  $L$  روی کمان  $(i, j)$  در دوره  $k$

$l_i$ : زمان خروج وسیله از گره  $i$

$a_i$ : زمان ورود وسیله به گره  $i$

$T_{tw}$ : دیرکرد تحویل سفارش مشتری  $i$  در صورتی که پنجره

زمانی  $tw$  برای تحویل سفارش آن، اعلام شده باشد

$E_{tw}$ : زودکرد تحویل سفارش مشتری  $i$  در صورتی که پنجره

زمانی  $tw$  برای تحویل سفارش آن، اعلام شده باشد

$A$ : مجموعه کمان‌ها، هر کمان از دو گره تشکیل می‌شود؛

$(i, j) \in A, \forall i, j \in N^0, i \neq j$

پارامترها (ورودی مدل):

$N_L$ : تعداد وسایل نقلیه نوع  $L$

$C_L$ : ظرفیت وسیله نقلیه نوع  $L$

$W_L$ : وزن وسیله نقلیه نوع  $L$

$\bar{Q}_i$ : تقاضای مشتری  $i$  (غیرقطعی فازی)

$D_{ij}$ : فاصله کمان  $(i, j)$

$\varepsilon_{ij}^{lk}$ : نرخ انتشارات  $CO_2$  در واحد مسافت پیموده در کمان

$(i, j)$  برای وسیله نوع  $L$  در دوره  $k$  ( $gr / km$ )

$LC_{ij}^{lk}$ : ضریب تصحیح بار برای وسیله نقلیه نوع  $L$  وقتی که

کمان  $(i, j)$  را در دوره  $k$  سفر می‌نماید

$\varphi_{tw}$ : هزینه واحد جریمه دیرکرد تحویل سفارش مشتری  $i$

نسبت به پنجره زمانی  $tw$

$\delta_{tw}$ : ضریب جریمه زودکرد تحویل سفارش مشتری  $i$  نسبت به

پنجره زمانی  $tw$

$\alpha_l$ : هزینه متغیر سفر واحد مسافت توسط وسیله نوع  $L$

$c$ : هزینه مصرف هر واحد سوخت

$\omega$ : هزینه انتشار هر واحد  $CO_2$

$F_l$ : هزینه ثابت وسیله نقلیه نوع  $L$

$LD$ : حداقل فاصله موردنیاز جهت عبور برای هر کمان که

برای سفر انتخاب می‌گردد

$v_{ij}^k$ : سرعت ثابت وسایل روی کمان  $(i, j)$  در دوره  $k$

$s_{1i}$ : زمان بارگیری واحد محصول از یک وسیله در گره  $i$

$s_{2i}$ : زمان بارگذاری واحد محصول روی وسیله در گره  $i$

$b_k$ : زمان شروع دوره زمانی  $k$

$e_k$ : زمان پایان دوره زمانی  $k$

$$\sum_{l=1}^p \sum_{i=0}^n r_{ij}^l - \sum_{l=1}^p \sum_{i=0}^n r_{ij}^l = y_j \quad (8)$$

$$\forall j \in N, \forall l \in P$$

$$r_{ij}^l \leq \left( C_l - \tilde{Q}_i \right) \cdot X_{ij}^l \quad (9)$$

$$\forall i, j \in N, i \neq j, \forall l \in P$$

$$y_{ij}^l + r_{ij}^l \leq C_l \quad (10)$$

$$\forall i, j \in N, i \neq j, \forall l \in P$$

$$y_i \leq R_i \quad \forall i \in N \quad (11)$$

$$X_{ij}^l \geq x_{ij}^{lk} \quad \forall (i, j) \in A, \forall l \in P, \forall k \in K \quad (12)$$

$$X_{ij}^l \leq \sum_{k=1}^m x_{ij}^{lk} \quad \forall (i, j) \in A, \forall l \in P \quad (13)$$

$$D_{ij} \cdot X_{ij}^l = \sum_{k=1}^K d_{ij}^{lk} \quad \forall (i, j) \in A, \forall l \in P \quad (14)$$

$$LD \cdot x_{ij}^{lk} \leq d_{ij}^{lk} \leq D_{ij} \cdot x_{ij}^{lk} \quad (15)$$

$$\forall (i, j) \in A, \forall l \in P, \forall k \in K$$

$$t_{ij}^{lk} = d_{ij}^{lk} / v_{ij}^k \quad (16)$$

$$\forall (i, j) \in A, \forall l \in P, \forall k \in K$$

$$l_i \leq e_k \cdot x_{ij}^{lk} - t_{ij}^{lk} + e_m \cdot (1 - x_{ij}^{lk}) \quad (17)$$

$$\forall (i, j) \in A, \forall l \in P, \forall k \in K$$

$$a_i \geq b_k \cdot x_{ij}^{lk} + t_{ij}^{lk} - e_m \cdot (1 - x_{ij}^{lk}) \quad (18)$$

$$\forall (i, j) \in A, \forall l \in P, \forall k \in K$$

$$a_i + s_{1i} \cdot \tilde{Q}_i + s_{2i} \cdot y_i \leq l_i \quad \forall j \in N \quad (19)$$

$$a_0 \leq e_m \quad (20)$$

$$a_j \geq l_i + \sum_{k=1}^m t_{ij}^{lk} - e_m \cdot (1 - X_{ij}^l) \quad (21)$$

$$\forall (i, j) \in A, \forall l \in P$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n t_{ij}^{lk} \leq e_k - b_k \quad \forall l \in P, \forall k \in K \quad (22)$$

$$x_{ij}^{lk} \leq 2 - x_{ij}^{lk'} - x_{ij}^l \quad (23)$$

$$\forall i, j, j' \in N, \forall k, k' \in K; k < k'$$

$$T_{itw} \geq (a_i - FS_{itw}) H_{itw} \quad \forall i \in N, tw \in TW_i \quad (24)$$

$$E_{itw} \geq (ST_{itw} - a_i) H_{itw} \quad \forall i \in N, tw \in TW_i \quad (25)$$

$$r_{ij}^l \geq BRY_{i0}^l \quad \forall i \in N, j = 0, \forall l \in P \quad (26)$$

$$X_{ij}^l \geq BRY_{i0}^l \quad \forall i \in N, j = 0, \forall l \in P \quad (27)$$

$\rho_{ij}^l$ : نرخ مصرف سوخت وسیله نوع  $L$  به ازای هر واحد مسافت طی شده روی کمان  $(i, j)$

$y_i$ : مقدار محصولات بازگشتی جمع‌آوری شده از گره  $i$

#### ۴-۱ فرمولاسیون مسئله در حالت اسمی

همانطور که اشاره شد؛ پارامترهای  $\tilde{Q}_i$  و  $\tilde{\beta}_i$  (تقاضای محصول و ارزش محصول بازگشتی از مشتریان مختلف) غیرقطعی هستند و به ترتیب به صورت اعداد فازی و فاصله‌ای بیان می‌شوند. در مدل‌سازی اسمی یا مقدار متوسط، موقتا فرض می‌کنیم یک مقدار متوسط/اسمی در این پارامترها قرار می‌گیرد. بنابراین مدل اسمی پیشنهادی به صورت زیر است.

$$\min \sum_{i=0}^n \sum_{l=1}^p \sum_{k=1}^K \left( \begin{aligned} &\varepsilon_{i0}^{lk} \cdot (1 - BIN_{i0}^l) \cdot d_{i0}^{lk} \\ &+ \varepsilon_{i0}^{lk} \cdot BIN_{i0}^l \cdot LC_{i0}^{lk} \cdot d_{i0}^{lk} \\ &+ \sum_{j=1}^n \varepsilon_{i0}^{lk} \cdot LC_{ij}^{lk} \cdot d_{ij}^{lk} \end{aligned} \right) \cdot \omega$$

$$+ \sum_{l=1}^p \sum_{j=1}^n F_L \cdot X_{0j}^l + \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{l=1}^p \sum_{k=1}^K (\alpha_l + c \cdot \rho_{ij}^l) \cdot d_{ij}^{lk} \quad (28)$$

$$- \sum_{i=0}^n \tilde{\beta}_i \cdot y_i + \sum_{i=1}^n \sum_{tw \in TW_i} (\delta_{itw} \cdot E_{itw} + \varphi_{itw} \cdot T_{itw})$$

s.t.

$$\sum_{tw \in TW_i} H_{itw} = 1 \quad \forall i \in N \quad (1)$$

$$\sum_{l=1}^p \sum_{i=0}^n X_{ij}^l = 1 \quad \forall j \in N \quad (2)$$

$$\sum_{l=1}^p \sum_{i=0}^n X_{ij}^l = 1 \quad \forall i \in N \quad (3)$$

$$\sum_{i=0}^n X_{ij}^l - \sum_{i=0}^n X_{ji}^l = 0 \quad \forall i \in N, \forall l \in P \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^n X_{0j}^l \leq N_l \quad \forall l \in P \quad (5)$$

$$\sum_{l=1}^p \sum_{i=0}^n y_{ij}^l - \sum_{l=1}^p \sum_{i=0}^n y_{ji}^l \geq \tilde{Q}_j \quad \forall j \in N \quad (6)$$

$$\tilde{Q}_j \cdot X_{ij}^l \leq y_{ij}^l \leq \left( C_l - \tilde{Q}_i \right) \cdot X_{ij}^l \quad (7)$$

$$\forall i, j \in N, i \neq j, \forall l \in P$$

می‌گردد که هر تقاضای مشتری به‌طور کامل پاسخ داده خواهد شد. محدودیت (۷) مطمئن می‌سازد که ظرفیت محدود هر وسیله نقلیه برای انتقال محصولات جدید، رعایت شده است. محدودیت (۸)، تعداد کالاهای بازگشتی را که باید از هر مشتری جمع‌آوری گردند؛ تعیین می‌نماید. محدودیت (۹) تضمین می‌نماید که ظرفیت انتقال محصولات بازگشتی توسط هر وسیله، نقض نخواهد شد. با وجود محدودیت (۱۰) اطمینان حاصل می‌گردد که یک بار یا محموله (محصولات جدید به همراه محصولات بازگشتی) حمل شده توسط هر وسیله روی هر کمان از ظرفیت آن وسیله، بیشتر نیست. محدودیت (۱۱) حد بالای جمع‌آوری کالاهای بازگشتی را برای هر مشتری تعریف می‌نماید. محدودیت (۱۲) بیان می‌کند که به‌منظور سفر در مسیر  $(i, j)$  توسط وسیله نقلیه نوع  $L$  در دوره  $k$ ، ابتدا باید این کمان برای سفر توسط وسیله نوع  $L$  انتخاب گردد. محدودیت (۱۳) توضیح می‌دهد که اگر مسیر  $(i, j)$  جهت سفر توسط وسیله نوع  $L$  انتخاب شد؛ این کمان می‌تواند در حداقل یک و حداکثر  $k$  دوره زمانی، سفر شود. دو محدودیت اخیر، متغیرهای  $X_{ij}^l$  و  $x_{ij}^{lk}$  را با یکدیگر سازگار می‌سازند. محدودیت (۱۴) تضمین می‌کند که اگر یک کمان جهت سفر توسط یک وسیله انتخاب شد؛ آن مسیر باید تا انتها، طی گردد. محدودیت (۱۵) متغیر  $d_{ij}^{lk}$  را با متغیر  $x_{ij}^{lk}$  سازگار می‌سازد. همچنین، حداقل و حداکثر فاصله قابل سفر را تعیین می‌نماید وقتی که مسیر  $(i, j)$  جهت سفر توسط وسیله نوع  $L$  در دوره زمانی  $k$  انتخاب می‌گردد. محدودیت (۱۶) زمان سفر وسیله نوع  $L$  را در دوره زمانی  $k$  روی مسیر  $(i, j)$  تعریف می‌نماید. محدودیت‌های (۱۷) و (۱۸) به ترتیب زمان‌های خروج و ورود وسایل نقلیه را از/به گره‌ها در هر دوره زمانی تعیین می‌کنند. محدودیت (۱۹) اطمینان می‌دهد که در هر گره، زمان خروج باید بعد از زمان ورود به‌علاوه زمان سرویس، اتفاق بیفتد. زمان سرویس در هر گره برابر با کل زمان‌های بارگیری و بارگذاری

$$r_{ij}^l \cdot X_{ij}^l \leq BRY_{i0}^l \cdot M \quad (28)$$

$$\forall i \in A, j = 0, \forall l \in P$$

$$\rho_{ij}^l = 7.93 \times 10^{-5} \cdot [W_L + (y_{ij}^l + r_{ij}^l) \cdot w] \quad (29)$$

$$-0.026 \quad \forall (i, j) \in A, \forall l \in P$$

$$X_{ij}^l, x_{ij}^{lk}, BRY_{i0}^l, H_{i0w} \in \{0, 1\} \quad (30)$$

$$\forall (i, j) \in A, l \in P, k \in K, tw \in TW$$

$$y_{ij}^l, d_{ij}^{lk}, t_{ij}^{lk}, l_i, a_i, T_{i0w}, E_{i0w} \geq 0 \quad (31)$$

$$\forall i, j \in N, l \in P, k \in K$$

در معادله (۰) تابع هدف مسئله آورده شده است که هر دو هزینه‌های عملیاتی و زیست‌محیطی را به‌طور هم‌زمان، حداقل می‌نماید. بخش اول از این تابع، هزینه کل انتشارات CO<sub>2</sub> را مینیمم می‌سازد. بخش دوم، هزینه‌های ثابت ناوگان را محاسبه می‌نماید. بخش سوم، جهت بهینه‌سازی هزینه‌های عملیاتی و زیست‌محیطی به‌طور هم‌زمان همراه با حداقل‌سازی هزینه‌های متغیر ناوگان شامل هزینه مصرف سوخت، استفاده می‌گردد. بخش چهارم، کل درآمد حاصل توسط جمع‌آوری کالای بازگشتی را محاسبه می‌نماید. در نهایت، بخش‌های پنجم و ششم، کل دیرکرد و زودکرد را به ترتیب به‌منظور تحویل به‌موقع تقاضاهای مشتریان و به‌موجب آن، کاهش هزینه‌های عملیاتی ناشی از تحویل زود هنگام یا دیر هنگام سفارشات، حداقل می‌سازد.

محدودیت (۱)، بیان می‌نماید که برای تحویل تقاضای هر مشتری باید یک پنجره زمانی از میان پنجره‌های زمانی بالقوه، انتخاب گردد. محدودیت‌های (۲) و (۳) به ترتیب تضمین می‌کنند که هر گره به‌جز گره مربوط به انبار ( $i = 0$ ) تنها یک ورودی و یک خروجی دارند. محدودیت (۴) بیان می‌کند که هر وسیله‌ای که وارد گره  $j$  می‌شود ( $j \neq 0$ ) باید آن را نیز ترک نماید. این محدودیت در واقع، پیوستگی مسیرها را تضمین می‌نماید. محدودیت (۵) تأکید می‌نماید که تعداد وسایل نقلیه از هر نوع، محدود خواهد بود. با وجود محدودیت (۶)، تضمین

## ۴-۲ استواری مدل مبتنی بر رویکرد برنامه‌ریزی امکانی

### استوار هیبریدی

در اکثر مسائل واقعی، فرض قطعیت در همه پارامترهای مسئله تقریباً نشدنی است و ممکن است موجب ایجاد ریسک شدید و کنترل‌نشده در پاسخ مسئله گردد. همانطور که اشاره شد؛ در این تحقیق نیز پارامترهای  $\tilde{Q}_i$  و  $\tilde{\beta}_i$  غیرقطعی هستند که در ادامه مبتنی بر رویکرد هیبریدی برنامه‌ریزی امکانی استوار به کنترل آن‌ها پرداخته می‌شود.

برای کنترل عدم قطعیت پارامترهای غیرقطعی  $\tilde{Q}_i$ ، فرض می‌کنیم این پارامترها با توجه به نظر خبرگان و داده‌های تاریخی، به یک مجموعه دوزنقه‌ای شکل محدود می‌شود که اصطلاحاً عدد/داده فازی دوزنقه‌ای<sup>۱۱</sup> (TFN) نامیده می‌شود و با چهار مولفه نمایش داده می‌شوند و قابل بیان هستند (یعنی  $(\tilde{Q}_i = (Q_i^{(1)}, Q_i^{(2)}, Q_i^{(3)}, Q_i^{(4)}))$ ). اگر در یک مسئله بهینه‌سازی، برخی از پارامترها به صورت یک TFN باشند؛ آن‌گاه می‌توان از رویکردهای مختلفی از جمله رویکرد برنامه‌ریزی امکانی برای حل این مسئله بهینه‌سازی استفاده کرد. از سوی دیگر، ممکن است در مسئله پارامترهایی باشند که عدم قطعیت آن‌ها عمیق‌تر است و حتی شناخت در حد بیان به صورت فازی نیز برای آن‌ها وجود ندارد و فقط به صورت یک فاصله بیان می‌شوند. در این صورت در مسئله، عدم قطعیت هیبریدی وجود دارد و باید رویکردهای هیبریدی مورد استفاده شوند که هم‌زمان هم پارامترهای فازی کنترل می‌شوند و هم پارامترهای فاصله ای [Rabbani, Hosseini-Mokhallesun, Ordibazar, et al., 2020; Dehghan, Nikabadi, Amiri, et al., 2018]

در ادامه، رویکرد برنامه‌ریزی امکانی استوار هیبریدی<sup>۱۲</sup> (HRPP) مورد نظر این تحقیق به صورت کلی توضیح داده

کالاهاست. محدودیت (۲۰) بیان می‌کند که زمان بازگشت به انبار نمی‌تواند از زمان تکمیل آخرین دوره زمانی بیشتر گردد. محدودیت (۲۱) زمان ورود به گره  $j$  را محاسبه می‌نماید. سه محدودیت اخیر، از ایجاد زیر تورها جلوگیری می‌کنند.

محدودیت (۲۲) تضمین می‌کند که هیچ استفاده بیش‌ازحدی از دوره‌های زمانی، اتفاق نخواهد افتاد. محدودیت (۲۳) نشان می‌دهد که اگر وسیله نوع  $L$  در دوره زمانی  $k'$  کمان  $(i, j)$  را سفر نماید؛ نمی‌تواند کمان‌هایی را که از گره  $j$  در دوره زمانی  $k$  (به طوری که  $k < k'$ ) شروع می‌شوند؛ سفر کند. محدودیت‌های (۲۴) و (۲۵) به ترتیب جهت محاسبه دیرکرد و زودکرد تحویل تقاضا به هر مشتری، استفاده می‌گردند. محدودیت‌های (۲۶) تا (۲۸) متغیرهای صفر و یک  $BIN'_{i0}$  را محاسبه می‌کنند. با توجه به معادله استفاده‌شده برای محاسبه انتشارات  $CO_2$  در این تحقیق، یکی از فاکتورهای نوآوری این است که آیا یک وسیله در حال حرکت، بارگیری شده است یا خیر. بنابراین با در نظر گرفتن فرضیات مسئله، عدم وجود بار در یک وسیله در حال حرکت تنها روی آخرین کمان از هر تور (کمان منتهی به انبار)، ممکن است. لذا تعریف متغیر باینری مذکور جهت تشخیص وجود یا عدم وجود بار در وسیله‌های در حال حرکت روی کمان‌های منتهی به انبار به منظور محاسبه مقدار صحیح انتشارات گاز و هزینه‌های مربوطه، ضروری است. در رابطه (۲۹)، برگرفته از پژوهش پایه، هزینه واحد مصرف سوخت وسایل نقلیه با در نظر گرفتن وزن آن‌ها و دیگر مولفه‌ها محاسبه می‌شود. در نهایت، محدودیت‌های (۳۰) و (۳۱) متغیرهای تصمیم را توصیف می‌نمایند. لازم به توضیح است که مدل فوق یک مدل غیرخطی آمیخته است؛ ولی نوع غیرخطی بودن روابط به صورت ضرب متغیر باینری در پیوسته است (مثل محدودیت‌های (۲۴) و (۲۵)) که همگی قابل خطی‌سازی هستند. در ادامه به استوارسازی این مدل پرداخته می‌شود.

حل مسئله زمان‌بندی و مسیریابی سبز وسایل حمل‌ونقل با ناوگان ناهمگن شامل لجستیک ...

$$\begin{cases} \text{Min } \sum_{j \in J} \bar{a}_{0j} x_j + \Psi(1 - \alpha)(b_i^4 - b_i^3) \\ \text{s. t.} \\ \sum_{j \in J} a_{ij} x_j \geq \alpha b_i^4 + (1 - \alpha) b_i^3 \quad \forall i \in I \\ x \in X \end{cases} \quad (35)$$

که  $\Psi > 0$  ضریب نقض قیود فازی و  $0.5 \leq \alpha \leq 1$  درجه ضرورت برقراری قیود فازی است. در مسئله مورد نظر این تحقیق، مقدار  $\Psi$  را می‌توان معادل با هزینه کمبود در تحویل سفارش مشتریان، مقداردهی کرد.

حال فرض کنیم فرم وضعیت قیود در مدل HRPP مشخص شده است و به طور کلی به صورت  $Ax \geq b$  حاصل شده است. بر اساس روش برتسیماس و سیم [Bertsimas and Sim, 2004] و هم‌تای استوار<sup>۱۷</sup> (RC) تابع هدف مدل (۳۵) به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{cases} \min_{x: Ax \leq b} z + \Psi(1 - \alpha)(b_i^4 - b_i^3) \\ \text{s. t.} \\ \sum_{j \in J} \bar{a}_{0j} x_j + \\ \max_{\{S \subseteq \{t\} | S \subseteq I, |S| = \Gamma, t \in S\}} \left\{ \sum_{j \in S} \bar{a}_{0j} |x_j| + \right. \\ \left. (\Gamma - |S|) \bar{a}_{0t} |x_t| \right\} \leq z \end{cases} \quad (36)$$

که در آن، مقدار اسمی پارامتر به صورت  $\bar{a}_{0j} = \frac{a_{0j}^L + a_{0j}^U}{2}$  و آشفتگی هر پارامتر از مقدار اسمی به صورت  $\bar{a}_{0j} = a_{0j}^U - \bar{a}_{0j}$  در نظر گرفته می‌شود و سطح محافظه‌کاری برابر با  $0 \leq \Gamma \leq |J|$  است. در پژوهش برتسیماس و سیم بر اساس قضیه قوی دوگانگی<sup>۱۸</sup> اثبات می‌شود که مدل فوق معادل با مدل خطی زیر است:

$$\begin{cases} \min_x z + \Psi(1 - \alpha)(b_i^4 - b_i^3) \\ \text{s. t.} \\ \sum_{j \in J} a_{ij} x_j \geq \alpha b_i^4 + (1 - \alpha) b_i^3 \quad \forall i \in I \\ \sum_{j \in J} \bar{a}_{0j} x_j + \Gamma \cdot q_0 + \sum_{j \in J} p_{0j} \leq t \\ q_0 + p_{0j} \geq \bar{a}_{0j} u_j \quad \forall j \in J \\ -x_j \leq u_j \leq x_j \\ q_0, p_{0j} \geq 0 \quad \forall j \in J \end{cases} \quad (37)$$

که در آن اگر  $\Gamma = 0$  شود؛ آنگاه فقط مقادیر اسمی پارامترها در نظر گرفته می‌شود و ریسک آن، با توجه به در نظر نگرفتن

می‌شود و سپس روی مدل پیشنهادی در بخش قبل برای کنترل عدم قطعیت پارامترهای  $\bar{\beta}_i$  و  $\bar{Q}_i$  مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مدل بهینه‌سازی زیر را در حالت کی در نظر بگیرید:

$$\begin{cases} \text{Min } \sum_{j \in J} \bar{a}_{0j} x_j \\ \text{s. t.} \\ \sum_{j \in J} a_{ij} x_j \geq \bar{b}_i \quad \forall i \in I \\ x \in X \end{cases} \quad (32)$$

که در آن  $\bar{b}_i = (b_i^1, b_i^2, b_i^3, b_i^4)$  و  $\bar{a}_{0j} = [a_{0j}^L, a_{0j}^U]$  به ترتیب داده‌های غیرقطعی مسئله هستند که به صورت اعداد فاصله‌ای و فازی، بیان شده‌اند. ابتدا به قیود و اعداد فازی پرداخته می‌شود که بر اساس رویکرد برنامه‌ریزی امکانی، ابتدا یک سطح  $(\alpha \times 100)\%$  برای برقراری قیود در نظر گرفته می‌شود؛ سپس اندازه ضرورت<sup>۱۳</sup>  $\alpha$  برای قیود به صورت زیر لحاظ می‌شود:

$$\begin{cases} \text{Min } \sum_{j \in J} \bar{a}_{0j} x_j \\ \text{s. t.} \\ \text{Nec}(\sum_{j \in J} a_{ij} x_j \geq \bar{b}_i) \geq \alpha \quad \forall i \in I \\ x \in X \end{cases} \quad (33)$$

با توجه به خواص اندازه ضرورت، مدل (۳۳) معادل با مدل دیفازی شده زیر است [Pishvae, Razmi and Torabi, 2012]:

$$\begin{cases} \text{Min } \sum_{j \in J} \bar{a}_{0j} x_j \\ \text{s. t.} \\ \sum_{j \in J} a_{ij} x_j \geq \alpha b_i^4 + (1 - \alpha) b_i^3 \quad \forall i \in I \\ x \in X \end{cases} \quad (34)$$

یکی از ضعف‌های مدل فوق، آن است که  $\alpha$  به طور ذهنی<sup>۱۴</sup> توسط تصمیم‌گیرنده تعیین گردد و ممکن است تنظیم آن، بهینه نباشد. در پژوهش صورت گرفته توسط پیشوایی و همکاران [Pishvae, Razmi and Torabi, 2012]، برای نخستین بار به این مسئله پرداخته شده است. در مدل پیشنهادی آن‌ها، با در نظر گرفتن دو مفهوم استواری موجه‌بودن<sup>۱۵</sup> و استواری بهینگی<sup>۱۶</sup>، سطوح بهینه مقدار  $\alpha$  بصورت فعالانه در خود مدل به دست آورده می‌شود و مدل زیر حاصل می‌شود:

## ۵. رویکرد حل فراابتکاری

بسیاری از مسائل بهینه‌سازی ترکیبی شامل VRP که در دسته مسائل NP-hard قرار می‌گیرند؛ نمی‌توانند برای مسائل ابعاد بزرگ دنیای واقعی در زمان محاسباتی منطقی حل شوند. بنابراین، جهت حل آن‌ها، رویکردهای ابتکاری و فراابتکاری به‌منظور دستیابی به راه‌حل‌های بهینه یا نزدیک به بهینه در زمان محاسباتی منطقی، موردنیاز هستند. در ادبیات نیز الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل VRP مورد استفاده قرار گرفته‌اند که می‌توان به تحقیقات [Koç, Bektaş, Jabali, et al., 2015; Xiao and Konak, 2015; Niu, Yang, Chen, et al., 2018] و فرح‌بخش و همکاران (۱۳۹۶) اشاره نمود. پس از بررسی تحقیقات گذشته در ادبیات VRP، دریافته‌ایم که الگوریتم‌های جمعیت‌محوری مانند GA توسط محققین، بیشتر در نظر گرفته شده‌اند. این بدان دلیل است که با توجه به چارچوب ارائه جواب، در نظر گرفتن یک جمعیتی از جواب‌ها (یک مجموعه‌ای از جواب‌ها) شدنی است و جواب نزدیک به بهینه از طریق عملگرهای مناسب و نیز براساس مکانیزمی مانند چرخ رولت/نخبه‌گرایی، به دست می‌آیند [Alshamsi and Diabat, 2017; Varun Kumar and Panneerselvam, 2017]. بنابراین، علی‌رغم اینکه با توجه به ساختار شبکه‌ای مسئله، الگوریتم‌های دیگری، قابلیت حل این مسئله را دارند؛ اما با توجه به مرور ادبیات و براساس تجربه ملاحظه می‌شود که الگوریتم ژنتیک معمولاً عملکرد بهتری داشته است [Tang and Xie, 2007; Tasan and Gen, 2012; Lin, Choy, Ho, et al., 2014; Alshamsi and Diabat, 2017; Varun Kumar and Panneerselvam, 2017; Tirkolaee, Hosseinabadi, Soltani, et al., 2018]. در این مقاله، همانند پژوهش پایه انتخاب شده، الگوریتم ژنتیک جهت حل مسئله در ابعاد بزرگ، استفاده شده است. بنابراین، حل این مسئله مبتنی بر روش فراابتکاری پیشنهادی پژوهش پایه [Foroutan, Rezaeian and Mahdavi, 2020]، صورت می‌پذیرد؛ با این تفاوت که

آشفته‌گی<sup>۱۹</sup> پارامترها، بسیار زیاد است و هرچه  $|J| \rightarrow \Gamma$  محافظه‌کاری مدل بیشتر می‌شود.

حال با فرض آن که پارامترهای غیر قطعی مسئله به صورت

$$\bar{Q}_i = (Q_i^1, Q_i^2, Q_i^3, Q_i^4) \quad \text{و}$$

$$\bar{\beta}_i = [\beta_i^L, \beta_i^U]; \hat{\beta}_i = \frac{\beta_i^L + \beta_i^U}{2}, \hat{\beta}_i = \frac{\beta_i^U - \beta_i^L}{2}$$

بر اساس رویکرد HRPP در مدل (۳۷) همتای استوار مدل نهایی مسئله این تحقیق، به صورت زیر است:

$$\min Z + \psi \sum_{i \in I} (1 - \alpha)(Q_i^4 - Q_i^3) \quad (38)$$

s.t.

$$Z \geq \sum_{i=0}^n \sum_{l=1}^p \sum_{k=1}^K \left( \begin{aligned} &\varepsilon_{i0}^{lk} \cdot (1 - BIN_{i0}^l) \cdot d_{i0}^{lk} \\ &+ \varepsilon_{i0}^{lk} \cdot BIN_{i0}^l \cdot LC_{i0}^{lk} \cdot d_{i0}^{lk} \\ &+ \sum_{j=1}^n \varepsilon_{i0}^{lk} \cdot LC_{ij}^{lk} \cdot d_{ij}^{lk} \end{aligned} \right) \cdot \omega$$

$$+ \sum_{l=1}^p \sum_{j=1}^n F_L \cdot X_{0j}^l + \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{l=1}^p \sum_{k=1}^K (\alpha_l + c \cdot \rho_{ij}^l) \cdot d_{ij}^{lk} \quad (39)$$

$$- \sum_{i=0}^n \bar{\beta}_i y_i + q + \Gamma \sum_{i=0}^n p_i$$

$$+ \sum_{i=1}^n \sum_{tw \in TW_i} (\delta_{i tw} \cdot E_{i tw} + \varphi_{i tw} \cdot T_{i tw})$$

$$q + p_i \geq \hat{\beta}_i y_i \quad \forall i \in N \quad (40)$$

$$\sum_{l=1}^p \sum_{i=0}^n y_{ij}^l - \sum_{l=1}^p \sum_{i=0}^n y_{ji}^l \geq \alpha Q_j^4 \quad (41)$$

$$+ (1 - \alpha) Q_j^3 \quad \forall j \in N$$

$$[\alpha Q_j^4 + (1 - \alpha) Q_j^3] \cdot X_{ij}^l \leq y_{ij}^l \leq$$

$$(C_l - [\alpha Q_j^4 + (1 - \alpha) Q_j^3]) \cdot X_{ij}^l \quad (42)$$

$$\forall i, j \in N, i \neq j, \forall l \in P$$

$$r_{ij}^l \leq (C_l - [\alpha Q_j^4 + (1 - \alpha) Q_j^3]) \cdot X_{ij}^l \quad (43)$$

$$\forall i, j \in N, i \neq j, \forall l \in P$$

$$a_i + s_{1i} \cdot [\alpha Q_j^4 + (1 - \alpha) Q_j^3] + s_{2i} \cdot y_i \leq l_i \quad (44)$$

$$\forall j \in N$$

$$q \text{ و } p_i \geq 0 \quad \forall i \in N \quad (45)$$

$$0.5 \leq \alpha \leq 1$$

و محدودیت‌های (۱) تا (۵) - (۸) - (۱۱) تا (۱۸) - (۲۰) تا (۳۱)



می‌دهد که  $k = 1, 2, \dots, m$  تعداد دوره‌های زمانی در دسترس را تعیین می‌نماید. همچنین،  $j$  و  $j+1$  ترتیب بازدید را برای دو گره متوالی نشان می‌دهند طوری که برای هر مسیر،  $j = 1$  و  $j = w_c$  (اولین و آخرین گره بازدید شده از هر مسیر) مرتبط با آن انبار هستند. هر آرایه  $S_{j,j+1}^{c,k}$  مقدار یک می‌گیرد اگر کمان اتصال کننده بین گره‌های  $j$  و  $j+1$  روی مسیر  $c$  در دوره زمانی  $k$  سفر شود و در غیر این صورت، صفر می‌گیرد ( $j = 1, 2, \dots, w_c - 1, \forall c, k$ ). در ماتریس  $S$ ، هر ستون، کمان بین گره‌های بازدید شده  $j$  و  $j+1$  روی آن مسیر و هر ردیف، دوره زمانی  $k$  را نشان می‌دهد. زیرماتریس سوم، تخصیص وسایل نقلیه را به مسیرها، نشان می‌دهد (سمت وسط-بالا)؛ چهارمین زیرماتریس، مقدار کالاهای بازگشتی جمع‌آوری شده از هر مشتری را نشان می‌دهد (سمت راست-بالا) و پنجمین زیرماتریس، زیرماتریسی از زمان‌های ورود و خروج به/از گره‌هاست (سمت چپ-پایین). در زیرماتریس اخیر، هر ستون شامل زمان‌بندی ورود و خروج همراه با کمان  $(i, j)$  مربوط به ستون‌های زیرماتریس  $S$  می‌شود. بنابراین، در هر ستون، هر عنصر از اولین سطر، زمان خروج از گره  $i$  را نشان می‌دهد؛ هر عنصر دومین سطر، زمان ورود به گره  $j$  را نشان می‌دهد و هر عنصر سومین سطر، زمان خروج از گره  $j$  را ارائه می‌کند.

جهت واضح نمودن توضیحات، با در نظر گرفتن شکل ۳ به منظور ارضای تمام تقاضاها، سه مسیر جداگانه  $c = 1, 2, 3$  و دو نوع وسیله نقلیه  $l = 1, 2$  در نظر گرفته می‌شوند. برای مثال در زیرماتریس سمت چپ-بالا از شکل ۳، یعنی:

۰	۳	۰	۲	۱	۰	۴	۰
---	---	---	---	---	---	---	---

گره‌های صفر، گره‌های انبار هستند. هر نوع وسیله، مسیر خود را از گره صفر (انبار) شروع نموده و پس از طی مسیر (بازدید گره‌های طول مسیر)، به آن برمی‌گردد. به عبارت دیگر، سه مسیر مجزا به ترتیب از چپ به صورت  $(0 \ 3 \ 0)$  و  $(0 \ 2 \ 1 \ 0)$

یک فاز اولیه پیش از آن اضافه می‌شود که به صورت تصادفی، یک پنجره زمانی از مجموعه پنجره‌های زمانی بالقوه برای تحویل سفارش هر مشتری، انتخاب می‌گردد. این الگوریتم به صورت ادامه، توضیح داده می‌شود.

## ۵-۱ نمایش راه‌حل ارائه شده

در این بخش، رویکرد اعمال شده برای نمایش یک راه‌حل تصادفی شامل مسیریابی و زمان‌بندی مربوطه، به‌طور دقیق توصیف می‌گردد. نمایش راه‌حل یکی از مهم‌ترین گام‌ها برای پیاده‌سازی یک الگوریتم است. راه‌حل کد شده از مسئله پیشنهادی به شکل ماتریس یا کروموزوم، ارائه می‌گردد که شامل تعدادی زیرماتریس می‌شود. هر کروموزوم انفرادی از آرایه‌های واحدی ساخته می‌شود که آن را از دیگر کروموزوم‌ها، متفاوت می‌سازد. در شکل ۳ برگرفته از پژوهش پایه، یک کروموزوم تصادفی با زیرماتریس‌های متفاوت، علامت‌گذاری شده است. اولین زیرماتریس از آن کروموزوم، ماتریس  $R = \{R_i^c\}$  نامیده می‌شود که بخش مسیریابی راه‌حل را ارائه می‌کند (سمت چپ-بالا). هر ماتریس  $R_i^c = \{r^c(1), \dots, r^c(w_c)\}$  مسیر مجزایی را نشان می‌دهد طوری که  $c = 1, 2, \dots, h$  نشان‌دهنده تعداد مسیر است و  $l = 1, 2, \dots, p$  نوع وسیله نقلیه استفاده شده برای سفر در آن مسیر را نشان می‌دهد. همچنین،  $r^c(j)$  شماره  $j$  امین گره بازدید شده را روی مسیر، مشخص می‌نماید و  $w_c$  شماره گره‌ها را روی  $c$  امین مسیر نشان می‌دهد. از آنجایی که انبار همیشه با شماره صفر، تعیین شده؛ لذا اولین و آخرین گره بازدید شده از هر مسیر خواهد بود و گره‌های مابین، کروموزوم‌ها را ارائه می‌کنند. زیرماتریس دوم از کروموزوم ارائه شده، ماتریس  $S = \{S^c\}$  نامیده می‌شود که بخش زمان‌بندی راه‌حل را توصیف می‌نماید (سمت چپ-وسط). هر ماتریس باینری  $S^c = \{S_{j,j+1}^{c,k}\}$  زمان‌بندی سفر را از  $c$  امین مسیر نشان

و (0 4 0) خواهد بود. هر یک از این مسیرها توسط انواع وسایل نقلیه، پیموده می شوند که این که کدام مسیر توسط کدام نوع وسیله نقلیه، طی شده است؛ توسط زیرماتریس سمت وسط-بالا یا

۱	۲	۱
---	---	---

تعیین می گردد (زیرماتریس نحوه تخصیص مسیرها به انواع وسایل). اولین آرایه از این زیرماتریس برابر ۱ است که نشان می دهد که اولین مسیر توسط وسیله نوع ۱، پیموده شده است و به طور تحلیل مشابه، دومین مسیر توسط وسیله نوع ۲ و سومین مسیر توسط وسیله نوع ۱، طی شده است.

حل مسئله زمان‌بندی و مسیریابی سبز وسایل حمل‌ونقل با ناوگان ناهمگن شامل لجستیک ...

۰	۳	۰	۲	۱	۰	۴	۰	*	۱	۲	۱	*	۲۳	۳۴	۳۷۴	۳۰
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
۰	۷۱۱	۰	-۷۵۰	۷۹۴	۰	-۷۷۹	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
-۷۳۴	۷۴۴	-۷۱۷	-۷۷۵	۷۰۸	-۷۳۰	-۷۹۸	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
۷۱۱	۷۴۴	-۷۵۰	۷۱۲	۷۰۸	-۷۷۹	-۷۹۸	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

شکل ۳. یک کروموزوم تولیدشده تصادفی (برگرفته از Foroutan, Rezaeian and Mahdavi, 2020)

توصیف‌شده در ادامه، محاسبه می‌گردد: هر مسیر همیشه شامل دو صفر ثابت در شروع و پایان آن می‌شود که به  $n_{fixed} = 2$  اشاره می‌کند. حداکثر تعداد مسیرهای ممکن برای یک مسئله خاص از طریق معادله (a) محاسبه می‌گردد. این مقدار برابر با حداقل تعداد مشتریان ( $n$ ) و کل تعداد وسایل در دسترس است.

$$\max(R) = \min\left(n, \sum_{l=1}^p N_l\right) \quad (a)$$

معادله (b)، تعداد صفرهای میانی را تعیین می‌نماید که برای یک مسئله، ثابت است ( $n_{mid.zeros}$ ). این صفرهایی که بین اولین و آخرین صفرهای ثابت، قرار می‌گیرند؛ نقش جداکننده‌های بین مسیرهای متمایز را در هر راه‌حل ایفا می‌کنند.

$$n_{mid.zeros} = \max(R) - 1 \quad (b)$$

در نهایت، تعداد آرایه‌ها، بخش مسیریابی (یا ماتریس R) از هر راه‌حل را در یک مسئله خاص، ارائه می‌کند که به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$n_t = n + n_{fixed} + n_{mid.zeros} \quad (c)$$

با در نظر گرفتن این حقیقت که در هر ماتریس R واحد، هر صفر میانی که دو مسیر مختلف را جدا می‌کند؛ بین هر دوی آن‌ها، مشترک است؛ اگر تعداد آرایه‌های  $n_{mid.zeros}$  از تعداد کل آرایه‌های همه مسیرها، کسر گردد؛ تعداد اختلاف برابر با  $n_t$  خواهد بود:

$$n_t = \sum_{c=1}^{\max(R)} \sum_{j=1}^{w_c} j - n_{mid.zeros} \quad (d)$$

به عبارتی، مسیر (0 3 0) را وسیله نوع ۱، مسیر (0 2 1 0) را وسیله نوع ۲ و مسیر (0 4 0) را وسیله نوع ۱، طی می‌نماید. چنانچه زیرماتریس  $R = \{R_l^c\}$  را بخواهیم برای این مثال با سه مسیر  $c=1,2,3$  و دو نوع وسیله نقلیه  $l=1,2$ ، بنویسیم؛ به صورت زیر خواهد بود:

$$R_1^1 = \{r^1(1)=0, r^1(2)=3, r^1(3)=0\}$$

$$R_2^2 = \{r^2(1)=0, r^2(2)=2, r^2(3)=1, r^2(4)=0\}$$

$$R_1^3 = \{r^3(1)=0, r^3(2)=4, r^3(3)=0\}$$

بقیه  $R_l^c$  ها مانند  $R_2^1$  صفر هستند چراکه برای همین  $R_2^1$  (یعنی اولین مسیر با وسیله نقلیه نوع ۲)، در واقع اولین مسیر توسط وسیله نقلیه نوع ۲، پیموده نمی‌شود و اولین مسیر تنها توسط وسیله نقلیه نوع ۱، طی می‌گردد. محتوای ماتریس S در رابطه با همان مسیر بیان می‌کند که کمان بین انبار و گره ۲ و نیز کمان بین گره‌های ۲ و ۱، هر دو در دوره زمانی ۱، سفر خواهند شد و کمان در رابطه با گره ۱ به انبار در اولین و دومین دوره‌های زمانی با هم، سفر می‌شوند (ستون‌های سوم به پنجم از ماتریس S). همچنین، تعداد کالاهای بازگشتی تعیین شده جهت جمع‌آوری از گره‌های ۲ و ۱ به ترتیب برابر ۳۴ و ۳۷۴ هستند. در نهایت، زمان‌های ورود و خروج به/از هر گره روی این مسیر می‌تواند در سه سطر پایینی از کروموزوم پیشنهادی، مشاهده گردد.

برای هر مسئله، تعداد آرایه‌ها در بخش مسیریابی، ثابت است و به صورت  $n_t$  نشان داده می‌شود. تعداد آرایه‌ها، با روابط

تضمین می‌کند که همه کمان‌ها از هر مسیر حداقل در یک دوره زمانی، سفر خواهند شد. محدودیت (۴۹) اطمینان ایجاد می‌نماید که اگر  $s_{j,j+1}^{c,k} = 1$ ، آنگاه همه عناصر روی گوشه بالا سمت راست ماتریس  $S$  باید صفر باشند؛ در غیر این صورت، محدودیت (۵۰) همین عمل را برای گوشه پایین سمت چپ انجام می‌دهد اگر  $s_{j,j+1}^{c,k} = 1$ . محدودیت (۵۱)، مقدار تجمعی به‌دست‌آمده برای هر ستون از هر مسیر را در ماتریس  $S$  محاسبه می‌نماید و آن را  $A_{j,j+1}^c$  می‌نامد. با توجه به این محدودیت، اگر  $k'$  به‌عنوان اولین دوره زمانی انتخاب شده برای سفر کمان  $(j, j+1)$  باشد؛ برای هر راه حل شدنی، محدودیت (۵۲) جهت تعیین دوره‌ای که یک کمان در بیشتر از یک دوره زمانی، سفر می‌شود؛ باید وجود داشته باشد. این نشان می‌دهد که هیچ وسیله‌ای مجاز نیست در حین سفر بین دو گره، توقف نماید. به‌عبارت‌دیگر، ستون‌هایی از ماتریس  $S$  که عدد یک بیشتر از یک‌بار تکرار می‌شود؛ مجاز نیستند هیچ فاصله‌ای بین آن‌ها وجود داشته باشند و همه اعداد یک در ستون منفردی باید در ردیف‌های متوالی قرار گیرند. در هر راه حل شدنی، برای هر مسیر واحد در ماتریس  $R$ ، یک مسیر مرتبط واحدی در ماتریس  $S$  وجود دارد که از گوشه بالا سمت چپ شروع می‌گردد و مسیرش را تا گوشه پایین سمت راست، ادامه می‌دهد. اشاره می‌گردد که حداکثر تعداد کمان‌هایی که ممکن است در بیشتر از یک دوره زمانی واحد سفر گردد؛ برابر با  $m-1$  در هر مسیر و  $h.(m-1)$  برای هر راه‌حل است.

## ۲-۵ تولید یک راه‌حل تصادفی

پس از تعریف مسئله، گام بعدی برای پیاده‌سازی GA، ایجاد تابعی است که راه‌حل‌های تصادفی را تولید نماید. لذا در ابتدا، حداقل تعداد مسیرهای لازم برای تشکیل یک راه‌حل شدنی براساس تعداد وسایل در دسترس از هر ظرفیت و مقدار تقاضاها، محاسبه می‌شود. سپس، حداکثر تعداد مسیرهای ممکن

در نتیجه، ابعاد ماتریس  $R$  به‌صورت  $1 \times n_t$  است. همچنین، محاسبات مربوط به اندازه ماتریس  $S$ ، به‌صورت زیر است:

$$Columns_s = \sum_{c=1}^{\max(R)} \left( \sum_{j=1}^{w_c} j - 1 \right) (e)$$

معادله بالا، تعداد ستون‌های موردنیاز ماتریس  $S$  را در هر راه‌حل منفرد، محاسبه می‌نماید. بنابراین، ابعاد ماتریس  $S$  به‌صورت  $m \times Columns_s$  خواهد بود. می‌توان ثابت نمود که رابطه (f) همیشه بین  $n_t$  و  $Columns_s$  وجود دارد.

$$n_t = Columns_s + 1 (f)$$

باید اشاره نمود که ابعاد ماتریس  $R$  و  $S$  برای هر مسئله خاص که با معادلات بیان‌شده، محاسبه می‌گردد؛ همواره ثابت خواهد بود و با تغییر تعداد مسیرها، تغییر نمی‌کند. در راه‌حل‌های جدید، تغییرات احتمالی در تعداد مسیرها با انتقال صف‌های میانی، انجام خواهد شد. برای داشتن ماتریس‌های شدنی  $R$  و  $S$ ، محدودیت‌های زیر باید ارضا گردند:

$$R - \{0\} = N - \{0\} (46)$$

$$r^c(1) = 0, r^c(w_c) = 0, \forall c (47)$$

$$\sum_{k=1}^K s_{j,j+1}^{c,k} \geq 1 \quad \forall c, j=1, 2, \dots, w_c - 1 (48)$$

$$1 - s_{j,j+1}^{c,k} \geq 1 \quad \forall c, j=1, 2, \dots, w_c - 1 (49)$$

$$1 - s_{j,j+1}^{c,k} \geq s_{j',j'+1}^{c,k'} \quad \forall c, j=1, 2, \dots, w_c - 1, j' < j, k' < k (50)$$

$$\sum_{k=1}^K s_{j,j+1}^{c,k} = A_{j,j+1}^c \quad \forall c, j=1, 2, \dots, w_c - 1 (51)$$

$$\sum_{k=k'+A_{j,j+1}^c}^K s_{j,j+1}^{c,k} = 0 (52)$$

$$\forall c, j=1, 2, \dots, w_c - 1 \text{ if } A_{j,j+1}^c > 1, k = k'$$

محدودیت (۴۶) نشان می‌دهد که تمام مشتریان باید تنها یک‌بار ملاقات گردند. محدودیت (۴۷) بیان می‌کند که اولین و آخرین گره از هر مسیر منفرد، انبار است. محدودیت (۴۸)

فرموله می‌کند؛ به صورت ادامه است: هزینه کل انتشارات CO<sub>2</sub>، هزینه‌های ثابت، هزینه‌های متغیر شامل هزینه مصرف سوخت و کل هزینه‌های دیرکرد و زودکرد منهای کل درآمد به دست آمده توسط جمع آوری کالاهای بازگشتی. دو هزینه اضافی در قالب استراتژی مجازات به تابع برازش، اضافه می‌شوند. اولین هزینه اضافی، جریمه‌ای برای راه‌حل‌های نشدنی است که به تابع برازش تحمیل خواهد شد اگر یک راه‌حل تولیدشده تصادفی، نشدنی باشد. به طوری که کل وزن کالاهای تخصیص داده شده به هر وسیله در یک راه‌حل تولیدشده تصادفی، محاسبه و جریمه‌ای برابر با  $M$  به ازای هر تجاوز از ظرفیت وسایل، در نظر گرفته خواهد شد. این جریمه به صورت  $Penalty 1$  نامیده می‌شود:

$$Penalty 1 = M \times \pi \quad (53)$$

که  $\pi$ ، تعداد زمان‌ها را ارائه می‌نماید وقتی که تجاوزی از ظرفیت وسایل نقلیه، رخ داده باشد. دومین هزینه اضافی، جریمه‌ای برای هر تجاوز از زمان در دسترس برای هر دوره است. هنگامی که در یک راه حل، کل زمان گذرانده شده جهت سفر کمان‌های مختلف در یک دوره زمانی واحد روی هر مسیر بیشتر از طول آن دوره زمانی گردد؛ جریمه‌ای به نام  $Penalty 2$  به تابع برازش، اضافه خواهد شد.

$$Penalty 2 =$$

$$\Lambda \cdot \sum_{c=1}^n \sum_{k=1}^K \max \left\{ 0, \sum_{j=1}^{w_c-1} T_{j,j+1}^{c,k} - (e_k - b_k) \right\} \quad (54)$$

در معادله بالا،  $T_{j,j+1}^{c,k}$  بخش زمان است طوری که کمان  $(j, j+1)$  از مسیر  $c$  در دوره زمانی  $k$  سفر می‌شود. همچنین،  $\Lambda$  ضریب جریمه برای هر استفاده بیش از حد از یک دوره زمانی است. مجموع تمام هزینه‌های اشاره شده از تابع هدف مدل ریاضی پیشنهادی به اضافه دو هزینه‌های توصیف شده اخیر، تابع برازش را تشکیل می‌دهند.

محاسبه خواهد شد که برابر با حداقل تعداد مشتریان و تعداد وسایل در دسترس در ناوگان است. در این مرحله، یک ماتریس تصادفی  $R$  و تخصیص‌های وسایل نقلیه مربوطه جهت مسیریابی تولید می‌شوند. گام بعدی، تعیین مقدار کالاهای بازگشتی است که از هر مشتری جمع آوری خواهد شد. این مقادیر با توجه به ظرفیت خالی وسایل نقلیه روی جاده‌ها موقعی که مشتریان را ملاقات می‌کنند؛ مشخص خواهد شد. به طوری که در هر گره، ظرفیت خالی وسیله بازدید شده موقع پایان فرایندهای تحویل، محاسبه می‌گردد و با مقدار محصولات بازگشتی بالقوه روی آن گره ( $R_i$ ) مقایسه خواهد شد. حداقل این دو مقادیر برابر با حداکثر تعداد کالاهای بازگشتی خواهد بود که وسیله می‌تواند واقعاً از آن گره، دریافت نماید. اگر حداقل به دست آمده بیشتر از صفر باشد؛ مقداری تصادفی بین صفر و مقدار حداقل به دست آمده، مقدار دقیق کالاهای بازگشتی را تعیین خواهد کرد که از آن گره جمع آوری خواهد شد؛ در غیر این صورت، آن مقدار برابر با صفر خواهد بود. با استفاده از این فرایند، تضمین می‌شود که مقدار کالاهای بازگشتی از هر مشتری بیشتر از ظرفیت وسایل بازدید شده نخواهد بود. در گام نهایی، یک ماتریس تصادفی  $S$  مرتبط با مسیرهای موجود از طریق یک فرایند تصادفی از پیش طراحی شده، تولید خواهد شد و محاسبات مرتبط با زمان‌های ورود و خروج براساس آن، انجام خواهد شد.

### ۳-۵ تابع ارزیابی

در این مرحله، تابعی برای محاسبه مقدار هدف به نام تابع برازش تعریف می‌گردد. این تابع برای ارزیابی برازش هر کروموزوم واحد تولیدشده در هر تکرار منفرد از الگوریتم متاهوریستیک پیشنهادی، استفاده می‌گردد و آن‌ها را با یکدیگر از نظر کیفیت و بهینگی، مقایسه می‌نماید. هزینه‌های مختلف که تابع برازش را به صورت یک عبارت ریاضی شامل چند قسمت،

## ۵-۴ تنظیم پارامترها

پیچیده هستند و همچنین تعداد آزمایشات مورد نیاز به صورت نمایی با افزایش تعداد پارامترها، افزایش خواهند یافت؛ لذا اعمال روش تاکوچی از این چالش‌ها بسیار جلوگیری می‌نماید [Taguchi, 1986]. این کار می‌تواند توسط اجرای تعداد محدودی از آزمایشات با استفاده از طراحی خاصی از آرایه‌های مرتب جهت بررسی تمام فضای پارامترها، انجام شود و بهترین مقادیر در زمان بسیار کمتر، پیدا شود. تعداد ۲۷ آزمایش متفاوت برای GA انجام شدند و هر کدام، ده بار تکرار شدند. شکل نرمالایز شده از متوسط مقادیر حاصل برای تابع هدف و زمان‌های محاسباتی به‌عنوان معیار تصمیم‌گیری جهت یافتن ترکیب بهینه پارامترها، استفاده شد.

نسبت سیگنال به نویز  $(S/N)^2$  در روش تاکوچی، تغییرات متغیر پاسخ را نشان می‌دهد. هدف، همیشه یافتن حداکثر مقدار نسبت  $S/N$  است به دلیل این‌که این نسبت، تأثیر فاکتورهای غیرقابل کنترل یا نویزی را حداقل می‌نماید و راه حل را پایدارتر خواهد ساخت. با توجه به تاکوچی، توابع هدف می‌توانند به سه دسته، تقسیم گردند: کوچک‌تر بهتر، بزرگ‌تر بهتر و اسمی بهترین. در این تحقیق، تابع هدف کوچک‌تر بهتر اعمال شده که از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\frac{S}{N} \text{ ratio} = -10 \times \log_{10} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) (g)$$

که  $y_i$  انحراف نرمالایز شده مقادیر تابع هدف از کمترین مقدار حاصل برای هر شرایط آزمایشی  $g$  است [Sun, 2007]. نتایج طراحی آزمایشات تاکوچی در جدول ۲ نشان داده شدند. اندازه جمعیت، بیشترین تأثیر را روی کیفیت راه‌حل‌ها و زمان‌های محاسباتی دارد و احتمال جهش، کمترین تأثیر را روی شاخص‌های یکسان خروجی خواهد داشت.

جدول ۲. بهترین مقادیر پارامترهای کنترل‌کننده الگوریتم حل

فاکتور	بهترین مقدار
$Pop_{size}$	۱۵۰

تنظیم پارامترها یکی از مهم‌ترین قسمت‌ها در حین طراحی متاهوریستیک‌هاست که تأثیر مهمی روی دستیابی به جواب‌های مناسب دارد. چون مقادیر مختلف از پارامترهای کنترل‌کننده، روی دو شاخص اصلی محاسباتی (کیفیت جواب و زمان حل) تأثیر می‌گذارد؛ لذا، مجموعه‌ای از آزمایشات به نام کالیبراسیون جهت تعیین ترکیبی بهینه از این پارامترهای کنترل‌کننده، انجام می‌گردد. در این تحقیق مشابه پژوهش پایه، پارامترهای اصلی کنترل‌کننده الگوریتم، عبارت‌اند از: اندازه جمعیت ( $Pop_{size}$ )، حداکثر تعداد نسل‌ها ( $G_{max}$ )، احتمال تولیدمثل ( $P_c$ ) و احتمال جهش ( $P_m$ ). معمولاً هر پارامتر روی شاخص‌های محاسباتی در فاصله خاصی از مقادیرشان، تأثیر می‌گذارند و آن تأثیر برای خارج از آن فاصله به دلیل جزئی بودن، نادیده گرفته می‌شود. شاخص‌های محاسباتی استفاده شده در این بخش، میانگین راه‌حل‌های بهینه از تابع هدف و میانگینی از زمان‌های محاسباتی در ۵۰ تکرار جدا برای هر پارامتر هستند. پنج مسئله آزمایشی مجزا با ترکیبات متفاوت از  $l$  و  $k$  با این هدف، اعمال شدند.

در این بخش، ابتدا محدوده اثر برای هر پارامتر به‌طور نسبی، مشخص و سپس، با طراحی آزمایشات چندجانبه، اثرات متقابل از آن‌ها، آنالیز می‌گردد و در نهایت، ترکیب بهینه، تعیین خواهد شد. هر پارامتر، جداگانه آزمایش شد که خروجی‌ها عبارت‌اند از:  $Pop_{size}$  بهترین عملکرد را وقتی دارد که مقادیر را از فاصله [۱۵۰، ۲۵۰] می‌گیرد. مقادیر معمول برای  $G_{max}$  برابر ۴۰، ۷۰ و ۱۰۰ هستند. همچنین، نتایج نشان می‌دهند که محدوده‌های مناسب برای  $P_c$  و  $P_m$  به ترتیب [۰/۷۵، ۰/۹۵] و [۰/۰۶، ۰/۱۲] هستند. در نهایت، جهت تعیین بهترین مقادیر هر پارامتر در حین اثر متقابل به همدیگر، طراحی آزمایشات براساس روش تاکوچی با استفاده از داده‌های حاصل از مرحله قبلی، تنظیم شد. از آنجایی که طراحی آزمایشات جهت اجرا،

حل مسئله زمان‌بندی و مسیریابی سبز وسایل حمل‌ونقل با ناوگان ناهمگن شامل لجستیک ...

می‌گیرند. مسائل آزمایشی شماره ۱ تا ۵، مسائل ابعاد کوچک، شماره ۶ تا ۱۰، مسائل ابعاد متوسط و شماره ۱۱ تا ۱۵، مسائل ابعاد بزرگ هستند.

۴۰  $G_{max}$

۰/۸۵  $P_c$

۰/۰۸  $P_m$

همچنین، برای داده‌های غیرقطعی تقاضا ( $\tilde{Q}_i$ ) و ارزش هر واحد محصول جمع‌آوری‌شده/بازگشتی ( $\tilde{\beta}_i$ )، نرخ عدم قطعیت ۳۰٪ در نظر گرفته شده است. به این معنا که برای نرخ بازگشت تصادفی، مقدار اسمی تا ۳۰٪ بیشتر یا کمتر می‌شود. مقدار تقاضا به صورت یک عدد فازی مثلثی (حالت خاص ذوزنقه‌ای) بیان می‌شود که مقدار اسمی به عنوان ارتفاع آن و مقدار اسمی منهای ۳۰٪ به عنوان بال چپ و مقدار اسمی به علاوه ۳۰٪ به عنوان بال راست، در نظر گرفته می‌شود. لازم به توضیح است که  $F$  (ضریب استواری مدل) که می‌تواند بین صفر تا  $N$ ، مقدار داشته باشد؛ برابر با  $N/2$  در نظر گرفته شده است ( $n$  تعداد مشتریان است). همچنین،  $\psi$  را به عنوان جریمه کمبود در نظر گرفته ایم که روی آن، تحلیل حساسیت ارائه خواهد شد.

## ۶. نتایج عددی

در این بخش، آزمایشات عددی جهت ارزیابی الگوریتم پیشنهادی و اثبات کارایی و اثربخشی آن، انجام می‌گردد. لذا، ابتدا مجموعه‌ای از مسائل آزمایشی، تولید می‌شوند. پس از آن، نتایج عددی حاصل از الگوریتم حل، ارزیابی می‌گردند.

### ۶-۱ تولید داده‌ها

برای ارزیابی عملکرد الگوریتم، محاسبات آزمایشی انجام شده تا عملکرد متاهوریستیک ارائه شده در مقایسه با بهترین جواب‌ها توسط سالور دقیق CPLEX از نرم افزار GAMS، بررسی گردد. در این مقایسات، دو فاکتور: کیفیت جواب (بهترین مقدار تابع هدف) و زمان‌های محاسباتی، بررسی شده است. جهت نشان دادن اثربخشی الگوریتم، مسائل در ابعاد مختلفی، در نظر گرفته شده‌اند. مسائل آزمایشی تولیدشده براساس ابعاد در سه دسته بندی مختلف، قرار می‌گیرند که در جدول ۳ آورده شده‌اند. همچنین، فواصل و توابع توزیعی که جهت تولید پارامترهای موردنیاز در حالت اسمی، اعمال می‌شوند؛ توصیف می‌گردند: جهت تولید عناصر ماتریس  $v_{i,j}^k$  توزیع یکنواخت گسسته [۲،۸] استفاده شد و مقادیر تولیدشده در عددی ضرب شدند. عناصر  $D_{i,j}$  توسط توزیع یکنواخت گسسته [۲،۶] به دست آمدند.  $Q_i$  و  $R_i$  ها به ترتیب در محدوده‌های [۱۰۰،۵۰۰] و [۱۰،۵۰] توزیع می‌شوند.  $[ST_{inv}, FT_{inv}]$  ها از بازه‌های [۱،۳] و [۱/۵،۳/۵] و [۲،۴]، انتخاب می‌شوند. همچنین، عناصر ماتریس‌های  $\delta_{inv}$  و  $\varphi_{inv}$  به ترتیب مقادیر  $\{40, 50, 100, 150\}$  و  $\{100, 150, 200, 300\}$

جدول ۳. ابعاد مسائل آزمایشی تولیدشده

شماره مسئله	$n$	$K$	$L$	$TW$
$N01$	۴	۲	۲	۲
$N02$	۴	۳	۳	۲
$N03$	۵	۲	۳	۲
$N04$	۵	۳	۲	۲
$N05$	۵	۳	۳	۲
$N06$	۸	۳	۳	۳
$N07$	۹	۳	۳	۳
$N08$	۱۰	۴	۳	۳
$N09$	۱۱	۵	۴	۳
$N10$	۱۲	۶	۵	۳
$N11$	۱۴	۶	۵	۵
$N12$	۱۶	۸	۶	۵

به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، دو معیار درصد خطای نسبی<sup>۲۱</sup> (*REP*) و درصد انحراف نسبی<sup>۲۲</sup> (*RDP*) در نظر گرفته شد. چون در پنج مسئله آزمایشی طراحی شده از ۱۵ مسئله، در مسائل ابعاد کوچک، بهینه‌ترین جواب‌ها به دست آمده‌اند؛ معیار *REP* جهت ارزیابی عملکرد الگوریتم *GA* در مسائل با چنین ابعادی، محاسبه شد. این معیار به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$REP = \frac{|A_t - A_m|}{A_t} \times 100 \quad (j)$$

در معادله بالا،  $A_t$  بهترین جواب به دست آمده توسط *GAMS* و  $A_m$  بهترین جواب به دست آمده توسط الگوریتم ژنتیک است. برای تمام مسائل خصوصاً مسائل با ابعاد متوسط و بزرگ، معیار درصد انحراف نسبی (*RDP*) جهت ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی استفاده شد. برای هر مسئله، معیار *RDP* متوسط به دست آمده از الگوریتم حل (*Ave*) را با بهترین جواب به دست آمده از آن الگوریتم (*Bs*)، به صورت زیر مقایسه می‌کند:

$$RDP = \frac{|Ave - Bs|}{Bs} \times 100 \quad (k)$$

واضح است که مقادیر کوچک‌تر برای *REP* و *RDP* مقادیر بهتری هستند. برای مسائل با ابعاد کوچک، الگوریتم *GA* متوسط اختلافی برابر ۲/۰۹ درصد با بهترین جواب از *GAMS* (حل دقیق) دارد. کیفیت جواب *GA*، ۲/۱۸ درصد پایین‌تر از متوسط در مقایسه با جواب حاصل از *GAMS* است و از نظر زمان‌های محاسباتی، الگوریتم *GA*، ۲۵ برابر به‌طور متوسط سریع‌تر از نرم‌افزار *GAMS* عمل می‌نماید. در نتیجه، کمی افت کیفیت در برابر کاهش مناسب در زمان حل، عملکرد رضایت‌بخش الگوریتم پیشنهادی را در دستیابی به جواب نزدیک به بهینه در مدت زمان منطقی، نشان می‌دهد. شکل ۴ کیفیت جواب *GAMS* و *GA* را مقایسه می‌نماید.

N13	۱۸	۹	۸	۵
N14	۲۰	۱۲	۱۰	۵
N15	۲۲	۱۵	۱۲	۵

## ۶-۲ ارزیابی الگوریتم

گرچه مدل پیشنهادی غیرخطی است؛ ولی همانطور که اشاره شد؛ روابط غیرخطی به صورت ضرب متغیرهای باینری در پیوسته هستند که همگی به صورت زیر قابل خطی‌سازی هستند:

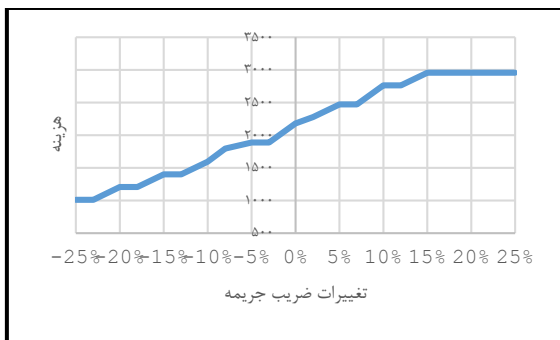
$$\left\{ \begin{array}{l} U = BV \times PV : BV = \{0,1\}, PV \geq 0 \\ \downarrow \\ U \leq M \cdot BV \\ U \leq PV \\ U \geq PV - (1 - BV)M \\ U \geq 0 \\ M = \text{big number} \end{array} \right. \quad (h)$$

ما نیز مبتنی بر تکنیک بالا، روابط غیرخطی را خطی‌سازی نموده و در نرم‌افزار *GAMS* مبتنی بر سالور *CPLEX*، مسائل آزمایشی را حل نموده‌ایم. الگوریتم حل با استفاده از نرم‌افزار *MATLAB R2016a* اجرا شد. هر مسئله از جدول ۳، پنج بار اجرا شد و بهترین راه‌حل انتخاب شد. بنابراین، تعداد پنج در پانزده اجرا (برابر ۷۵) به‌طورکلی انجام شد. جدول ۴ به‌خوبی نشان می‌دهد که نرم‌افزار *GAMS* می‌تواند جواب‌های بهینه را برای مسائل در ابعاد کوچک در زمان‌های محدود داده شده، پیدا نماید. همچنین، آن می‌تواند بهترین جواب (بهینه محلی) را برای برخی از مسائل با ابعاد متوسط در همان مدت‌زمانی، پیدا کند. در هر صورت، *GAMS* نمی‌تواند جواب‌های بهینه را برای مسائل با ابعاد متوسط و بزرگ در یک زمان محاسباتی منطقی بیابد. به‌منظور برخورد با چنین سناریوها و جهت مناسب ساختن مدل پیشنهادی برای مسائل دنیای واقعی، روش‌های حل دیگری موردنیاز خواهد بود. به همین دلیل، در این تحقیق، الگوریتم ژنتیک اعمال شد و عملکرد آن در نمونه مسائل ابعاد کوچک با *GAMS* مقایسه شده است.



حل مسئله زمان‌بندی و مسیریابی سبز وسایل حمل‌ونقل با ناوگان ناهمگن شامل لجستیک ...

جریمه دیرکرد معمولاً موجب افزایش هزینه و کاهش این ضریب معمولاً باعث کاهش هزینه می‌شود. لازم به ذکر است که هر افزایش در ضریب جریمه، لزوماً هزینه را افزایش نمی‌دهد و هر کاهش در این ضریب نیز لزوماً هزینه را کاهش نمی‌دهد. همچنین، افزایش ضریب جریمه از جایی به بعد، تغییری در خروجی ایجاد نمی‌نماید.



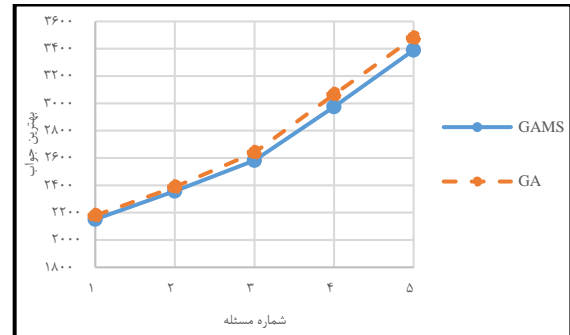
شکل ۵. اثر تغییر ضریب جریمه دیرکرد روی هزینه

اکنون اثر افزایش ابعاد مسئله روی عملکرد الگوریتم GA بررسی می‌گردد و نیز عملکرد GA از نظر زمان حل با عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان<sup>۳۳</sup> (ACO) مقایسه می‌شود. لازم به ذکر است که کیفیت حل GA و ACO، تقریباً نسبت به هم، یکسان بوده ولی از نظر زمان حل، GA بهتر عمل می‌کند که در ادامه با شکل نشان داده می‌شود. توجه شود که عملکرد مناسب GA براساس جدول ۴، اثبات شده است.

اولین اندیسی که جهت بررسی اثر آن، افزایش داده می‌شود؛  $I$  یعنی مجموعه گره‌ها یا همان به اصطلاح اندازه شبکه است. چنانچه فرض گردد که اندازه شبکه ( $I$ ) براساس ضریب مشخصی مانند  $\xi$  افزایش یابد؛ خواهیم داشت:

$$I^{new} = \xi \cdot I^{old} \quad (M)$$

که در آن  $\xi = [1, 3]$  در نظر گرفته می‌شود. با در نظرگیری مسئله  $N10$  شکل ۶ حاصل می‌گردد که نشان می‌دهد زمان حل GA نسبت به ACO در بیشتر مواقع، کمتر بوده است.



شکل ۴. مقایسه بین کیفیت جواب GA و GAMS

برای مسائل ابعاد متوسط، میانگین درصد اختلاف بین متوسط جواب حاصل توسط الگوریتم GA و بهترین جواب حاصل توسط GA، برابر ۱۰/۷۲ درصد است. همچنین، این معیار برای مسائل با ابعاد بزرگ برابر با ۱۵/۴۳ محاسبه شد. باید دقت شود که این مقادیر، درصد خطای الگوریتم پیشنهادی نیستند؛ چراکه مطابق رابطه  $(k)$ ، این مقادیر تنها متوسط به‌دست‌آمده توسط GA را با بهترین جواب به‌دست‌آمده توسط این الگوریتم، مقایسه می‌کنند. درواقع، تنها معیار انحراف را نشان می‌دهند. از نظر زمان حل نیز الگوریتم GA، در زمان منطقی، جوابی نزدیک به بهینه را می‌دهد.

### ۳-۶ تحلیل حساسیت

در این بخش، تحلیل حساسیت روی یکی از پارامترهای مسئله و نیز روی ابعاد مسئله، صورت می‌پذیرد. ابتدا، یکی از پارامترهای مهم مسئله یعنی ضریب جریمه دیرکرد ( $\varphi_{inv}$ ) از ۲۵٪- تا ۲۵٪+ با طول گام ۰.۵٪، تغییر داده می‌شود تا اثر تغییر آن روی تابع هدف مسئله، مشخص گردد. بنابراین اگر فرض شود که ضریب جریمه دیرکرد قدیم با  $\varphi_{inv}^{old}$  و جدید با  $\varphi_{inv}^{new}$  نشان داده شود؛ خواهیم داشت:

$$\varphi_{inv}^{new} = (1 + \alpha) \varphi_{inv}^{old} \quad (L)$$

که در آن  $\alpha = [-25\%, +25\%]$  است. با در نظرگیری مسئله  $N01$ ، براساس شکل ۵، ملاحظه می‌گردد که افزایش ضریب

جدول ۴: مقایسه بین عملکرد GAMS و الگوریتم پیشنهادی

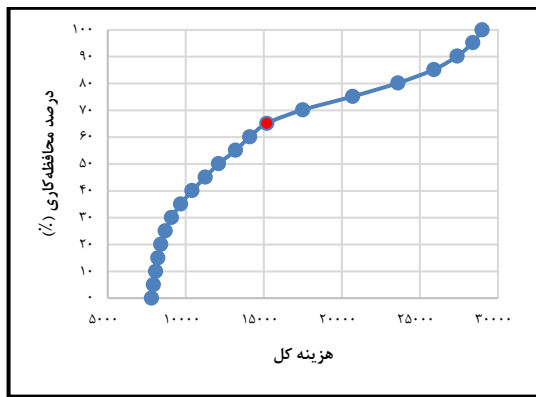
شماره مسئله	الگوریتم ژنتیک (GA)				GAMS	
	بهترین جواب (واحد هزینه)	بهترین جواب (واحد هزینه)	متوسط (واحد هزینه)	میانگین زمان CPU (ثانیه)	زمان (ثانیه)	بهترین جواب (واحد هزینه)
N01	۲۱۷۹/۴۵	۱/۳۰	۸/۶۱	۲۳۶۷/۱۳	۲۸/۴۱	۲۱۵۱/۴۱
N02	۲۳۸۸/۳۲	۱/۲۹	۱۴/۳۶	۲۷۳۱/۲۱	۲۹/۶۵	۲۳۵۷/۸۴
N03	۲۶۳۹/۹۴	۲/۲۱	۱۵/۶۹	۳۰۵۴/۱۷	۲۰۱/۲۱	۲۵۸۲/۹۸
N04	۳۰۶۵/۱۳	۳/۰۲	۱۶/۲۱	۳۵۶۲/۰۹	۲۱۸/۵۷	۲۹۷۵/۳۴
N05	۳۴۷۸/۶۸	۲/۶۲	۱۷/۹۳	۴۱۰۲/۳۹	۱۵۸۸/۳۳	۳۳۸۹/۹۸
میانگین	۲۷۵۰/۳۱	۲/۱۸	۱۵/۰۲	۳۱۶۳/۴۰	۴۱۳/۲۸	۲۶۹۱/۵۱
میانگین REP و RDP		۲/۰۹	۱۴/۵۶			
N06	۶۷۸۹/۰۶	-	۶/۳۳	۷۷/۸۲	۳۶۰۰	۹۹۸۴/۷۷
N07	۷۵۶۲/۲۳	-	۱۰/۳۷	۸۷/۵۲	۳۶۰۰	۱۶۷۳۶/۲۸
N08	۸۱۲۲/۷۷	-	۹/۳۲	۸۸۷۹/۸۹	۳۶۰۰	۲۱۷۸۴/۳۳
N09	۹۲۱۳/۹۸	-	۱۲/۸۱	۱۰۳۹۴/۳۸	۳۶۰۰	NA*
N10	۱۲۱۰۸/۴۲	-	۱۴/۷۷	۱۳۸۹۶/۵	۳۶۰۰	NA
میانگین	۸۷۵۹/۳۰	-	۱۱/۲۸	۹۷۴۷/۱۹		
میانگین RDP			۱۰/۷۲			
N11	۹۸۵۳/۱۱	-	۱۱/۲۷	۱۰۹۶۳/۴	۱۰۰۰۰	NA
N12	۱۳۱۷۵/۸	-	۱۳/۷۴	۱۴۹۸۶/۱	۱۰۰۰۰	NA
N13	۱۸۸۵۳/۳	-	۱۵/۴۴	۲۱۷۶۴/۸	۱۰۰۰۰	NA
N14	۲۴۶۲۱/۴	-	۱۹/۱۲	۲۹۳۲۸/۹	۱۰۰۰۰	NA
N15	۳۳۸۵۹/۸	-	۱۷/۵۸	۳۹۸۱۲/۳	۱۰۰۰۰	NA
میانگین	۲۰۰۷۲/۷	-	۱۶/۴۳	۲۳۳۷۱/۱		
میانگین RDP			۱۵/۴۳			

\* حل کننده مربوطه نتوانسته است مسئله را حل نماید.

دومین اندیسی که جهت بررسی اثر آن، افزایش داده می شود؛  
 K یعنی مجموعه دوره های زمانی است. مشابه قبل، اگر  
 مجموعه دوره های زمانی با ضریب مشخصی مانند  $\psi$  افزایش  
 یابد؛ خواهیم داشت:

$$K^{new} = \psi \cdot K^{old} \quad (N)$$

محافظة کاری برابر با ۵۰ درصد است. در نمودار زیر با در نظر گرفتن مسئله  $N10$ ، درصد محافظه کاری از صفر تا صد درصد افزایش داده می‌شود. به عبارتی،  $\Gamma$  از صفر تا  $N$ ، تغییر داده شده است و مقادیر تابع هدف، ملاحظه می‌گردد. مطابق نمودار، پیشنهاد این است که این مسئله با  $\Gamma$  مساوی با ۶۵ درصد، اجرا گردد. به عبارت دیگر، اگر  $N \frac{65}{100}$  برای  $\Gamma$  لحاظ گردد؛ یک تنظیم مناسب است.

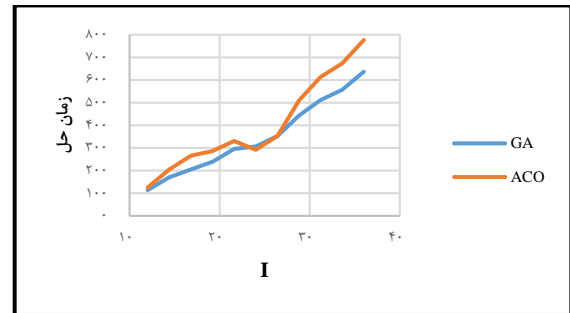


شکل ۸. تحلیل حساسیت روی درصد محافظه کاری ( $\Gamma$ )

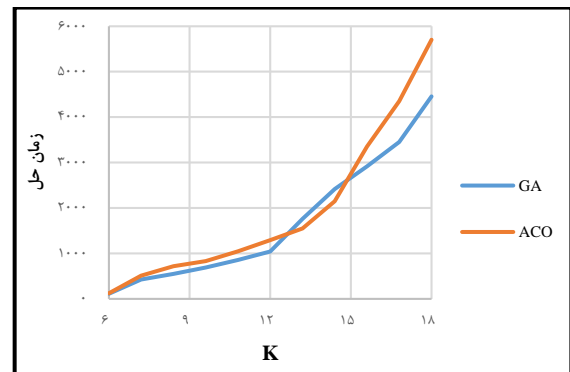
اکنون روی  $\psi$  به عنوان جریمه کمبود یا ضریب نقض قیود فازی، تحلیل ارائه می‌گردد. برای همان مسئله  $N10$ ، مطابق نمودار زیر، اگر جریمه کمبود افزایش یابد؛ میزان کمبود، کاهش می‌یابد؛ درحالی‌که مقدار کل هزینه، افزایش خواهد یافت. مطابق این نمودار،  $\psi = 175$  مقدار مطلوبی برای جریمه کمبود است؛ چراکه با انتخاب این مقدار جریمه کمبود، اولاً مقدار کمبود زیاد نیست و در ثانی، کل هزینه در این نقطه به مقدار قابل ملاحظه‌ای، کاهش یافته است؛ به طوری‌که با کاهش جریمه کمبود از مقدار ۱۷۵، کاهش قابل توجهی در کل هزینه مشاهده نمی‌گردد؛ اما افزایش زیادی در میزان کمبود، رخ می‌دهد. بنابراین، انتخاب مقدار  $\psi = 175$ ، مطلوب خواهد بود.

که در آن  $\psi = [1,3]$  در نظر گرفته می‌شود. با توجه به مسئله  $N10$  شکل ۷ به دست می‌آید که نشان می‌دهد با افزایش تعداد دوره‌های زمانی، زمان حل دو الگوریتم افزایش می‌یابد ولی در بیشتر مواقع، زمان حل GA کمتر از ACO است که برتری GA را اثبات می‌نماید.

همچنین، با مقایسه دو شکل ۶ و ۷، استنباط می‌گردد که افزایش  $K$  نسبت به  $I$  به طور قابل ملاحظه‌ای زمان حل را در دو الگوریتم، بیشتر می‌کند.



شکل ۶. اثر افزایش اندازه شبکه روی زمان حل دو الگوریتم GA و ACO



شکل ۷. اثر افزایش مجموعه دوره‌های زمانی روی زمان حل دو الگوریتم GA و ACO

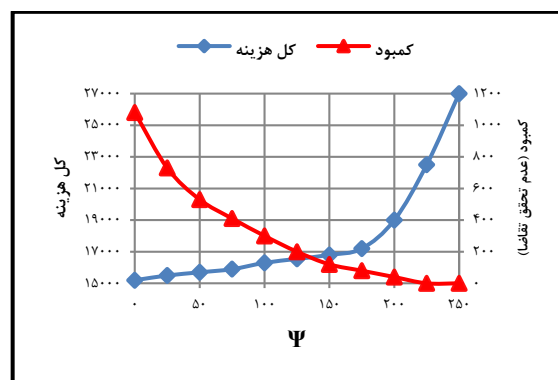
#### ۶-۴ تحلیل استواری مدل

همان‌طور که اشاره شد؛ مقدار  $\Gamma$  (استواری مدل) برابر با  $\Gamma = \frac{N}{2}$  در نظر گرفته شد که نشان‌دهنده این است که درصد

پیشنهادی در مسائل ابعاد کوچک با نتایج GAMS، مقایسه شد. همچنین، روی پارامتر مهم مسئله، تحلیل صورت گرفت و نتایج GA از نظر زمان حل با ACO، مقایسه شد. آنالیزهای انجام شده، نشان داد که الگوریتم پیشنهادی، عملکرد راضی‌کننده‌ای را در دستیابی به جواب‌های نزدیک به بهینه باکیفیت بالا در زمان CPU معقول و منطقی، دارد. در نظر گرفتن ناوگانی ناهمگن همراه با تغییرات در وزن وسایل در طول مسیرشان در مسئله زمان‌بندی و مسیریابی، با هدف نزدیکی به شرایط دنیای واقعی، اعمال جریمه‌های زودکرد و دیرکرد برای تقاضاهایی که به‌موقع، ارضا نمی‌شوند و نیز توجه به جمع‌آوری کالاهای بازگشتی از مشتریان در چارچوب لجستیک معکوس (ملاحظات زیست‌محیطی) از ویژگی‌های اصلی تحقیق حاضر بودند. براساس بررسی‌ها، وجود این ویژگی‌ها باهم در هیچ تحقیقی در ادبیات برای مسئله GVRSP، یافت نشد. برای تحقیقات آتی، در نظر گرفتن وضعیت‌های چند انبار یا چند محصول، شرایط وجود انبارهای موقت و اسکله‌ها در طول مسیرها و همچنین امکان‌پذیری عرضه به هر مشتری با بیشتر از یک ملاقات واحد، پیشنهاد می‌گردد. حل این مسئله با استفاده از الگوریتم‌های متاهیورستیک دیگر یا الگوریتم‌های ترکیبی جهت بهبود روش حل پیشنهادی می‌تواند توسعه دیگری از این تحقیق باشد.

#### ۸. پی‌نوشت‌ها

1. Vehicle Routing Problem
2. Pollution Routing Problem
3. International Energy Agency
4. Time Dependent VRP
5. Traveling Salesman Problem
6. Green VRP
7. VRP in Reverse Logistics



شکل ۹. اثر افزایش جریمه کمبود ( $\psi$ ) روی کمبود و هزینه کل

#### ۷. نتیجه‌گیری

مسئله مسیریابی وسیله، یکی از شناخته‌شده‌ترین مسائل در زمینه حمل و نقل و لجستیک است. از آنجایی که نگرانی‌های زیست‌محیطی در طول دهه‌های اخیر، مهم‌تر شده است؛ مسئله سبز VRP به‌طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق، مسئله GVRSP با ناوگان ناهمگن شامل لجستیک معکوس به شکل جمع‌آوری کالاهای بازگشتی همراه با هزینه‌های زودکرد و دیرکرد وزنی با در نظر گرفتن پنجره‌های زمانی چندگانه، مطالعه شد. تقاضای مشتریان به صورت تقریبی و مبتنی بر اعداد فازی، در نظر گرفته شد که با توجه به وجود عدم قطعیت در برخی دیگر از پارامترها، از رویکرد برنامه‌ریزی امکانی استوار جهت کنترل، استفاده گشت. مسئله در ابتدا به‌صورت یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی مختلط فرموله شد؛ سپس با استفاده از نرم‌افزار GAMS کدنویسی شد. از آنجایی که این مسئله در دسته مسائل NP-hard قرار می‌گیرد؛ جهت یافتن جواب‌های نزدیک به بهینه برای مسائل با ابعاد متوسط و بزرگ در یک زمان منطقی، الگوریتم ژنتیک (GA) ارائه شد. در نهایت با استفاده از مجموعه مسائل آزمایشی تعریف‌شده، عملکرد الگوریتم پیشنهادی با توجه به دو معیار در نظر گرفته شده یعنی کیفیت جواب‌ها و زمان‌های محاسباتی، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل توسط الگوریتم

-فرحبخش، فریبا، توکلی مقدم، رضا و قضاوتی، وحیدرضا (۱۳۹۶) "توسعه مدل ریاضی چند هدفه برای مساله مسیریابی وسایل نقلیه ناهمگن تحت شرایط بحران"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۹، شماره ۲، ص. ۱۶۹-۱۸۷

-Alshamsi, A. and Diabat, A. (2017) "A Genetic Algorithm for Reverse Logistics network design: A case study from the GCC", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 151, pp. 652-669.

-Beheshtinia, M. A., and Ghasemi, A. (2018) "A multi-objective and integrated model for supply chain scheduling optimization in a multi-site manufacturing system", *Engineering Optimization*, Vol. 50, No. 9, pp. 1415-1433.

-Beheshtinia, M. A., Ghasemi, A., and Farokhnia, M. (2018) "Supply chain scheduling and routing in multi-site manufacturing system (case study: a drug manufacturing company)", *Journal of Modelling in Management*, Vol. 13, No. 1, pp. 27-49.

-Bektaş, T. and Laporte, G. (2011) "The pollution-routing problem", *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 45, No. 8, pp. 1232-1250.

-Bertsimas, D. and Sim, M. (2004) "The price of robustness", *Operations research*, Vol. 52, No. 1, pp. 35-53.

-Borumand, A., & Beheshtinia, M. A. (2018) "A developed genetic algorithm for solving the multi-objective supply chain scheduling problem", *Kybernetes*, Vol. 47, No. 7, pp. 1401-1419.

-Coelho, I. M., Munhoz, P. L. A., Ochi, L. S., et al. (2016) "An integrated CPU-GPU heuristic inspired on variable neighbourhood search for the single vehicle routing problem with deliveries and selective pickups", *International*

8. Green Vehicle Routing and Scheduling Problem

9. Robust Possibilistic Programming

10. Proactive

11. Trapezoidal Fuzzy Number (TFN)

12. Hybrid Robust Possibilistic Programming

13. Necessity Measure

14. Subjective

15. Feasibility Robustness

16. Optimality Robustness

17. Robust Counterpart

18. Strong Duality Theorem

19. Perturbation

20. Signal-to-Noise Ratio

21. Relative Error Percentage

22. Relative Deviation Percentage

23. Ant Colony Optimization Algorithm

## ۹. مراجع

- بهشتی نیا، محمد علی، و اعرابی، آتنا (۱۳۹۶) "ارایه یک الگوریتم ژنتیک برای مساله یکپارچگی مسیریابی وسایل نقلیه و زمان بندی تولید و زنجیره تامین. (مطالعه موردی: زنجیره تامین تجهیزات پزشکی)، نشریه مهندسی صنایع دانشکده فنی دانشگاه تهران، دوره ۵۱، شماره ۲، ص. ۱۴۷-۱۶۰

-بهشتی نیا، محمد علی، فیض، داوود و سدادی، فاطیما (۱۳۹۷) "یکپارچگی مساله مسیریابی وسایل نقلیه با زمان بندی حمل و نقل و تولید زنجیره تامین"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، جلد ۹، شماره ۴، ص. ۵۴۹-۵۷۰

- windows", *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, Vol. 66, pp. 207–214.
- Figliozzi, M. (2010) "Vehicle routing problem for emissions minimization", *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*, Vol. 2197, pp. 1–7.
- Foroutan, R. A., Rezaeian, J., and Mahdavi, I. (2020) "Green vehicle routing and scheduling problem with heterogeneous fleet including reverse logistics in the form of collecting returned goods", *Applied Soft Computing*, Vol. 94, pp. 106462.
- Franceschetti, A., Honhon, D., Van Woensel, T., et al. (2013) "The time-dependent pollution-routing problem", *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 56, pp. 265–293.
- Gaur, D. R., Mudgal, A. and Singh, R. R. (2013) "Routing vehicles to minimize fuel consumption", *Operations Research Letters*, Vol. 41, No. 6, pp. 576–580.
- Ghannadpour, S. F. and Zarrabi, A. (2019) "Multi-objective heterogeneous vehicle routing and scheduling problem with energy minimizing", *Swarm and evolutionary computation*, Vol. 44, pp. 728–747.
- Hoogeboom, M., Dullaert, W., Lai, D. and Vigo, D. (2020) "Efficient neighborhood evaluations for the vehicle routing problem with multiple time windows", *Transportation Science*, Vol. 54, No. 2, pp. 400–416.
- Kara, I., Kara, B. and Yetis, M. K. (2007) "Energy minimizing vehicle routing problem", *Combinatorial optimization and applications*, pp. 62–71.
- Khodabandeh, M., Hejazi, S. and Rasti-Barzoki, M. (2013) "A Genetic Algorithm for an Integrated Production and Distribution
- Journal of Production Research*, Vol. 54, No. 4, pp. 945–962.
- Daniel, S. E., Diakoulaki, D. C. and Pappis, C. P. (1997) "Operations research and environmental planning", *European journal of operational research*, Vol. 102, No. 2, pp. 248–263.
- Dantzig, G. B. and Ramser, J. H. (1959) "The truck dispatching problem", *Management science*, Vol. 6, No. 1, pp. 80–91.
- Dehghan, E., Nikabadi, M. S., Amiri, M. and Jabbarzadeh, A. (2018) "Hybrid robust, stochastic and possibilistic programming for closed-loop supply chain network design", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 123, pp. 220–231.
- Demir, E., Bektaş, T. and Laporte, G. (2012) "An adaptive large neighborhood search heuristic for the pollution-routing problem", *European Journal of Operational Research*, Vol. 223, No. 2, pp. 346–359.
- Demir, E., Bektaş, T. and Laporte, G. (2014b) "The bi-objective pollution-routing problem", *European Journal of Operational Research*, Vol. 232, No. 3, pp. 464–478.
- Erdoğan, S. and Miller-Hooks, E. (2012) "A green vehicle routing problem", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 48, No. 1, pp. 100–114.
- Eydi, A. and Alavi, H. (2018) "Vehicle Routing Problem in Reverse Logistics with Split Demands of Customers and Fuel Consumption Optimization", *Arabian Journal for Science and Engineering*, pp. 1–11.
- Ferreira, H. S., Bogue, E. T., Noronha, T. F., et al. (2018) "Variable neighborhood search for vehicle routing problem with multiple time

- Malandraki, C. and Daskin, M. S. (1992) "Time dependent vehicle routing problems: Formulations, properties and heuristic algorithms", *Transportation science*, Vol. 26, No. 3, pp. 185–200.
- Mirzapour Al-e-hashem, S. M. J. and Rekik, Y. (2014) "Multi-product multi-period Inventory Routing Problem with a transshipment option: A green approach", *International Journal of Production Economics*, Vol. 157, pp. 80–88.
- Niu, Y., Yang, Z., Chen, P., *et al.* (2018) "Optimizing the green open vehicle routing problem with time windows by minimizing comprehensive routing cost", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 171, pp. 962–971.
- Norouzi, N., Tavakkoli-Moghaddam, R. (2017) "Minimizing Energy Consumption and Travel Time in a Vehicle Routing Problem with Time-Dependent Speeds Using an Imperialist Competitive Algorithm", *Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems*, Vol. 4, No. 9, pp. 213-219 (In Persian).
- Pishvaei, M. S., Razmi, J. and Torabi, S. A. (2012) "Robust possibilistic programming for socially responsible supply chain network design: A new approach", *Fuzzy sets and systems*, Vol. 206, pp. 1–20.
- Rabbani, M., Bosjin, S., Yazdanparast, R., *et al.* (2018) "A stochastic time-dependent green capacitated vehicle routing and scheduling problem with time window, resiliency and reliability: a case study", *Decision Science Letters*, Vol. 7, No. 4, pp. 381–394.
- Rabbani, M., Hosseini-Mokhallesun, S. A. A., Ordibazar, A. H. and Farrokhi-Asl, H. (2020) "A hybrid robust possibilistic approach for a sustainable supply chain location-allocation network design", *International Journal of Scheduling Problem with VRP*", *Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems*, Vol. 1, No. 2, pp. 167-181 (In Persian).
- Koç, Ç., Bektaş, T., Jabali, O., *et al.* (2015) "A hybrid evolutionary algorithm for heterogeneous fleet vehicle routing problems with time windows", *Computers & Operations Research*, Vol. 64, pp. 11–27.
- Kwon, Y.-J., Choi, Y.-J. and Lee, D.-H. (2013) "Heterogeneous fixed fleet vehicle routing considering carbon emission", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 23, pp. 81–89.
- Lenstra, J. K. and Kan, A. H. G. (1981) "Complexity of vehicle routing and scheduling problems", *Networks*, Vol. 11, No. 2, pp. 221–227.
- Li, J., Guo, H., Zhou, Q. and Yang, B. (2019) "Vehicle routing and scheduling optimization of ship steel distribution center under green shipbuilding mode", *Sustainability*, Vol. 11, No. 15, pp. 42–48.
- Li, J., Qin, H., Baldacci, R. and Zhu, W. (2020) "Branch-and-price-and-cut for the synchronized vehicle routing problem with split delivery, proportional service time and multiple time windows", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 140, pp. 101955.
- Liao, T. W. (2020) "Integrated Outbound Vehicle Routing and Scheduling Problem at a Multi-Door Cross-Dock Terminal", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, pp. 1–14.
- Lin, C., Choy, K. L., Ho, G. T. S., *et al.* (2014) "Survey of green vehicle routing problem: past and future trends", *Expert Systems with Applications*, Vol. 41, No. 4, pp. 1118–1138.

- The ministry of land, infrastructure, transport and tourism of Japan website, [www.mlit.go.jp/common/000037099.pdf](http://www.mlit.go.jp/common/000037099.pdf).
- Tirkolaee, E. B., Hosseinabadi, A. A. R., Soltani, M., *et al.* (2018) "A Hybrid Genetic Algorithm for Multi-Trip Green Capacitated Arc Routing Problem in the Scope of Urban Services.", *Sustainability*, Vol. 10, No. 5, pp. 1050-2071.
- Varun Kumar, S. G. and Panneerselvam, R. (2017) "A study of crossover operators for genetic algorithms to solve VRP and its variants and new sinusoidal motion crossover operator", *Int. J. Comput. Intell. Res*, Vol. 13, No. 7, pp. 1717-1733.
- Xiao, Y. and Konak, A. (2015) "A simulating annealing algorithm to solve the green vehicle routing & scheduling problem with hierarchical objectives and weighted tardiness", *Applied Soft Computing*, Vol. 34, pp. 372-388.
- Xiao, Y. and Konak, A. (2016) "The heterogeneous green vehicle routing and scheduling problem with time-varying traffic congestion", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 88, pp. 146-166.
- Systems Science: Operations & Logistics*, Vol. 7, No. 1, pp. 60-75.
- Salamat-Bakhsh, A., Tavakkoli-Moghaddam, R., Alinaghian, M. and Najafi, I. (2017) "Robust optimization approach in a competitive vehicle routing problem in an uncertain condition by using improved differential evolution", *Quarterly Journal of Transportation Engineering*, In Press (In Persian).
- Soysal, M. (2016) "Closed-loop Inventory Routing Problem for returnable transport items", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 48, pp. 31-45.
- Statistics, I. E. A. (2015) "CO2 emissions from fuel combustion-highlights", *IEA, Paris*, [www.iea.org/co2highlights/co2highlights.pdf](http://www.iea.org/co2highlights/co2highlights.pdf). Cited July.
- Sun, J. U. (2007) "A taguchi approach to parameter setting in a genetic algorithm for general job shop scheduling problem", *IEMS*, Vol. 6, No. 2, pp. 119-124.
- Taguchi, G. (1986) "Introduction to quality engineering: designing quality into products and processes", *The Asian Productivity Organization*.
- Tang, Q. and Xie, F. (2007) "A genetic algorithm for reverse logistics network design", in *Natural Computation, 2007. ICNC 2007. Third International Conference on*. IEEE, pp. 277-281.
- Tasan, A. S. and Gen, M. (2012) "A genetic algorithm based approach to vehicle routing problem with simultaneous pick-up and deliveries", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 62, No. 3, pp. 755-761.



عادل اعظمی، درجه کارشناسی خود را در رشته مهندسی صنایع در سال ۱۳۹۳ از دانشگاه تهران و درجه کارشناسی ارشد را در رشته مهندسی صنایع گرایش مهندسی صنایع در سال ۱۳۹۵ از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمودند. ایشان اکنون، دانشجوی دکتری رشته مهندسی صنایع در دانشگاه علم و صنعت ایران هستند. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان، برنامه‌ریزی تولید-توزیع، زمان‌بندی و مسیریابی، فضاهای رقابتی در زنجیره تأمین و الگوریتم‌های حل دقیق است.



محمد سعیدی مهرآباد، درجه دکتری خود را در رشته مهندسی صنایع در سال ۱۳۷۱ از دانشگاه ویرجینیای غربی کشور آمریکا اخذ نمودند. ایشان اکنون، عضو هیات علمی دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه علم و صنعت ایران با مرتبه استاد هستند. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه نامبرده، مدل‌سازی سیستم‌های تولید سلولی، تحلیل و بررسی اقتصادی هزینه‌های تولید و قابلیت اطمینان محصول، انرژی‌های تجدیدپذیر و مدل‌سازی ریاضی فرایندهای ساخت و بهینه‌سازی آن‌هاست.

