فصلنامه پژوهشنامه بازرگانی، شماره ۱۰۰، پاییز ۱۴۰۰، ۱۹۸-۱۵۹

مقاله پژوهشی: برنامه‌ریزی ظرفیت وسایل نقلیه در یک مسئله مسیریابی چندهدفه با ناوگان ناهمگن

ملیحه معصومی* جواد بهنامیان**

دریافت: ۹۸/۲/۸ پذیرش: ۹۸/۷/۲۶

مسئله مسیریابی وسایل نقلیه / پنجره زمانی / مصرف انرژی / ناوگان اجاره‌ای / استراتژی ظرفیت

چکیده

حمل و نقل کالا از نقاط عرضه به مشتریان مختلف، یک وظیفه مهم در زنجیره‌تأمین است. در این حوزه، مسئله مسیریابی وسایل نقلیه از اهمیت ویژه‌ای برخودار است. در این مقاله مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با در نظر گرفتن پنجره‌های زمانی با استفاده از مفهوم ناهمگونی ارائه شده است. در اینجا مفهوم ناهمگنی وسایل نقلیه مربوط به مالکیت ناوگان است و زمانی رخ می‌دهد که ناوگان خصوصی کافی در دسترس نبوده و شرکت مجبور به اجاره برخی وسایل نقلیه از سایر شرکت‌های باربری باشد. علاوه براین، برخلاف تلاش‌های قبلی، مدل پیشنهادی به دنبال حداقل‌سازی انرژی مصرفی است. در اینجا دو سناریو مورد بررسی قرار گرفته است و برای هریک یک مدل ریاضی چندهدفه پیشنهاد شده است. در سناریو اول، مسئله با در نظر گرفتن پنجره‌های زمانی بدون در نظر گرفتن مفهوم ناهمگنی و در سناریو دوم وجود وسایل نقلیه به صورت اجاره‌ای مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین در سناریو دوم استراتژی تغییر ظرفیت ناوگان اجاره‌ای بر اساس مدل پیشنهادی مشخص خواهد شد. برای حل این مسئله، یک الگوریتم فراابتکاری

*. دانشجوی دکتری دانشگاه بوعلی سینا، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی صنایع، همدان

**. دانشیار دانشگاه بوعلی سینا، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی صنایع، همدان Behnamian@basu.ac.ir

■ جواد بهنامیان، نویسنده مسئول.

ترکیبی بر مبنای الگوریتم‌های سیستم ایمنی مصنوعی بدن و ازدحام ماهی‌های مصنوعی پیشنهاد شده است. در نهایت نیز نتایج آن با نتایج حاصل از الگوریتم NSGAII روی مسائل با ابعاد مختلف مقایسه شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن ناوگان اجاره‌ای در بخش عظیمی از هزینه‌ها و انرژی مصرفی صرفه جویی شده است. همچنین رویکرد پیشنهادی توانسته به‌عنوان یک سیستم تصمیم‌گیری پشتیبان برای بررسی استراتژی‌های ظرفیت شرکت‌های باربری مورد استفاده قرار گیرد.

طبقه‌بندی JEL: N7, C61, R41

مقدمه

در دنیای در حال توسعه حاضر، لجستیک به یک جزء قابل توجهی تبدیل شده است که شرکت‌های زنجیره‌تأمین مدرن را به سراسر محیط کسب و کار متصل می‌کند. هزینه‌های مرتبط با عملیات‌های انواع مختلف حمل و نقل، بخش عمده‌ای از هزینه‌های عملیاتی یک سازمان را در بر می‌گیرند. بنابراین، یک برنامه حمل و نقلی موثر می‌تواند به شدت به سودآوری، رقابت پذیری و اعتبار یک سازمان کمک کند[1] . از این رو، علاقه زیادی به فرمول‌بندی موثر مدل‌های حمل و نقل و همچنین توسعه استراتژی‌های قدرتمند بهینه‌سازی برای تولید برنامه‌های حمل و نقلی با کیفیت بالا وجود دارد[2].

حمل و نقل کالا و یا ارائه خدمات از نقاط عرضه به مشتریان مختلف، یک وظیفه بسیار مهم در زنجیره‌تأمین است. غالباً در اکثر شرکت‌ها، حمل و نقل نشان دهنده مهمترین عنصر در هزینه‌های لجستیک می‌باشد. برای کاهش هزینه‌های حمل و نقل و بهبود خدمت به مشتریان، یافتن بهترین مسیر که وسیله نقلیه باید در طول شبکه طی کند غالباً یک مسئله تصمیم‌گیری مهم محسوب می‌شود. یکی از مهم‌ترین و گسترده‌ترین مسائل بهینه‌سازی ترکیبی مطالعه شده در این حوزه، مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با در نظر گرفتن پنجره‌های زمانی[3] (VRPTW) است[4]. مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با در نظر گرفتن پنجره‌های زمانی، تعمیمی از مسئله مسیریابی وسایل نقلیه ظرفیت‌دار[5] (CVRP) است که در آن خدمت دهی به مشتریان باید در بازه زمانی معین (این بازه زمانی به پنجره زمانی معروف است) صورت گیرد[6]. در بیشتر مسائل مسیریابی وسایل نقلیه با در نظر گرفتن پنجره‌های زمانی فرض بر این است که باید وسایل نقلیه مورد نیاز را خرید، اما بعضی از شرکت‌ها قادرند این کار را برون سپاری کرده و عملیات توزیع را به شرکت‌های باربری بسپارند یا وسایل نقلیه را اجاره کنند. این مسئله مفهوم ناهمگنی وسایل نقلیه را بوجود می‌آورد که یکی از مهم‌ترین انواع مسائل مسیریابی است و به دلیل پیچیدگی‌های ذاتی و سودمندی آن در زندگی واقعی، توجه بسیار زیادی را به خود

1. Zachariadis, (2015).
2. Laporte, (2009).
3. Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW)
۴. نادری پور و علی نقیان، (۲۰۱۶)
5. Capacitated VRP (CVRP)
۶. توکلی مقدم و همکاران، (۱۳۸۵)

جلب کرده است. مفهوم ناهمگنی مرتبط با مالکیت وسایل نقلیه و ناوگان موجود است. برای مثال، شرکتی را در نظر بگیرید که از یک سرویس خصوصی برای ارائه خدمات به مشتریان استفاده می‌کند. با این حال، از آنجایی که ظرفیت سرویس‌های موجود کافی نیست، شرکت مجبور به عقد قرارداد با شرکت‌های باربری برای اجاره ناوگان حمل و نقلی می‌شود[۱]. در این حالت، از آنجا که هزینه خرید وسایل نقلیه با هزینه اجاره آن بسیار متفاوت است، مسئله مهم این است که با توجه به افق برنامه‌ریزی باید چه تعدادی از وسایل نقلیه را خرید و چه تعدادی را اجاره کرد تا مجموع ارزش فعلی هزینه‌ها حداقل گردد[۲]. از این رو استراتژی‌های مختلف برای ظرفیت وسایل نقلیه مور نیاز جواب بهینه را تغییر می‌دهد. به طور کلی در این حالت می‌توان دو استراتژی کلی برای تعیین ظرفیت وسایل نقلیه در نظر گرفت.

۱) ابتدا مسئله را بدون در نظر گرفتن امکان اجاره وسایل نقلیه حل کرد و سپس برای هر وسیله نقلیه در جواب بهینه با توجه به هزینه‌ها، نحوه تأمین وسایل نقلیه را (اجاره یا خرید) مشخص کرد.

۲) از همان ابتدا در تابع هدف نحوه تأمین وسایل نقلیه را (اجاره یا خرید) را منظور کرده و سپس مدل حل شود. با این حال اگر از استراتژی اول استفاده شود ممکن است جواب بهینه از دست برود، چرا که تصمیمات مربوط به خرید و اجاره وسایل نقلیه بر نحوه شکل‌گیری مسیرها تاثیر گذار است. از این رو در این مقاله با توجه به استراتژی دوم، دو سناریو مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است و برای هریک یک مدل ریاضی پیشنهاد شده است. سناریو اول، مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با در نظر گرفتن پنجره‌های زمانی را بدون در نظر گرفتن مفهوم ناهمگنی بررسی می‌کند و در سناریو دوم تعدادی از وسایل نقلیه به صورت اجاره‌ای وجود دارد که توسط شرکت‌های باربری تأمین می‌شوند. در واقع هدف اصلی پژوهش حاضر بررسی یکی از جنبه‌های دنیای واقعی یعنی ایجاد یک مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با رویکرد مالکیت ناهمگن است که به صورت چندهدفه در نظر گرفته شده است. در این مسئله هدف تعیین تعداد وسایل نقلیه مورد نیاز جهت خرید و اجاره، زمان عقد قراردادها و به طور کلی ظرفیت وسایل نقلیه خصوصی و اجاره‌ای می‌باشد. علاوه براین، هزینه‌های مصرف انرژی، به‌عنوان بخش مهمی از کل هزینه‌های حمل و نقل، در نظر گرفته شده است.

---

۱. نادری پور و علی نقیان، (۲۰۱۶)

۲. میرمحمدی و حاجی شفیعی، (۱۳۹۴)

در بخش بعدی به مرور ادبیات مربوط به مسئله مسیریابی وسایل نقلیه ناهمگن با در نظر گرفتن پنجره‌های زمانی و بررسی روش‌های حل این مسئله می‌پردازیم. در بخش سه ابتدا تعریفی از مسئله ارائه می‌شود و سپس مدل‌های ریاضی مربوط به دو سناریو در نظر گرفته شده برای مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با در نظر گرفتن پنجره‌های زمانی بررسی می‌شوند. به دنبال آن در بخش چهار به بیان ساختار کلی روش حل فراابتکاری و همچنین جزئیات بیشتر در رابطه با آن می‌پردازیم. در بخش پنج نتایج عددی مسئله با تولید ۱۳ مسئله نمونه‌ای تصادفی و حل آن توسط الگوریتم فراابتکاری، بررسی می‌شود و در نهایت در آخرین بخش از مقاله نتایج و پیشنهادات آتی مورد بحث قرار می‌گیرد.

۱. مرور ادبیات

مقالات منتشر شده در حوزه مسیریابی وسایل نقلیه و یا ناوگان اجاره‌ای به دلیل پیچیدگی‌های ذاتی و سودمند در زندگی واقعی، سرشار از رویکردهای متفاوت است و انواع مختلفی از روش‌های ابتکاری در ادبیات موضوعی آن وجود دارد. همچنین، نشان داده شده است که ابتکاری‌های مبتنی بر تکنیک‌های تجزیه (به‌عنوان مثال آزادسازی لاگرانژ و تولید ستون) ممکن است در صورت وجود زمان محاسباتی مناسب، جواب‌های بسیار با کیفیتی ارائه دهند[1]. بنابراین، روش‌های مختلف ابتکاری از روش‌های جستجوی محلی گرفته تا روش‌های مبتنی بر تکنیک‌های تجزیه برنامه‌ریزی ریاضی و فرا ابتکاری توسعه داده شده‌اند. استفاده از روش‌های فرا ابتکاری عمدتا فرا ابتکاری‌های تکاملی، برای حل مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با در نظر گرفتن پنجره‌های زمانی به صورت گسترده در ادبیات موضوعی یافت می‌شود.

یکی از مواردی که در مسائل مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با در نظر گرفتن پنجره‌های زمانی در نظر گرفته شده است، طراحی یک سیستم حمل و نقل مناسب و یکپارچه و همچنین بهبود شبکه‌ها از لحاظ هزینه، برای جلب رضایت مشتریان می‌باشد. یکی از مهم‌ترین انواع این نوع مسائل در نظر گرفتن مسائل مسیریابی ناهمگن است. شایان ذکر است که مقالات بسیاری در حوزه تسهیم کردن وسایل نقلیه و اجاره آن موجود است اما اکثر آنها مربوط به مسائل ترافیکی و اجاره وسایل نقلیه‌ای مانند دوچرخه می‌باشد که مرتبط با مبحث ما نیست.

1. Pepin, (2009).

لیو و جیانگ[1] یک مسئله مسیریابی وسایل نقلیه مختلط بسته-باز را جهت حداقل‌سازی هزینه‌های ثابت و متغیر برای اجرا روی مسیرهای باز و بسته پیشنهاد کردند. در مقاله آنها، یک الگوریتم ممتیک پیشنهاد شده است و کارایی آن در مقایسه با حل کننده CPLEX مورد تحلیل قرار گرفته است.

لئونگ[2] و همکاران، براندائو[3] و جیانگ و همکاران (۲۰۱۴)، یک الگوریتم جستجوی ممنوع برای مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با اندازه ناوگان مختلط و با هدف حداقل‌سازی هزینه‌ها پیشنهاد کردند. در مسئله آنها انواع مختلفی از وسایل نقلیه و تعداد مشخصی از هر نوع در نظر گرفته شده و روش حل ابتکاری ارائه شده توسط آنها، نتایجی با کیفیت بسیار بالا تولید کرده است. در کاری مشابه، گوناریس[4] و همکاران یک روش حل برنامه‌نویسی حافظه تطبیقی[5] (AMP) جدید را برای این مسئله پیشنهاد کردند که در آن ناوگان ناهمگن وسایل نقلیه ظرفیت‌های مختلفی داشتند. لی[6] و همکاران این مطالعه را با استفاده از یک جستجوی ممنوع اصلاح شده به‌عنوان استراتژی تشدید، بهبود و توسعه دادند.

ارنست[7] و همکاران بیان داشتند که مسئله زمان‌بندی ناوگان اجاره‌ای (RFSP)[8] در عملیات‌های اجاره وسایل نقلیه که انواع مختلفی از وسایل نقلیه را به مشتریان ارائه می‌دهند ایجاد می‌شود. RFSP شامل تخصیص وسایل نقلیه به شرکت‌ها یا افرادی است که خواهان اجاره آن هستند، تا هزینه‌های عملیاتی کاهش یابد، و این مسئله در هر دو حالت آنلاین و استاتیک رخ می‌دهد. این نویسندگان یک الگوریتم شناخته شده تخصیص را برای حالت آنلاین در نظر گرفتند و الگوریتم پیشنهادی خود را در عملیات پشتیبانی یک شرکت حمل و نقلی بزرگ که وسایل نقلیه را اجاره می‌دهد، پیاده‌سازی کردند.

بائو[9] و همکاران یک مدل ریاضی به منظور حداقل‌سازی تعداد وسایل نقلیه اجاره‌ای ارائه کردند. در مدل آنها رضایت مشتریان و مسافت‌های طی شده وسایل نقلیه، به‌عنوان

1. Liu & Jiang , (2012).
2. Leung , (2013).
3. Brandao, (2011).
4. Gounaris, (2016).
5. Adaptive Memory Programming (AMP)
6. Li, (2010).
7. Ernst, (2010).
8. Rental Fleet Scheduling Problem (RFSP)
9. Bao, (2011).

محدودیت در نظر گرفته شده است. این نویسندگان برای حل مدل پیشنهادی، یک الگوریتم دو مرحله‌ای را ارائه کردند. در اولین مرحله، تعداد اولیه وسایل نقلیه و مکان مشتریان بر اساس الگوریتم خوشه‌بندی جایگشت معکوس پنجره‌های زمانی مشخص شده و در مرحله دوم، جواب اولیه بهبود یافته و از طریق یک روش ابتکاری الحاقی بهینه‌سازی شد. در نهایت، کارایی مدل و الگوریتم پیشنهادی از طریق آزمایشات شبیه‌سازی شده تایید شد و نتایج حاصل از آن مورد تحلیل قرار گرفت.

خو[1] در سال ۲۰۱۵، با بررسی تحویل و برداشت‌های رایگان مشتریان به فرودگاه‌ها، انواع مختلفی از وسایل نقلیه اجاره‌ای و خصوصی را به طور همزمان استفاده کرد. پس از تعریف درجه رضایت در پنجره‌های زمانی ورود وسیله نقلیه، مدل حداقل‌سازی هزینه برای توصیف مسئله زمان‌بندی وسایل نقلیه ارائه شد. نتایج حاصل از آزمایشات عددی نشان دهنده امکان پذیر بودن رویکرد پیشنهادی برای یافتن مسیر بهینه بود. نادری پور و علی نقیان (۲۰۱۶) یک مدل جامع جدید برای اندازه گیری، ارزیابی و به حداقل رساندن سه گاز گلخانه‌ای مهم و منتشر شده از وسایل نقلیه، CO۲، NOx و CO، در یک مسئله مسیریابی وسایل نقلیه ارائه کردند. در این مسئله، ویژگی‌های ترافیکی مناطق متراکم، وسایل نقلیه اجاره‌ای در برخی شرکت‌های توزیع و مسیریابی وسایل نقلیه وابسته به زمان آزاد (OTDVRP)[2] در نظر گرفته شدند. این نویسندگان برای حل مسئله پیشنهادی، یک الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات معرفی کردند. نتایج، نشان دهنده عملکرد مناسب در آزمایشات عددی در مقایسه با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات[3] (PSO) اصلی بودند، همچنین، آلاینده‌ها به طور متوسط تا ۱۶ درصد در مقایسه با OTDVRP کلاسیک کاهش داشتند. عواملی که سبب تغییر در انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شوند نیز در این مطالعه شناسایی شد و مورد بحث قرار گرفت.

دوتالی و اپیکوکو[4] بر روی بهینه‌سازی یکی از حیاتی‌ترین فعالیت‌ها در حمل و نقل بین وجهی درب-تا- درب[5] تمرکز کردند. در یک حمل و نقل بین وجهی نیاز است که حداقل از دو حالت مختلف حمل و نقل (برای مثال حمل و نقل ریلی و جاده ای) بین مبدا و مقصد

1. Xu, (2015).
2. Open Time Dependent Vehicle Routing Problem (OTDVRP)
3. Particle Swarm Optimization (PSO)
4. Dotoli & Epicoco, (2017).
5. Door-to-Door Intermodal Transportation

استفاده شود. یک حمل و نقل بین وجهی در صورتی که کالا، از جانب یک فرستنده، برای یک گیرنده، در یک واحد بار ارسال می‌گردد، به صورت درب تا درب است.[1] این نویسندگان روشی را برای حل دقیق و بهینه مسائل تحویل و برداشت تحت فرضیات معمول حمل و نقل بین‌المللی مانند: بارگیری کامل کامیون‌ها (FTL)[2]، امکان تقسیم بار در تحویل، بک‌هال‌های خوشه‌بندی شده[3]، و پنجره‌های زمانی، ارائه کردند. روش ارائه شده در مقاله آنها، با ایجاد قابلیت مطابقت تحویل با درخواست برداشت، این امکان را می‌دهد تا فواصل طی شده جاده‌ای محدود شوند، در حالی که زمان مناسب و مورد نیاز خدمت‌دهی مشتریان را برآورده می‌سازد. در این مسئله وسایل نقلیه به صورت خصوصی، دردسترس، و اجاره‌ای در نظر گرفته شدند. بنابراین شرکت‌های حمل و نقل بین وجهی، می‌توانند مسیریابی وسایل نقلیه و مسائل زمان‌بندی را به صورت یکپارچه مدیریت کنند. در این مطالعه، اثر بخشی روش ارائه شده توسط یک مطالعه موردی واقعی نشان داده شد. گام[4] و همکاران مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با ناوگان خصوصی و حامل‌های مشترک را در سه بعد توسعه دادند: دو نوع گزینه اجاره‌ای، یک تابع هزینه با توجه به حجم و فاصله، و تخفیفات حجمی پیشنهاد شده توسط حامل‌های مشترک. این نویسندگان، برای حل آن، یک مسئله عدد صحیح مختلط و سه فراابتکاری را بر اساس جستجوی همسایگی ارائه کردند. تجزیه و تحلیل نتایج محاسباتی نشان دهنده مناسب بودن روش‌های حل و اثرات مثبت دو مکانیسم جدید معرفی شده، بود. این نویسندگان با تحلیل وابستگی‌های بین گزینه‌های برون سپاری موجود و مزایای اقتصادی، نشان دادند که زیر مجموعه‌ای از گزینه‌ها برای کاهش قابل توجه هزینه‌ها کافی می‌باشد.

اکثر مطالعات موجود در این حوزه، روش‌های مختلفی را برای حداقل‌سازی هزینه‌ها توسط حداقل کردن فواصل کل بدون در نظر گرفتن میزان مصرف انرژی ارائه کرده‌اند. اما علاوه بر مطالعات صورت گرفته بر روی مسافت طی شده، مقالات متعددی بر روی سایر عوامل تاثیرگذار بر روی میزان مصرف انرژی مطالعه کرده‌اند. تاورس[5] و همکاران هم تاثیر میزان بار وسایل نقلیه و هم تاثیر شیب جاده را بر میزان مصرف انرژی در حمل و نقل‌های صورت گرفته

1. Konings, (2008).
2. Full Truck Load (FTL)
3. Clustered backhauls
4. Gahm, (2017).
5. Tavares, (2008).

برای جمع‌آوری زباله‌ها در نظر گرفته‌اند. در همین راستا، بکتاش و لاپورته[1] بر روی مسئله مسیریابی-آلودگی[2] (PRP) مطالعه کردند. آنها پارامترهای مختلفی از جمله میزان بار وسایل نقلیه، سرعت و هزینه‌های کل را در مسئله مسیریابی وسایل نقلیه دوستدار محیط‌زیست در نظر گرفتند. در حالت در نظر گرفتن مسافت و میزان بار وسایل نقلیه، کارا[3] و همکاران یک تابع هزینه جدید را از منظر میزان مصرف انرژی برای CVRP ارائه کردند. عملکرد مدل ارائه شده آنها، توسط نمونه‌های موجود در ادبیات موضوعی مسئله VRP ظرفیت‌دار با استفاده از CPLEX ۸٫۰ نشان داده شد. قنادپور و ضرابی (۲۰۱۹) یک مدل و روش حل جدید برای مسئله زمان‌بندی و مسیریابی وسایل نقلیه با رویکرد مالکیت ناهمگن و یک مدل چندهدفه با حداقل‌سازی انرژی مصرفی و با در نظر گرفتن پنجره‌های زمانی ارائه کردند. در این مقاله همچنین اولویت مشتریان نیز برای خدمت دهی به آنها مورد توجه قرار گرفت. در این مقاله از دو سناریو برای تفسیر چندهدفه بودن مسئله استفاده شده است. در سناریو اول، انرژی مصرف شده توسط وسایل نقلیه و تعداد کل وسایل نقلیه حداقل و میزان رضایت مشتریان حداکثرسازی می‌شود. در سناریو دوم، فاصله بین وسایل نقلیه، تعداد کل وسایل اجاره‌ای و انرژی مصرف شده توسط وسایل نقلیه خصوصی حداقل‌سازی شده و میزان رضایت مشتریان به حداکثر می‌رسد. روش حل پیشنهادی در این مقاله، بر اساس الگوریتم‌های تکاملی است و عملکرد آن در چندین نمونه کاملا تصادفی با الگوریتم‌های NSGAII و حل کننده CPLEX مقایسه شده است. در نهایت، کارآیی روش پیشنهادی توسط آزمایش‌های محاسباتی متعددی نشان داده شده است. همچنین در ادبیات موضوعی، حداقل‌سازی میزان مصرف سوخت در مسائل مسیریابی وسایل نقلیه نیز در نظر گرفته شده است برای مثال مدل بهینه‌سازی میزان مصرف سوخت برای یک VRP ظرفیت‌دار توسط شیائو[4] و همکاران توسعه داده شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده از مطالعه آنها، میزان مصرف سوخت در مقایسه با مدل کلاسیک VRP به طور متوسط در حدود ۵ درصد کاهش داشته است. در این رابطه ژانگ[5] و همکاران. با هدف کاهش اثرات منفی بر محیط‌زیست ناشی از مسیریابی

1. Bektas and Laporte, (2011).
2. Pollution-routing problem (PRP)
3. Kara, (2007).
4. Xiao, (2012).
5. Zhang, (2014).

وسایل نقلیه مدل مشابهی را با عنوان مسئله مسیریابی وسایل نقلیه زیست‌محیطی[1] (EVRP) معرفی کردند و با استفاده از یک الگوریتم کلونی زنبور عسل ترکیبی آن را حل کردند. در جدول (۱) خلاصه‌ای از برخی از مطالعات فوق در حوزه مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با در نظر گرفتن ناوگان اجاره‌ای آورده شده است.

با توجه به سودمندی ذاتی مسائل چندهدفه در زندگی واقعی، اتخاذ یک دیدگاه چندهدفه در این مسئله می‌تواند مفید واقع شود. همچنین فرآیند بهینه‌سازی به فراهم کردن ترتیبی از جواب‌ها که تعادلی بین اهداف برقرار می‌کند، نیاز دارد نه یک جواب انفرادی. بنابراین، مدل پیشنهادی در این مطالعه به صورت چندهدفه در نظر گرفته شده است که در بخش بعدی مورد بحث قرار خواهد گرفت. در بخش بعد مسئله مربوطه و مدل ریاضی که مدلی توسعه یافته از مدل قنادپور و ضرابی (۲۰۱۹) است، بررسی می‌شود. مدل قنادپور و ضرابی (۲۰۱۹) تک دوره‌ای بود، و امکان تقسیم بار وجود نداشت و تقاضای هر مشتری تنها توسط یک وسیله نقلیه برآورده می‌شد. همچنین در مدل قنادپور و ضرابی (۲۰۱۹) ناهمگنی بین وسایل نقلیه وجود نداشت و وسایل نقلیه تنها به دو دسته خصوصی و اجاره‌ای تقسیم‌بندی شده بودند، در مدل پیشنهادی حاضر در هر دو دسته تنوع وسایل نقلیه با ظرفیت‌های مختلف وجود دارد. در مدل پیشنهادی در این پژوهش ناوگان اجاره‌ای توسط چندین شرکت حمل و نقلی تأمین می‌شود که هریک در دوره‌های زمانی مختلف محدودیت تأمین وسایل نقلیه مختلف را داشته و هریک دارای هزینه‌های عقد قرارداد برای یک افق برنامه‌ریزی چند دوره‌ای هستند. همچنین فرض شده است دریافت خدمت در مشتریان دارای محدودیت است و اگر چند وسیله نقلیه به طور همزمان به مشتری iام برسند، تنها یک یا تعداد محدودی وسیله نقلیه امکان بارگذاری را داشته و مابقی وسایل نقلیه مستلزم انتظار هستند که این زمان انتظار در هر مشتری، از یک مقدار حداکثری، فراتر نمی‌رود. در مدل قنادپور و ضرابی (۲۰۱۹) زمان خدمت دهی در هر مشتری ثابت فرض شده است که در مدل پیشنهادی این زمان به‌عنوان مضربی از میزان بار مورد نیاز مشتری در هر دوره زمانی در نظر گرفته شده است. همچنین سایر مفروضات مدل پیشنهادی در این پژوهش به گونه‌ای است که مدل‌سازی مسئله به دنیای واقعی نزدیکتر، و از این رو کاربردی‌تر باشد.

1. Environmental Vehicle Routing Problem (EVRP)

جدول ۱- مطالعات پیشین مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با در نظرگرفتن پنجره‌های زمانی و مالکیت ناهمگن[1]

ردیف	نویسندگان	سال انتشار	مدل سازی										روش حل		
			تابع هدف		معیارهای توابع هدف						مدل ریاضی	قطعی / غیرقطعی	دقیق	ابتکاری	فرا ابتکاری
			تک هدفه	چندهدفه	انتشار گازهای گلخانه‌ای	رضایت مشتریان	هزینه	مسافت سفر	مصرف انرژی						
۱	لی و همکاران	۲۰۱۰	*				*				MAMP[1]	قطعی			جستجوی ممنوع تعمیم یافته
۲	ارنست و همکاران	۲۰۱۰	*				*				MIP	قطعی	سیپلکس	مبتنی بر تخصیص	
۳	براندائو	۲۰۱۱	*				*				گراف	قطعی			جستجوی ممنوع
۴	بکتاش و لاپورته	۲۰۱۱	*		*		*	*	*		MIP	قطعی	سیپلکس		
۵	لیو و جیانگ	۲۰۱۲	*				*				MIP	قطعی	سیپلکس		الگوریتم ممتیک
۶	لئونگ و همکاران	۲۰۱۳	*				*	*			گراف	قطعی			شبیه‌سازی تبرید
۷	جیانگ و همکاران	۲۰۱۴	*			*	*	*			MINLP	قطعی			جستجوی ممنوع
۸	گوناریس و همکاران	۲۰۱۶	*				*				MIP	غیرقطعی	سیپلکس		AMP
۹	نادری پور و علی نقیان	۲۰۱۶			*		*				MEET	قطعی	روش شمارش		بهینه‌سازی ازحام ذرات
۱۰	دوتالی و اپیکوکو	۲۰۱۷	*					*			MIP	قطعی	GLPK		
۱۱	گاهم و همکاران	۲۰۱۷	*				*				MIP	قطعی	سیپلکس	جستجوی همسایگی متغیر	

1. Multi-Start Adaptive Memory Programming (MAMP)

ردیف	نویسندگان	سال انتشار	مدل سازی									روش حل		
			تابع هدف		معیارهای توابع هدف					قطعی/غیرقطعی	مدل ریاضی	دقیق	ابتکاری	فرا ابتکاری
			تک هدفه	چندهدفه	انتشار گازهای گلخانه‌ای	رضایت مشتریان	هزینه	مسافت سفر	مصرف انرژی					
۱۲	قنادپور و ضرابی	۲۰۱۹		*		*	*		*	قطعی	MIP	سیپلکس		NSGAII الگوریتم مبتنی بر الگوریتم‌های تکاملی

۲. تعریف مسئله

طراحی سنتی مسئله مسیریابی وسایل نقلیه (VRP) در ابتدا بر روی ارسال موثر یک ناوگان وسایل نقلیه و تضمین بارگیری آن با اقلام حمل شده برای خدمت رسانی به گروهی از مشتریان با نیازهای مشخص مانند حداقل‌سازی هزینه‌های عملیاتی، متمرکز بود. VRP برای اولین بار توسط دانتزیگ و رامسر[1] معرفی شد و به دلیل اهمیت آن در لجستیک و مدیریت زنجیره تامین، تحقیقات جامع و گسترده‌ای توسط نویسندگان مختلفی بر روی آن صورت گرفت. همانطور که گفته شد، یکی از مهم‌ترین و گسترده‌ترین مسائل بهینه‌سازی ترکیبی مطالعه شده در این حوزه، مسائل مسیریابی وسایل نقلیه با در نظر گرفتن پنجره‌های زمانی است. این مدل زمانی که در آن از ناوگان حمل و نقلی ناهمگن استفاده شود، یکی از جنبه‌های دنیای واقعی محسوب می‌شود. در مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با در نظر گرفتن پنجره‌های زمانی با مالکیت ناهمگن، وسایل نقلیه در تجهیزات، ظرفیت، عمر و یا هزینه متفاوت هستند. اگرچه اشکال مختلفی از مسائل مسیریابی وسایل نقلیه با در نظر گرفتن پنجره‌های زمانی وجود دارند، اغلب آنها هزینه را به وسیله حداقل‌سازی مسافت کل سفر و یا زمان سفر، به حداقل می‌رسانند. اما در واقعیت، مقدار سوخت یا انرژی مصرفی وسایل نقلیه، نگرانی بیشتری برای شرکت‌های باربری محسوب می‌شود تا مسافت طی شده که مطابق با آخرین الزامات لجستیک سبز نیز می‌باشد. آمارها نشان می‌دهند که هزینه‌های انرژی، بخش قابل توجهی از

1. Dantzig and Ramser, (1959).

هزینه‌های کل حمل و نقل را تشکیل می‌دهند[1]. بنابراین، مهم است که مصرف انرژی همراه با افزایش بهره وری صورت بگیرد. کاهش مصرف انرژی همچنین به نفع جامعه است، زیرا انتشار دی اکسید کربن نیز می‌تواند کاهش یابد.

مسئله مورد بررسی در این مطالعه که تعمیمی از مسئله مورد بررسی در مقاله قنادپور و ضرابی (۲۰۱۹) می‌باشد، یک مسئله مسیریابی وسایل نقلیه ناهمگن است که به صورت چندهدفه در نظر گرفته شده است، به طوری که علاوه بر هزینه‌های حمل و نقل، خرید، نگهداری و غیره، میزان مصرف انرژی، به‌عنوان یک تابع هدف مجزا در نظر گرفته شده است. مدل پیشنهادی در دو سناریو مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهد گرفت. قبل از توضیح سناریوها لازم است تا مفاهیم کلاسیک مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با پنجره‌های زمانی توصیف شوند. در مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با در نظر گرفتن پنجره‌های زمانی یک گره خاص به نام انبار، مجموعه‌ای از مشتریان $c=\{0,1,...,N\}$ ، و یک شبکه جهت دار که انبار را به مشتریان متصل می‌کند، در نظر گرفته می‌شود. علاوه براین، مجموعه‌ای از ناوگان $v=\{1,2,...,K\}$ نیز در انبار در دسترس هستند. این ناوگان وسایل نقلیه باید انبار مرکزی را ترک کرده و در نهایت به آن بازگردند. هر وسیله نقلیه یک ظرفیت محدود و هر مشتری یک تقاضای از قبل مشخصی دارد. مسافت d_{ij} و زمان سفر t_{ij} با هر کمان از شبکه مرتبط هستند. از طرف دیگر، هر مشتری i باید در بازه زمانی از پیش تعیین شده $[e_i, l_i]$ خدمت رسانی شود. وسایل نقلیه‌ای که زودتر از حد پایین این بازه به مشتریان برسند باید منتظر بمانند (w_i زمان انتظار در گره i است). مدل پیشنهادی دارای دو نوع متغیر تصمیم‌گیری می‌باشد. هدف از مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با در نظر گرفتن پنجره‌های زمانی کلاسیک، خدمت رسانی به کلیه مشتریان به گونه‌ای است که مسافت طی شده توسط وسایل نقلیه حداقل شود. این مسئله یک مدل زمان‌بندی و مسیریابی وسایل نقلیه را پیشنهاد می‌کند که در آن ناوگان ناهمگن، از نظر مالکیت ناوگان، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مدل، مسافت طی شده توسط وسایل نقلیه، تعداد کل وسایل نقلیه اجاره‌ای و انرژی مصرفی توسط وسایل نقلیه خصوصی به حداقل می‌رسد. در مدل پیشنهادی حاضر، کاهش هزینه‌های مربوط به مصرف انرژی به‌عنوان یکی از اهداف در نظر گرفته شده است. هزینه‌های واقعی وسایل نقلیه به عوامل

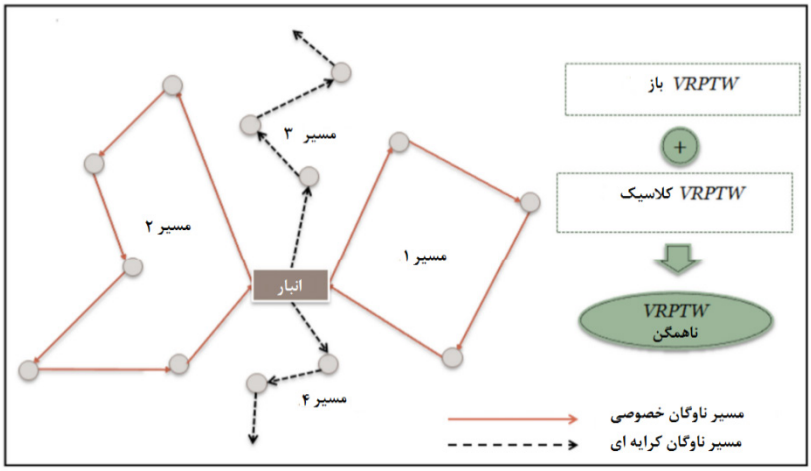
1. Xiao, (2012).

بسیار زیادی بستگی دارد. این عوامل عبارتند از بار وسایل نقلیه، مصرف سوخت در هر مایل (کیلومتر)، قیمت سوخت، زمان صرف شده یا مسافت طی شده تا یک گره مشخص، زمان صرف شده برای خدمت دهی به کلیه مشتریان، کل مسافت طی شده، استهلاک، نگهداری و تعمیرات وسایل نقلیه، دستمزد رانندگان و غیره. عامل اول که شامل شرایط جاده، میزان بار، سرعت و نرخ مصرف سوخت می‌شود رابطه مستقیمی را مصرف انرژی دارند و سایر عوامل هیچ‌گونه ارتباط مستقیمی با زمان‌بندی سفر ندارند. علاوه بر این، اغلب عوامل ذکر شده در واقع بر پایه فاصله و یا زمان هستند که می‌توان آنها با مسافت طی شده تقریب زد. با این حال، برخی از متغیرها مانند بار وسایل نقلیه، مصرف سوخت در هر کیلومتر و زمان صرف شده تا یک گره مشخص را ن می‌توان به‌عنوان فاصله بین گره‌ها در نظر گرفت و آن را در هزینه‌های سفری که ممکن است ثابت نباشند، در نظر گرفت. این نوع متغیرها، ممکن است به‌عنوان تابعی از جریان، به ویژه به‌عنوان تابعی از بار وسایل نقلیه بر روی کمان مربوطه نمایش داده شوند. اگرچه میزان مصرف انرژی تا حد زیادی از طریق مسافت طی شده تعیین می‌شود، اما عوامل دیگری نیز وجود دارند که تاثیر بسزایی در هزینه‌های مصرف سوخت دارند. به عبارت دیگر، اگر سایر عوامل ثابت بمانند، مصرف انرژی به طور عمده به فاصله و میزان بار بستگی دارد. به‌عنوان مثال برای یک مسیر خاص، مصرف انرژی یک وسیله نقلیه خالی بسیار کمتر از یک وسیله نقلیه بارگذاری شده است. شایان ذکر است که مسافت طی شده به ازای هر واحد انرژی، قویا نسبت عکسی با وزن وسیله نقلیه دارد[1]. بنابراین، برخلاف اکثر مطالعاتی که تنها حداقل کردن هزینه را با حداقل‌سازی مسافت طی شده انجام می‌دهند، لازم است علاوه بر مسافت طی شده، بار وسایل نقلیه به‌عنوان یک شاخص در هزینه در نظر گرفته شود. بدیهی است که وزن وسیله نقلیه برابر است با وزن وسیله نقلیه خالی (پارامتر tare در مدل پیشنهادی) بعلاوه میزان بار وسیله نقلیه. لازم به ذکر است که این تابع هزینه اساسا بر روی مصرف انرژی تمرکز دارد و بر پایه حالت خاصی از مطالعه قنادپور و ضرابی (۲۰۱۹) است و در آن شیب جاده صفر در نظر گرفته شده است.

همانطور که گفته شد در این مقاله مفهوم ناهمگنی ناوگان حمل و نقل به مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با در نظر گرفتن پنجره‌های زمانی اضافه شده است. در این حالت، وسایل

۱. خیائو و ژائو، (۲۰۱۲)

نقلیه بخش خصوصی در خدمت برخی مشتریان قرار می‌گیرند و با توجه به مسائل امنیتی و تعمیرات و نگهداری باید به انبار شرکت باز گردند. اما نیاز نیست که وسایل نقلیه اجاره شده بعد از اتمام وظایفشان به انبار برگردند چرا که شرکت هزینه‌های بعد از ارائه آخرین سرویس توسط آنها را متقبل نمی‌شود. بنابراین مسیریابی این وسایل نقلیه باز است و تصمیم گیران باید بین وسایل نقلیه خصوصی و اجاره‌ای که هزینه‌های متفاوتی برای خدمت رسانی به مشتریان دارند، دست به انتخاب بزنند. نمودار (۱) مسیریابی وسایل نقلیه خصوصی و اجاره‌ای را به صورت یک طرح معمولی نشان می‌دهد.



نمودار۱- مسئله مسیریابی ناوگان خصوصی و اجاره‌ای قنادپور و ضرابی (۲۰۱۹)

به طور کلی در مسئله حاضر فواصل طی شده و انرژی مصرف شده توسط وسایل نقلیه خصوصی و اجاره شده حداقل‌سازی می‌شود، همچنین به‌عنوان یک نوآوری که تاکنون مورد توجه قرار نگرفته است، تعدادی از وسایل نقلیه به صورت اجاره‌ای وجود دارد که توسط شرکت‌های باربری تأمین می‌شود. بنابراین تعداد این وسایل نقلیه، زمان عقد قراردادها و به طور کلی ظرفیت آنها باید مشخص شود. بنابراین در مسئله پیشنهادی فرض شده است که:

- وسایل نقلیه در دو نوع خصوصی و اجاره‌ای در دسترس هستند.
- تقاضا از یک توزیع احتمالی پیروی کرده و در طول زمان متغیر است.
- وسایل نقلیه ناهمگن هستند.

- مشتریان دارای پنجره‌های زمانی برای خدمت رسانی هستند و فرض بر این است که تمامی مشتریان ر بازه‌های زمانی مورد نظر خدمت رسانی شوند. همچنین فرض شده است که پنجره‌های زمانی در هر دوره ثابت است، چرا که به‌عنوان مثال هر مشتری تنها روز خاصی در هر ماه را (دوره‌های یک ماهه) به پرسازی انبار خود اختصاص داده است.
- امکان تقسیم بار[1] بین وسایل نقلیه وجود دارد.
- دریافت خدمت در مشتریان دارای محدودیت است به این معنی که یک مشتری بدلیل محدودیت مکانی و یا غیره تنها قادر به دریافت خدمت از یک یا تعداد محدودی وسیله نقلیه است، به عبارتی اگر چند وسیله نقلیه به طور همزمان به مشتری iام برسند، تنها یک یا تعداد محدودی وسیله نقلیه امکان بارگذاری را داشته و مابقی وسایل نقلیه مستلزم انتظار هستند.
- زمان انتظار وسیله نقلیه در هر مشتری، از یک مقدار حداکثری، فراتر نمی‌رود.
- برای تعیین تعداد وسایل نقلیه اجاره‌ای، زمان و طول عقد قراردادها با شرکت‌های خارجی حمل و نقل و به طور کلی تعیین ظرفیت وسایل نقلیه اجاره از یک مدل پیشنهادی جدید استفاده شده است.

۲-۱. نمادها

V مجموعه انواع وسایل نقلیه $V=1,2,..,V$

C مجموعه مشتریان $i,j=0,1,2,..,N$ که صفر نشان دهنده انبار است.

T افق برنامه‌ریزی $t=0,1,\ldots,T$

k,k' شمارنده وسیله نقلیه از نوع V

i,j,p شمارنده مشتریان

R مجموعه شرکت‌های باربری $r=1,2,..,R$

$m_{i,t}$ تقاضای مشتری i ام در دوره زمانی t ام برحسب واحد بار (فرض شده است که تقاضا یک متغیر تصادفی یکنواخت است)

1. Split load

Q_v میزان ظرفیت مجاز حمل برای وسیله نقلیه نوع V (این مقادیر برای هر نوع وسیله نقلیه توسط آیین نامه و برحسب تناژ مشخص می‌شود)

Cf_v هزینه ثابت خرید وسیله نقلیه نوع V

Co_v هزینه‌های متغیر وسیله نقلیه نوع V برحسب فاصله طی شده.

CH هزینه‌های نگهداری وسایل نقلیه در یک دوره

$tare_v$ وزن وسیله نقلیه نوع V در حالت خالی

f_i زمان مورد نیاز برای دریافت خدمت در مشتری i ام

e_i حد پایین پنجره زمانی مشتری i ام

l_i حد بالای پنجره زمانی مشتری i ام

D_{ij} مسافت سفر بین نقطه i ام و j ام

tt_{ij} زمان سفر بین نقطه i ام و j ام

Cc_r هزینه عقد قرارداد با شرکت حمل و نقلی r ام.

$Cr_{v,r}$ هزینه اجاره وسیله نقلیه نوع V در هر دوره از شرکت حمل و نقلی r ام.

$Qr_{r,v}$ تعداد وسایل نقلیه در دسترس از نوع V در شرکت حمل و نقلی r ام.

w_{max} حداکثر زمان انتظار وسایل نقلیه

H یک عدد بسیار بزرگ

$z^t_{ijv_k}$ اگر وسیله نقلیه k ام از نوع V در دوره t از نقطه i به نقطه j حرکت کند، ۱؛ در غیر این صورت، صفر.

$x_{r,v,t}$ تعداد وسایل نقلیه از نوع V در دوره t که از شرکت حمل و نقلی r ام اجاره می‌شود.

$u^t_{ijv_k}$ وزن بار وسیله نقلیه k ام از نوع V در دوره t از نقطه i به نقطه j.

$w^t_{iv_k}$ زمان انتظار وسیله نقلیه k ام از نوع V در دوره t و در نقطه i.

$At^t_{iv_k}$ زمان رسیدن وسیله نقلیه k ام از نوع V به نقطه i در دوره t.

$ts^t_{iv_k}$ زمان شروع خدمت دهی وسیله نقلیه k ام از نوع V به نقطه i در دوره t.

$kk_{v,t}$ تعداد وسایل نقلیه مورد نیاز از نوع V برای خرید در دوره t.

$kp_{v,t}$ تعداد وسایل نقلیه مورد نیاز از نوع V که باید در دوره t اجاره شود.

$kmax_v$ تعداد وسایل نقلیه مورد نیاز از نوع V برای خرید در ابتدای افق برنامه ریزی

۲-۲. مدل ریاضی پیشنهادی برای سناریو I

$$Min\ O1 = \sum_{v\in V} Cf_v \times kmax_v + \sum_{t\in T}\sum_{i\in C}\sum_{j\in C, j\neq i}\sum_{v\in V}\sum_{k} D_{ij} \times Co_v \times z_{ijv_k}^t + \sum_{t\in T}\sum_{v\in V} CH \times (kmax_v - kk_{v,t}) \quad (۱)$$

$$Min\ O2 = \sum_{t\in T}\sum_{i\in C}\sum_{j\in C, j\neq i}\sum_{v\in V}\sum_{k} (tare_v \times z_{ijv_k}^t + u_{ijv_k}^t) \times D_{ij} \quad (۲)$$

s.t

$$\sum_{i\in C} m_{i,t} \leq \sum_{v\in V} Q_v \times kk_{v,t} \qquad \forall t \in T \quad (۳)$$

$$kk_{v,t} = \sum_{j\in C/\{0\}}\sum_{k} z_{0jv_k}^t \qquad \forall t \in T, v \in V \quad (۴)$$

$$kmax_v = \max_{t\in T}(kk_{v,t}) \qquad \forall v \in V \quad (۵)$$

$$\sum_{j\in C, j\neq i} z_{ijv_k}^t = \sum_{j\in C, j\neq i} z_{jiv_k}^t \qquad \forall t \in T, i \in C, v \in V, k \quad (۶)$$

$$\sum_{j\in C, j\neq i} z_{jiv_k}^t \leq 1 \qquad \forall t \in T, i \in C, v \in V, k \quad (۷)$$

$$\sum_{i\in C, i\neq j}\sum_{v\in V}\sum_{k} z_{ijv_k}^t \geq 1 \qquad \forall t \in T, j \in C \quad (۸)$$

$$\sum_{j\in C, j\neq i}\sum_{v\in V}\sum_{k} u_{jiv_k}^t - \sum_{j\in C, j\neq i}\sum_{v\in V}\sum_{k} u_{ijv_k}^t = m_{i,t} \qquad \forall t \in T, i \in C/\{0\} \quad (۹)$$

$$\sum_{j\in C, j\neq i}\sum_{v\in V}\sum_{k} (u_{jiv_k}^t + m_{i,t}) \times z_{jiv_k}^t = \sum_{j\in C, j\neq i}\sum_{v\in V}\sum_{k} u_{ijv_k}^t \times z_{ijv_k}^t \qquad \forall t \in T, i \in C/\{0\} \quad (۱۰)$$

$$u_{jiv_k}^t \leq Q_v \times z_{ijv_k}^t \qquad \forall t \in T, i, j \in C, v \in V, k \quad (۱۱)$$

$$w_{0v_k}^t = 0 \qquad \forall t \in T, v \in V, k \quad (۱۲)$$

$$w_{iv_k}^t \leq w_{max} \qquad \forall t \in T, i \in C, v \in V, k \quad (۱۳)$$

$$e_i \leq w_{iv_k}^t + At_{iv_k}^t \leq l_i \qquad \forall t \in T, i \in C, v \in V, k \quad (۱۴)$$

$$w_{iv_k}^t + At_{iv_k}^t + tt_{ij} + f_i - \left(1 - z_{jiv_k}^t\right) \times H \leq At_{jv_k}^t \qquad \forall t \in T, i \neq j \in C/\{0\}, v \in V, k \quad (۱۵)$$

$$ts_{iv_k}^t = w_{iv_k}^t + At_{iv_k}^t \qquad \forall t \in T, i \in C, v \in V, k \quad (۱۶)$$

$$ts_{jv_k}^t + \left(1 - z_{ijv_k}^t\right) \times H \geq \left(ts_{jv_{k'}}^t + f_j\right) \times z_{pjv_{k'}}^t \qquad \forall t \in T, i, p, j \in C, v \in V, k \neq k' \quad (۱۷)$$

$$z_{ijv_k}^t \in \{0,1\}\ ; \quad (۱۸)$$

$$u_{ijv_k}^t, w_{iv_k}^t, At_{iv_k}^t, ts_{iv_k}^t \geq 0;$$

$$kk_{v,t}, kmax_v \geq 0 \text{ and } int \qquad \forall t \in T, i \in C, v \in V, k$$

معادلات (۱) و (۲) توابع هدف مدل پیشنهادی می‌باشند. تابع هزینه به صورت معادله (۱) نوشته می‌شود که در آن عبارت دوم هزینه‌های متغیر بر حسب فاصله طی شده را بیان می‌کند و عبارت سوم بیانگر هزینه‌های نگهداری وسایل نقلیه در دوره‌هایی است که نیازی به آنها

وجود ندارد. معادله (۲) انرژی مصرفی وسایل نقلیه خصوصی را حداقل می‌کند. در فیزیک، کار مکانیکی مفهومی است که طی آن، اعمال نیرو باعث جابه‌جایی یک ذره می‌شود، به عبارتی کار نتیجه اعمال نیرو و جابه‌جایی حاصل از آن است. فرض بر این است که حرکت وسایل نقلیه به صورت حرکتی در نظر گرفته می‌شود که در آن نیروی ایجادکننده این حرکت برابر است با نیروی اصطکاک (کار= نیرو در جابجایی= (ضریب اصطکاک×وزن× کسینوس (θ)+ وزن× سینوس (θ)) که θ در آن معادل شیب جاده است). از این رو، یک تابع هدف جدید برای حداقل‌سازی کار انجام شده توسط وسیله نقلیه یا انرژی مصرفی (معادل سوخت مصرف شده توسط وسایل نقلیه) در نظر گرفته می‌شود که به شرح زیر است:

$$Min \sum_{t\in T}\sum_{i\in C}\sum_{j\in C}\sum_{v\in V}\sum_{k}\Big[\big(\mu'_{ij}\times\big(u^{t}_{ijv_k}+tare_k\big)\times g\times\cos(\theta_{ij})\big) + \Big(\big(u^{t}_{ijv_k}+tare_k\big)\times g\times\sin(\theta_{ij})\Big)\Big]\ \ z^{t}_{ijv_k}\times D_{ij} \qquad (۱۹)$$

اگر $\theta_{ij}=0$ آنگاه تابع جدید به صورت زیر می‌باشد.

$$Min \sum_{t\in T}\sum_{i\in C}\sum_{j\in C}\sum_{v\in V}\sum_{k}\Big[\big(\mu'_{ij}\times\big(u^{t}_{ijv_k}+tare_k\big)\times g\times D_{ij}\big)\Big]\times z^{t}_{ijv_k} \qquad (۲۰)$$

در توابع فوق g شتاب گرانش و برابر با $۹٫۸۱\ m/s^2$ است، برابر با شیب مسیر اتصالi و j، و ضریب اصطکاک مسیر اتصالi و j، که می‌توان آن را در جاده‌های مشابه ثابت در نظر گرفت[۱]. بنابراین با ثابت در نظر گرفتن این مقادیر، معادله ۱۹ به معادله (۲) تبدیل می‌شود. تعداد وسایل نقلیه مورد نیاز برای خرید با توجه به معادلات (۳) تا (۵) ارضا می‌شوند. معادله (۵) بیان می‌کند که شرکت باید در ابتدای افق برنامه ریزی، حداکثر تعداد وسایل مورد نیاز بین دوره‌های زمانی را خریداری کند. معادلات (۶) تا (۸) محدودیت‌های مربوط به مسیریابی وسایل نقلیه هستند و معادله (۸) بیان کننده امکان تقسیم بار توسط وسایل نقلیه می‌باشد. محدودیت‌های (۹) و (۱۰) میزان بار وسیال نقلیه را مشخص می‌کنند و محدودیت (۱۱) تضمین می‌کند که این میزان بار از ظرفیت وسایل نقلیه فراتر نرود. معادله (۱۲) نشان می‌دهد که وسایل نقلیه بدون معطلی در انبار بارگذاری می‌شوند و زمان انتظار آنها صفر

۱. قنادپور و ضرابی، (۲۰۱۹)

است. همچنین معادله (۱۳) حداکثر زمان انتظار مجاز برای وسایل نقلیه را مشخص می‌کند. معادله (۱۴) محدودیت پنجره زمانی برای هریک از مشتریان را ارضا می‌کند. محدودیت‌های (۱۵) و (۱۶) به ترتیب زمان رسیدن هریک از وسایل نقلیه و زمان شروع خدمت‌دهی هریک از آنها به مشتریان را تعیین می‌کند. معادله (۱۷) بیان می‌دارد که یک مشتری بدلیل محدودیت مکانی و یا غیره تنها قادر به دریافت خدمت از یک وسیله نقلیه است و در نهایت متغیرهای تصمیم مسئله نشان داده شده است.

۲-۳. مدل ریاضی پیشنهادی برای سناریو II

در سناریو دوم تنها تابع هدف اول به صورت زیر تغییر خواهد کرد که در آن هزینه‌های عقد قرارداد و هزینه‌های اجاره بها هریک از وسایل نقلیه با هریک از شرکت‌های باربری لحاظ شده است.

$$Min\ O1 = \sum_{v\in V} Cf_v \times kmax_v + \sum_{t\in T}\sum_{i\in C}\sum_{j\in C, j\neq i}\sum_{v\in V}\sum_{k} D_{ij}\times Co_v \times z^t_{ijv_k} + \sum_{t\in T}\sum_{v\in V} CH\times(kmax_v - kk_{v,t}) + \frac{\sum_{t\in T}\sum_{r\in R}\sum_{v\in V} Cc_r \times x_{r,v,t}}{|T|\times|v|} + \left(\sum_{t\in T}\sum_{r\in R}\sum_{v\in V} Cr_{v,r}\times x_{r,v,t}\right) \quad (۲۱)$$

همچنین محدودیت‌هایی به شرح زیر به مدل اضافه می‌شوند.

$$\sum_{i\in C} m_{i,t} \leq \sum_{v\in V} Q_v \times (kk_{v,t} + kp_{v,t}) \qquad \forall t\in T \quad (۲۲)$$

$$kp_{v,t} = \sum_{r\in R} x_{r,v,t} \qquad \forall t\in T, v\in V \quad (۲۳)$$

$$x_{r,v,t} = \sum_{j\in C/\{0\}} z^t_{ijv_k} \qquad \forall t\in T, r\in R, v\in V \quad (۲۴)$$

$$x_{r,v,t} \leq Qr_{r,v} \qquad \forall t\in T, r\in R, v\in V \quad (۲۵)$$

$$x_{r,v,t}, kp_{v,t} \geq 0 \text{ عدد صحیح و} \qquad \forall t\in T, i\in C, v\in V, k \quad (۲۶)$$

محدودیت (۲۲) بیان می‌کند که مجموع تقاضای مشتریان در هر دوره باید کمتر از مجموع ظرفیت‌های ناوگان خصوصی و اجاره‌ای باشد. معادله (۲۳) تعداد وسایل نقلیه اجاره‌ای در هر دوره را تعیین می‌کند. محدودیت (۲۴) تعداد وسایل نقلیه اجاره شده از شرکت حمل

و نقلی rام را تعیین می‌کند و محدودیت (۲۵) تضمین می‌کند که این مقدار از تعداد وسایل نقلیه در دسترس در آن شرکت فراتر نرود. در نهایت متغیرهای اضافه شده به مسئله که هر دو عدد صحیح هستند نشان داده شده است.

۳. روش حل پیشنهادی

بدیهی است که این نوع مسئله بسیار چالش برانگیزتر و پیچیده‌تر از مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با در نظر گرفتن پنجره‌های زمانی معمولی که NP-hard است، می‌باشد. این به آن معنا است که مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با در نظر گرفتن پنجره‌های زمانی و مالکیت ناهمگن نیز متعلق به کلاس مسائل NP-hard می‌باشد. بنابراین با توجه به سخت بودن این مسئله و کاربرد وسیع آن در شرایط واقعی، تکنیک‌های بهینه‌سازی که قادر به تولید جواب‌هایی با کیفیت بالا در زمان محدود هستند، اهمیت زیادی دارد [۱].

از آنجایی که مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با در نظر گرفتن پنجره‌های زمانی و مالکیت ناهمگن یک مسئله NP-Hard است با افزایش ابعاد مسئله، زمان حل آن به شکل نمایی افزایش می‌یابد. برای کاهش زمان محاسباتی در مسائلی با ابعاد بزرگتر، رویکرد فراابتکاری ترکیبی مبتنی بر الگوریتم‌های سیستم ایمنی مصنوعی و ازدحام ماهی‌های مصنوعی[۲] (AIS_AFS)[۳] برای حل این مسئله پیشنهاد شده و با الگوریتم NSGAII کلاسیک مورد مقایسه قرار گرفته است. برای چندهدفه بودن مسئله نیز از روش حل معیار جامع (LP-متریک[۴]) استفاده شده است. روش معیار جامع از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM) است که به حل مدل‌های تصمیم‌گیری چندهدفه (MODM) می‌پردازد. تکنیک‌های برنامه‌ریزی آرمانی و معیار جامع، از متدولوژی‌های مطرح در تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه می‌باشند. این رویکردها دارای ریشه مشترک هستند و از یک نقطه هدف قطعی در فضای معیار به منظور مدل‌سازی ترجیحات تصمیم‌گیرنده استفاده می‌کنند. در تکنیک معیار جامع این نقطه هدف، برداری از سطوح مرجع است[۵]. در این روش مجموع توان انحرافات نسبی اهداف

1. Dondo & Cerda, (2007).
2. Artificial Immune System (AIS) and Artificial Fish Swarm (AFS) (AIS_AFS)
۳. فتاحی و همکاران (۱۳۹۶)
4. LP-metric
5. Ogryczak, (2001).

از مقدار بهینه‌شان حداقل می‌شود. بدین صورت که برای یک مسئله با n تابع هدف باید مقدار بهینه هر تابع هدف را (از اولین تا nمین) مستقل از بقیه n-1 تابع هدف دیگر و با در نظرگیری تمامی محدودیت‌های مسئله حساب شود. از آنجایی که هرچه توابع هدف به مقادیر بهینه‌شان نزدیک‌تر باشد، مطلوب‌تر است بنابراین به دنبال تابع هدفی هستیم که با استفاده از آن همه توابع به مقدار بهینه‌شان نزدیک شوند بدین منظور باید مجموع انحراف‌های نسبی اهداف از مقادیر بهینه‌شان حداقل شود.

۳-۱. تولید جواب شدنی

برای حل مسئله مورد نظر با استفاده از الگوریتم ترکیبی ایمنی مصنوعی و ازدحام ماهی‌های مصنوعی، ابتدا بایستی ساختاری به منظور دستیابی به جواب اولیه شدنی ایجاد نمود. با توجه به ساختار الگوریتم ترکیبی ارائه شده لازم است سیستم کدگذاری دارای ساختاری پیوسته باشد. در این راستا رشته جواب‌های زیر به‌عنوان نمایش‌دهنده جواب اولیه ارائه شده است. پس از آن از طریق تابع کدنویسی شده این رشته جواب به ساختار یک جواب قابل درک تبدیل می‌شود.

رشته‌های تعریف شده به صورت زیر هستند:

۱. رشته نمایش‌دهنده اولویت استفاده از وسیله نقلیه نوع v و تعداد آن

در این رشته به هر نوع وسیله نقلیه به صورت تصادفی یک عدد بین ۰ تا ۱ و یک عدد بین ۱ تا K) K تعداد وسایل نقلیه قابل استفاده است) اختصاص می‌یابد. اولویت استفاده از هر وسیله نقلیه با اعداد تصادفی بین ۰ و ۱ نشان داده می‌شود. همچنین تعداد وسایل نقلیه از هر نوع با اعداد صحیح مشخص شده است. به‌عنوان مثال در نمودار (۲) وسیله نقلیه نوع یک در اولویت اول است که به تعداد ۲ در دسترس است و سپس وسیله نقلیه نوع سه که به تعداد سه در دسترس است. به این صورت که برای بازید مشتریان ابتدا از وسیله نقلیه نوع یک استفاده شده و پس از ارضای محدودیت‌های زمان و ظرفیت مجاز وسیله نقلیه از وسیله نقلیه دوم از همان نوع استفاده می‌شود. اگر هنوز تمامی مشتریان بازدید نشده‌اند از وسیله نقلیه نوع سه استفاده می‌شود.

۰.۶۲	۰.۲۳	۰.۷۵
۳	۱	۲

نمودار ۲- رشته نمایش دهنده اولویت استفاده از وسیله نقلیه نوع ۷ و تعداد آن

۲. رشته نشان‌دهنده اولویت وسایل نقلیه و شرکت‌های باربری

این رشته یک ماتریس با اعداد تصادفی بین ۰ و ۱ است. تعداد سطرهای آن برابر تعداد شرکت‌های باربری به علاوه (۱+) و تعداد ستون آن برابر انواع وسایل نقلیه است. سطر اول اولویت وسایل نقلیه در استفاده و سطرهای بعدی اولویت شرکت‌های باربری برای اجاره وسایل نقلیه را نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال در نمودار (۳) در سطر اول سه نوع وسایل نقلیه داریم که ابتدا وسایل نقلیه نوع دو و پس از آن وسایل نقلیه نوع یک و سپس وسایل نقلیه نوع سه به ترتیب در اولویت اجاره هستند. در سطر دوم اولویت شرکت‌های باربری (۱) در اجاره وسیله نقلیه و سطر سوم اولویت شرکت‌های باربری (۲) را نشان داده شده است.

۰.۲۱	۰.۶۸	۰.۳
۰.۳۲	۰.۴۴	۰.۱۱
۰.۲۳	۰.۸۹	۰.۳

نمودار ۳- ماتریس تصادفی برای اولویت وسایل نقلیه و شرکت‌های باربری

۳. اولویت مشتری‌ها برای بازدید

در رشته سوم نیز اولویت هر مشتری برای بازدید با اعداد تصادفی بین ۰ و ۱ نشان داده می‌شود. از آنجایی که تمام تقاضای مشتری‌ها باید برآورده شود لذا این رشته اولویت محصولات برای برآورده شدن را نشان نمی‌دهد. در رشته زیر، مشتری چهار در اولویت اول و پس از آن مشتری دو در اولویت بازدید است.

۰.۳۱	۰.۵	۰.۱	۰.۷۸

نمودار ۴- بردار تساوی برای اولویت هر مشتری

۳-۲. ارزیابی میل پیوندی

جهت مقایسه جواب‌های شدنی به‌دست آمده در هر تکرار الگوریتم، بایستی میل پیوندی و یا همان تطابق آنتی‌بادی‌ها و آنتی‌ژن‌ها مورد ارزیابی قرار گیرد. الگوریتم پیشنهادی در مطالعه فتاحی و همکاران (۱۳۹۶) که در این مطالعه از آن برای حل مدل پیشنهادی استفاده شده است، تک هدفه بوده و جهت استفاده از این الگوریتم در مدل دو هدفه پیشنهادی، باید میل پیوندی به صورت معادله (۲۷) محاسبه شود. در واقع می‌توان گفت در این بخش سعی شده است روش LP-متریک در الگوریتم فراابتکاری به کار گرفته شود.

$$Z_{LP-metric} = w_1\left(\frac{Z_1 - Z^*}{Z^*}\right) + w_2\left(\frac{Z_2 - Z^*}{Z^*}\right) \quad (۲۷)$$

که در آن Z^* بهترین جواب یافت شده در ۵ تکرار (هر تکرار با تغییر وزن‌ها به‌دست می‌آید) است. Z_1 مقدار تابع هدف اول و Z_2 مقدار تابع هدف دوم است. w_1 و w_2 نیز به ترتیب وزن هریک از توابع در هر تکرار هستند. پس از محاسبه $Z_{LP\text{-}metric}$ برای جواب‌های به‌دست آمده از هر تکرار با توجه به اینکه توابع هدف مسئله از نوع کمینه‌سازی است، جوابی که کمترین مقدار را داراست به‌عنوان جوابی با بالاتری میل‌پیوندی نسبت به سایر جواب‌ها معرفی می‌شود.

۳-۳. مراحل الگوریتم ترکیبی

گام‌های الگوریتم فرا ابتکاری AIS_AFS به شرح زیر می‌باش که در هر گام از یکی از الگوریتم‌های ایمنی مصنوعی و ازدحام ماهی‌ها بهره برده‌اند.

گام اول: ایجاد انتی‌بادی‌های اولیه: این گام بر اساس الگوریتم ایمنی مصنوعی انجام می‌شود. جمعیت اولیه آنتی‌بادی‌ها (Nsol) برابر ۱۰۰ در نظر گرفته شده است. این پارامتر یک پارامتر تنظیمی است که می‌تواند تغییر کند.

گام دوم: ارائه آنتی‌ژن به آنتی‌بادی‌های اولیه: در این مرحله ابتدا آنتی‌ژن‌ها را به آنتی‌بادی‌های اولیه ارائه می‌کنیم. آنتی‌ژن‌های ارائه شده همان رشته جواب‌هایی است که در بخش قبل توضیح داده شد. سپس برای هر الگوی آنتی‌ژنی مراحل زیر را انجام می‌دهیم:

۱. **ارزیابی تطابق آنتی‌بادی با آنتی‌ژن (ارزیابی میل پیوندی):** پس از آنکه آنتی‌ژن را به جمعیت آنتی‌بادی‌ها ارائه کردیم، میزان تطابق (میل پیوندی) آن را با هر یک از آنتی‌بادی‌های اولیه می‌سنجیم.

۲. **انتخاب کلونی:** تعداد nsol از آنتی‌بادی‌هایی که بالاترین میل پیوندی را دارند انتخاب می‌کنیم و از این آنتی‌بادی‌ها باتوجه به میل پیوندی آنها با آنتی‌ژن‌ها، یک کلونی تولید می‌کنیم: با میل پیوندی بالاتر، تعداد انتشار بیشتر و بالعکس.

گام سوم: تولید جواب‌های جدید: در این مرحله از جواب‌هایی که در مرحله قبل انتخاب شده است، جواب‌های جدیدی تولید می‌شود. نحوه تولید جواب‌های جدید از رفتار دنباله‌روی ماهی‌ها در الگوریتم ازدحام ماهی‌ها بهره برده شده است. در این مرحله بر اساس رابطه (۲۸) بهترین جواب با Xn معرفی شده و مقادیر هر بردار xi جواب بر اساس این رابطه تعیین می‌شود. در این رابطه STEP یک پارامتر تنظیمی می‌باشد.

$$\overrightarrow{X_i}(t+1) = \overrightarrow{X_i}(t) + \frac{\overrightarrow{X_n} - \overrightarrow{X_i}(t)}{Dis_{i,n}} \times Step \times Rand(0,1) \qquad (۲۸)$$

گام چهارم: فراجهش: در این مرحله می‌خواهیم نسخه‌های جدیدی که در مرحله قبل از آنتی‌بادی ایجاد کردیم را جهش دهیم به امید اینکه به جوابهای بهتری برسیم. این فراجهش از رفتار جستجوی غذای ماهی‌ها در الگوریتم ازدحام ماهی‌ها الهام گرفته شده است. در این جهش یک جواب به تصادف انتخاب شده و x_j نامیده می‌شود. پس از آن بر اساس رابطه ۲۹ بردار جواب x_i تغییر پیدا می‌کند.

$$\overrightarrow{X_i}(t+1) = \overrightarrow{X_i}(t) + \frac{\overrightarrow{X_{Center}} - \overrightarrow{X_i}(t)}{Dis_{i,Center}} \times Step \times Rand(0,1) \qquad (۲۹)$$

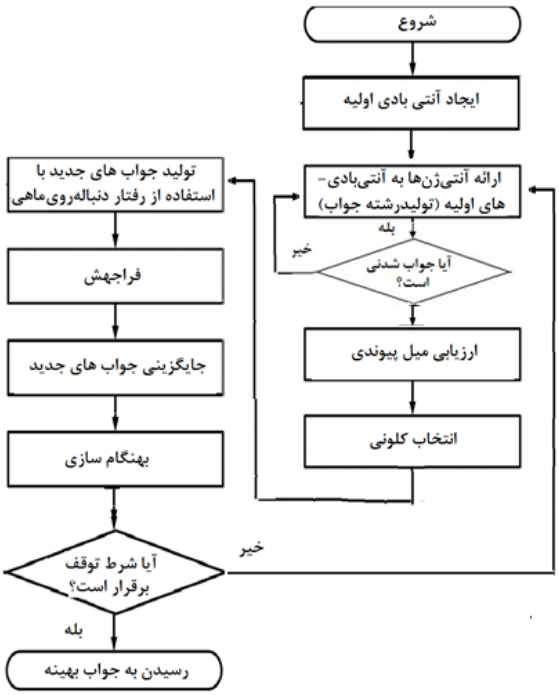
فرایند فراجهش روی تمامی جواب‌ها اعمال نمی‌شود. بلکه هر جواب با احتمال Pmute وارد فرایند فراجهش می‌شود.

گام پنجم: جایگزینی: در این مرحله تمام نسخه‌های کپی شده را بر حسب میزان تطابقشان

مرتب می‌کنیم و بهترین‌های آنها را برداشته و جایگزین بهترین‌ها در جمعیت اولیه آنتی بادی‌ها می‌کنیم.

گام ششم: به هنگام کردن بهترین جواب یافت شده در این قسمت بهترین جواب جمعیت جدید را بهترین جواب به دست آمده تا کنون مقایسه کرده و اگر بهتر از آن باشد جایگزین بهترین جواب یافت شده می‌شود.

گام هفتم:تا وقتی که شرط توقف بر قرار نشده‌است به گام دوم می‌رویم. شرط توقف رسیدن به تکرار ۱۰۰ می‌باشد.



نمودار ۵- فلوچارت الگوریتم پیشنهادی (فتاحی و همکاران، ۱۳۹۶)

۴. نتایج عددی

نتایج محاسباتی در این بخش به منظور بررسی و ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی چندهدفه برای مسئله مسیریابی وسایل نقلیه ناهمگن ارائه شده است. بدین منظور، سیزده مسئله

نمونه‌ای با اندازه‌های مختلف در اندازه‌های کوچک و بزرگ تولید شده‌اند. مسئله نمونه‌ای در اندازه کوچک با روش دقیق و با استفاده از نرم‌افزار گمز برای دو سناریو I و II حل می‌شود. تولید داده‌های آزمایشی مسائل نمونه‌ای با اندازه کوچک و بزرگ که برخی از آنها قطعی و مشخص بوده و برخی به صورت تصادفی و مبتنی بر توزیع یکنواخت است، در جدول (۲) آورده شده است. وسایل نقلیه استفاده شده در این تحقیق در چهار نوع وانت، نیسان، کامیونت و کامیون در انواع دوگانه سوز، بنزینی و گازوئیلی که هزینه‌های ثابت و متغیر آنها واقعی و قطعی هستند در نظر گرفته شده‌اند.

جدول ۲- تولید داده‌های تصادفی برای مدل‌های پیشنهادی

پارامتر	مسائل نمونه‌ای با اندازه کوچک				مسائل نمونه‌ای با اندازه بزرگ								
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳
V	۲	۲	۲	۳	۳	۴	۴	۵	۵	۶	۶	۸	۸
C	۲	۴	۶	۸	۱۰	۲۵	۳۰	۴۰	۵۵	۶۵	۸۰	۹۰	۱۰۰
T (ماهانه)	۱	۲	۳	۳	۳	۶	۶	۶	۱۲	۱۲	۱۲	۱۸	۱۸
R	۱	۱	۲	۲	۳	۵	۵	۶	۶	۶	۷	۷	۸
mi,t (تن)	~U(0,0.5)	~U(0,0.5)	~U(0,1)	~U(0,1)	~U(0,2)	~U(0,2)	~U(0,2)	~U(1,3)	~U(1,4)	~U(2,5)	~U(2, 5)	~U(3,6)	~U(3,6)
Qv (تن)	−۰٫۴۶ −۰٫۹	−۰٫۴۶ −۰٫۹	−۰٫۴۶ −۰٫۹	−۰٫۴۶ −۰٫۹ −۲٫۱	−۰٫۴۶ −۰٫۹ −۲٫۱	−۰٫۴۶ −۰٫۹ −۲٫۱ −۲٫۱	−۰٫۴۶ −۰٫۹ −۲٫۱ −۲٫۱	−۰٫۴۶ −۰٫۹ −۲٫۱ −۲٫۱ −۵٫۲	−۰٫۴۶ −۰٫۹ −۲٫۱ −۲٫۱ −۵٫۲	−۰٫۴۶ −۰٫۹ −۲٫۱ −۲٫۱ −۵٫۲ −۶	−۰٫۴۶ −۰٫۹ −۲٫۱ −۲٫۱ −۵٫۲ −۶	−۰٫۴۶ −۰٫۹ −۲٫۱ −۲٫۱ −۵٫۲ −۶ −۸	−۰٫۴۶ −۰٫۹ −۲٫۱ −۲٫۱ −۵٫۲ −۶ −۸ −۱۰

پارامتر	مسائل نمونه‌ای با اندازه کوچک				مسائل نمونه‌ای با اندازه بزرگ									
Cfv (میلیون تومان)	−۶۷ −۷۲	−۶۷ −۷۲	−۶۷ −۷۲	−۶۷ −۷۲ −۹۹	−۶۷ −۷۲ −۹۹	−۶۷ −۷۲ −۹۹ −۱۰۹	−۶۷ −۷۲ −۹۹ −۱۰۹	−۶۷ −۷۲ −۹۹ −۱۰۹ −۳۰۰	−۶۷ −۷۲ −۹۹ −۱۰۹ −۳۰۰	−۶۷ −۷۲ −۹۹ −۱۰۹ −۳۰۰ −۴۲۰	−۶۷ −۷۲ −۹۹ −۱۰۹ −۳۰۰ −۴۲۰	−۶۷ −۷۲ −۹۹ −۱۰۹ −۳۰۰ −۴۲۰ −۵۱۳	−۶۷ −۷۲ −۹۹ −۱۰۹ −۳۰۰ −۴۲۰ −۵۱۳ −۶۵۰
Cov (میلیون تومان در هر ۱۰۰ کیلومتر)	−۰٫۰۱۹۸ −۰٫۰۲۷۷۵	−۰٫۰۱۹۸ −۰٫۰۲۷۷۵	−۰٫۰۱۹۸ −۰٫۰۲۷۷۵	−۰٫۰۱۹۸ −۰٫۰۲۷۷۵ −۰٫۰۳۹	−۰٫۰۱۹۸ −۰٫۰۲۷۷۵ −۰٫۰۳۹	−۰٫۰۱۹۸ −۰٫۰۲۷۷۵ −۰٫۰۳۹ −۰٫۰۰۶۳	−۰٫۰۱۹۸ −۰٫۰۲۷۷۵ −۰٫۰۳۹ −۰٫۰۰۶۳	−۰٫۰۱۹۸ −۰٫۰۲۷۷۵ −۰٫۰۳۹ −۰٫۰۰۶۳ −۰٫۰۰۷۲	−۰٫۰۱۹۸ −۰٫۰۲۷۷۵ −۰٫۰۳۹ −۰٫۰۰۶۳ −۰٫۰۰۷۲	−۰٫۰۱۹۸ −۰٫۰۲۷۷۵ −۰٫۰۳۹ −۰٫۰۰۶۳ −۰٫۰۰۷۲ −۰٫۰۰۷۲	−۰٫۰۱۹۸ −۰٫۰۲۷۷۵ −۰٫۰۳۹ −۰٫۰۰۶۳ −۰٫۰۰۷۲ −۰٫۰۰۷۲ −۰٫۰۱۲	−۰٫۰۱۹۸ −۰٫۰۲۷۷۵ −۰٫۰۳۹ −۰٫۰۰۶۳ −۰٫۰۰۷۲ −۰٫۰۰۷۲ −۰٫۰۱۲ −۰٫۰۱۵
(میلیون تومان در هر دوره)	۰٫۳	۰٫۳	۰٫۳	۰٫۳	۰٫۳	۰٫۳	۰٫۳	۰٫۳	۰٫۳	۰٫۳	۰٫۳	۰٫۳	۰٫۳	۰٫۳
tarev	−۰٫۹ −۱٫۲۴	−۰٫۹ −۱٫۲۴	−۰٫۹ −۱٫۲۴	−۰٫۹ −۱٫۲۴ −۱٫۵۴	−۰٫۹ −۱٫۲۴ −۱٫۵۴	−۰٫۹ −۱٫۲۴ −۱٫۵۴ −۱٫۷۴	−۰٫۹ −۱٫۲۴ −۱٫۵۴ −۱٫۷۴	−۰٫۹ −۱٫۲۴ −۱٫۵۴ −۱٫۷۴ −۲	−۰٫۹ −۱٫۲۴ −۱٫۵۴ −۱٫۷۴ −۲	−۰٫۹ −۱٫۲۴ −۱٫۵۴ −۱٫۷۴ −۲ −۳	−۰٫۹ −۱٫۲۴ −۱٫۵۴ −۱٫۷۴ −۲ −۳	−۰٫۹ −۱٫۲۴ −۱٫۵۴ −۱٫۷۴ −۲ −۳ −۳٫۲	−۰٫۹ −۱٫۲۴ −۱٫۵۴ −۱٫۷۴ −۲ −۳ −۳٫۲ −۳٫۵
fi (دقیقه)	~U(15,30)	~U(15,30)	~U(15,30)	~U(15,45)	~U(15,45)	~U(15,60)	~U(15,60)	~U(30,90)	~U(30,120)	~U(60,120)	~U(60,120)	~U(90,180)	~U(90,180)	~U(90,180)
ei	~U(1,T)	~U(1,T)	~U(1,T)	~U(1,T)	~U(1,T)	~U(1,T)	~U(1,T)	~U(1,T)	~U(1,T)	~U(1,T)	~U(1,T)	~U(1,T)	~U(1,T)	~U(1,T)
li	~U(ei,T)	~U(ei,T)	~U(ei,T)	~U(ei,T)	~U(ei,T)	~U(ei,T)	~U(ei,T)	~U(ei,T)	~U(ei,T)	~U(ei,T)	~U(ei,T)	~U(ei,T)	~U(ei,T)	~U(ei,T)

پارامتر	مسائل نمونه‌ای با اندازه کوچک				مسائل نمونه‌ای با اندازه بزرگ								
Dij (کیلومتر)	~U(0,5)	~U(0,10)	~U(0,15)	~U(5,20)	~U(5,25)	~U(5,30)	~U(5,35)	~U(10,40)	~U(15,45)	~U(15,50)	~U(15,60)	~U(25,65)	~U(30,70)
ttij (دقیقه)	~U(5,15)	~U(5,20)	~U(5,30)	~U(5,35)	~U(5,40)	~U(10,45)	~U(10,50)	~U(20,60)	~U(25,75)	~U(30,90)	~U(30,100)	~U(45,120)	~U(45,150)
Ccr (میلیون تومان)	۰٫۷	۰٫۷	۰٫۷	۰٫۷	۰٫۷	۰٫۷	۰٫۷	۰٫۷	۰٫۷	۰٫۷	۰٫۷	۰٫۷	۰٫۷
Crv,r (میلیون تومان در ساعت)	۰٫۰۹	۰٫۰۹	۰٫۰۹	۰٫۰۹ ۰٫۱	۰٫۰۹ ۰٫۱	۰٫۰۹ ۰٫۱	۰٫۰۹ ۰٫۱	۰٫۰۹ ۰٫۱ ۰٫۱۴	۰٫۰۹ ۰٫۱ ۰٫۱۴	۰٫۰۹ ۰٫۱ ۰٫۱۴ ۰٫۱۶	۰٫۰۹ ۰٫۱ ۰٫۱۴ ۰٫۱۶	۰٫۰۹ ۰٫۱ ۰٫۱۴ ۰٫۱۶ ۰٫۲۷	۰٫۰۹ ۰٫۱ ۰٫۱۴ ۰٫۱۶ ۰٫۲۷
Qrr,v (تعداد)	~U(1,3)	~U(1,3)	~U(1,3)	~U(1,3)	~U(3,5)	~U(3,5)	~U(3,5)	~U(3,5)	~U(4,8)	~U(4,8)	~U(4,8)	~U(5,10)	~U(5,10)
wmax (ساعت)	۱	۱	۱	۲	۲	۲	۳	۳	۳	۳	۴	۴	۴

* U نمایانگر توزیع احتمالی یکنواخت می‌باشد.

در ادامه نتایج محاسباتی مسئله مسیریابی وسایل نقلیه ناهمگن ارائه شده است. حل دقیق مدل ریاضی برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی پیشنهادی در نرم‌افزار گمز نسخه‌ی ۲۵٫۱٫۲ با استفاده از حل‌کننده LINDOGLOBAL انجام شده است. الگوریتم‌های فراابتکاری نیز توسط نرم‌افزار MATLAB R۲۰۱۷b کد شده و بر روی کامپیوتر با پردازشگر و حافظه اجرا شده است.

به منظور بررسی عملکرد الگوریتم‌ها و مدل ریاضی پیشنهادی از شاخص‌های زیر استفاده خواهد شد.

- مقدار انحراف از بهترین جواب پیدا شده: این شاخص برای الگوریتم A با استفاده از رابطه (۳۰) محاسبه خواهد شد.

$$GAP_A = \frac{\text{بهترین مقدار کشف شده توسط الگوریتم } A \; - \; \text{بهترین مقدار کشف شده مسئله}}{\text{بهترین مقدار کشف شده مسئله}} \times 100 \qquad (۳۰)$$

- میانگین تابع هدف و بازه حداقل اختلاف معنی‌دار:

$$RPD_A = \frac{\text{بهترین مقدار کشف شده توسط الگوریتم } A - \text{بهترین مقدار کشف شده توسط هاالگوریتم}}{\text{بهترین مقدار کشف شده توسط هاالگوریتم}} \times 100 \qquad (۳۱)$$

جداول (۳) و (۴) نتایج محاسباتی را به ترتیب برای مسائل نمونه‌ای با اندازه کوچک و بزرگ، برای الگوریتم فراابتکاری و مدل ریاضی مسئله در دو سناریو مورد بررسی به همراه انحراف از بهترین جواب یافت شده، و زمان حل نمایش می‌دهد. لازم به ذکر است که مقدار انحراف از بهترین جواب در مسائل نمونه‌ای کوچک، برای الگوریتم‌های فرا ابتکاری نسبت به بهترین جواب یافت شده در هر سناریو I و سناریو II و این مقدار برای حل دقیق نسبت به بهترین جواب به‌دست آمده در سناریوها محاسبه شده است. همچنین در مسائل نمونه‌ای بزرگ مقدار RPD نسبت به بهترین جواب یافت شده در هر دو سناریو محاسبه شده است.

جدول ۳- نتایج مسائل نمونه‌ای با اندازه کوچک برای مدل‌های پیشنهادی در سناریو I و II

			مسئله ۱	مسئله ۲	مسئله ۳	مسئله ۴	مسئله ۵
جواب دقیق	سناریو I	تابع هدف اول	۲۷۰٫۷۶	۱۸۰۲٫۱۲	۳۷۸۸٫۷۳	۷۶۰۰٫۲۹	۲۱۹۵۵٫۳
		%GAP (نسبت به سناریو ۲)	۰	۷۸٫۱۹	۵۲٫۱۲	۱۰۰>	۱۰۰>
		تابع هدف دوم	۳۳٫۶	۹۲٫۴	۴۳۸٫۲۰۱	۶۰۶٫۱۹۹	۷۶۶٫۲۸۷
		%GAP (نسبت به سناریو ۲)	۰	۰	۰	۰	۱٫۴۷
	زمان (ثانیه)		۰٫۷	۵۳٫۱۲	۱۲۳۵٫۶۲۱	۱۲۳٫۱۶	۱۵۵۷٫۲۷
	سناریو II	تابع هدف اول	۳۳۶٫۳۱	۱۰۱۱٫۲۹۵	۲۴۹۰٫۴۸	۲۷۹۴٫۲۴۶	۷۷۰۴٫۰۱۴
		%GAP	۲۴٫۲۱	۰	۰	۰	۰
		تابع هدف دوم	۳۹٫۶	۱۰۲٫۳	۱۷۸۲٫۶۶۴	۶۹۷٫۳۷۵	۷۵۵٫۱۲۵
		%GAP	۱۷٫۸	۱۰٫۷	۱۰۰>	۱۵	۰
	زمان (ثانیه)		۰٫۶۱	۲۳٫۱۸	۹۵۴٫۲۶	۱۹۷٫۲۳	۲۴۰۰٫۰۷

AIS_AFS	سناریو I	تابع هدف اول	۲۷۰٫۷۶	۱۸۴۶٫۴۸	۴۰۶۶٫۴۴	۷۹۶۵٫۱	۲۲۹۵۱٫۱۲
		%GAP	۰	۴٫۱	۷٫۳۳	۴٫۸	۴٫۵۳
		تابع هدف دوم	۳۳٫۶	۱۰۴٫۳۱۹۶	۵۸۵٫۰۴۲	۸۷۱٫۳۵	۱۱۱۵٫۳۹
		%GAP	۰	۱۲٫۹	۳۳٫۵۱	۴۳٫۷۴	۴۵٫۵۵
	زمان (ثانیه)		۰٫۰۹	۳٫۰۰۱	۲۱۱٫۳۱	۱۸۰٫۲۳	۱۹۰٫۵۲
	سناریو II	تابع هدف اول	۳۳۸٫۰۳	۱۰۱۶٫۴۷	۲۹۵۶٫۶۹	۳۳۵۵٫۸۹	۹۰۲۲٫۹۴
		%GAP	۰٫۵۱	۱۰٫۴	۱۸٫۷۲	۲۰٫۱	۱۷٫۱۲
		تابع هدف دوم	۳۹٫۶	۱۱۰٫۶۸	۱۹۳۲٫۷۶	۷۶۲٫۴۴	۸۳۶٫۳
		%GAP	۰	۸٫۱۹	۸٫۴۲	۹٫۳۳	۱۰٫۷۵
	زمان (ثانیه)		۰٫۰۵۳	۴٫۰۹۳	۲۴۵٫۶۲	۲۱۰٫۹۱	۲۸۰
NSGAII	سناریو I	تابع هدف اول	۲۷۰٫۷۶	۱۸۴۱٫۷۶	۳۹۴۸٫۹۹	۷۸۷۹٫۹۸	۲۲۱۵۵٫۲
		%GAP	۰	۲٫۲	۴٫۲۳	۳٫۶۸	۰٫۹۱
		تابع هدف دوم	۳۳٫۶	۱۰۲٫۶۵	۵۲۱٫۳۲	۷۹۸٫۵۲	۱۰۷۰٫۳۱
		%GAP	۰	۱۱٫۰۹	۱۸٫۹۶	۳۱٫۷۲	۳۹٫۶۷
	زمان (ثانیه)		۰٫۰۶	۲٫۲۵۶	۸۱٫۱۵	۱۵۳٫۴	۱۶۴٫۲۱
	سناریو II	تابع هدف اول	۳۳۷٫۴۹	۱۰۶۳٫۹۸۳	۲۷۳۵٫۷۹	۳۰۷۰٫۲۲۹	۸۴۸۲٫۸۹
		%GAP	۰٫۳۵	۵٫۲۱	۹٫۸۵	۱۰٫۰۲	۱۰٫۱۱
		تابع هدف دوم	۳۹٫۶	۱۰۵٫۵۷	۱۸۹۶٫۳۹	۷۴۲٫۹۸	۸۱۴٫۳۲۸
		%GAP	۰	۳٫۲	۶٫۳۸	۶٫۵۴	۷٫۸۴
	زمان (ثانیه)		۰٫۰۰۲	۳٫۱۳	۱۰۵٫۶۲	۱۶۷٫۴۲	۱۹۵٫۶۲

جدول ۴- نتایج مسائل نمونه‌ای با اندازه بزرگ برای مدل‌های پیشنهادی در سناریو I و II

			مسئله ۶	مسئله ۷	مسئله ۸	مسئله ۹	مسئله ۱۰	مسئله ۱۱	مسئله ۱۲	مسئله ۱۳
AIS_AFS	سناریو I	تابع هدف اول	۴۲۴۰۶	۵۷۵۷۴٫۷	۷۵۵۷۷٫۷	۱۹۶۲۸۵	۲۱۳۱۷۸٫۳	۲۴۲۸۰۸٫۵۸	۴۰۶۴۳۲٫۶۸	۴۵۹۵۸۴٫۶۵
		%GAP	۳۰٫۱	۳۳٫۶	۳۶	۱۷٫۴۲	۸٫۴۶	۱۶٫۷۳	۲۳٫۷	۱۶٫۳۱
		تابع هدف دوم	۱۷۴۰٫۵۹	۲۰۰۰٫۹۶	۲۲۳۰٫۱۳	۴۴۸۰٫۸۹	۴۷۷۱٫۴۴	۵۳۱۰٫۱۲	۷۲۲۲٫۹۴	۸۶۹۰٫۶۲
		%GAP	۱۰٫۵	۱۴٫۴۸	۱۳٫۹	۱۲٫۷	۷٫۰۸	۱۲٫۷۶	۲۴٫۳۷	۲۳٫۲۷
	زمان (ثانیه)		۳۴۲٫۷۵	۴۱۸٫۳۳	۴۶۸٫۵۴	۷۲۳٫۹۴	۶۰۷٫۷۸	۸۸۱٫۹۵	۹۲۹٫۵۹	۹۴۰٫۵۱
	سناریو II	تابع هدف اول	۳۲۶۵۰٫۴	۴۳۲۸۷٫۵	۵۵۷۵۸	۱۶۷۱۵۴٫۶	۱۹۷۲۵۵٫۹	۲۰۹۵۲۸٫۵۵	۳۲۸۶۳۷٫۷	۳۹۶۲۶۵٫۲۷
		%GAP	۰٫۳۳	۰٫۴۴	۰٫۳۷	۰	۰٫۳۶	۰٫۷۳	۰٫۰۴۳	۰٫۲۸
		تابع هدف دوم	۱۵۷۵٫۵۹	۱۷۵۹٫۰۸	۱۹۷۸٫۶۸	۳۹۷۷٫۹۶	۴۴۶۹٫۶۷	۴۷۲۰٫۵	۵۸۳۸٫۶۷	۷۰۷۵٫۷۴
		%GAP	۰٫۰۹۳	۰٫۶۴	۱٫۱	۰٫۰۶۷	۰٫۳۱	۰٫۲۴	۰٫۵۳	۰٫۳۶
	زمان (ثانیه)		۴۲۳٫۳۵	۵۴۰٫۹۷	۴۶۹٫۷۸	۹۲۳٫۱۸	۱۰۲۸٫۶۵	۹۸۵٫۶۸	۱۰۶۰٫۲۴	۱۱۸۰٫۹۶

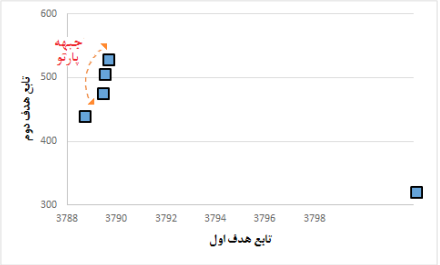
			مسئله ۶	مسئله ۷	مسئله ۸	مسئله ۹	مسئله ۱۰	مسئله ۱۱	مسئله ۱۲	مسئله ۱۳
NSGAII	سناریو I	تابع هدف اول	۴۱۷۲۴/۷	۵۴۴۹۱۵	۷۴۴۱۵/۸	۱۹۵۳۱۹/۱۷	۲۰۸۱۷۷/۶	۲۳۸۹۳۱/۴	۴۰۴۹۳۳/۸۱	۴۵۷۳۳۶/۴
		%GAP	۲۸/۲	۲۶/۴۳	۳۴	۱۶/۸۴	۵/۹۱	۱۴/۹	۲۳/۲۷	۱۵/۷۴
		تابع هدف دوم	۱۷۳۰/۳۳	۱۹۴۱/۵۶	۲۱۰۰/۰۶	۴۴۶۱/۸۱	۴۶۹۰/۰۶	۵۲۴۲/۳۶	۷۱۹۲/۳۴	۸۶۶۱/۰۵
		%GAP	۹/۹۲	۱۱/۰۸	۷/۳۱	۱۲/۲۳	۵/۲۶	۱۱/۳۳	۲۳/۸	۲۲/۸۵
	زمان (ثانیه)		۲۷۹/۶	۲۷۱/۸	۲۱۸/۲	۴۰۵/۳	۴۹۸/۲۳	۴۴۵/۴	۴۸۱/۵۲	۵۶۳/۱
	سناریو II	تابع هدف اول	۳۲۵۴۱/۴	۴۳۰۹۸/۲	۵۵۵۵۲	۱۶۷۲۱۴/۶	۱۹۶۵۴۲/۵	۲۰۷۹۹۹	۳۲۸۴۹۶/۲	۳۹۵۱۳۵/۲
		%GAP	۰	۰	۰	۰/۰۳۵	۰	۰	۰	۰
		تابع هدف دوم	۱۵۷۴/۱۲	۱۷۴۷/۸۶	۱۹۵۶/۹۴	۳۹۷۵/۳	۴۴۵۵/۷	۴۷۰۸/۸۹	۵۸۰۷/۵۳	۷۰۴۹/۹۸
		%GAP	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	زمان (ثانیه)		۳۸۴/۴۳	۳۹۴/۵۷	۴۲۱	۶۵۴/۰۸	۷۱۳/۴۲	۷۸۰/۳	۸۶۸/۹	۸۹۵/۷۱

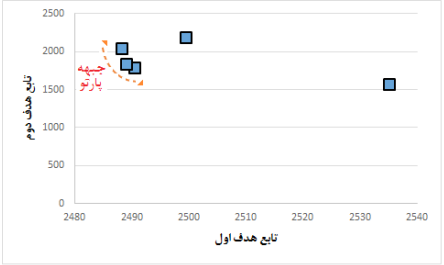
همان‌گونه که در این جداول مشخص است کمترین زمان مورد استفاده برای حل مسائل نمونه با اندازه کوچک و بزرگ را الگوریتم NSGAII به خود اختصاص داده است. همچنین، نرخ همگرایی الگوریتم فرا ابتکاری NSGAII نسبت به الگوریتم AIS-AFS بهتر است و جواب نزدیکتری به جواب بهینه به‌دست می‌آورد. اما مسئله حائز اهمیت این است که مدل مربوط به سناریو II در تمامی حالات بهترین نتیجه را با کمترین هزینه و میزان مصرف انرژی با اختلاف کمی بیشتر از مدل سناریو I به همراه دارد، که این امر نشان می‌دهد همکاری با شرکت‌های باربری همواره باعث بهبود می‌شود، البته زمان رسیدن به جواب بهینه در مدل پیشنهادی سناریو دوم بیشتر از سناریو اول می‌باشد.

جدول (۵) نتایج به‌دست آمده از حل دقیق توسط حل کننده LINDOGLOBAL را در ۵ تکرار نشان می‌دهد. جواب‌های مختلف (جواب‌های نامغلوب) با تغییر در وزن توابع هدف به‌دست آمده‌اند. برای هر جواب به‌دست آمده، مقادیر تابع هدف در هر دو سناریو به طور جداگانه در جدول (۵) نشان داده شده است. در سطر اول و آخر هر مسئله نمونه‌ای مقادیر بهینه هریک از توابع در حالتی که مدل تک هدفه باشد، نمایش داده شده است. مسئله نمونه‌ای سوم، برای تحلیل بیشتر و به منظور نمایش اینکه چگونه جواب مسئله با تغییر در وزن توابع هدف تغییر می‌کنند، در نظر گرفته شده است. نتایج مسئله نمونه‌ای سوم در جدول (۵) برای وزن‌های مختلف در نمودار (۶) نشان داده شده است. با توجه به رفتار توابع هدف در نمودار (۶) می‌توان جبهه پارتوی مدل دو هدفه پیشنهادی را در هر دو سناریو مشخص کرد.

جدول ۵- نتایج به‌دست آمده از حل دقیق برای مسائل نمونه‌ای کوچک در ۵ تکرار

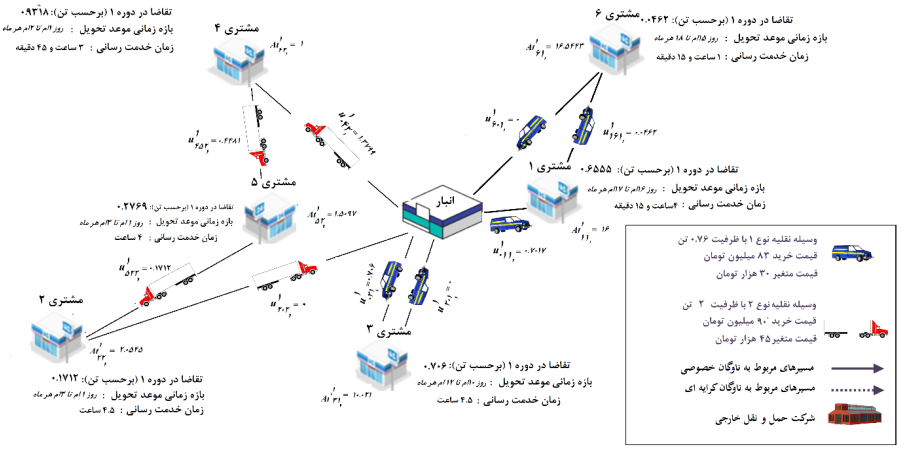
			حل دقیق					
			سناریو I			سناریو II		
	w۱	w۲	Obj۱	Obj۲	زمان (ثانیه)	Obj۱	Obj۲	زمان (ثانیه)
مسئله نمونه ۱	۱	۰	۲۷۰٫۷۶۵	۳۳٫۶	۰٫۱۴۱	۳۳۸٫۶۱	۹۲٫۱	۰٫۱۲۵
	۰٫۷۵	۰٫۲۵	۲۷۰٫۷۶۵	۳۳٫۶	۰٫۱۴۰	۳۳۸٫۶۱	۵۳٫۱	۰٫۱۴۰
	۰۵	۰٫۵	۲۷۰٫۷۶۵	۳۳٫۶	۰٫۱۴۰	۳۳۸٫۶۱	۵۳٫۱	۰٫۱۲۵
	۰٫۲۵	۰٫۷۵	۲۷۰٫۷۶۵	۳۳٫۶	۰٫۱۴۱	۳۳۸٫۴۷۵	۴۸٫۶	۰٫۱۴۱
	۰	۱	۲۷۰٫۷۶۵	۳۳٫۶	۰٫۱۴۱	۳۳۶٫۳۱	۳۹٫۶	۰٫۱۵۶
مسئله نمونه ۲	۱	۰	۱۸۰۱٫۹۳۵	۱۰۸٫۹	۰٫۷۹۶	۱۰۹۹٫۵۳۵	۱۷۲٫۵۸۵	۲٫۸۸۶
	۰٫۷۵	۰٫۲۵	۱۸۰۲٫۱۲	۹۲٫۴	۶٫۵۲۴	۱۰۹۵٫۸۲	۱۲۹٫۹۵	۳٫۷۲۸
	۰۵	۰٫۵	۱۸۰۲٫۱۲	۹۲٫۴	۴٫۹۷۶	۱۰۱۱٫۲۹۵	۱۰۲٫۳	۵٫۳۱۱
	۰٫۲۵	۰٫۷۵	۱۸۰۲٫۱۲	۹۲٫۴	۶٫۴۴۳	۱۰۱۱٫۲۹۵	۱۰۲٫۳	۷٫۵۶۶
	۰	۱	۱۸۰۲٫۱۲	۹۲٫۴	۳۲٫۳۷۱	۲۰۸۴٫۸۶	۱۰۹٫۰۱	۴٫۷۲۷
مسئله نمونه ۳	۱	۰	۳۷۸۹٫۵۴۰	۵۰۵٫۱۲۷	۱۷۶۰٫۱۶	۲۴۸۸٫۳۱	۲۰۳۱٫۶۳۳	۲۳۱۳٫۵۷۳
	۰٫۷۵	۰٫۲۵	۳۷۸۹٫۶۷۵	۵۲۸٫۱۴۶	۳۴۲۳٫۷۸۵	۲۴۹۹٫۵۷۲	۲۱۸۶٫۳۰۸	۳۷۰٫۵۶۵
	۰٫۵	۰٫۵	۳۷۸۹٫۴۵	۴۷۴٫۷۴۱	۳۶۱۰٫۷۰۵	۲۴۹۰٫۴۸	۱۷۸۲٫۶۶۴	۳۳۴۸٫۹۸۳
	۰٫۲۵	۰٫۷۵	۳۷۸۸٫۷۳	۴۳۸٫۲۰۱	۳۷۳۰٫۸۵۷	۲۴۸۹٫۱۷۰	۱۸۳۴٫۷۹۵	۲۶۴۷٫۸۸۳
	۰	۱	۵۰۱۷٫۱۶۵	۳۱۹٫۱۰۹	۱۳۳۴٫۶۱۹	۴۸۳۵٫۱۷	۱۵۷۰٫۰۶۱	۹۲۵٫۵۰۷
مسئله نمونه ۴	۱	۰	۷۶۰۷٫۶۳	۱۰۱۳٫۴۲۶	۴۸٫۱۲۴	۲۷۷۷٫۷۸۵	۱۷۷۸٫۳۴۲	۷۰٫۶۵۳
	۰٫۷۵	۰٫۲۵	۷۶۰۲٫۴۸	۶۸۰٫۷۸۴	۴۳٫۷۱۱	۲۷۸۶٫۴۹۶	۷۶۹٫۸۹۶	۲۱۹٫۱۶۵
	۰٫۵	۰٫۵	۷۶۰۰٫۲۹	۶۰۶٫۱۹۹	۴۱٫۹۴۹	۲۷۹۵٫۲۲۹	۷۲۰٫۰۳۳	۱۰۸٫۰۳۱
	۰٫۲۵	۰٫۷۵	۷۶۰۲٫۰۳۵	۶۶۵٫۷۲۷	۳۸٫۳۷۶	۲۷۹۴٫۲۴۶	۶۹۷٫۳۷۵	۱۸۷٫۸۷۲
	۰	۱	۱۵۷۲۸٫۸۱	۶۰۹٫۱۶۲	۱۸۹٫۱۲	۶۰۴۸٫۵۲۹	۶۳۴٫۸۲۷	۵۲۳
مسئله نمونه ۵	۱	۰	۱۹۲۱۶٫۸۹	۱۳۵۴٫۲۷۳	۱۲۹۰٫۵۳۳	۶۵۲۳٫۷۱	۱۲۵۴٫۶	۹۵۲٫۳۱
	۰٫۷۵	۰٫۲۵	۲۱۹۵۵٫۳	۷۶۶٫۲۸۷	۱۴۰۲٫۲	۷۷۰۴٫۰۱۴	۷۵۵٫۱۲۵	۵۴۶٫۸۷
	۰٫۵	۰٫۵	۲۱۹۵۵٫۳	۷۶۶٫۲۸۷	۱۵۱۴٫۰۱	۷۹۵۲	۷۵۴٫۲۳۴	۱۱۲۰٫۳
	۰٫۲۵	۰٫۷۵	۲۳۵۲۲٫۲۱	۶۰۲٫۳۵۴	۱۳۲۹٫۵	۷۹۵۲	۷۵۴٫۲۳۴	۱۴۲۵٫۶
	۰	۱	۲۳۷۸۲٫۴۹	۵۸۴٫۲۱	۱۲۶۵٫۱۲	۹۵۲۰٫۶	۶۱۱٫۲۴۱	۱۹۵۴٫۷۱



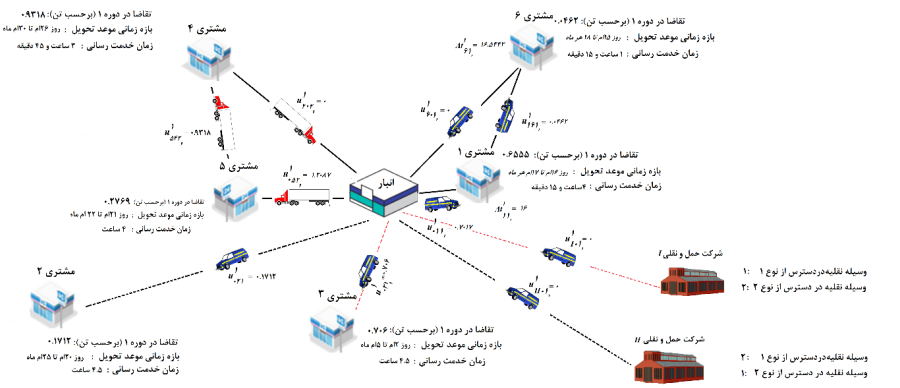


نمودار ۶- جبهه پارتو برای تکرار ۱ تا ۵ مسئله نمونه‌ای ۱۳ام در سناریو ۱ و ۲ (به ترتیب از راست به چپ)

نمودارهای (۷ و (۸) نمایشی از جواب مسئله نمونه‌ای سوم با وجود ۶ مشتری، دو نوع وسیله نقلیه و دو شرکت حمل و نقلی با ظرفیت محدود در تأمین وسایل نقلیه را به ترتیب در دو سناریو I و II به تصویر می‌کشد.



نمودار ۷- تصویری از نمایش جواب سناریو I مسئله نمونه‌ای سوم در دوره ۱ام (t=۱)



نمودار ۸- تصویری از نمایش جواب سناریو II مسئله نمونه‌ای سوم در دوره ۱ام(t=۱)

متغیرهای تعیین ظرفیت ناوگان وسایل نقلیه به‌دست آمده در سناریو اول از مسئله نمونه‌ای سوم $kk_{v,t}$ و $kmax_v$ است که به ترتیب برابرند با، $kk_{v,t}=\begin{bmatrix}2 & 3 & 3\\ 1 & 2 & 2\end{bmatrix}$ و $kmax_v=\begin{bmatrix}3\\ 2\end{bmatrix}$.

ماتریس اول بدین معنی است که در دوره اول از وسیله نقلیه نوع یک، دو عدد و وسیله نقلیه نوع دو، یک عد مورد نیاز است و در دوره دو و سه، از وسیله نقلیه نوع یک، سه عدد و وسیله نقلیه نوع دو، دو عدد مورد نیاز است. با توجه به اینکه این تعداد وسیله نقلیه باید در ابتدای افق برنامه‌ریزی خریداری شوند، بنابراین تعداد kmax_{v} از وسایل نقلیه خریداری می‌شود. همچنین متغیرهای تعیین ظرفیت ناوگان وسایل نقلیه به‌دست آمده در سناریو اول از مسئله نمونه‌ای سوم برابرند با

$$kk_{v,t}=\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ 1 & 0 & 1\end{bmatrix}\ ,kmax_{v}=\begin{bmatrix}1\\ 1\end{bmatrix}\ ,x_{r,v,t}=\begin{bmatrix}I.1 & 1 & 0 & 0\\ I.2 & 0 & 0 & 0\\ II.1 & 1 & 2 & 2\\ II.2 & 0 & 1 & 1\end{bmatrix}\ ,kp_{v,t}=\begin{bmatrix}2 & 2 & 2\\ 0 & 1 & 1\end{bmatrix}$$

این متغیرها نشان می‌دهند که شرکت باید در ابتدای افقی زمانی از هر وسیله نقلیه یک عدد خریداری کرده و در دوره اول یک وسیله نقلیه از نوع یک از شرکت حمل و نقلی I و یک وسیله نقلیه از همین نوع از شرکت حمل و نقلی II اجاره کند. در دوره دوم و سوم لازم است از شرکت حمل و نقلی II، دو وسیله نقلیه از نوع یک و یک وسیله از نوع دو اجاره کند.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک مسئله مسیریابی وسایل نقلیه ناهمگن با در نظر گرفتن پنجره‌های زمانی برای مشتریان به صورت چندهدفه در نظر گرفته شده است، به طوری که علاوه بر هزینه‌های حمل و نقل، خرید، نگهداری و غیره، میزان مصرف انرژی، به‌عنوان یک تابع هدف مجزا در نظر گرفته شده است. مدل پیشنهادی در دو سناریو مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. سناریو اول، مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با در نظر گرفتن پنجره‌های زمانی را بدون در نظر گرفتن مفهوم ناهمگنی بررسی می‌کند و در سناریو دوم تعدادی از وسایل نقلیه به صورت اجاره‌ای وجود دارد که توسط شرکت‌های باربری تأمین می‌شود. بنابراین در سناریو دوم تعداد این وسایل نقلیه، زمان عقد قراردادها و به طور کلی ظرفیت آنها مشخص شد. از این رو استراتژی تغییر ظرفیت ناوگان اجاره‌ای بر اساس مدل پیشنهادی مشخص شده است. ماهیت این مسئله NP-Hard است، و به‌عنوان یک برنامه‌ریزی ریاضی فرموله شد. دو مدل

برنامه‌ریزی غیرخطی مختلط عدد صحیح (MINLP) برای هر دو سناریو این مسئله ارائه شد. برای حل مدل‌های پیشنهادی، در این تحقیق یک الگوریتم ترکیبی مبتنی بر الگوریتم سیستم‌های ایمنی مصنوعی بدن، و الگوریتم ازدحام ماهی‌های مصنوعی، و الگوریتم NSGAII ارائه شد. برای اعتبار و صحت مدل‌های پیشنهادی، سیزده مسئله نمونه‌ای که به طور تصادفی تولید شده‌اند، با اندازه‌های مختلف توسط الگوریتم‌های دقیق و فرا ابتکاری حل شدند. نتایج به‌دست آمده از حل دقیق توسط حل کننده LINDOGLOBAL را در پنج تکرار (جواب‌های نامغلوب) با تغییر در وزن توابع هدف به‌دست آمده‌اند و جبهه پارتوی مدل دو هدفه پیشنهادی در هر دو سناریو مشخص شد. نتایج محاسباتی نشان داد که الگوریتم NSGAII برای حل این مسئله هم از نظر زمانی و هم همگرایی به جواب بهینه، مناسب‌تر می‌باشد. کمترین زمان مورد استفاده برای حل مسائل نمونه با اندازه کوچک و بزرگ را الگوریتم NSGAII به خود اختصاص داده است. همچنین، نرخ همگرایی الگوریتم فرا ابتکاری NSGAII نسبت به الگوریتم AIS-AFS بهتر است و جواب نزدیکتری به جواب بهینه به‌دست می‌آورد. اما مسئله حائز اهمیت این است که مدل مربوط به سناریو II در تمامی حالات بهترین نتیجه را با کمترین هزینه و میزان مصرف انرژی با اختلاف کمی بیشتر از مدل سناریو I به همراه دارد، که این امر نشان می‌دهد همکاری با شرکت‌های باربری همواره باعث بهبود می‌شود، البته زمان رسیدن به جواب بهینه در مدل پیشنهادی سناریو دوم بیشتر از سناریو اول می‌باشد. محققان در این حوزه می‌توانند برای توسعه‌های آتی به بررسی تقاضا به صورت فازی بپردازند. همچنین می‌توان مشتریان را به دو دسته پر اهمیت و دارای اهمیت کمتر تقسیم کرده و بحث اولویت‌بندی مشتریان در نظر گرفته شود. حالت عدم خدمت‌رسانی برای برخی از مشتریان با احتساب هزینه جریمه نیز از مواردی است که می‌تواند به مدل اضافه شود. در مدل‌های پژوهش حاضر ارزش زمانی پول در نظر گرفته نشده است که در شرایط کنونی کشور حائز اهمیت است و در نهایت می‌توان بحث رقابت بین شرکت‌های حمل و نقلی را به مسئله اضافه کرد. همچنین با توجه به قابلیت مسائله مسیریابی وسایل نقلیه در مدل کردن انواع مسائل مطرح در لجستیک سازمان‌ها و به طور خاص سیستم‌های توزیع و یا تامین، توجه به مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با در نظر گرفتن پنجره‌های زمانی و مالکیت ناهمگن از اهمیت بالایی برخوردار است. از طرفی خرید یا اجاره وسایل نقلیه موضوعی است که اثر بسزایی بر هزینه‌های حمل و نقل دارد و در جهان واقع نیز کاربرد دارد. از این رو پیشنهاد

می‌شود به کاربردهای واقعی مدل پیشنهادی در این مقاله برای مثال، محدوده وسیعی از خدمات کالای تجاری، پیک، پست، صنایع مصالح ساختمانی، صنایع مواد غذایی، فولاد، ناوگان تاکسیرانی و حمل و نقل شهری، ناوگان هواپیماهای اجاره‌ای و به طور کلی تمام صنایع درگیر در فعالیت‌های باربری، توجه بیشتری شود. همچنین مدل پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان یک سیستم تصمیم‌گیری پشتیبان برای بررسی استراتژی‌های ظرفیت شرکت‌های باربری مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

توکلی مقدم، رضا؛ ربانی، مسعود؛ شریعت، محمدعلی؛ صفایی، نیما؛ (۱۳۸۵). "حل مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با پنجره‌های زمانی نرم با استفاده از یک الگوریتم فرا ابتکاری تلفیقی"، نشریه دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۴۰(۴) صص.۴۶۹.

فتاحی، پرویز؛ معصومی، ملیحه؛ بهنامیان, جواد. (۱۳۹۶). ارائه یک الگوریتم ترکیبی برای حل مسئله مکان‌یابی مسیریابی-چندکالایی با در نظر گرفتن سیستمهای فراباراندار در زنجیره‌تأمین، مطالعات مدیریت صنعتی، ۱۵(۴۶)، صص ۹۷-۱۳۴.

میرمحمدی، سید حمید؛ حاجی شفیعی، زینب. (۱۳۹۴). ‹رویکرد فراابتکاری ترکیبی برای حل مسئله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه با محدودیت ظرفیت و تصمیم‌گیری همزمان در سطرجدید مورد خرید یا اجاره‌ی وسایل نقلیه›، مهندسی صنایع و مدیریت، ۳۱،۱(۱)، صص ۷۳-۸۰.

Bao, Y., Tang, J.F. and Liu, L.L., (2011). Clustering Algorithm for Minimizing Vehicle Number of Airport Pickup and Delivery Service. Computer Integrated Manufacturing Systems, 17(2), pp.442-447.

Bektaş, T. and Laporte, G., (2011). The Pollution-Routing Problem. Transportation Research Part B: Methodological, 45(8), pp.1232-1250.

Brandão, J., (2011). A Tabu Search Algorithm for the Heterogeneous Fixed Fleet Vehicle Routing Problem. Computers & Operations Research, 38(1), pp.140-151.

Dantzig, G.B. and Ramser, J.H., (1959). The Truck Dispatching Problem. Management Science, 6(1), pp.80-91.

Dondo, R. and Cerdá, J., (2007). A Cluster-Based Optimization Approach for the Multi-depot Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem with Time Windows. European Journal of Operational Research, 176(3), pp.1478-1507.

Dotoli, M. and Epicoco, N., (2016), October. A Technique for the Optimal Management of Containers' Drayage at Intermodal Terminals. In 2016 IEEE International Conference

on Systems, Man, and Cybernetics (SMC) (pp. 000566-000571). IEEE.

Ernst, A.T., Horn, M., Kilby, P. and Krishnamoorthy, M., (2010). Dynamic Scheduling of Recreational Rental Vehicles with Revenue Management Extensions. Journal of the Operational Research Society, 61(7), pp.1133-1143.

Gahm, C., Brabänder, C. and Tuma, A., (2017). Vehicle Routing with Private Fleet, Multiple Common Carriers Offering Volume Discounts, and Rental Options. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 97, pp.192-216.

Ghannadpour, S.F. and Zarrabi, A., (2019). Multi-Objective Heterogeneous Vehicle Routing and Scheduling Problem with Energy Minimizing. Swarm and Evolutionary Computation, 44, pp.728-747.

Ghoseiri, K. and Ghannadpour, S.F., (2010). Multi-objective Vehicle Routing Problem with Time Windows Using Goal Programming and Genetic Algorithm. Applied Soft Computing, 10(4), pp.1096-1107.

Gounaris, C.E., Repoussis, P.P., Tarantilis, C.D., Wiesemann, W. and Floudas, C.A., (2016). An Adaptive Memory Programming Framework for the Robust Capacitated Vehicle Routing Problem. Transportation Science, 50(4), pp.1239-1260.

Jiang, J., Ng, K.M., Poh, K.L. and Teo, K.M., (2014). Vehicle Routing Problem with a Heterogeneous Fleet and Time Windows. Expert Systems with Applications, 41(8), pp.3748-3760.

Kara, I., Kara, B.Y. and Yetis, M.K., (2007), August. Energy Minimizing Vehicle Routing Problem. In International Conference on Combinatorial Optimization and Applications (pp. 62-71). Springer, Berlin, Heidelberg.

Konings, J.W., (2008). The Future of Intermodal Freight Transport: Operations, Design and Policy. Edward Elgar Publishing.

Kumar, V.S., Thansekhar, M.R., Saravanan, R. and Amali, S.M.J., (2014). Solving Multi-Objective Vehicle Routing Problem with Time Windows by FAGA. Procedia Engineering, 97, pp.2176-2185.

Laporte, G., (2009). Fifty Years of Vehicle Routing. Transportation Science, 43(4), pp.408-416.

Leung, S.C., Zhang, Z., Zhang, D., Hua, X. and Lim, M.K., (2013). A Meta-Heuristic Algorithm for Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problems with Two-Dimensional Loading Constraints. European Journal of Operational Research, 225(2), pp.199-210.

Li, X., Tian, P. and Aneja, Y.P., (2010). An Adaptive Memory Programming Metaheuristic for the Heterogeneous Fixed Fleet Vehicle Routing Problem. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 46(6), pp.1111-1127.

Liu, R. and Jiang, Z., (2012). The Close–Open Mixed Vehicle Routing Problem. European Journal of Operational Research, 220(2), pp.349-360.

Naderipour, M. and Alinaghian, M., (2016). Measurement, Evaluation and Minimization

of CO2, NOx, and CO Emissions in the Open time Dependent Vehicle Routing Problem. Measurement, 90, pp.443-452.

Ogryczak, W., (2001). On Goal Programming Formulations of the Reference Point Method. Journal of the Operational Research Society, 52(6), pp.691-698.

Pepin, A.S., Desaulniers, G., Hertz, A. and Huisman, D., (2009). A Comparison of Five Heuristics for the Multiple Depot Vehicle Scheduling Problem. Journal of Scheduling, 12(1), PP.17-33.

Tavares, G., Zsigraiova, Z., Semiao, V. and Carvalho, M.D.G.,(2008). A Case Study of Fuel Savings Through Optimisation of MSW Transportation Routes. Management of Environmental Quality: An International Journal, 19(4), pp.444-454.

Xiao, Y., Zhao, Q., Kaku, I. and Xu, Y., (2012). Development of a Fuel Consumption Optimization Model for the Capacitated Vehicle Routing Problem. Computers & Operations Research, 39(7), pp.1419-1431.

Zachariadis, E.E., Tarantilis, C.D. and Kiranoudis, C.T., (2015). The Load-Dependent Vehicle Routing Problem and its Pick-up and Delivery Extension. Transportation Research Part B: Methodological, 71, pp.158-181.

Zhang, S., Lee, C.K.M., Choy, K.L., Ho, W. and Ip, W.H., (2014). Design and Development of a Hybrid Artificial Bee Colony Algorithm for the Environmental Vehicle Routing Problem. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 31, pp.85-99.

Zhengzheng, X., (2015), May. A Vehicle Routing Approach Using Mixed Vehicles for Pickup and Delivery Services to Airport. In The 27th Chinese Control and Decision Conference (2015 CCDC) (pp. 6330-6334). IEEE.