

# مسیریابی موجودی باز با در نظر گرفتن کاهش مصرف سوخت روش حل: الگوریتم تکاملی تفاضلی

مهدی علینقیان\* (دانشیار)

زهرا کاویانی دزکی (کارشناس ارشد)

سید رضا حجازی (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی اصفهان

مهندسی صنایع و مدیریت شریف، زمستان ۱۳۹۶ (۱۳-۱)  
دوری ۲/۲، شماره ۲/۲، ص. ۲۵-۱۵

لجستیک به دلیل داشتن فعالیت‌های حمل‌ونقلی نقش زیادی در تولید گازهای گل‌خانه‌یی دارد. از آنجایی که مسیریابی موجودی به دلیل پاسخگویی هم‌زمان به مسیریابی وسایل نقلیه و سطوح موجودی، نقش مهمی در کاهش هزینه‌های لجستیک دارد و از سویی دیگر در بسیاری از شرکت‌های توزیع، وسایل نقلیه اجاره‌یی هستند و به بازگشت به انبار پس از تخلیه نیاز نیست، در این مقاله مدلی برای مسئله‌ی مسیریابی موجودی با در نظر گرفتن کاهش مصرف سوخت و کاهش هزینه‌های موجودی ارائه شده است. برای حل مسئله یک روش فراابتکاری بهبودیافته‌ی ترکیبی مبتنی بر الگوریتم تکاملی تفاضلی و الگوریتم سازنده کلارک و رایت ارائه شده است. به منظور صحت‌گذاری بر روش حل پیشنهادی در ابعاد کوچک الگوریتم پیشنهادی با جواب حاصل از حل دقیق برای چند مسئله‌ی نمونه مقایسه شده است. در ابعاد بزرگ نیز به بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی پرداخته شده است.

**واژگان کلیدی:** مدل‌های ریزمقیاس انتشار، مسیریابی وسایل نقلیه، هزینه‌های موجودی، الگوریتم کلارک و رایت، الگوریتم تکاملی تفاضلی.

alinaghian@cc.iut.ac.ir  
zahrakaviany@yahoo.com  
rehejazi@cc.iut.ac.ir

## ۱. مقدمه

گرم‌شدن زمین یکی از مهم‌ترین چالش‌های قرن اخیر است. از این رو در سال‌های اخیر توجه ویژه‌ی به انتشار گازهای گل‌خانه‌یی شده است. گرمای هوا نتیجه‌ی افزایش گازهای گل‌خانه‌یی در اتمسفر است. جهانی‌شدن و افزایش تمایل صنایع به برون‌سپاری باعث تبدیل حمل‌ونقل به بخش مهم تولید گازهای گل‌خانه‌یی در دو دهه‌ی اخیر شده است. فعالیت‌های حمل‌ونقل یکی از عوامل اصلی گرم‌شدن زمین است. به همین دلیل تحقیقاتی در زمینه‌ی لجستیک سبز انجام شده است.

هدف اولیه‌ی لجستیک، هماهنگی فعالیت‌هایی مانند حمل‌ونقل کالا، ذخیره، مدیریت موجودی، و جابه‌جایی مواد است. یکی از موضوعات شناخته‌شده در زمینه‌ی لجستیک مسئله‌ی مسیریابی موجودی است.<sup>[۱]</sup> این مسئله در زنجیره‌ی تأمین به‌طور هم‌زمان سطوح بهینه‌ی موجودی و مسیرهای تحویل و زمان‌بندی وسایل نقلیه را بر پایه‌ی کمینه‌کردن هزینه‌ها تعیین می‌کند.<sup>[۲]</sup> در گذشته این هزینه فقط از لحاظ اقتصادی مد نظر قرار می‌گرفت؛ اما امروزه به‌علت افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی، نیاز به در نظر گرفتن معیارهای زیست‌محیطی در این زمینه

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۲/۱۹، اصلاحیه ۱۳۹۴/۹/۲۱، پذیرش ۱۳۹۵/۲/۲۶.

نوآوری‌های این مقاله به‌طور خلاصه عبارت‌اند از: ارائه‌ی یک مدل جامع بر پایه‌ی مدل‌های ریزمقیاس تولید آلاینده‌ها به‌منظور کاهش سوخت مصرفی در مسیریابی موجودی باز، در نظر گرفتن هزینه‌های سوخت مصرفی، هزینه‌های موجودی، راننده، و استفاده از وسایل نقلیه و در نهایت ارائه‌ی یک روش فراابتکاری بهبودیافته‌ی ترکیبی برای مسئله.

در این مقاله ابتدا مروری روی مطالعات انجام‌شده در زمینه‌ی مسیریابی وسایل نقلیه و هزینه‌های موجودی و تحقیقات انجام‌شده در زمینه‌ی مدل‌های انتشار گاز گل‌خانه‌یی انجام شده است؛ سپس به معرفی مسئله‌ی مسیریابی موجودی با در نظر گرفتن کاهش مصرف سوخت پرداخته شده است و در قسمت بعد روش حل مسئله بیان شده است.

## ۲. پیشینه‌ی پژوهش

برنازی و همکاران مفهوم یک به چند<sup>۱</sup> را در یک مسئله‌ی مسیریابی موجودی که به معنای بارگیری از یک انبار مرکزی<sup>۲</sup> و تحویل به چند مشتری است، بیان کردند.<sup>[۲]</sup> برنازی و همکاران نوع دیگری از مسیریابی موجودی تصادفی با مجاز بودن کمیود و عدم وجود انباشته را در نظر گرفتند.<sup>[۳]</sup> ترودو و درور مسئله‌ی مسیریابی موجودی شامل توزیع مواد از انبار مرکزی به مجموعه‌ی بزرگی از مشتریان را مطالعه کردند. آنها فرض کردند که تقاضای هر مشتری تصادفی است.<sup>[۴]</sup> را و آقزاف یک مسئله‌ی مسیریابی موجودی دراز مدت با نرخ تقاضای ثابت را که برای رویکرد برنامه‌ریزی چرخه‌ی مناسب است، در نظر گرفتند.<sup>[۵]</sup> آقزاف تقاضای مشتریان و زمان سفر را توزیع نرمال با میانگین ثابت و انحراف معیار محدود در نظر گرفت. در پژوهش او از شبیه‌سازی مونت‌کارلو استفاده شده است.<sup>[۶]</sup> ادالیاساک و همکاران مدل‌سازی مسیریابی موجودی را تحت سیاست‌های رسیدن به بیشینه‌ی سطح موجودی و محدودیت بیشینه‌ی سطح موجودی برای وسایل نقلیه‌ی چندگانه گسترش دادند و آن را به روش شاخه و کران حل کردند.<sup>[۷]</sup> یانگ و وی یک سیستم یکپارچه‌ی موجودی برای محصولات خراب‌شدنی را با یک فروشنده و چندین خریدار تحلیل کردند.<sup>[۸]</sup> میرزایی و سیفی مدلی برای مسیریابی موجودی ارائه کردند که کالاها را فاسدشدنی را توزیع می‌کند. آن‌ها از الگوریتم‌های شبیه‌سازی تریبند و جست‌وجوی ممنوع برای حل مسئله استفاده کردند.<sup>[۹]</sup> احمدی‌جاوید و آزاد مدلی که به‌طور هم‌زمان تصمیمات مکان‌یابی، موجودی، و مسیریابی را بهینه می‌کند، ارائه نمودند.<sup>[۱۰]</sup> لی و همکاران موجودی و مسیریابی را در یک مدل ترکیب کردند و یک روش ابتکاری بر پایه‌ی تولید ستون برای حل مدل ارائه دادند.<sup>[۱۱]</sup> شن و همکاران یک مدل مکان‌یابی - موجودی برای سیستم توزیع خون ارائه دادند. آنها برای حل مدل از روش تولید ستون استفاده کردند.<sup>[۱۲]</sup> هانگ و لین مسیریابی موجودی برای محصولات چندگانه را با ناوگان محدود در نظر گرفتند که در آن تقاضا در لحظه‌ی تحویل مشخص می‌شود. در این مقاله از روش بهینه‌سازی کلونی مورچگان استفاده شده است.<sup>[۱۳]</sup> اندرسون و هاف و همکاران ترکیب مدیریت موجودی و مسیریابی را بررسی کردند.<sup>[۱۴]</sup> آنبیلی و فدرگوسن روش جدیدی برای حل مسئله‌ی مسیریابی موجودی ارائه دادند که ابتدا مشتریان را به چند دسته تقسیم می‌کند و هر دسته توسط یک وسیله‌ی نقلیه و بر مبنای کمیته‌سازی هزینه‌ها خدمت‌دهی می‌شود و سپس بسامد دوباره برگردن برای هر مسیر به‌طور جداگانه تعیین می‌شود.<sup>[۱۵]</sup> نیاکان و رحیمی مسیریابی موجودی را روی توزیع دارو بررسی کردند و مدل ریاضی چندهدفه برای آن به‌دست آوردند. اهداف آن‌ها کمیته‌کردن هزینه‌های حمل و نقل و موجودی همراه با کمیته‌کردن داروهای منقضی‌شده و همچنین کاهش تولید گازهای گل‌خانه‌یی بود.<sup>[۱۶]</sup>

لین و همکاران مروری روی مطالعات حوزه‌ی لجستیک سبز انجام دادند و موارد را در سه دسته طبقه‌بندی کردند: مسیریابی وسایل نقلیه‌ی سبز، مسیریابی آلودگی، و لجستیک معکوس.<sup>[۱۷]</sup> کارا و همکاران هزینه‌ی واقعی‌تری از حمل‌ونقل را که متأثر از بار وسیله‌ی نقلیه و همچنین مسافت کمان طی شده است، در نظر گرفتند.<sup>[۱۸]</sup> خیا و همکاران مدلی برای مصرف سوخت به‌دست آوردند. آنها برای مسئله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه با ظرفیت محدود نرخ مصرف سوخت را به‌دست آوردند و هدف را کمیته‌کردن سوخت مصرفی قرار دادند.<sup>[۱۹]</sup> کو سرعت وسیله‌ی نقلیه را به مدل محاسبه‌ی سوخت مصرفی در مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه‌ی وابسته به زمان اضافه کرد.<sup>[۲۰]</sup> پرونو و آندره اشاره کردند که مدل‌های قابل اطمینان برای اندازه‌گیری آلودگی تولیدشده توسط وسایل نقلیه نیاز به در نظر گرفتن عامل‌های

بیشتری دارد، عامل‌هایی مانند زمان سفر وقتی موتور سرد است.<sup>[۲۱]</sup> سیهی و اگلس مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه‌ی وابسته به زمان را در شرایط ترافیک در نظر گرفتند. با توجه به نتایج، وقتی وسیله‌ی نقلیه با بهترین سرعت حرکت می‌کند آلودگی کمتری تولید می‌شود.<sup>[۲۲]</sup> پالمر مدلی جامع از تولید کربن‌دی‌اکسید و مسیریابی را توسعه داد و مقدار کربن‌دی‌اکسید تولیدشده، زمان، و مسافت سفر را محاسبه کرد. همچنین اثرات سرعت را روی کاهش آلودگی در شرایط مختلف ترافیکی با داشتن پنجره‌ی زمانی بررسی کرد.<sup>[۲۳]</sup> فاگروهولت و همکاران تلاش کردند تا با بهینه‌کردن سرعت سوخت مصرفی و انتشار آلودگی را در حمل‌ونقل کاهش دهند.<sup>[۲۴]</sup> بکتاس و لاپورت مسئله‌ی مسیریابی آلودگی را با و بدون پنجره‌ی زمانی معرفی کردند و تابع هدف جامعی شامل کمیته‌کردن هزینه‌ی انتشار کربن و هزینه‌های عملیاتی راننده و سوخت مصرفی را یکی می‌باشد، ارائه کردند.<sup>[۲۵]</sup> دمیر جست‌وجوی همسایگی انطباقی گسترش‌یافته را برای مسئله‌ی مسیریابی آلودگی معرفی کرد.<sup>[۲۶]</sup> فالین و همکاران مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با ظرفیت محدود و با معیارهای زیست‌محیطی را معرفی کردند و اثرات پیچیده‌تر زیست‌محیطی مانند سروصدا را در نظر گرفتند.<sup>[۲۷]</sup> دمیر و همکاران عامل‌های مؤثر در مصرف سوخت را بررسی کردند. این عامل‌ها را می‌توان در پنج دسته طبقه‌بندی کرد: وسایل نقلیه، محیط‌زیست، ترافیک، راننده، و عوامل خارجی. بیشتر مدل‌های مصرف سوخت روی عوامل وسیله‌ی نقلیه، محیط زیست، و ترافیک متمرکز هستند.<sup>[۲۸]</sup> رخا و همکاران بیان کردند که مدل‌های بیشتری برای برآورد انرژی و انتشار وجود دارد که در رویکرد، ساختار، و داده‌های مورد نیاز برای مدل‌سازی‌شان تفاوت دارند.<sup>[۲۹]</sup>

## ۳. تعریف مسئله

در این بخش به تعریف مدل پرداخته می‌شود. برای این منظور در ابتدا مسیریابی بارها در نظر گرفتن هزینه‌های موجودی (مسیریابی موجودی) توضیح داده می‌شود. سپس مدل انتشار ریزمقیاس توضیح داده خواهد شد و در نهایت مدل پیشنهادی ارائه می‌شود.

### ۱.۳. مسئله‌ی مسیریابی موجودی

هزینه‌های حمل‌ونقل و موجودی دو جزء اصلی زنجیره‌ی تأمین هستند و بیشترین تأثیر را روی عملکرد آن دارند. روابط متقابل بین تخصیص موجودی و مسیریابی وسایل نقلیه به تازگی باعث شده است تا محققان به‌طور هم‌زمان این عوامل را مدل کنند. به این مسئله‌ی کاربردی مسئله‌ی مسیریابی موجودی گفته می‌شود.<sup>[۱]</sup>

مسیریابی موجودی زمانی به‌وجود می‌آید که یک خرده‌فروش مسئولیت مدیریت موجودی مشتریان را بر عهده می‌گیرد و تحویل به مشتری باید به‌موقع انجام گیرد تا تضمین شود که مشتریان با کمبود مواجه نمی‌شوند. مسئله‌ی مسیریابی موجودی یکی از مهم‌ترین توسعه‌های مسئله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه است که کنترل موجودی و تصمیمات مسیریابی هم‌زمان با هم اتخاذ می‌شوند. هدف آن تعیین سیاست‌های توزیع برای کمیته‌کردن هزینه‌هایی مانند هزینه‌های نگهداری و حمل‌ونقل است. مدیریت موجودی توسط فروشنده<sup>۲</sup> یک سیستم هماهنگی زنجیره‌ی تأمین است که فروشنده مسئولیت مدیریت انباشته را تقبل می‌کند. فروشنده موجودی‌ها را بر اساس اطلاعات تقاضای مشتریان مدیریت می‌کند. بزرگ‌ترین تفاوت مدیریت موجودی توسط فروشنده در مقایسه با مدیریت موجودی تولیدکننده/خرده‌فروش متعارف این است که فروشنده جواب‌گویی سطح

$A$  مساحت سطح جلوی وسیله نقلیه بر حسب مترمربع و برابر ۹ است.  $g$  ثابت گرانش زمین و برابر با ۹/۸۱ است.

کمان  $i - j$  مفروض است، سرعت، فاصله، زاویه، و جرم روی این کمان به ترتیب  $speed_{ij}$ ،  $dis_{ij}$ ،  $\theta$  و  $M = W + f_i$  فرض شده است.  $f_i$  نیز بار وسیله نقلیه روی این کمان است. با این اوصاف انرژی مصرفی روی این کمان از جمع روابط زیر به دست می آید.<sup>[۲۷]</sup>

$$p_{ij} \approx KNV \left( \frac{d_{ij}}{speed_{ij}} \right) + \beta speed_{ij} d_{ij} + \alpha_{ij} (W + f_{ij}) d_{ij} \quad (3)$$

که در آن:

$$\alpha_{ij} = a + g \sin \theta_{ij} + g C_r \cos \theta_{ij} \quad (4)$$

$$\beta = \rho \Delta C_d A p \quad (5)$$

وزن هر یک از وسایل نقلیه ۵ تن است. شتاب و شیب جاده صفر فرض شده است. اگر از رابطه ۳ بر حسب سرعت مشتق گرفته شود و عبارت حاصل برابر صفر قرار داده شود، سرعت بهینه‌ای که مقدار سوخت مصرفی را کمینه می‌کند، به دست خواهد آمد.

$$\frac{\partial(F(v))}{\partial(v)} = 0 \rightarrow \frac{-kNV\lambda d}{v^2} + 2\beta\gamma\lambda dv = 0 \quad (6)$$

$$v^* = \sqrt[3]{\frac{kNV}{2\beta\gamma}} \quad (7)$$

با توجه به پارامترهای معرفی شده، مقدار سرعت بهینه‌ای که سوخت مصرفی را کمینه می‌کند برای وسایل نقلیه‌ی مخصوص بار متوسط برابر ۳۶/۳۲ کیلومتر بر ساعت است.

### ۳.۳. فرضیات

- مسیرهای وسایل نقلیه به صورت باز است، یعنی وسایل نقلیه بعد از ملاقات مشتریان نیاز به بازگشت به انبار مرکزی ندارند.
- سیاست موجودی مورد استفاده، سیاست محدودیت بیشینه‌ی سطح موجودی است. این سیاست به این شکل عمل می‌کند که در زمان ملاقات مشتری مقدار محصولی در بازه‌ی صفر تا میزان ظرفیت نگهداری موجودی مشتری به وی تحویل داده می‌شود.
- بیشینه‌ی تعداد وسایل نقلیه در دسترس ثابت است و استفاده از هر وسیله نقلیه هزینه‌ی ثابتی به دنبال دارد.
- افق برنامه‌ریزی متناهی است.
- یک نوع محصول بین مشتریان توزیع می‌شود.
- تقاضای مشتریان در همه‌ی دوره‌های زمانی در ابتدای افق برنامه‌ریزی مشخص است.
- مشتریان در ابتدای افق برنامه‌ریزی موجودی اولیه دارند.

انباشته است. در مدیریت موجودی توسط فروشنده تصمیمات اجرایی برای تحویل محصول به مشتریان بر پایه‌ی موجودی خاص و سیاست‌های زنجیره گرفته می‌شود.<sup>[۲۸]</sup>

این روش اغلب به عنوان یک موقعیت مناسب به کار می‌رود به طوری که فروشندگان در هزینه‌های تولید و توزیع صرفه‌جویی می‌کنند؛ زیرا آنها می‌توانند بین مشتریان مختلف هماهنگی ارسال ایجاد کنند و خریداران نیز با عدم نیاز به کنترل موجودی سود بیشتری می‌کنند. فروشنده باید سه تصمیم هم‌زمان بگیرد:

۱. چه زمانی به یک مشتری مفروض خدمت دهی شود.
۲. چه مقدار محصول به هر مشتری در زمان ملاقاتش تحویل داده شود.
۳. تخصیص مشتریان به وسایل نقلیه چگونه باشد.<sup>[۲۹]</sup>

### ۲.۳. مدل انتشار جامع

با توجه به افزایش اثرات زیست‌محیطی حمل‌ونقل کالا، به خصوص در بخش جاده‌یی، کاهش تولید گازهای گل‌خانه‌یی اهمیت بیشتری پیدا کرده است. تولید گازهای گل‌خانه‌یی در بخش حمل‌ونقل رابطه‌ی مستقیمی با مصرف سوخت دارد؛ از این رو کاهش مصرف سوخت می‌تواند به کاهش تولید گازهای گل‌خانه‌یی بینجامد. عوامل مؤثر در مصرف سوخت عبارتند از: وسیله نقلیه (وزن، سرعت موتور، و...)، محیط‌زیست (شیب جاده، شرایط آب‌وهوایی، و...)، ترافیک (سرعت و شتاب)، راننده (شرایط جسمی، و...) و عوامل خارجی (اندازه‌ی ناوگان و...) <sup>[۳۰]</sup>.

مدل‌های مصرف سوخت به دو دسته‌ی اصلی تقسیم می‌شوند: ۱. مدل‌های ریزمقیاس، ۲. مدل‌های درشت‌مقیاس.

در مدل‌های ریزمقیاس میزان مصرف سوخت بر حسب ویژگی‌های موتور و محیط محاسبه می‌شود. در حالی که در مدل‌های درشت‌مقیاس میزان مصرف سوخت از طریق مدل‌های رگرسیونی به دست آمده از عملکرد وسایل نقلیه در شرایط مختلف تخمین زده می‌شود.<sup>[۳۱]</sup> با توجه به مقایسه‌یی که دمیر در رساله‌ی دکترای خود آورده است، از بین مدل‌های موجود، مدل انتشار جامع<sup>۴</sup> مدل با بهترین برآورد انتخاب شده است. ساده شده‌ی این مدل به صورت زیر است که در آن نرخ مصرف سوخت  $F$ ، بر حسب  $g/s$  به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$F \approx \left( KNV + \frac{\left( \frac{p_t}{\varepsilon} + p_a \right)}{\mu} \right) U \quad (1)$$

که در آن  $k$  ضریب اصطکاک موتور بر حسب  $\frac{Kj}{rev/L}$  است و مقدار این پارامتر برای وسایل نقلیه‌ی مخصوص بار برابر با ۰/۲ است (در ادامه همه‌ی پارامترها و محاسبات برای وسایل نقلیه‌ی مخصوص بار متوسط هستند).  $N$  سرعت موتور بر حسب  $rev/s$  و برابر ۳۳ است.  $V$  تغییر مکان موتور بر حسب لیتر و مقدار آن برابر ۵ است.  $p_t$  نیروی کششی مورد نیاز وسیله نقلیه به وات است که از رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود.  $\varepsilon$  کارایی،  $p_a$  قدرت مورد نیاز موتور برای متعلقات وسیله نقلیه و  $\mu$  معیار کارایی است که تقریباً برابر ۰/۴۵ است.

$$p_t = Mav + Mgv \sin \theta + \rho \Delta C_d A p v^2 + Mg C_r \cos \theta v \quad (2)$$

که در آن  $M$  جرم کلی وسیله نقلیه (جمع اوزان وسیله نقلیه خالی و بار حمل شده) به  $Kg$  است.  $a$  و  $v$  به ترتیب شتاب  $m/s^2$  و سرعت وسیله نقلیه  $m/s$  است.  $\theta$  زاویه‌ی جاده،  $C_d$  و  $C_r$  به ترتیب ضرایب مقاومت نورد و کشیدگی و معادل ۰/۶ و ۰/۱ هستند.  $\rho$  چگالی هوا و برابر با ۱/۲۰۴۱ و بر حسب  $kg/m^3$  است.

### ۴.۳. مدل مسئله‌ی مسیریابی با توجه به هزینه‌های موجودی با در

#### نظر گرفتن کاهش مصرف سوخت

مسئله‌ی مسیریابی موجودی با در نظر گرفتن کاهش مصرف سوخت روی گراف

$G = (V, A)$  تعریف می‌شود که  $V = \{0, 1, \dots, n, n+1\}$  مجموعه‌ی

رئوس و  $A = \{(i, j) : i, j \in V, i \neq j\}$  مجموعه‌ی کمان‌ها هستند. رأس

صفر عرضه‌کننده (دپو) و رئوس  $V' = V/\{0\}$  نماینده‌ی مشتریان هستند. هم

عرضه‌کننده و هم مشتریان هزینه‌ی نگهداری موجودی  $h_i$  را در هر دوره متحمل

می‌شوند. هر مشتری یک ظرفیت نگهداری موجودی  $cap_i$  دارد. طول افق برنامه‌ریزی

محدود و برابر  $T$  است و هر دوره‌ی زمانی  $t \in \{1, 2, \dots, T\}$  می‌باشد. مقدار

محصول تولیدی در دسترس عرضه‌کننده در دوره‌ی  $t$ ،  $r_t$  است. فرض شده است

که عرضه‌کننده موجودی کافی برای ملاقات همه‌ی مشتریان در طول افق برنامه‌ریزی

را دارد و موجودی اجازه‌ی منفی شدن ندارد، یعنی همه‌ی تقاضاها باید برآورده

شود. در شروع افق برنامه‌ریزی تصمیم‌گیرنده از سطح فعلی موجودی عرضه‌کننده و

مشتریان  $(I_i^0, I_i^0)$  و همچنین از اطلاعات تقاضای هر مشتری در هر دوره‌ی زمانی

$t$   $(dim_i^t)$  آگاه است. مقدار کالای تحویل داده‌شده به مشتری  $i$  در دوره‌ی  $t$  نیز

با  $q_i^{kt}$  نشان داده می‌شود. مجموعه‌ی  $K = \{1, 2, \dots, k\}$  مجموعه‌ی وسایل

نقلیه‌ی در دسترس را نشان می‌دهد. ظرفیت وسیله‌ی نقلیه‌ی  $k$  ام با  $Q_k$  نشان داده

می‌شود. هر وسیله‌ی نقلیه اجازه دارد در هر دوره‌ی زمانی حداکثر یک مسیر را از

عرضه‌کننده به زیر مجموعه‌ی مشتریان طی کند. مسافت هر کمان  $(i, j) \in A$

با  $dis_{ij}$  نشان داده می‌شود. هدف مسئله کمینه‌کردن هزینه‌ی کل در طول تأمین

تقاضای هر مشتری در همه‌ی دوره‌هاست. متغیر دودویی  $x_{ij}^{kt}$ ، اگر وسیله‌ی نقلیه‌ی

$k$  در دوره‌ی  $t$  کمان بین دو مشتری  $i$  و  $j$  را طی کند مقدار یک می‌گیرد و در

غیر این صورت مقدار آن صفر خواهد شد. متغیر دودویی  $l_k^t$ ، اگر وسیله‌ی نقلیه‌ی

$k$  در دوره‌ی  $t$  مورد استفاده قرار گیرد مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر

می‌گیرد.

$f_{ij}^{kt}$  میزان بار وسیله‌ی نقلیه‌ی  $k$  در دوره‌ی  $t$  است وقتی روی کمان بین مشتری

$i$  و  $j$  حرکت می‌کند.  $u_i^{kt}$  متغیری برای جلوگیری از ایجاد زیرتور است. هزینه‌ی

سوخت مورد نیاز برای تولید یک کیلوژول انرژی مصرفی با  $C_f$  نشان داده می‌شود.

هزینه‌ی هر ساعت رانندگی نیز با  $P$  مشخص شده است.  $vp$  هزینه‌ی استفاده از

هر یک از وسایل نقلیه در هر دوره‌ی زمانی است. از آنجایی که مسیر وسایل نقلیه

باز است و نیاز به بازگشت به انبار مرکزی وجود ندارد، گره مجازی  $n+1$  تعریف

می‌شود.

با توجه به پارامترها و متغیرهای بالا و مدل CMEM و مدل مسیریابی موجودی،

مدل زیر که حاصل ترکیب این دو است، هزینه‌ی سوخت مصرفی و هزینه‌های

موجودی، راننده، و استفاده از وسایل نقلیه را کمینه می‌کند.

$$\min z = c_f k N V \lambda \sum_{i=0}^n \sum_{j=0, j \neq i}^n \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T dis_{ij} x_{ij}^{kt} / speed$$

$$+ \sum_{i=0}^n \sum_{j=0, i \neq j}^n \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T c_f \lambda \gamma \alpha_{ij} dis_{ij} W X_{ij}^{kt}$$

$$+ \sum_{i=0}^n \sum_{j=0, i \neq j}^n \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T c_f \lambda \gamma \alpha_{ij} dis_{ij} f_{ij}^{kt} X_{ij}^{kt}$$

$$+ \sum_{i=0}^n \sum_{j=0, j \neq i}^n \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T c_f \lambda \gamma dis_{ij} \beta speed^t$$

$$+ \sum_{i=0}^n \sum_{j=0, j \neq i}^n \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T p * dis_{ij} x_{ij}^{kt} / speed$$

$$+ \sum_{i=0}^n \sum_{t=1}^T h_i I_i^t + \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T vpl_k^t$$

subject to :

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} X_{ij}^{kt} \leq 1 \quad \forall j \in N, t \in T \quad (9)$$

$$\sum_{j \in V'} X_{ij}^{kt} = l(k, t) \quad \forall k \in K, t \in T \quad (10)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} X_{ij}^{kt} \leq BM * l(k, t) \quad \forall k \in K, t \in T \quad (11)$$

$$\sum_{i \in v'} X_{ij}^{kt} - \sum_{m \in v'} X_{jm}^{kt} = 0 \quad \forall j \in N, k \in K, t \in T \quad (12)$$

$$f_{ij}^{kt} \geq \sum_{m=0}^n f_{mi}^{kt} - q_i^{kt} - BM(1 - X_{ij}^{kt})$$

$$\forall i, j \in N, k \in K, t \in T$$

$$f_{ij}^{kt} \leq \sum_{m=0}^n f_{mi}^{kt} - q_i^{kt} + BM(1 - X_{ij}^{kt})$$

$$\forall i, j \in N, k \in K, t \in T$$

$$f_{ij}^{kt} = \sum_{i=1}^n q_i^{kt} * X_{ij}^{kt} \quad \forall j \in N, k \in K, t \in T \quad (15)$$

$$f_{ij}^{kt} \leq Q(k) \quad \forall j \in N, k \in K, t \in T \quad (16)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{t \in T} u_i^{kt} = 0 \quad (17)$$

$$u_i^{kt} + 1 \leq u_j^{kt} + BM(1 - X_{ij}^{kt})$$

$$\forall i, j \in N, k \in K, t \in T \quad (18)$$

$$q_i^{kt} \leq BM * \sum_{j \in V} X_{ij}^{kt} \quad \forall i \in N, k \in K, t \in T \quad (19)$$

$$q_i^{kt} \geq dem_i^t * \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^K X_{ij}^{kt} - I_i^{t-1}$$

$$\forall i \in N, k \in K, t \in T$$

$$I_i^t = I_i^{t-1} + \sum_{k \in K} q_i^{kt} - dem_i^t \quad \forall i \in N, t \in T \quad (21)$$

$$I_i^t = I_i^{t-1} + r_t - \sum_{i \in V} \sum_{k \in K} q_i^{kt} \quad \forall t \in T \quad (22)$$

$$X_{ij}^{kt} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in N, k \in K, t \in T$$

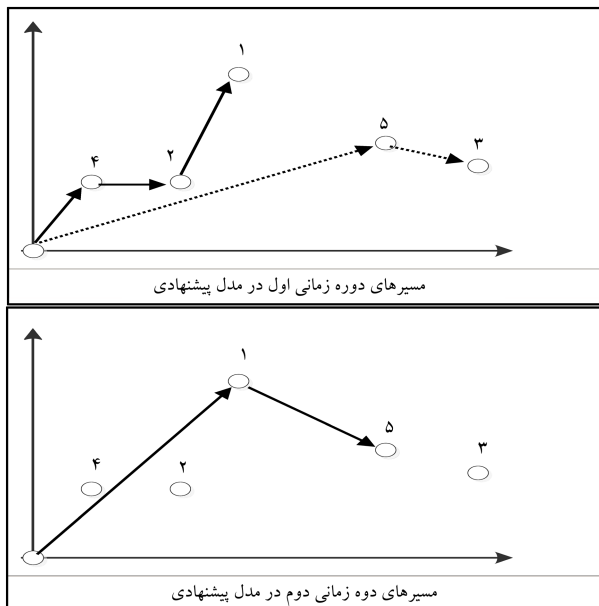
$$l_k^t \in \{0, 1\} \quad \forall k \in K, t \in T$$

$$I_i^t \geq 0 \quad \forall i, t \in T$$

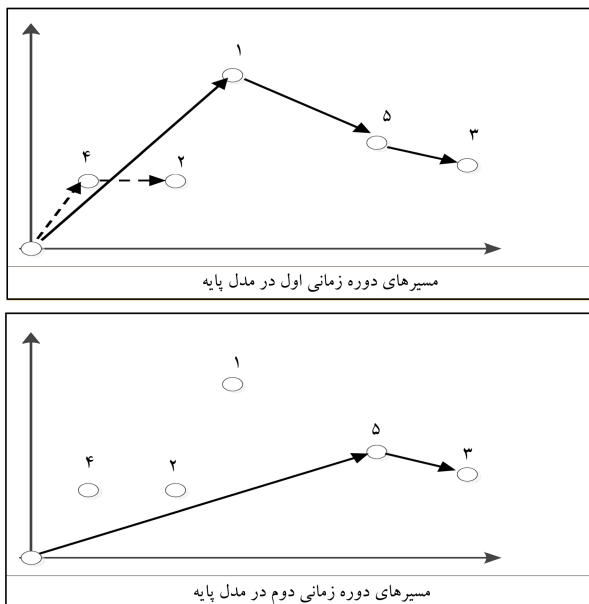
$$q_i^{kt} \geq 0 \quad \forall i, k \in K, t \in T$$

$$f_{ij}^{kt} \geq 0 \quad \forall i, j \in N, k \in K, t \in T \quad (23)$$

تابع هدف عبارت ۸ است که جمله‌های آن به ترتیب عبارت‌اند از هزینه‌ی سوخت مصرفی توسط تجهیزات وسیله نقلیه، هزینه‌ی سوخت مصرفی مربوط به وزن وسیله نقلیه بدون بار، هزینه‌ی سوخت مصرفی مربوط به بار حمل‌شده، هزینه‌ی



شکل ۱. مسیرهای مدل پیشنهادی.



شکل ۲. مسیرهای مدل پایه.

و بخش برنامه‌ریزی موجودی توسط الگوریتم فراابتکاری تفاضلی هدایت می‌شود. در ادامه به ترتیب روش ابتکاری و الگوریتم فراابتکاری توضیح داده می‌شود.

#### ۱.۴. الگوریتم ابتکاری

کلارک و رایت در سال ۱۹۶۴ الگوریتمی برای حل مسائل مسیریابی وسایل نقلیه ارائه کردند؛ این الگوریتم براساس مفهوم صرفه‌جویی بنا شده است.<sup>[۳۷]</sup> در این مقاله نیز برای حل مسئله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه با در نظر گرفتن کاهش مصرف سوخت از مفهوم کلارک و رایت استفاده شده است.

گام ۱. به همه‌ی گره‌ها (مشتریان) یک وسیله‌ی نقلیه اختصاص پیدا کند.

گام ۲. صرفه‌جویی حاصل از اتصال هر جفت گره محاسبه شود. بدین منظور از

سوخت مصرفی مربوط به سرعت وسیله‌ی نقلیه، هزینه‌ی راننده، هزینه‌ی نگهداری، و هزینه‌ی استفاده از وسایل نقلیه. محدودیت ۹ بیان می‌کند که نیاز نیست یک مشتری در یک دوره حتماً ملاقات شود. محدودیت‌های ۱۰ و ۱۱ مربوط به استفاده از وسیله‌ی نقلیه هستند. محدودیت ۱۲ تضمین می‌کند که اگر یک وسیله‌ی نقلیه به مشتری وارد شود حتماً از آن خارج می‌شود. محدودیت‌های ۱۳ و ۱۴ مقدار بار وسیله‌ی نقلیه بین دو گره را مشخص می‌کنند. محدودیت ۱۵ مقدار اولیه‌ی بار هر وسیله‌ی نقلیه را تعیین می‌کند. محدودیت ۱۶ تضمین می‌کند که بار وسیله‌ی نقلیه از ظرفیت آن بیشتر نشود. محدودیت‌های ۱۷ و ۱۸ برای جلوگیری از ایجاد زیرتور است. محدودیت‌های ۱۹ و ۲۰ میزان بار تحویل داده‌شده به هر مشتری در هر دوره‌ی زمانی را مشخص می‌کنند. محدودیت‌های ۲۱ و ۲۲ به ترتیب موجودی مشتریان و انبار را تعیین می‌کنند. محدودیت ۲۳ نوع متغیرها را نشان می‌دهد.

#### ۵.۳. خطی‌سازی مدل

همان‌طور که از مدل بالا مشخص است در قسمت سوم تابع هدف و محدودیت ۱۵ دو متغیر در هم ضرب شده و باعث غیرخطی شدن مدل شده‌اند؛ به منظور خطی‌سازی مدل پیشنهادی از رویکردهای ارائه شده استفاده شد.<sup>[۳۶،۳۵]</sup>

#### ۶.۳. تأثیر به‌کارگیری مدل پیشنهادی در کاهش هزینه‌ها

به منظور بررسی تأثیر به‌کارگیری مدل پیشنهادی در کاهش هزینه‌ها، هزینه و مسافت سفر در قالب یک مثال محاسبه شده و نتایج آن با نتایج حاصل از زمانی که تابع هدف کمینه‌کردن هزینه‌ی موجودی و هزینه‌ی مربوط به مسافت است، مقایسه شده است. برای این کار مسئله‌ی با پنج مشتری، دو وسیله‌ی نقلیه، و دو دوره‌ی زمانی در نظر گرفته شد. پنج مشتری به صورت تصادفی از مسئله‌ی اول آگرات انتخاب و از مختصات و تقاضای آن‌ها استفاده شد. سه‌جفت مشتری به تصادف انتخاب و شیب جاده در فاصله‌ی بین آنها به صورت تصادفی از بازه  $10\%$  تا  $10\%$  حاصل شده است. این مسئله توسط مدل پیشنهادی و مدل مسیریابی موجودی پایه حل شده است و نتایج آن در شکل‌های ۱ و ۲ مشاهده می‌شود. هزینه‌ی کل دو دوره‌ی زمانی در مدل پیشنهادی برابر  $139715$  و در مدل پایه برابر  $147114$  است. همان‌طور که از هزینه‌ها پیداست استفاده از مدل پیشنهادی باعث کاهش  $5.4\%$  درصدی در هزینه شده است. این کاهش به این دلیل است که مدل پیشنهادی مسیریابی که شیب منفی دارند انتخاب می‌کند حتی اگر باعث شود مسافت طی شده تا حدودی افزایش یابد. مسافت طی شده در مدل پیشنهادی  $315742$  کیلومتر و در مدل پایه  $291731$  کیلومتر است؛ اما مسیری که مدل پایه برای کمینه‌کردن مسافت طی می‌کند دارای کمان‌های با شیب مثبت است که باعث افزایش هزینه‌ی سوخت مصرفی می‌شود و در نتیجه کل هزینه افزایش می‌یابد.

#### ۴. روش حل

در این بخش روش حل ارائه شده برای مسئله ارائه می‌شود. روش حل مبتنی بر ترکیب الگوریتم تکاملی تفاضلی و الگوریتم سازنده‌ی کلارک و رایت است. در این روش مسئله به دو زیربخش مسیریابی با توجه به کاهش مصرف سوخت و برنامه‌ریزی موجودی تقسیم می‌شود. برای زیربخش مسیریابی با توجه به کاهش مصرف سوخت یک روش ابتکاری ارائه شده که مبتنی بر روش کلارک و رایت است

گام ۹. همه‌ی گره‌ها تخصیص یافته‌اند، الگوریتم متوقف شود و مسیر هر وسیله‌ی نقلیه گزارش شود.

برای بهبود جواب حاصل از روش کلارک و رایت از دو الگوریتم بهبوددهنده‌ی همسایگی  $2opt$  و همسایگی  $\lambda$  interchange استفاده شده است. یک همسایگی  $2opt$  از تور  $T$  شامل همه توره‌های  $T^1$  است که می‌تواند با حذف دو کمان  $(i, i+1)$  و  $(j, j-1)$  و اضافه کردن دو کمان جدید  $(i, j-1)$  و  $(i+1, j)$  به دست بیاید. عثمان در سال ۱۹۹۳ همسایگی  $\lambda$  interchange را تعریف کرد، این همسایگی شامل تعویض  $\lambda$  مشترکی بین مسیرهای مختلف است. [۳۸] در این مقاله از همسایگی  $\lambda$  interchange  $1-1$  استفاده شده است. به منظور بررسی کیفیت جواب‌های حاصل از الگوریتم ابتکاری پیشنهادی ۱۰ مسئله‌ی نمونه مربوط به مسئله‌ی مسیریابی سبز در ابعاد کوچک به روش دقیق حل شدند و نتایج آنها با نتایج حاصل از الگوریتم مقایسه شدند. نتایج نشان‌دهنده‌ی میانگین خطای ۱۷٪ الگوریتم پیشنهادی است.

### ۲.۴. الگوریتم تکاملی تفاضلی

الگوریتم تفاضلی یک روش بهینه‌سازی تصادفی برای مسائل NP-Hard است. این الگوریتم دارای سه مزیت اصلی است: حل مسئله بدون توجه به مقدار اولیه‌ی پارامترها، همگرایی سریع، و استفاده از پارامترهای کنترلی کم. الگوریتم تفاضلی یک الگوریتم جمعیت‌محور است و عملگرهایی مشابه الگوریتم ژنتیک دارد؛ یعنی تقاطع، جهش، و انتخاب. الگوریتم تفاضلی از عملگر جهش به‌عنوان سازوکار جست‌وجو و از عملگر انتخاب برای هدایت جست‌وجو به مناطق مؤثر در ناحیه‌ی جست‌وجو استفاده می‌کند. با استفاده از اجزای اعضای جمعیت موجود برای ساخت بردار آزمون، عملگر تقاطع به‌طور مؤثر ترکیب‌های موفقی برای جست‌وجوی بهتر در فضای جواب تولید می‌کند. [۳۹]

الگوریتم تفاضلی یک روش جست‌وجوست که از  $NP$  بردار  $D$  بعدی بهره می‌برد که اصطلاحاً اعضا نامیده می‌شوند. جواب منتخب را می‌توان به صورت  $x_{i,G} = \{x_{i,G}^1, x_{i,G}^2, \dots, x_{i,G}^D\}$  نوشت که در آن  $i = 1, 2, \dots, NP$ . جمعیت اولیه باید کل فضای جست‌وجو را تا جای ممکن پوشش دهد. برای مثال زامین پارامتر  $z$  امین عضو در تکرار  $G = 0$  با استفاده از عبارت ۲۸ به دست می‌آید.

$$x_{i,G}^j = x_{\min}^j + rand(0, 1) \cdot (x_{\max}^j - x_{\min}^j), \quad j = 1, 2, \dots, D \quad (28)$$

$x_{\min}^j$  و  $x_{\max}^j$  به ترتیب حد پایین و حد بالای زامین پارامتر هستند. جهش: برای هر عضو منحصر به فرد  $x_{i,G}$  که عضوی از جمعیت است و به اصطلاح بردار هدف نامیده می‌شود، یک بردار جهش با استفاده از رابطه‌ی ۲۹ ساخته می‌شود که در آن  $x_{r1}$  و  $x_{r2}$  سه عضو از اعضای جمعیت هستند که به‌طور تصادفی انتخاب می‌شوند و باید با یکدیگر و با عضو والد متفاوت باشند.

$$v_{i,G+1} = x_{r1} + F(x_{r2} - x_{r3}), \quad i \neq r1 \neq r2 \neq r3 \quad (29)$$

$F$  عامل مقیاس و یک مقدار ثابت است که معمولاً در بازه‌ی  $[0.5, 1]$  قرار می‌گیرد. به بردار حاصل از جهش بردار هدف، بردار آزمون گفته می‌شود. در این قسمت، اگر عدد به دست آمده در بازه‌ی صفر تا ۰/۵ باشد، خانه‌ی مربوطه مقدار صفر می‌گیرد و در غیر این صورت مقدار یک خواهد گرفت. [۴۰] ممکن است مقدار حاصل عددی بزرگ‌تر از یک یا کوچک‌تر از صفر باشد. برای رفع این مشکل به صورت آینه عمل

رابطه‌ی ۱۵ استفاده می‌شود. اگر این رابطه برای کمان  $(i, j)$  با  $sum_{ij}$  نشان داده شود، صرفه‌جویی حاصل از اتصال دو گره  $i$  و  $j$  با استفاده از رابطه‌ی ۲۴ به دست می‌آید.

$$(sum_{i+} + sum_{i-}) + sum_{.j} - (sum_{.i} + sum_{ij}) \quad (24)$$

اگر رابطه ۲۴ به صورت گسترده نوشته و ساده شود رابطه‌ی ۲۵ حاصل می‌شود.

$$c_f kNV\lambda(dis_{i+} + dis_{.j} - dis_{ij})/speed + c_f \lambda \gamma W(\alpha_{i+} dis_{i+} + \alpha_{.j} dis_{.j} - \alpha_{ij} dis_{ij}) + c_f \lambda \gamma (\alpha_{.j} dis_{.j} dem_j - \alpha_{ij} dis_{ij} dem_j - \alpha_{i+} dis_{i+} dem_j) + c_f \lambda \gamma \beta (dis_{i+} + dis_{.j} - dis_{ij}) speed^2 + p(dis_{i+} + dis_{.j} - dis_{ij}/speed) \quad (25)$$

در رابطه‌ی ۲۵،  $speed$  سرعت بهینه‌ی طی مسیر است به گونه‌ی که هزینه‌ی سوخت و هزینه‌ی راننده کمینه شود. برای به دست آوردن این سرعت از روابط مربوط به سوخت مصرفی و هزینه‌ی راننده بر حسب سرعت مشتق گرفته می‌شود، روابط ۲۶ و ۲۷ این روال را نشان می‌دهند.

$$\frac{\partial}{\partial v} = 0 \rightarrow \frac{-f_c kNV\lambda c_{ij}}{v^2} + 2f_c \beta \gamma \lambda c_{ij} v - dp \frac{c_{ij}}{v^2} = 0 \quad (26)$$

$$v^* = \left( \frac{KNV}{2\beta\gamma} + \frac{dp}{2\beta\lambda\gamma f_c} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (27)$$

گام ۳. صرفه‌جویی‌های محاسبه شده در گام ۲ به صورت نزولی مرتب و در فهرستی ذخیره شود.

گام ۴. برای همه‌ی وسایل نقلیه، گام‌های ۵ تا ۸ انجام شود.

گام ۵. از ابتدای فهرست به دست آمده در گام قبل شروع شود.

گام ۱.۵. اگر هیچ یک از دو گره قبلاً ملاقات نشده‌اند و مجموع تقاضای آنها از ظرفیت وسیله‌ی نقلیه کمتر است، دو گره به یکدیگر متصل شوند. در غیر این صورت دو گره بعدی موجود در فهرست امتحان شوند.

گام ۲.۵. اگر به وسیله‌ی نقلیه دو گره اختصاص یافته است، الگوریتم به گام ۵ برود.

گام ۳.۵. اگر همه‌ی گره‌ها تخصیص یافته‌اند الگوریتم به گام ۹ برود.

گام ۶. به ازای همه‌ی گره‌های تخصیص داده نشده به این وسیله‌ی نقلیه، گام‌های ۱.۶ و ۲.۶ انجام می‌شود.

گام ۱.۶. گره به ابتدای تور وسیله‌ی نقلیه اضافه و مقدار تابع هدف محاسبه شود.

گام ۲.۶. گره به انتهای تور وسیله‌ی نقلیه اضافه و مقدار تابع هدف محاسبه شود.

گام ۷. گره‌ی که کمترین مقدار هزینه را به تور اضافه کرده است و تقاضای آن از ظرفیت خالی وسیله‌ی نقلیه کمتر است، به تور اضافه می‌شود. اگر این هزینه مربوط به قرار دادن گره در ابتدای تور است، گره به ابتدای تور اضافه می‌شود و در غیر این صورت به انتهای تور متصل می‌شود و ظرفیت باقی‌مانده وسیله‌ی نقلیه روزآمد می‌شود.

گام ۸. اگر چنین مشرتی پیدا نشد، الگوریتم به گام ۵ برود.

### ۳.۴. تولید جمعیت اولیه

تولید جمعیت اولیه مبتنی بر روش تصادفی و یک روش ابتکاری است. برای هر یک از اعضای جمعیت، یک عدد تصادفی تولید می‌شود؛ اگر عدد حاصل از ۰/۵ کوچک‌تر باشد، مقداردهی به این عضو از روش تصادفی و در غیر این صورت از روش ابتکاری خواهد بود. در روش تصادفی ابتدا عدد تصادفی برای عضو تولید می‌شود. سپس برای هر یک از خانه‌های آن نیز یک عدد تصادفی دیگر تولید می‌شود. اگر عدد حاصل از عدد مربوط به عضو بزرگتر باشد، آن خانه مقدار یک می‌گیرد و در غیر این صورت مقدار صفر خواهد گرفت. برای مقداردهی اولیه با روش ابتکاری گام‌های زیر انجام می‌شود.

گام ۱. ماتریسی با ابعاد  $n * t$  که همه‌ی درایه‌های آن برابر صفر است، در نظر گرفته شود.  $n$  تعداد مشتریان و  $t$  تعداد دوره‌های زمانی را نشان می‌دهد. برای هر یک از مشتریان شمارنده‌ی در نظر گرفته می‌شود که در طول الگوریتم زمان ملاقات آنها را نشان می‌دهد، این شمارنده در ابتدا برای همه‌ی مشتریان برابر یک است. موجودی همه‌ی مشتریان در ابتدای الگوریتم برابر موجودی آنها در ابتدای افق برنامه‌ریزی است.

گام ۲. برای همه‌ی دوره‌های زمانی  $\{1, \dots, T\}$ ، گام‌های ۳ تا ۱۲ انجام شود.  
گام ۳. برای همه‌ی مشتریانی که شمارنده‌ی آنها با شماره‌ی دوره‌ی زمانی برابر است تقاضای مشتری در دوره‌ی زمانی و موجودی ابتدای دوره‌ی زمانی محاسبه می‌شود.

گام ۱.۳. اگر تقاضای محاسبه‌شده مقداری مثبت است، یعنی تقاضا از موجودی بیشتر است؛ مشتری باید در این دوره ملاقات شود.

گام ۲.۳. اگر تقاضای محاسبه‌شده مقداری منفی است، یعنی تقاضا از موجودی کمتر است؛ مشتری نیازی به ملاقات در این دوره ندارد و به شمارنده‌ی مربوط به مشتری یک واحد اضافه شود.

گام ۴. همه‌ی مشتریانی که باید در این دوره‌ی زمانی ملاقات شوند در یک فهرست قرار داده شوند.

گام ۱.۴. مجموع تقاضای مشتریان موجود در فهرست محاسبه شود.

گام ۵. تعداد وسایل نقلیه‌ی مورد نیاز تخمین زده شود؛ برای این کار، مجموع تقاضای به‌دست‌آمده در گام قبل بر ظرفیت هر وسیله‌ی نقلیه تقسیم و حاصل رو به بالا گرد می‌شود. با این کار حداقل وسایل نقلیه‌ی مورد نیاز محاسبه می‌شود.

گام ۱.۵. تعداد وسایل نقلیه، فهرست مشتریان و مشخصات آنها به الگوریتم ساخت مسیر داده می‌شود.

گام ۲.۵. اگر الگوریتم ساخت مسیر همه‌ی مشتریان موجود در فهرست را به وسایل نقلیه اختصاص داده باشد، الگوریتم به گام ۶ می‌رود و در غیر این صورت، الگوریتم به وسایل نقلیه یک واحد اضافه می‌کند و دوباره به الگوریتم ساخت مسیر هدایت می‌شود.

گام ۶. با توجه به مسیرهای ساخته‌شده توسط الگوریتم ساخت مسیر، میزان ظرفیت استفاده‌شده هر وسیله‌ی نقلیه محاسبه شود.

گام ۷. به شمارنده‌ی همه‌ی مشتریان موجود در فهرست ملاقات این دوره یک واحد اضافه شود.

می‌شود؛ اگر عدد به‌دست آمده از یک بزرگ‌تر باشد، مقدار یک از عدد کم و سپس جواب حاصل از یک کم می‌شود. در غیر این صورت قدرمطلق عدد جایگزین آن می‌شود.

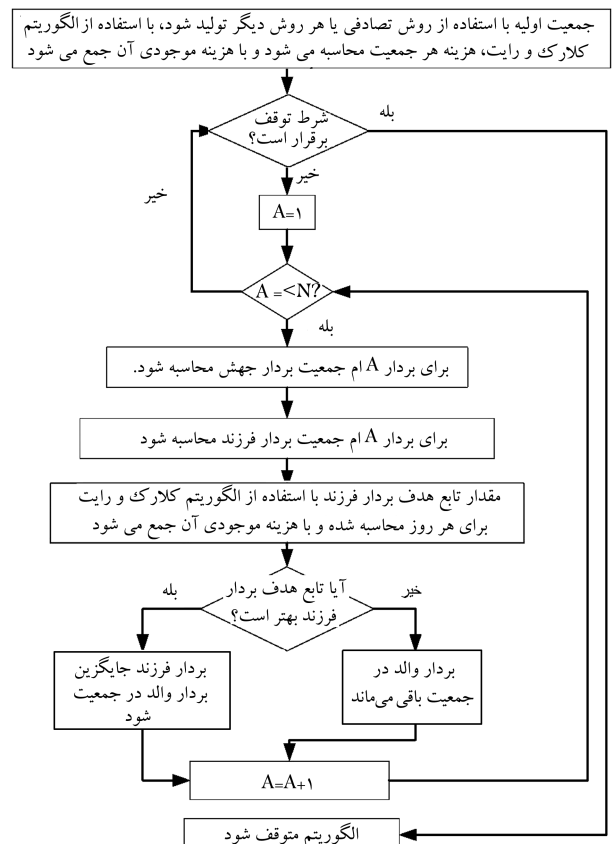
**تقاطع:** بعد از فاز جهش، عملگر تقاطع روی بردار هدف و بردار جهش حاصل از آن برای ساخت بردار فرزند اعمال می‌شود. تقاطع یکنواخت برای تولید فرزند  $u_i$  از ترکیب بردار هدف  $x_i$  با بردار آزمون  $v_i$  به صورت زیر انجام می‌گیرد.

$$u_i(j) = \begin{cases} v_i(j) & \rightarrow \text{if } \left\{ \begin{array}{l} (rand(0, 1) \leq CR) \\ \text{or } (j = j_{rand}) \end{array} \right. \\ x_i(j) & \rightarrow \text{otherwise} \end{cases} \quad (30)$$

$CR$  ثابت تقاطع است و در بازه  $[0, 1]$  تغییر می‌کند.  $j_{rand}$  یک اندیس تصادفی است تا بردار فرزند حداقل در یک جزء با بردار والد متفاوت باشد. انتخاب: اگر مسئله کمیته‌سازی باشد، برای انتخاب یک بردار از بین بردار والد و بردار فرزند، از مقایسه‌ی زیر استفاده می‌شود. [۳۶]

$$x_i^* = \begin{cases} u_i, & \text{if } (f(u_i) \leq f(x_i)) \\ x_i, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (31)$$

مراحل سه‌گانه‌ی توضیح داده‌شده تا رسیدن به شرایط خاتمه ادامه می‌یابد. فلوچارت الگوریتم در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۳. فلوچارت الگوریتم تقاضایی.

گام ۸. برای همه‌ی وسایل نقلیه‌ی استفاده‌شده در این دوره‌ی زمانی گام‌های ۹ و ۱۰ انجام شود.

گام ۹. برای هر وسیله‌ی نقلیه فهرست جدیدی تهیه شود؛ همه‌ی مشتریانی که توسط این وسیله‌ی نقلیه در این دوره ملاقات شده‌اند و شمارنده‌ی آنها کوچک‌تر از تعداد دوره‌های زمانی است و تقاضای دوره‌ی زمانی برابر با شمارنده‌شان از ظرفیت خالی وسیله‌ی نقلیه کوچک‌تر است به فهرست مربوط به وسیله‌ی نقلیه اضافه می‌شوند.

گام ۱۰.۹. از میان مشتریان موجود در فهرست وسیله‌ی نقلیه،  $L$  مشتری که بیشترین فاصله از انبار مرکزی را دارند جدا می‌شوند و از بین آنها یکی به تصادف انتخاب می‌شود تا تقاضای دوره‌ی زمانی برابر با شمارنده‌اش به میزان محصولی که وسیله‌ی نقلیه در این بازدید برای وی می‌برد، اضافه شود.

گام ۲۰۹. ظرفیت خالی وسیله‌ی نقلیه روزآمد شود؛ به شمارنده‌ی مشتری انتخاب‌شده در گام ۱۰.۹ یک واحد افزوده شود.

گام ۱۰. گام ۹ تا جایی که ظرفیت خالی وسیله‌ی نقلیه پاسخ‌گوی تقاضای هیچ‌یک از مشتریان موجود در مسیرش نباشد یا مشتریان دیگر تقاضایی نداشته باشند، ادامه می‌یابد.

گام ۱۱. میزان محصول ارسالی برای هر یک از مشتریان محاسبه و با استفاده از آن موجودی ابتدای دوره‌ی بعد مشخص شود.

گام ۱۲. ستون مربوط به این دوره‌ی زمانی در ماتریس گام ۱ روزآمد شود. بدین‌منظور، مشتریانی که در فهرست این دوره‌ی زمانی قرار دارند، درابه‌ی مربوطه‌شان مقدار یک می‌گیرند.

#### ۴.۴. نحوه‌ی نمایش جواب‌ها

نمایش جواب‌ها شامل ماتریسی است که تعداد  $N$  سطرها و  $T$  ستون دارد. هر سطح نماینده‌ی یک مشتری است و هر ستون نماینده‌ی یک روز از دوره‌ی زمانی است. اعداد داخل هر سطر و ستون مقداری بین صفر و یک هستند. مقدار بزرگ‌تر از  $0.75$  به معنی بازدید مشتری در روز مورد نظر و مقدار کمتر از آن به معنی عدم بازدید مشتری در روز مورد نظر است.

#### ۵.۴. تنظیم پارامترهای الگوریتم

تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های فرآیندکاری نقش مهمی در کیفیت جواب‌های حاصل از آنها دارد. پارامترهای اساسی الگوریتم پیشنهادی عبارت‌اند از:  $F$  پارامتر مقیاس،  $CR$  ثابت تقاطع، و تعداد جمعیت اولیه. مقداردهی به این پارامترها با استفاده از روش تاگوچی انجام شده است. جدول ۱ مقادیر پارامترهای الگوریتم پیشنهادی را ارائه می‌دهد.

#### ۵. نتایج عددی

در این بخش نتایج عددی ارائه می‌شود. در ابتدا نحوه‌ی تولید مسائل نمونه در ابعاد

جدول ۱. مقادیر پارامترهای الگوریتم پیشنهادی.

پارامتر	تعداد اعضا	$F$	$CR$
مقدار	$5 * \sqrt{n}$	۰/۵	۰/۷

#### ۱.۵. تولید مسائل نمونه

برای تولید این دسته مسائل از نمونه مسائل آگرات (دسته اول مسائل) استفاده شده است. مختصات مشتریان همان مختصات مسائل آگرات است. تعداد وسایل نقلیه‌ی در دسترس برای هر مسئله برابر مسیره‌های بهینه مسئله است. ظرفیت هر وسیله‌ی نقلیه در دسته مسائل انتخاب‌شده  $10^5$  واحد است، برای تبدیل ظرفیت به پنج تن، این عدد در  $5^5$  ضرب می‌شود، تقاضای مشتریان نیز با همین ضریب افزایش می‌یابد. تعداد دوره‌های زمانی به تصادف از بازه‌ی  $[5, 20]$  انتخاب می‌شود و تقاضا در همه‌ی دوره‌ها برابر است. ظرفیت نگهداری، هزینه نگهداری، و میزان محصول در دسترس در انبار مرکزی در هر دوره‌ی زمانی همانند مسائل نمونه در ابعاد کوچک است. برای تولید مسائل نمونه در ابعاد کوچک به صورت تصادفی از یک مسئله در ابعاد بزرگ مشتریانی انتخاب می‌شوند. نحوه‌ی تولید مسائل کوچک با توجه به مسائل بزرگ در جدول ۲ آمده است.

#### ۲.۵. بررسی مسائل در ابعاد کوچک

نتایج عددی حاصل از حل مسائل در ابعاد کوچک در جدول ۳ ارائه شده است. در ستون اول جدول ۳ مشخصات مسئله، (عدد اول شماره‌ی مسئله، عدد دوم تعداد مشتریان، عدد سوم تعداد وسایل نقلیه‌ی در دسترس، و عدد چهارم تعداد دوره‌های زمانی) را نشان می‌دهد. مثلاً منظور از  $3 - 2 - 3 - 1$ ، مسئله‌ی یک با سه مشتری، دو وسیله‌ی نقلیه، و سه دوره‌ی زمانی است. همان‌گونه که مشخص است الگوریتم فرآیندکاری پیشنهادی در  $70\%$  موارد به جواب بهینه رسیده است. همچنین این الگوریتم با میانگین خطای ۶ دهم درصد کیفیت مطلوبی را ارائه کرده است. از نظر زمانی نیز میانگین زمان حل الگوریتم ۱۷ ثانیه است. میانگین زمان حل روش دقیق نیز  $90^{\circ}$  ثانیه است. نتایج نشان‌دهنده‌ی عملکرد مطلوب الگوریتم پیشنهادی در ابعاد کوچک است.

#### ۳.۵. تأثیر تعداد تکرار بر عملکرد الگوریتم ترکیبی پیشنهادی در

##### ابعاد بزرگ

در جدول ۴ مسائل در ابعاد بزرگ با استفاده از روش ترکیبی حل شده‌اند. به‌منظور بررسی تأثیر تکرارها در ابعاد بزرگ ابتدا تعداد تکرارها  $5^5$  در نظر گرفته شده و سپس مسائل با تعداد تکرارهای  $10^5$  و  $15^5$  هم اجرا شده است. هر مسئله با هر تعداد تکرار چهار بار اجرا شده و میانگین زمان و تابع هدف آن در جدول ۴ قرار داده شده است.

با توجه به جدول ۴، با افزایش تعداد تکرارهای الگوریتم کیفیت جواب‌ها بهبود می‌یابد اما روند بهبود ثابت نیست. در تعداد تکرار  $5^5$  در  $16\%$  از مسائل بهترین جواب به دست می‌آید. میانگین درصد خطا در  $5^5$ ،  $10^5$  و  $15^5$  تکرار برابر  $2.9\%$ ،  $0.9\%$  و صفر است.

#### ۶. نتیجه‌گیری

مسائل مسیریابی موجودی در زمره‌ی مسائل مسیریابی وسایل نقلیه هستند که در آن تصمیمات مسیریابی و کنترل موجودی در یک زمان انجام می‌شود. در این



جدول ۲. تولید مسائل نمونه در ابعاد کوچک.

پارامتر مسئله‌ی مسیریابی موجودی	مقدار پارامتر در مسائل با ابعاد کوچک
مختصات و تقاضای مشتریان	به صورت تصادفی از بین مشتریان ابعاد بزرگ
بیشینه‌ی وسایل نقلیه در دسترس	سه برابر کمینه‌ی وسایل نقلیه مورد نیاز
تعداد دوره‌های زمانی	انتخاب به صورت تصادفی از بازه‌ی [۲, ۴]
ظرفیت نگهداری	برابر مجموع تقاضای افق برنامه‌ریزی
میزان محصول انبار در هر دوره‌ی زمانی	برابر مجموع تقاضای همه مشتریان در همه‌ی دوره‌های زمانی
هزینه‌ی نگهداری	۰/۰۰۰۲ به ازای هر کیلوگرم محصول

جدول ۳. مقایسه‌ی الگوریتم ترکیبی پیشنهادی با روش دقیق.

الگوریتم ترکیبی پیشنهادی			روش دقیق		
درصد	زمان حل	تابع	زمان حل	جواب	مشخصات مسئله
خطا	(ثانیه)	هدف	(ثانیه)	بهینه	
۰	۱۰,۱۳	۶۴,۹۵	۴	۶۴,۹۵	۱-۳-۲-۳
۰	۱۱,۸۶	۶۳,۷۶	۶۱	۶۳,۷۵	۲-۴-۲-۳
۰	۱۴,۰۲	۹۲,۸	۲۷	۹۲,۸	۳-۴-۲-۴
۰	۱۲,۹۷	۸۵,۵	۶۰	۸۵,۵	۴-۵-۲-۲
۲,۳	۱۴	۱۲۵,۷۸	۸۳	۱۲۲,۹۳	۵-۶-۲-۲
۲,۹	۱۹,۷۲	۹۴,۹	۳۹۷	۹۲,۱۵	۶-۷-۲-۲
۰	۱۶,۰۴	۹۰,۳۲	۹۳۰	۹۰,۳۲	۷-۵-۲-۳
۰	۱۷,۴۷	۱۱۴,۸۵	۱۱۱۷	۱۱۴,۸۵	۸-۸-۲-۲
۰	۲۰,۶۳	۱۳۲,۷۵	۱۷۴۸	۱۳۲,۷۵	۹-۷-۲-۳
۰,۹۹	۳۳,۴۱	۱۳۱,۴۱	۴۶۶۱	۱۳۰,۱۱	۱۰-۹-۲-۲
۰,۶۱۹	۱۷,۰۲		۹۰۸,۸		میانگین

از اجرای الگوریتم روی مسائل در ابعاد بزرگ و کوچک، الگوریتم با داشتن میانگین خطای ۰/۶۱۹ درصد در ابعاد کوچک عملکرد مناسبی دارد. در ابعاد بزرگ نیز با افزایش تعداد تکرارهای الگوریتم، جواب بهینه به جز در مسائل ۷، ۸ و ۱۴ بهبود پیدا کرده است. از جمله پیشنهادها برای تحقیقات آتی، می‌توان به ارائه‌ی الگوریتم‌های ابتکاری و فرایبتکاری دیگر برای حل مسئله اشاره کرد. همچنین در نظر گرفتن ناوگان حمل و نقل غیرهمگن نیز می‌تواند موضوع جدیدی در این حوزه باشد.

مقاله مدل مسیریابی موجودی با مدل انتشار جامع ترکیب شد و مدل مسیریابی موجودی با در نظر گرفتن کاهش مصرف سوخت به دست آمد. در این مدل کاهش مصرف سوخت علاوه بر مسافت طی شده به شیب مسیر، بار وسیله‌ی نقلیه در هر مسیر، و سرعت وسیله‌ی نقلیه مرتبط است. مدل حاصل برای حل، به دو قسمت مسیریابی وسایل نقلیه با در نظر گرفتن کاهش مصرف سوخت و قسمت موجودی تقسیم شد. برای حل قسمت مسیریابی از الگوریتم کلارک و رایب و برای حل قسمت موجودی از الگوریتم تکاملی تفاضلی استفاده شد. با توجه به نتایج حاصل

جدول ۴. مقایسه‌ی الگوریتم ترکیبی در ابعاد بزرگ و در تعداد تکرارهای مختلف.

$it = 150$			$it = 100$			$it = 50$			مشخصات مسئله
درصد خطا	زمان حل (S)	تابع هدف	درصد خطا	زمان حل (S)	تابع هدف	درصد خطا	زمان حل (S)	تابع هدف	
۰	۴۵۲,۱۳	۷۱۵,۳۴	۰,۷۵	۲۳۹,۶۷	۷۲۰,۷۵	۰,۹۷	۸۶,۳۷	۷۲۲,۲۸	۱-۳۱-۵-۳
۰	۴۵۱,۵۴	۹۰۸,۴	۰,۶۴	۲۶۵,۷	۹۱۴,۲۲	۵,۷۳	۱۹۶,۹۳	۹۶۰,۵۱	۲-۳۲-۵-۴
۰	۹۱۵,۶۱	۱۲۷۲,۴۵	۱,۴	۱۷۴,۹۷	۱۲۹۰,۳۳	۲,۵	۲۰۳,۷۸	۱۳۰۴,۸۲	۳-۳۲-۶-۵
۰	۲۸۹,۸۸	۷۶۷,۷۲	۰,۸۹	۲۳۸,۸۵	۷۷۴,۵۶	۰,۸۹	۵۹,۹۲	۷۷۴,۵۶	۴-۳۳-۵-۳
۰	۲۰۸۶,۷۶	۱۰۴۹,۰۶	۲,۲	۶۹۲,۲۴	۱۰۷۲,۴۲	۵,۶	۶۷۴,۸۶	۱۱۰۸,۰۳	۵-۳۵-۵-۴
۰	۲۴۸۲,۵۸	۶۹۱,۵۵	۱,۵	۱۰۲۶,۹۳	۷۰۲,۳۵	۳,۷	۳۶۶,۸۷	۷۱۷,۶۲	۶-۳۶-۵-۳
۰	۱۴۸۰,۷۶	۱۶۷۸,۱۱	۰	۱۱۷۴,۰۶	۱۶۷۸,۱۱	۰	۲۲۸,۴۲	۱۶۷۸,۱۱	۷-۳۶-۶-۵
۰	۶۶۷,۴۶	۸۸۰,۹۷	۰	۴۹۲,۹۱	۸۸۰,۹۷	۰	۳۳۷,۹۴	۸۸۰,۹۷	۸-۳۷-۵-۳
۰	۵۷۲	۱۱۵۵,۳۳	۱,۴	۶۱۳,۳۲	۱۱۷۱,۵۹	۱,۷	۲۳۷,۳۹	۱۱۷۵,۸۵	۹-۳۸-۵-۴
۰	۱۷۲۵,۶۷	۱۳۹۷,۲۵	۱,۳	۱۵۵۲,۹۴	۱۴۱۶,۲۴	۳,۱	۵۱۲,۳۳	۱۴۴۱,۷۴	۱۰-۳۸-۶-۵
۰	۵۹۶,۳۱	۱۲۵۵,۹۵	۲,۶	۴۳۷,۴۳	۱۲۸۸,۸۲	۳,۳	۲۴۳,۹۲	۱۲۹۷,۸۳	۱۱-۴۳-۷-۴
۰	۷۱۷,۹۲	۱۱۹۲,۵۱	۰,۴	۵۹۶,۸۵	۱۱۹۷,۲۸	۳,۵	۳۸۴,۶۵	۱۲۳۴,۱۲	۱۲-۴۴-۷-۴
۰	۹۶۶,۵۷	۱۷۷۹,۱۱	۰,۳۴	۷۱۷,۶۶	۱۷۸۵,۲۷	۲,۷	۲۸۰,۶۱	۱۸۲۸	۱۳-۴۴-۷-۵
۰	۱۳۵۴,۴۸	۹۲۱,۶۳	۰	۹۷۹,۴۷	۹۲۱,۶۳	۰	۸۰۷,۶۱	۹۲۱,۶۳	۱۴-۴۵-۷-۳
۰	۲۱۲۱,۵۶	۱۴۳۵,۰۵	۱,۸	۵۹۷,۱۱	۱۴۶۱,۳۱	۲,۵	۴۰۸,۹۱	۱۴۷۲,۱	۱۵-۴۷-۷-۴
۰	۲۴۶۹,۷	۱۰۷۸,۴۴	۰,۷۶	۲۲۵۳,۵۷	۱۰۸۶,۷۲	۴,۴	۴۸۱,۳۷	۱۱۲۵,۸۸	۱۶-۵۲-۷-۳
۰	۱۲۷۸,۶۲	۷۷۲,۷۳	۰,۶۳	۵۸۶,۰۵	۷۷۷,۶	۴,۵	۹۸۶,۹۸	۸۰۷,۷۸	۱۷-۵۳-۷-۲
۰	۱۰۳۶,۲۶	۱۱۴۸,۴۶	۰,۹۶	۶۸۱,۳۸	۱۱۵۹,۴۸	۱,۵	۴۵۸,۴۶	۱۱۶۶,۴۴	۱۸-۵۴-۹-۳
۰	۱۲۰۳,۶۵		۰,۹۷	۷۴۰,۰۶		۲,۹۲	۳۸۶,۵۱		میانگین

### پانویسها

1. one-to-many
2. depot
3. vendor managed inventory
4. comprehensive modal emission model (CMEM)

### منابع (References)

1. Al-e-hashem, S.M.J. and Rekik, Y. "Multi-product multi-period inventory routing problem with a transshipment option: A green approach", *International Journal of Production Economics*, **157**, pp. 80-88 (2014).
2. Moin, N.H. and Salhi, S. "Inventory routing problem: A logistical overview", *Journal of the Operational Research Society*, **58**, pp. 1185-1194 (2007).
3. Bertazzi, L., Speranza, M.G. and Ukovich, W. "Minimization of logistic costs with given frequencies", *Transport Research B*, **31**, pp. 327-340 (1997).
4. Bertazzi, L., Bosco, A., Guerriero, F. and Lagana, D. "A stochastic inventory routing problem with stock-out", *Transportation Research Part C*, **27**, pp. 89-107 (2013).
5. Trudeau, P. and Dror, M. "stochastic inventory routing: Route design with stock outs and route failures", *Transportation Science*, **26**, pp. 171-184 (1992).
6. Raa, B. and Aghezzaf, E. "Designing distribution patterns for long-term inventory routing with constant demand rates", *International Journal of Production Economics*, **112**, pp. 255-26 (2008).
7. Aghezzaf, E. "Robust distribution planning for the supplier-managed inventory agreements when demand rates and travel times are stationary", *Journal of the Operational Research Society*, **59**, pp. 1055-1065 (2008).
8. Adulyasak, Y., Cordeau, J.F. and Jans, R. "Formulations and branch- and- cut algorithms for multi-vehicle production and inventory routing problems", *INFORMS Journal on Computing*, **26**, pp. 103-120 (2012).
9. Yang, P. and Wee, H. "A single-vendor and multiple-buyers production-inventory policy for a deteriorating item", *European Journal of Operational Research*, **143**, pp. 570-581 (2002).
10. Mirzaei, S. and Seifi, A. "Considering lost sale in inventory routing problems for perishable goods", *Computers & Industrial Engineering*, **87**, pp. 213-227 (2015).
11. Ahmadi Javid, A. and Azad, N. "Incorporating location, routing and inventory decisions in supply chain network design", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **46**, pp. 582-597 (2010).
12. Le, T., Diabat, A., Richard, J.P. and Yih, Y. "A column generation- based heuristic algorithm for an inventory routing problem with perishable product", *Optimization Letters*, **7**, pp. 1481-1502 (2013).
13. Shen, Z.J.M., Coullard, C. and Daskin, M.S. "A joint location-inventory model", *Transportation Science*, **37**, pp. 40-55 (2003).

14. Huang, S. and Lin, P. "A modified ant colony optimization algorithm for multi-item inventory routing problems with demand uncertainty", *Transportation Research Part E*, **46**, pp. 598-611 (2010).
15. Andersson, H., Haff, A., Christiansen, M., Hasle, G. and Lokketangen, A. "Industrial Aspects and literature survey: Combined inventory management and routing", *Computers & Operations Research*, **37**, pp. 1515-1536 (2010).
16. Anily, S. and Federgruen, A. "A class of Euclidean routing-problems with general- route cost-functions", *Mathematics of Operations Research*, **15**, pp. 268-285 (1990).
17. Niakan, F. and Rahimi, M. "A multi-objective healthcare inventory routing problem; a fuzzy possibilistic approach", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **80**, pp. 74-94 (2015).
18. Lin, C., Choy, K.L., Ho, G.T., Shung, S.H. and Lam, H.Y. "Survey of green vehicle routing problem: Past and future trends", *Expert Systems with Applications*, **41**, pp. 1118-1138 (2014).
19. Kara, İ., Kara, B.Y. and Yetis, M.K. "Energy minimizing vehicle routing problem", *International Conference on Combinatorial Optimization and Applications*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 62-71 (2007).
20. Xiao, Y., Zhao, Q., Kaku, I. and Xu, Y. "Development of fuel consumption optimization model for the capacitated vehicle routing problem", *Computers & Operations Research*, **39**, pp. 1419-1431 (2012).
21. Kuo, Y. "Using simulated annealing to minimize fuel consumption for the time dependent vehicle routing problem", *Computers & Industrial Engineering*, **59**, pp. 157-165 (2010).
22. Pronello, C. and André, M., *Pollution Emissions Estimation in Road Transport models*, INRETS-LTE Report N° 2007, 109 p. (2000).
23. Sbihi, A. and Eglese, R.W. "Combinatorial optimization and green logistics", *OR: A Quarterly Journal of Operations Research*, **5**, pp. 99-116 (2007).
24. Palmer, A. "Development of an integrated routing and carbon dioxide emissions model for goods vehicles", PhD. Dissertation, School of Management, Cranfield University (2007).
25. Fagerholt, K., Laporte, G. and Norstad, I. "Reducing fuel emissions by optimizing speed on shipping routes", *Journal of the Operational Research Society*, **61**, pp. 523-529 (2010).
26. Bektaş, T. and Laporte, G. "The pollution-routing problem", *Transportation Research Part B*, **45**, pp. 1232-1250 (2011).
27. Demir, E. "Models and algorithms for the pollution-routing problem and its variations", Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy (2012).
28. Faulin, J., Juan, A., Lera, F. and Grasman, S. "Solving the capacitated vehicle routing problem with environmental criteria based on real estimations in road transportation: A case study", *Procedia Social and Behavioral Sciences*, **20**, pp. 323-334 (2011).
29. Demir, E., Bektaş, T. and Laporte, G. "A comparative analysis of several vehicle emission models for road freight transportation", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **16**, pp. 347-357 (2011).
30. Rakha, H., Ahn, K. and Trani, A. "Comparison of MOBILE5a, MOBILE6, VTMICRO, and CMEM models for estimating hot-stabilized light-duty gasoline vehicle emissions", *Canadian Journal of Civil Engineering*, **30**, pp. 1010-1021 (2003).
31. Poutanen, J.P. "Vendor managed inventory case WÄRTSILÄ industrial operations", Degree Programme of International Business, VAASAN AMMATTIKO-RKEAKOULU, Univesity of Applied Sciences (2010).
32. Golden, B.L., Raghavan, S. and Wasil, E.A., *The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges*, Springer Science (2008).
33. Ardekani, S., Hauer, E. and Jamei, B., *Traffic Impact Models. in Traffic Flow Theory*, Chapter 7, US Federal Highway Administration, Washington (1996).
34. Demir, E., Bektaş, T. and Laporte, G. "An adaptive large neighborhood search heuristic for the pollution-routing problem", *European Journal of Operational Research*, **223**, pp. 346-359 (2012).
35. Lysgaard, J. "Clarke & Wright's savings algorithm", Department of Management Science and Logistics, The Aarhus School of Business, pp. 1-7 (1997).
36. Glover, F. and Woolsey, L. "Converting the 0-1 polynomial programming problem to a 0-1 linear program", *Operations Research*, **22**, pp. 180-182 (1974).
37. Clarke, G., and Wright, J.W. "Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivering points", *operations research*, **12**, pp. 568-581 (1964).
38. Agarwal, R., Ahuja, R.K., Laporte, G. and Shen, Z.J. "A composite very large-scale neighborhood search algorithm for the vehicle routing problem", *Handbook of Scheduling: Algorithms, Models and Performance Analysis*, pp. 1-49 (2004).
39. Karaboga, D. and Okdem, S. "A simple and global optimization algorithm for engineering problems: Differential evolution algorithm", *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, **12**(1), pp. 53-60 (2004).
40. Storn, R. "Differential evolution, a simple and efficient heuristic strategy for global optimization over continuous spaces", *Journal of Global Optimization*, **11**, pp. 341-359 (1997).