

یک مدل بهینه‌سازی استوار سناریو - محور برای مسئله مسیریابی وسایط نقلیه دوره‌ای با پنجره زمانی تحت شرایط عدم قطعیت با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی

علیرضا سلامت‌بخش ورجوی^۱، رضا توکلی مقدم^{۲*}، مهدی علینقیان^۳، اسماعیل نجفی^۴

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی صنایع، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

۲. استاد، دانشکده مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۳. استادیار، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی اصفهان

۴. استادیار، گروه مهندسی صنایع، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

(تاریخ دریافت: ۹۵/۱۲/۲۳، تاریخ دریافت روایت اصلاح‌شده: ۹۶/۰۳/۰۸، تاریخ تصویب: ۹۶/۰۳/۱۰)

چکیده

در این مقاله یک رویکرد ریاضی به‌منظور بررسی و ارزیابی مسئله مسیریابی دوره‌ای وسایط نقلیه با پنجره زمانی در محیط رقابتی با توجه به عدم قطعیت در زمان سرویس‌دهی رقبا به مشتریان ارائه خواهد شد. هدف از این مقاله، ارائه یک مدل دوهدفه شامل کمینه‌سازی هزینه حمل‌ونقل از طریق انتخاب کوتاه‌ترین مسیر و بیشینه‌کردن سود ناشی از توزیع کالا با در نظر گرفتن عدم قطعیت زمان سرویس‌دهی رقبا به مشتریان با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار تحت سناریوست. به‌منظور ارزیابی کارایی مدل ارائه‌شده از دو راهبرد کارای الگوریتم تکامل تفاضل استفاده، و نتایج به‌دست‌آمده در ابعاد کوچک و متوسط با نتایج حاصل از روش حل دقیق شد، همچنین به‌منظور ارزیابی عملکرد راهبردهای پیشنهادی، تعدادی مسئله نمونه در ابعاد بزرگ ایجاد، و نتایج مقایسه و بررسی شد. نتایج محاسباتی نشان می‌دهد که راهبردهای پیشنهادی عملکرد مناسبی در حل مدل پیشنهادی دارد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم تکامل تفاضلی، بهینه‌سازی استوار، عدم قطعیت، مسیریابی دوره‌ای وسایط نقلیه در حالت غیرقطعی.

مقدمه

چشم‌گیری در حل مسائل دنیای واقعی ایفا می‌کند، این مدل کاربردهای فراوانی در سیستم‌های تولید به‌موقع (JIT)^۱، سیستم‌های توزیع همانند پست، پول‌رسانی به بانک‌ها و سوخت‌رسانی به جایگاه‌های سوخت دارد [۳].

از سوی دیگر، با توجه به سطح پراکندگی مشتریان و تغییر تقاضای آن‌ها، مسئله مسیریابی دوره‌ای وسایط نقلیه با پنجره زمانی توسعه داده شد که در آن تأمین تقاضای مشتریان در چند روز انجام شده است و مشتریان می‌توانند چندین ترکیب از روزهای دوره را برای سرویس‌دهی انتخاب کنند [۴].

در مسئله مسیریابی وسایط نقلیه دوره‌ای با پنجره زمانی هر مشتری $n_i \in N$ نشان‌دهنده مجموعه‌ای از ϕ_i ترکیب است که در آن ترکیب روزهای سرویس‌دهی مشخص شده است؛ برای مثال اگر در یک دوره γ روزه، مشتری n_i دو ترکیب سرویس‌دهی $\{4, 1, 5\}$ و $\{6, 3, 7\}$ باشد، در این صورت اگر وسیله نقلیه ترکیب اول را انتخاب کند، باید به مشتری در روزهای اول، چهارم و پنجم سرویس‌دهی کند، اما با انتخاب

در دنیای رقابتی امروز، اهمیت تغییرات عمده در محیط کسب و کار و تشدید رقابت در بازار رقابتی مانند تقاضای مورد نیاز مشتریان و هزینه‌های حمل‌ونقل، شرکت‌ها را مجبور کرده است به‌منظور کسب سهم بیشتر از بازار و بهینه‌کردن فرایند مدیریت لجستیک از روش‌های ابتکاری در انجام کسب‌وکار خود استفاده کنند. در مواجهه با این چالش‌ها، شرکت‌هایی توانایی رقابت دارند که در مقایسه با سایر رقبا در فرصت‌های ایجادشده در بازارهایی که به‌طور پیوسته در حال تغییر است بیشترین بهره را ببرند. یکی از راه‌های افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌های عملیاتی در دنیای رقابتی، استفاده از مسئله مسیریابی وسایط نقلیه است که کاربرد بسیاری در بهینه‌کردن هزینه‌های حمل‌ونقل، توزیع و لجستیک دارد [۱-۲].

گفتنی است مسیریابی وسایط نقلیه با پنجره زمانی (VRPTW)^۱ کاربردهای فراوانی در سیستم‌های توزیع دارد که در ترکیب با سایر مدل‌های مسیریابی وسایط نقلیه نقش

رویکرد بهینه‌سازی استوار برای مسئله مسیریابی وسایط نقلیه در شرایط عدم قطعیت پارامترها، مزیت‌های زیادی در مقایسه با رویکرد بهینه‌سازی احتمالی با برآورد توزیع احتمالی پارامترها دارد؛ در بیشتر اوقات، امکان برآورد توزیع احتمالی مشاهدات امکان‌پذیر نیست و پیچیدگی محاسباتی بهینه‌سازی استوار در مقایسه با روش‌های بهینه‌سازی به‌طور چشمگیری بیشتر نمی‌شود [۱۴]. در این مقاله، زمان سرویس‌دهی رقبا به مشتریان به‌صورت مجموعه‌ای از سناریوها به‌جای برآورد زمان نقطه‌ای زمان شروع سرویس‌دهی تعریف می‌شود.

در برنامه‌ریزی استوار یک روش ریسک‌گریز به‌منظور حل مسئله در حالت عدم قطعیت داده‌ها در مسائل بهینه‌سازی ارائه می‌شود. سویستر [۱۵] یک روش برنامه‌ریزی استوار بدبینانه در مسائل برنامه‌ریزی خطی غیردقیق توسعه داد. مدل مذکور سطح بالایی از محافظه‌کاری را داشت و فاصله تابع هدف با مقدار بهینه زیاد بود. در ادامه، مولوی و همکاران [۱۶] مدل منعطف و کاربردی بهینه‌سازی تصادفی استوار را بر مبنای سناریو ارائه دادند. این رویکرد سعی دارد که تعادل منطقی بین استواری، هزینه آن و سایر اهداف مسئله بهینه‌سازی همانند بهبود عملکرد متوسط سیستم بر طبق منطق هزینه-منفعت ایجاد کند. برخلاف رویکردهای بدبینانه، در این رویکرد، نقض جزئی در برخی از محدودیت‌ها مجاز است و مدل بهینه‌سازی به‌دنبال یک پاسخ استوار نسبی بر مبنای ترجیحات تصمیم‌گیرنده است [۱۷]. جواب بهینه این روش موجه و برای بیشتر حالات ممکن پارامترهای غیرقطعی نزدیک به بهینه است. در ادامه، بنتال و نمروسفکی [۱۹ و ۱۸] و القوی و همکاران [۲۰] با توسعه روش سویستر برای مسائل برنامه‌ریزی خطی غیرقطعی با مجموعه‌های عدم قطعیت محدب گوناگون گامی روبه‌جلو و مهم در توسعه تئوری برنامه‌ریزی استوار برداشتند.

در خصوص حل مسئله مسیریابی وسایط نقلیه با رویکرد بهینه‌سازی استوار می‌توان به مقاله سونجر و همکاران [۲۱] و گونارین و همکاران [۲۲] به‌منظور ارائه مدل استوار مسئله مسیریابی وسایط نقلیه با ظرفیت محدود با تقاضای غیرقطعی اشاره کرد. در مدل مذکور، هدف کمینه‌سازی هزینه حمل با در نظر گرفتن تأمین تقاضای تمامی مشتریان است؛ به‌طوری‌که تقاضای تأمین‌نشده مشتریان سبب افزایش هزینه‌های حمل می‌شود. با توجه به نتایج محاسباتی مشخص شده می‌شود که رویکرد بهینگی استوار، توانمندی مناسبی در حل مسئله مذکور دارد. در ادامه، لی و همکاران

ترکیب دوم این سرویس‌دهی باید در روزهای سوم، ششم و هفتم انجام شود [۵]. با توجه به تحقیقات انجام مسئله مسیریابی دوره‌ای وسایط نقلیه، کاربردهایی همانند جمع‌آوری و بازیافت کالا و توزیع قطعات یدکی دارد [۸-۶].

در مسیریابی وسایط نقلیه کلاسیک فرض بر آن است که انحصار در محیط شرکت‌های توزیع وجود دارد و میزان کالای توزیع‌شده در سود توزیع‌کنندگان تأثیری ندارد، ضمن آنکه تأثیر سرعت پاسخ‌دهی توزیع‌کنندگان رقیب بر تقاضای مشتریان در نظر گرفته نمی‌شود، در حالی‌که با توجه به دنیای واقعی در تأمین تقاضای مشتریان زودتر از سایر رقبا با استفاده از مسیریابی وسایط نقلیه رقابتی تأثیر قابل توجهی در کسب نقدینگی بیشتر شرکت‌های توزیع دارد. به همین منظور توکلی مقدم و همکاران [۹] برای نخستین بار مدل مسیریابی وسایط نقلیه چندهدفه رقابتی ارائه کردند که پیشینه‌کردن سود ناشی از سرویس‌دهی پیش از رسیدن سایر رقبا به مشتریان و کمینه‌کردن هزینه حمل‌ونقل یکی دیگر از اهداف مسئله بود [۱۰]؛ به عبارت دیگر، در صورتی‌که سرویس‌دهی به مشتریان دیرتر از رقبا صورت‌پذیرد سهم بازار کاهش خواهد یافت.

به‌دلیل عدم قطعیت در زمان شروع سرویس‌دهی رقبا به مشتریان (به دلیل ترافیک، اوضاع جوی و...) در این مقاله، رویکرد مسئله مسیریابی دوره‌ای وسایط نقلیه رقابتی در حالت عدم قطعیت زمان شروع سرویس‌دهی رقبا به مشتریان به‌منظور پیشینه نمودن سود شرکت توزیع با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار تحت سناریو ارائه می‌شود، ضمن آنکه کمینه‌سازی هزینه حمل‌ونقل کالا از دیگر اهداف این مقاله است.

باید توجه داشت که مسئله مسیریابی وسایط نقلیه یکی از پیچیده‌ترین مسائل بهینه‌سازی ترکیبی است که مدل‌های متفاوتی از آن توسعه داده شده است، اما در اغلب آن‌ها تمامی پارامترها به‌صورت قطعی در نظر گرفته شده است. در مقالات متعددی روش‌های حل مسائل مسیریابی وسایط نقلیه با پارامترهای غیرقطعی توسعه داده شده است، اما در این مقالات عدم قطعیت در تقاضای مشتریان با روش‌هایی مانند مشخص کردن توزیع احتمالی مدل‌سازی شده است. در این بین، چالش اصلی که همان مشخص کردن تأثیر پارامترهای غیرقطعی در جواب شدنی بهینه است، با استفاده از برآورد کردن میزان عدم قطعیت و تبدیل آن به پارامتر قطعی نادیده گرفته شده است [۱۳-۱۱].

طراحی استوار، به‌منزله یک رویکرد بهینه‌سازی، در دهه اخیر، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. استفاده از

در بخش دوم این مقاله، رویکرد بهینه‌سازی استوار تحت سناریو معرفی، همچنین مدل ریاضی رویکرد استوار مسئله مسیریابی وسایط نقلیه با وجود عدم قطعیت نشان داده می‌شود. در بخش سوم الگوریتم تکامل تفاضلی استفاده شده به منظور حل مدل ارائه خواهد شد. در بخش چهارم نمونه مسائل در ابعاد کوچک و بزرگ حل خواهد شد و در بخش پنجم نیز نتایج عملکرد راهبردهای الگوریتم تکامل تفاضلی در حل مدل پیشنهادی بررسی خواهد شد.

بهینه‌سازی تصادفی استوار

مدل برنامه‌ریزی خطی شامل پارامترهای تصادفی به شرح ذیل است:

$$\text{Min } c^T x + d^T y \quad (1)$$

s.t.

$$Ax = b \quad (2)$$

$$Bx + Cy = e \quad (3)$$

$$x, y \geq 0 \quad (4)$$

x بردار متغیرهای تصمیم‌گیری را نشان می‌دهد که باید تحت عدم قطعیت پارامترهای مدل تعیین شود. C, B و e به ترتیب ماتریس ضرایب فنی تصادفی و بردار سمت راست را نشان می‌دهند. یک مجموعه محدود از سناریو را فرض کنید: $\Omega = \{1, 2, \dots, s\}$ برای مدل کردن پارامترهای غیرقطعی، برای هر سناریو $s \in \Omega$ ، زیرمجموعه $\{ds; Bs; Cs; es\}$ را داریم. احتمال وقوع هر سناریو برابر است با p_s ؛ به طوری که $\sum_s p_s = 1$.

باید توجه داشت که یک سناریو مجموعه‌ای از داده‌های تحقق‌یافته در افق برنامه‌ریزی است. ضرایب نامشخص C, B و e می‌توانند برای هر سناریو $s \in \Omega$ به صورت C_s, B_s و e_s در نظر گرفته شوند، همچنین متغیر کنترلی y که یک متغیر تنظیمی است، با تحقق یک سناریو به عنوان y_s برای هر سناریوی s نشان داده می‌شود. به دلیل غیرقطعی بودن پارامتر، ممکن است مدل برای برخی سناریوها نشدنی باشد، به این منظور δ_s امکان‌ناپذیری مدل را در سناریو s نشان می‌دهد. اگر مدل شدنی باشد، δ_s صفر خواهد بود، در غیر این صورت δ_s مقدار مثبت به خود می‌گیرد [۳۲]. یک مدل بهینه‌سازی پایدار به فرم زیر فرمول‌بندی می‌شود:

[۲۳] یک مدل استوار مسیریابی وسایط نقلیه را با در نظر گرفتن عدم قطعیت در تقاضای مشتریان و زمان عبوری وسایط نقلیه از مسیرها توسعه دادند و هدف آن‌ها کمینه‌کردن مسافت عبوری وسایط نقلیه با در نظر گرفتن حد انتظار زمان سرویس‌دهی به مشتریان بود.

علاوه بر آن، در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترها در مسئله بهینه‌سازی مسیریابی وسایط نقلیه را به پیچیدگی مسئله بهینه‌سازی افزایش می‌دهد، به همین دلیل تجزیه و تحلیل پارامترهای غیرقطعی در محاسبه جواب بهینه مسئله بهینه‌سازی بسیار مهم است؛ به طوری که کوچک‌ترین تغییر در تابع ورودی ممکن است مقدار بهینگی را به طور چشمگیری تغییر دهد.

ثابت شده است که مسئله مسیریابی وسایط نقلیه جزء مسائل NP-Hard است [۲۴]. در طول سال‌های اخیر روش‌های فراابتکاری مختلفی به منظور حل مسئله مسیریابی دوره‌ای وسایط نقلیه (PVRP)^۳ توسعه داده شده است. کون و همکاران [۲۵] روش دومرحله‌ای برنامه‌ریزی و مسیریابی را برای حل مسئله مسیریابی دوره‌ای وسایط نقلیه ارائه دادند.

الجر و همکاران [۲۶] از روش جست‌وجوی پراکنده در مسئله (PVRP) با احتساب برداشت و گذاشت در واحدهای تولید خودرو استفاده کردند. علی‌نقیان و همکاران [۲۷] مسئله مسیریابی وسایط نقلیه دوره‌ای رقابتی با در نظر گرفتن قطعی تقاضا را توسعه و مدل را با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه حل نمودند.

نوروزی و همکاران [۳] از روش بهبودیافته بهینه‌سازی ازدحام ذرات به منظور بهینه‌سازی مسیریابی دوره‌ای وسایط نقلیه با در نظر گرفتن پنجره زمانی (PVRPTW)^۴ استفاده کردند. آنجللی و اسپرانز [۲۸] از الگوریتم جست‌وجوی ممنوع به منظور حل مسئله (PVRP) با در نظر گرفتن بارگیری مجدد وسایط نقلیه استفاده کردند.

در این مقاله، به منظور یافتن جواب‌های بهینه در حالت استوار از الگوریتم تکامل تفاضلی (DE)^۵ استفاده خواهد شد. این الگوریتم به دلیل ساختار و اجرای ساده، و همگرایی سریع و پایداری به یکی از کاربردی‌ترین الگوریتم‌های تکاملی به منظور بهینه‌یابی طیف بسیاری از مسائل تبدیل شده است [۲۹].

الگوریتم تکامل تفاضلی کاربرد فراوانی در حل مسئله مسیریابی وسایط نقلیه دارد. برای نمونه می‌توان به حل مسئله مسیریابی وسایط نقلیه دوره‌ای با در نظر گرفتن چند دپو با احتساب برداشت و گذاشت چندباره کالا یا مسئله مسیریابی وسایط نقلیه با در نظر گرفتن تقاضا به صورت فازی اشاره کرد [۳۰ و ۳۱].

$$\begin{aligned} & \text{Min} \sum_{s \in \Omega} p_s \xi_s + \lambda \sum_{s \in \Omega} p_s \\ & \left[(\xi_s - \sum_{s' \in \Omega} p_{s'} \xi_{s'}) + 2\theta \right] \end{aligned} \quad (11)$$

s.t.

$$\xi_s - \sum_{s \in \Omega} p_s \xi_s + \theta_s \geq 0 \quad \forall s \in \Omega \quad (12)$$

$$\theta_s \geq 0 \quad \forall s \in \Omega \quad (13)$$

از آنجا که ξ_s ، از آنجا که $\sum_{s \in \Omega} p_s \xi_s = 1$ بزرگتر است، $\theta_s = 0$ است، درحالی که مقدار $\sum_{s \in \Omega} p_s \xi_s$ از ξ_s بیشتر است، در نتیجه $\theta_s = \sum_{s \in \Omega} p_s \xi_s - \xi_s$. عبارت دوم در تابع هدف، $(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_s)$ ، تابع احتمال جریمه نشدنی بودن است و برای جبران خطاهای محدودیت‌های کنترل در برخی سناریوها به کار می‌رود. خطا در قیدهای کنترل به معنی به‌دست‌آمدن پاسخ‌های نشدنی در برخی سناریوهاست. با استفاده از وزن ω ، جایگزینی بین استواری پاسخ از نخستین عبارت $\sigma(o)$ به‌عنوان مدل اندازه‌گیری شده از بخش جریمه $\rho(o)$ ممکن است به‌عنوان فرایند تصمیم‌گیری چندمعیاره مدل شود. با توجه به این بحث تابع هدف می‌تواند به‌صورت زیر مدل شود:

$$\begin{aligned} & \text{Min} \sum_{s \in \Omega} p_s \xi_s + \lambda \sum_{s \in \Omega} p_s \\ & \left[(\xi_s - \sum_{s' \in \Omega} p_{s'} \xi_{s'}) + 2\theta \right] + \omega \sum_{s \in \Omega} p_s \delta_s \end{aligned} \quad (14)$$

تعریف مسئله و مدل‌سازی

در مسیریابی رقابتی زمان شروع سرویس‌دهی به مشتری بر میزان سود تأثیرگذار است. در دنیای واقعی، بین رقبا رقابتی در محیط بر سر کسب نقدینگی بیشتر وجود دارد که بی‌توجهی به این اصل سبب کاهش کارایی در کسب نقدینگی بیشتر می‌شود، در صورتی که سرویس‌دهی به مشتریان دیرتر از رقبا صورت پذیرد، درصدی از فروش ازدست می‌رود و سهم بازار کاهش می‌یابد. توزیع‌کنندگان سعی می‌کنند به‌منظور کسب بیشترین سهم بازار، علاوه بر بهینه‌کردن هزینه حمل کالا و بهینه‌کردن سود، نحوه سرویس‌دهی را بر مبنای راهبردهای توزیع شرکت‌های رقیب در نظر بگیرند، از سوی دیگر رقبا در مسیریابی روزانه خود به مشتریان مسیره‌های مختلفی را انتخاب می‌کنند، تعیین مسیره‌های روزانه رقیب به ترکیب مشتریان آن روز و وضعیت ترافیکی مسیره‌ها بستگی دارد، این موضوع سبب می‌شود زمان سرویس‌دهی رقبا به مشتریان چند مقدار مختلف (براساس مسیر انتخابی) با احتمال مشخص داشته باشد. در این مقاله، رویکرد مسئله

$$\text{Min} \sigma(x, y_1, y_2, \dots, y_s) + \omega(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_s) \quad (5)$$

s.t.

$$Ax = b \quad (6)$$

$$B_s x + C_s y_s + \delta_s = e_s \quad \forall s \in \Omega \quad (7)$$

$$x \geq 0, \quad y_s \geq 0 \quad \delta_s \geq 0 \quad \forall s \in \Omega \quad (8)$$

در قسمت اول رابطه ۵، $\{y_1, y_2, \dots, y_s\}$ برای هر سناریو $s \in \Omega$ مجموعه‌ای از متغیرهای کنترل تعریف می‌شود. عبارت دوم پایداری مدل را نشان می‌دهد که شامل جواب‌هایی با جریمه است که تقاضا در یک سناریو را برآورده نمی‌کند یا محدودیت‌هایی فیزیکی دیگر نظیر ظرفیت را نقض می‌کند. از ξ_s برای نشان‌دادن $f(x, y)$ که یک تابع هزینه یا سود است، استفاده می‌شود و $\xi_s = f(x, y_s)$ برای سناریوی s .

واریانس $\xi_s = f(x, y_s)$ به معنی میزان ریسک در یک تصمیم‌گیری است؛ به عبارت دیگر، یک تغییر جزئی در پارامترهای غیرقطعی ممکن است تغییرات عمده‌ای در تابع هدف ایجاد کند. مولوی و همکاران [۱۶] معادله ذیل را برای ارائه پایداری پاسخ به کار بردند:

$$\sigma(o) = \sum_{s \in \Omega} p_s \xi_s + \lambda \sum_{s \in \Omega} p_s \left(\xi_s - \sum_{s' \in \Omega} p_{s'} \xi_{s'} \right)^2 \quad (9)$$

که در آن λ یک مقدار ثابت مثبت است. همان‌طور که دیده می‌شود، یک عبارت درجه دوم غیرخطی در معادله ۹ وجود دارد. یو و لی [۳۳] به‌منظور خطی‌سازی معادله درجه دوم یک اختلاف مطلق را به جای عبارت درجه دوم به کار برده‌اند که به‌صورت رابطه ۱۰ نشان داده می‌شود:

$$\sigma(o) = \sum_{s \in \Omega} p_s \xi_s + \lambda \sum_{s \in \Omega} p_s \left| \xi_s - \sum_{s' \in \Omega} p_{s'} \xi_{s'} \right| \quad (10)$$

اگرچه تابع ۱۰ تابعی غیرخطی است، با تبدیل مسئله به یک مدل برنامه‌ریزی خطی که تابع هدف خطی با محدودیت‌های خطی و با واردکردن دو متغیر اختلافی نامنفی بهینه شود. توجه این تساوی، تغییری ساده در متغیرهاست. براساس مقاله لئونگ و چن [۳۴]، به جای کمینه‌سازی مجموع اختلافات مطلق در معادله ۱۰، دو متغیر اختلافی با توجه به محدودیت‌های اصلی و محدودیت‌های اضافی که مقادیر مثبت را به اختلاف درون توابع قدر مطلق می‌دهند، کمینه شود. معادله ۱۱ به مسئله برنامه‌ریزی خطی تبدیل شده است:

خود را افزایش دهد؛ بدین منظور مسیرهایی را طراحی می‌کند که اگر رقیب هر یک از مسیره‌های خود را نیز انتخاب کند، سود معقولی نصیب شرکت توزیع می‌شود. همان‌گونه که بیان شد متغیرهای مسیریابی شرکت توزیع متغیرهای مرحله اول هستند. در این بین، مسیره‌های شرکت پیش از تشکیل مسیره‌های رقیب انتخاب می‌شوند. تنها متغیرهای مرحله دوم، متغیرهای محاسبه سود است که مقدار آن‌ها پس از مشخص شدن مسیر رقیب و با توجه به مسیر انتخابی شرکت توزیع برحسب سناریو مشخص می‌شود. با توجه به توضیحات مذکور متغیرهای مسئله به شرح ذیل است:

$x_{\tau ij}^v$: اگر در روز τ - ام وسیله نقلیه v - ام یال $i - j$ را طی کند مقدار ۱ می‌گیرد، در غیر این صورت صفر است.

$z_{\tau \phi i}$: اگر در ترکیب ϕ - ام مشتری i - ام انتخاب شود ۱، و در غیر این صورت صفر است.

$w_{\tau \phi i}$: اگر در روز τ - ام در ترکیب ϕ - ام مشتری i - ام انتخاب شود ۱ می‌گیرد در غیر این صورت صفر می‌گیرد.

$U_{\tau i}$: اگر در روز τ - ام برای سرویس‌دهی به مشتری i - ام انتخاب شود ۱، و در غیر این صورت صفر می‌گیرد.

$\eta_{s\tau i}$: اگر در سناریوی s - ام در روز τ - ام زمان شروع سرویس‌دهی به مشتری i - ام زودتر از بازه پایین زمان سرویس‌دهی رقیب به مشتری i - ام شود مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار صفر خواهد گرفت.

$\gamma_{s\tau i}$: اگر در سناریوی s - ام در روز τ - ام زمان شروع سرویس‌دهی بین بازه زمان رسیدن رقیب به مشتری i - ام باشد مقدار ۱ می‌گیرد و در غیر این صورت مقدار صفر خواهد گرفت.

$\zeta_{s\tau i}$: اگر در سناریوی s - ام در روز τ - ام زمان شروع سرویس‌دهی به مشتری i - ام بیشتر از کران بالای بازه رسیدن رقیب باشد مقدار ۱ می‌گیرد و در غیر این صورت صفر خواهد گرفت.

$\kappa_{s\tau i}$: اگر در سناریوی s - ام در روز τ - ام زمان شروع سرویس‌دهی به مشتری i - ام کمتر از کران بالای بازه زمان شروع سرویس‌دهی رقیب باشد، مقدار ۱ می‌گیرد و در غیر این صورت مقدار صفر است.

مدل ریاضی

مدل ریاضی پیشنهادی به شرح ذیل است:

مسیریابی دوره‌ای وسایط نقلیه رقابتی در حالت عدم قطعیت بازدید رقا از مشتریان به منظور بیشینه‌کردن سود ناشی از کسب سهم بازار و کاربرد رویکرد بهینه‌سازی احتمالی استوار تحت سناریو معرفی می‌شود، ضمن آنکه کمینه‌سازی هزینه حمل‌ونقل کالا از دیگر اهداف این مقاله است.

مجموعه‌ها و اندیس‌ها

N : تعداد مشتریان (گره‌ها) (دپو $i = 0$)؛

k, U : تعداد وسایط نقلیه (U اندیس وسایط نقلیه)؛

D : تعداد روزهای دوره؛

ϕ_i : تعداد کل ترکیب‌های مشتری i - ام.

پارامترها

CU : حداکثر ظرفیت هر وسیله نقلیه؛

T : حداکثر زمان در دسترس در هر روز هر وسیله نقلیه؛

d_i : تقاضای مشتری i - ام (به عبارت دیگر گره i - ام)؛

t_{ij} : زمان مورد نیاز جهت طی یال $i - j$ ؛

M : عدد بسیار بزرگ؛

CO_{ij} : هزینه حمل کالا از گره $i - j$ ؛

D_i : تقاضای کل مشتری i - ام در هر روز از ترکیب؛

d_{tdi} : تقاضای وابسته به زمان مشتری i - ام هر روز ترکیب؛

u_{tis} : کران بالای زمان رسیدن رقیب به مشتری i - ام در روز τ - ام در سناریوی s - ام؛

l_{tis} : کران پایین زمان رسیدن رقیب به مشتری i - ام در روز τ - ام سناریوی s - ام؛

ts_i : مدت زمان سرویس‌دهی به مشتری i - ام؛

t_{ij} : مدت زمان عبور از گره i - ام به گره j - ام؛

$t_{\tau i}$: زمان رسیدن به مشتری i - ام در روز τ - ام.

متغیرها

همان‌گونه که در بخش تعریف مسئله بیان شد، زمان رسیدن رقیب به مشتریان بر میزان فروش شرکت توزیع تأثیرگذار است؛ بنابراین، شرکت توزیع علاقه دارد زودتر از رقیب به مشتریان خدمت‌رسانی کند، از سوی دیگر رقیب با توجه به ترکیب مشتریان و وضعیت ترافیکی چندین مسیر مختلف را برای بازدید مشتریان انتخاب می‌کند (سناریو) و براساس این موضوع که رقیب چه مسیری را انتخاب کرده باشد، زمان سرویس‌دهی او به مشتری متفاوت است. شرکت توزیع قصد دارد با افزایش احتمال سرویس‌دهی زودتر به مشتریان سود

$$\begin{aligned}
 &Max Z \\
 &\sum_{s \in \Omega} P_s \left[\sum_{i=1}^N \left(\eta_{s\tau i} d_{tdi} + \gamma_{s\tau i} \left(\frac{u_{\tau is} - t_{i\tau}}{u_{\tau is} - l_{\tau is}} \right) d_{tdi} \right) \right] + \\
 &\lambda \sum_{s \in \Omega} P_s \left[\sum_{i=1}^n \left(\eta_{s\tau i} d_{tdi} + \gamma_{s\tau i} \left(\frac{u_{\tau is} - t_{i\tau}}{u_{\tau is} - l_{\tau is}} \right) d_{tdi} \right) - \right. \\
 &\left. \sum_{s' \in \Omega} P_{s'} \left[\sum_{i=1}^N \left(\eta_{s'\tau i} d_{tdi} + \gamma_{s'\tau i} \left(\frac{u_{\tau is'} - t_{i\tau}}{u_{\tau is'} - l_{\tau is}} \right) d_{tdi} \right) \right] + 2\theta_s \right] - \\
 &\omega \sum_{s \in \Omega} P_s \delta_s - \sum_{\nu=1}^{k\nu} \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N \sum_{\tau=1}^D c\omega_{ij} x_{ij}^{\nu} \quad (15)
 \end{aligned}$$

s.t.

$$\sum_{\phi=1}^{\phi'} z_{\phi i} = 1 \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (16)$$

$$u_{\tau i} = \sum_{\phi=1}^{\phi'} z_{\phi i} w_{\tau \phi i} \quad ; \forall i = 1, \dots, N; \quad \tau = 1, \dots, D \quad (17)$$

$$u_{\tau 0} = 1 \quad ; \forall \tau = 1, \dots, D \quad (18)$$

$$\sum_{\nu=1}^{k\nu} x_{\tau ij}^{\nu} \leq \frac{u_{\tau i} + u_{\tau j}}{2} \quad ; \forall \tau = 1, \dots, D \quad i, j = 0, \dots, N \quad (19)$$

$$\sum_{j=0}^N x_{\tau ij}^{\nu} - \sum_{j=0}^N x_{\tau ji}^{\nu} = 0 \quad ; \forall \tau = 1, \dots, D \quad i = 0, \dots, N \quad \nu = 1, \dots, k\nu \quad (20)$$

$$\sum_{\nu=1}^{k\nu} \sum_{i=0}^N x_{\tau ij}^{\nu} - u_{\tau j} = 0 \quad ; \forall \tau = 1, \dots, D \quad j = 1, \dots, N \quad (21)$$

$$\sum_{i=1}^N x_{\tau i 0}^{\nu} = 1 \quad ; \forall \tau = 1, \dots, D \quad \nu = 1, \dots, k\nu \quad (22)$$

$$\sum_{i=1}^N (D_i - d_{tdi} \zeta_{s\tau i}) \sum_{j=0}^N x_{\tau ij}^{\nu} - \delta_s \leq c\nu \quad ; \forall \tau = 1, \dots, D \quad \nu = 1, \dots, k\nu \quad s \in \Omega \quad (23)$$

$$(u_{\tau is} - t_{i\tau}) - M(\kappa_{s\tau i}) \leq 0 \quad ; \forall \tau = 1, \dots, D \quad i = 1, \dots, N \quad s \in \Omega \quad (24)$$

$$(u_{\tau is} - t_{i\tau}) - M(\zeta_{s\tau i}) \geq 0 \quad ; \forall \tau = 1, \dots, D \quad i = 1, \dots, N \quad s \in \Omega \quad (25)$$

$$\zeta_{s\tau i} + \kappa_{s\tau i} = 1 \quad ; \forall \tau = 1, \dots, D \quad i = 1, \dots, N \quad s \in \Omega \quad (26)$$

$$\sum_{i=0}^N t s_i \sum_{j=0}^N x_{\tau ij}^{\nu} + \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N t_{ij} x_{\tau ij}^{\nu} \leq T \quad ; \forall \tau = 1, \dots, D \quad \nu = 1, \dots, k\nu \quad (27)$$

$$t_{j\tau} = \sum_{i=0}^N t_{i\tau} \sum_{\nu=0}^{k\nu} x_{\tau ij}^{\nu} + \sum_{i=0}^N \sum_{\nu=1}^{k\nu} (t s_i + t_{ij}) x_{\tau ij}^{\nu} \quad ; \forall \tau = 1, \dots, D \quad j = 1, \dots, n \quad (28)$$

$$\sum_{v=1}^{kv} \sum_{i=0}^N \sum_{\tau=1}^D x_{\tau ij}^v = 0 \quad (29)$$

$$(u_{\tau is} - t_{i\tau}) - M(1 - \gamma_{s\tau i}) \geq 0 \quad ; \forall \tau = 1, \dots, D \quad i = 1, \dots, N \quad s \in \Omega \quad (30)$$

$$(l_{\tau is} - t_{i\tau}) - M(1 - \eta_{s\tau i}) \geq 0 \quad ; \forall \tau = 1, \dots, D \quad i = 1, \dots, N \quad s \in \Omega \quad (31)$$

$$\eta_{s\tau i} + \gamma_{s\tau i} = 1 \quad ; \forall \tau = 1, \dots, D \quad i = 1, \dots, N \quad s \in \Omega \quad (32)$$

$$\eta_{s\tau i} \leq v_{\tau i}, \gamma_{s\tau i} \leq v_{\tau i} \quad ; \forall \tau = 1, \dots, D \quad i = 1, \dots, N \quad s \in \Omega \quad (33)$$

$$\sum_{i=1}^n \left(\eta_{s\tau i} d_{idi} + \gamma_{s\tau i} \left(\frac{u_{\tau is} - t_{i\tau}}{u_{\tau is} - l_{\tau is}} \right) d_{idi} \right) + \sum_{s \in \Omega} p_s \left(\sum_{i=1}^n \left(\eta_{s\tau i} d_{idi} + \gamma_{s\tau i} \left(\frac{u_{\tau is} - t_{i\tau}}{u_{\tau is} - l_{\tau is}} \right) d_{idi} \right) \right) + \theta_s \geq 0 \quad s \in \Omega \quad (34)$$

$$\sum_{i,j \in Q} x_{\tau ij}^v \leq |Q| - 1 \quad ; \forall Q \subseteq N \quad 2 \leq Q \quad \forall \tau = 1, \dots, D \quad v = 1, \dots, kv \quad (35)$$

$$x_{\tau ij}^v, z_{\phi i}, w_{\tau \phi i}, v_{\tau i}, \eta_{s\tau i}, \gamma_{s\tau i}, \varsigma_{s\tau i}, \kappa_{s\tau i} \in [0, 1] \quad (36)$$

$$\forall \tau = 1, \dots, D \quad i, j = 1, \dots, N \quad s \in \Omega \quad v = 1, \dots, kv \quad \phi = 1, \dots, \phi'$$

وسایط نقلیه پس از کران بالای رسیدن رقیب باشد، از ابتدا کالای مشتری i - ام حمل نمی‌شود. محدودیت ۲۷، به حداکثر زمان دسترسی وسایط نقلیه مربوط است. محدودیت ۲۸ نشان‌دهنده زمان سرویس‌دهی v - ام روز τ - ام به مشتری i - ام است. محدودیت ۲۹ به حذف حلقه، و محدودیت‌های ۳۰ تا ۳۳ به بیشینه‌کردن سود مربوط است. محدودیت ۳۴ نشان‌دهنده اختلاف میان سود کسب‌شده در سناریو s - ام و امید ریاضی سود قابل کسب به ازای تمامی سناریوهاست. محدودیت ۳۵ به حذف زیر گردش‌ها، و محدودیت ۳۶ به متغیرهای مدل مربوط است.

الگوریتم تکامل تفاضلی

تکامل تفاضلی الگوریتم بهینه‌سازی تصادفی و مبتنی بر جمعیت است که برای نخستین بار استورن و پرایس [۳۵] آن را ارائه کردند که به علت سرعت بالا و قدرت خوب آن در حل مسائل و سادگی، کاربردهای فراوانی در حل مسائل بهینه‌سازی دارد. در این الگوریتم برخلاف سایر الگوریتم‌ها ابتدا عملگر جهش به منظور ایجاد جمعیت فرزندان ایجاد، سپس عملگر تقاطع بر روی اعضای جمعیت اعمال می‌شود [۳۶]. شبه کد اجرای الگوریتم تکامل تفاضلی در شکل ۱ نشان داده شده است.

رابطه ۱۵ تابع هدف مسئله را نشان می‌دهد که از سه جزء تشکیل شده است، بخش اول به میانگین سود حاصل در هر سناریو مربوط است. بخش دوم درباره تغییرات تابع هدف در هر سناریوست و بخش سوم به منظور کمینه‌سازی هزینه حمل‌ونقل است.

محدودیت ۱۶ یعنی هر مشتری تنها در یکی از ترکیب‌های پیشنهادی انتخاب می‌شود. محدودیت ۱۷ به انتخاب روزهای ترکیب انتخابی برای سرویس‌دهی به مشتریان مربوط است. محدودیت ۱۸ تضمین می‌کند که دپو در تمامی روزها در دسترس است. در محدودیت ۱۹ می‌بینیم تنها هنگامی که در روز τ - ام از سناریوی s - ام در ترکیب انتخابی مشتری i - ام و j - ام باشد، یال $i - j$ امکان انتخاب شدن دارد. محدودیت ۲۰ بیان می‌کند اگر وسیله نقلیه v - ام در روز τ - ام وارد گره i - ام شود، باید در همان روز از همان گره بیرون برود. محدودیت ۲۱ مربوط به سرویس‌دهی به مشتریان در روزهای ترکیب انتخاب شده است. ترکیب محدودیت ۲۲ با ۱۹ تضمین می‌کند که تمام وسایط نقلیه در تمامی روزها از دپو شروع به حرکت می‌کنند و به دپو بازمی‌گردند. محدودیت‌های ۲۳ تا ۲۶ مربوط به حداکثر ظرفیت وسایط نقلیه در سناریوی s - ام است، به طوری که اگر برای مشتری i - ام، روز τ - ام زمان رسیدن

شمارشگر تعداد تکرارها را برابر صفر قرار دهید $t=0$.
 به تعداد $t=0$ بردار (اعضای جمعیت) را به وجود آورید و آن را به عنوان اعضای جمعیت اولیه $C(0)$ در نظر بگیرید.
تا هنگامی که شرایط خاتمه برآورده نشده است، مراحل زیر را انجام دهید:
به ازای هر بردار $x_i(t)$ که عضو مجموعه $C(t)$ است مراحل زیر را انجام دهید:
 تابع برازش بردار $f(x_i(t))$ را محاسبه کنید.
 بردار آزمون $u_i(t)$ را با استفاده از عملگر جهش به وجود آورید.
 با استفاده از بردار آزمون $u_i(t)$ بردار فرزند $x'_i(t)$ را با استفاده از عملگر تقاطعی به دست بیاورید.
اگر تابع برازش بردار آزمون $f(x'_i(t))$ از تابع برازش والد $f(x_i(t))$ بهتر بود آنگاه:
 عضو فرزند $x'_i(t)$ را به اعضای نسل بعدی $C(t+1)$ اضافه کنید.
در غیر این صورت
 بردار والد $x_i(t)$ را به اعضای نسل بعدی $C(t+1)$ اضافه کنید.
پایان

شکل ۱. شبه کد الگوریتم تکامل تفاضلی

به طوری که $x_{i_2,k}(t) - x_{i_3,k}(t)$ نشان دهنده بردار
 تفاضل k ام است و β عددی مثبت که برای کنترل اندازه
 تغییرات اعمال شونده به بردار هدف است.

عملگر تقاطع

به منظور ایجاد بردار فرزند $x'_i(t)$ ، از ترکیب گسسته بردار
 آزمون $u_i(t)$ و بردار والد $x_i(t)$ بر طبق رابطه ذیل
 استفاده می شود:

$$x'_{ij}(t) = \begin{cases} u_{ij}(t) & \text{if } j \in \zeta \\ x_{ij}(t) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (38)$$

به طوری که $x_{ij}(t)$ نشان دهنده عنصر j -ام بردار
 $x_i(t)$ ، و ζ بیانگر مجموعه ای از نقاط تقاطع است که
 عملگر تقاطع در آن اعمال می شود. در این مقاله، از عملگر
 تقاطع دوجمله ای استفاده شده است.

عملگر جهش

در الگوریتم تکامل تفاضلی به ازای هر بردار $x_i(t)$
 به طوری که $i = \{1, \dots, n_s\}$ یک بردار آزمون $u_i(t)$ تعریف
 می شود که از آن در عملگر تقاطع به منظور ایجاد بردار فرزند
 $x'_i(t)$ استفاده خواهد شد. به منظور اجرای عملگر جهش،
 گام های ذیل را اجرا کنید.

گام اول: برای بردار $x_i(t)$ از اعضای جمعیت فعلی،
 بردار هدف $x_{i_1}(t)$ از اعضای جمعیت فعلی را طوری انتخاب
 کنید که $i \neq i_1$.

گام دوم: به طور تصادفی دو بردار $x_{i_2}(t)$ و $x_{i_3}(t)$ از
 اعضای جمعیت فعلی را انتخاب کنید، به طوری که
 $i_2, i_3 \sim U(1, n_s)$ و $i \neq i_1 \neq i_2 \neq i_3$.

گام سوم: بردار آزمون $u_i(t)$ به صورت زیر تعریف می شود.

$$u_i(t) = x_{i_1}(t) + \beta \sum_{k=1}^{n_u} (x_{i_2,k}(t) - x_{i_3,k}(t)) \quad (37)$$

ژن j^* را از مجموعه $\{1, 2, \dots, n_x\}$ به طور تصادفی انتخاب، و آن را به مجموعه J اضافه کنید.
 پارامتر کنترلی p_r را مقاردهی کنید.
 به ازای تمام ژن های $\{1, 2, \dots, n_x\}$ $j \in \{1, 2, \dots, n_x\}$ مراحل ذیل را تکرار کنید:
 اگر $(0, 1) \leq p_r$ یا $J \neq j^*$ باشد:
 ژن j -ام را به مجموعه J اضافه کنید.
 پایان (اگر)
 پایان (به ازای)
پایان حلقه تکرار (تا هنگامی که)

شکل ۲. شبه کد الگوریتم عملگر تقاطع

روش دوجمله ای، p_r احتمال انتخاب شدن هر ژن از بردار
 آزمون $u_i(t)$ وجود دارد. شبه کد الگوریتم عملگر تقاطع
 دوجمله ای در شکل ۲ نشان داده شده است.

اگر n_x نشان دهنده تعداد مشتریان یا به عبارت دیگر
 تعداد ژن های بردار $x_i(t)$ باشد، تقاطع ζ از میان اعداد
 مجموعه $\{1, \dots, n_x\}$ به صورت تصادفی انتخاب می شود. در

دوم و سوم به مشتریان اول و سوم سرویس‌دهی نمی‌شود. شکل ۳ نشان‌دهنده مسیر توالی عبور وسایط نقلیه در روزهای سرویس‌دهی است.

نتایج محاسباتی

در این قسمت در بخش اول، مسائل در ابعاد کوچک و متوسط حل، و نتایج با پاسخ‌های بهینه ناشی از روش حل دقیق مقایسه خواهد شد. در قسمت دوم، مسائل ابعاد بزرگ ایجاد شده و دقت محاسباتی به همراه زمان محاسباتی بررسی خواهد شد. در بخش سوم به منظور تحلیل حساسیت به عدم قطعیت موجود در مدل و تأثیر جریمه‌ها، مثالی عددی حل، و نتایج حاصل از حل مسئله به صورت عدم قطعیت با پاسخ‌های حاصل از حل هر یک از سناریوها به صورت قطعی با یکدیگر مقایسه شده است. از آنجا که تابع هدف مدل پیشنهادی از دو بخش کمینه‌سازی هزینه حمل‌ونقل و بیشینه‌سازی سود قابل کسب تشکیل شده است، به منظور تبدیل کردن توابع هدف به یک بخش از ضریب وزنی استفاده شد؛ به طوری که وزن هر یک از اهداف ۰/۵ و به صورت بیشینه‌سازی تابع هدف در نظر گرفته شده است. کدنویسی راهبردهای الگوریتم تکامل تفاضلی با نرم‌افزار MATLAB 7 با پردازنده core i7 با توانایی GHZ ۲/۳ و حافظه داخلی ۲ GB انجام شده است.

ارزیابی راهبردهای الگوریتم تکامل تفاضلی پیشنهادی

در حل مسائل در ابعاد کوچک و متوسط

به منظور بررسی توانمندی راهبردهای معرفی شده در الگوریتم تکامل تفاضلی برای حل مدل ارائه شده، ۹ نمونه مسئله در ابعاد کوچک و متوسط ابتدا با راهبردهای مختلف الگوریتم تکامل تفاضلی حل، و نتایج با جواب‌های بهینه ناشی از روش حل دقیق CPLEX با استفاده از نرم‌افزار GAMS 23.6 مقایسه شد. داده‌های اسمی مورد نیاز به منظور ایجاد مسئله در ابعاد کوچک به صورت توزیع یکنواخت در نظر گرفته شد که در جدول یک مشاهده می‌شود.

به منظور بررسی راهبردهای ارائه شده در ابعاد کوچک، ۹ نمونه مسئله تولید، و نتایج با یکدیگر مقایسه شده است که در جدول ۲ مشاهده می‌شود. در این جدول، ستون اول نشان‌دهنده شماره مسئله است. ستون اول و دوم برای هر یک از روش‌های حل به ترتیب نشان‌دهنده پاسخ بهینه و زمان محاسباتی است و ستون آخر برای راهبردهای الگوریتم تکامل تفاضلی نشان‌دهنده خطای محاسباتی اختلاف مقدار تابع هدف حل دقیق و راهبرد مورد بررسی است.

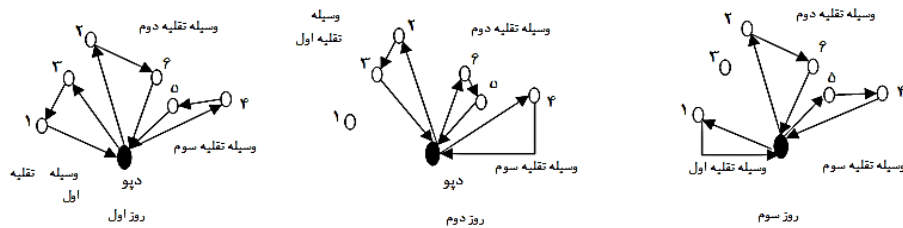
مطالعات تجربی نشان می‌دهد $DE / rand / 1 / bin$ که در آن بردار هدف به طور تصادفی انتخاب می‌شود، تنوع خوبی در جواب‌ها ایجاد می‌کند و قابلیت خوبی برای همگرایی پاسخ‌ها دارد [۳۷]. از سوی دیگر راهبرد $DE / current to best / 2 / bin$ به همگرایی در جواب‌ها منجر خواهد شد که در رابطه زیر نشان داده شده است:

$$u_i(t) = x_i(t) + \beta(\hat{x}(t) - x_i(t)) + \beta(x_{i_2}(t) - x_{i_3}(t)) \quad (39)$$

در این رابطه بردار تفاضل اول، از اختلاف $\hat{x}(t)$ بهترین بردار موجود با بردار والد $x_i(t)$ به دست می‌آید و بردار تفاضل دوم از اختلاف دو بردار $x_{i_2}(t)$ و $x_{i_3}(t)$ که به طور تصادفی انتخاب شده‌اند محاسبه می‌شود [۳۵]. تنظیم پارامترهای الگوریتم با سعی و خطا و حل چند مسئله نمونه انجام، و $\beta = 0.5$ و $n_s = 200$ و $p_r = 0.6$ انتخاب شده است که عملکرد مناسبی در حل مدل پیشنهادی است [۳۸، ۳۷، ۳۵].

نمایش پاسخ‌ها

به منظور نشان دادن پاسخ‌ها در مسئله مسیریابی وسایط نقلیه به صورت پیوسته، برای حل مدل پیشنهادی به وسیله الگوریتم تکامل تفاضلی، بردار $x_i(t)$ به اندازه n_x ژن را طوری تعریف کنید که در آن n_x نشان‌دهنده تعداد مشتریان و t نشان‌دهنده تعداد روزهای سرویس‌دهی است. به ازای هر ژن $j \in \{1, \dots, n_x\}$ یک عدد تصادفی صحیح در بازه $[0, kv+1-\varepsilon]$ که نشان‌دهنده شماره وسیله نقلیه تخصیصی به مشتری j - ام است در صورتی تخصیص می‌یابد که محدودیت‌های ظرفیت وسیله نقلیه، زمان سرویس‌دهی، ترکیب در روزهای سرویس‌دهی و سایر قیود مسئله رعایت شود، در غیر این صورت، این مقدار کمتر از ۱ برای مشتری j - ام در نظر گرفته می‌شود. برای تعیین توالی عبور وسایط نقلیه از مشتریان به ازای هر ژن در بردار $x_i(t)$ یک عدد اعشاری به مقدار صحیح اضافه می‌شود که با مرتب کردن این اعداد به صورت صعودی ترتیب عبور وسیله نقلیه از تور مشخص می‌شود. شکل ۳ نشان‌دهنده نحوه نمایش جواب‌ها برای بردار $x_i(t)$ با شش مشتری (ژن) و سه وسیله نقلیه و برای سه سرویس‌دهی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در روز اول تمامی تقاضای مشتریان با وسایط نقلیه پاسخ داده شده است. در روز دوم و سوم مقدار تخصیصی به مشتری اول و سوم به ترتیب برابر ۰/۵ و ۰/۳ است که نشان می‌دهد در روزهای



زمان سرویس دهی (مشتری (ژن))	روز اول						روز دوم						روز سوم					
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۱	۲	۳	۴	۵	۶
نمایش جواب به صورت پیوسته	۱/۷	۲/۶	۱/۷	۲/۵	۲/۷	۲/۸	-/۵	۱/۲	۱/۶	۲/۴	۲/۵	۲/۴	۱/۷	۲/۲	۰/۳	۲/۸	۲/۶	۲/۷
وسيله نقلیه تخصیصی به مشتری j	۱	۲	۱	۲	۲	۲	-	۱	۱	۲	۲	۲	۱	۲	-	۲	۲	۲

شکل ۳. نحوه نمایش جوابها

جدول ۱. داده‌های اسمی مسئله در ابعاد کوچک و متوسط

توزیع مورد استفاده	پارامتر
~Uniform (0,25)	مختصات
~Uniform (1,12)	تقاضای مشتری
~Uniform (1,6)	زمان سرویس دهی
~Uniform (5,20)	کران پایین زمان رسیدن رقیب
~Uniform (e _i +5, e _i +20)	کران بالای زمان رسیدن رقیب
~Uniform (2,5)	تعداد سناریوها
~Uniform (2,4)	تعداد روزهای دوره D
~Uniform (1, D)	تعداد بازدید مورد نیاز مشتریان

در راهبرد $DE / current\ to\ best / 2 / bin$ تمام نمونه‌ها به جز یک نمونه مسئله الگوریتم تکامل تفاضلی بهبودیافته توانسته است پاسخ بهینه را بدون خطا محاسبه کند و تنها در مسئله نمونه ۳ پس از ۱۰۰ مرتبه تکرار نتوانسته است این پاسخ را محاسبه کند و خطای محاسباتی برابر ۰/۴ گزارش شده است، اما در راهبرد $DE / rand / 1 / bin$ در دو نمونه مسئله راهبردی مورد بررسی پس از ۱۰۰ مرتبه تکرار پاسخ بهینه محاسبه نشده است، اما میانگین خطای محاسباتی برابر ۰/۱۳ درصد است که نشان دهنده کارایی راهبردهای استفاده شده به منظور حل مسئله پیشنهادی است. میانگین زمان محاسباتی روش حل دقیق برابر ۲۷/۴ ثانیه است، در حالی که راهبرد $DE / rand / 1 / bin$ و $DE / current\ to\ best / 2 / bin$ میانگین زمان به ترتیب ۵/۰۱ و ۴/۹ ثانیه گزارش شده است.

جدول ۲. حل مسئله در ابعاد کوچک و متوسط

نمونه مسئله	روش CPLEX		$DE / rand / 1 / bin$		$DE / current\ to\ best / 2 / bin$	
	زمان پاسخ بهینه (ثانیه)	خطا (درصد)	زمان پاسخ بهینه (ثانیه)	خطا (درصد)	زمان پاسخ بهینه (ثانیه)	خطا (درصد)
۱	۲۸۹/۳	۰/۰	۲۵/۳	۰/۰	۴/۵	۰/۰
۲	۳۵۷/۹	۰/۰	۲۶/۲	۰/۰	۵/۱	۰/۰
۳	۳۸۲/۲	۰/۰	۲۵/۵	۰/۴۵	۳/۷	۰/۴۵
۴	۴۰۱/۶	۰/۰	۲۷/۸	۰/۰	۴/۸	۰/۰
۵	۴۰۶/۹	۰/۰	۲۴/۱	۰/۰	۳/۵	۰/۰
۶	۵۲۹/۶	۰/۰	۲۸/۴	۰/۰	۶/۸	۰/۰
۷	۴۸۳/۵	۰/۰	۳۰/۲	۰/۰	۵/۹	۰/۰
۸	۶۲۴/۵	۰/۰	۳۱/۳	۰/۰	۶/۵	۰/۰
۹	۷۲۳/۸	۰/۰	۲۷/۸	۰/۰	۴/۳	۰/۰

نمونه مسائل استاندارد که کوردیو و همکاران [۳۹] ارائه کرده‌اند استفاده شده است.

با توجه به تفاوت مدل پیشنهادی با مسئله دوره‌ای وسایط نقلیه با پنجره زمانی، تغییرات کوچکی در نمونه

ارزیابی راهبردهای الگوریتم تکامل تفاضلی پیشنهادی در حل مسائل در ابعاد بزرگ

از آنجا که در ادبیات، موضوع نمونه مسائل در ابعاد بزرگ در مسیریابی دوره‌ای وسایط نقلیه با پنجره زمانی وجود ندارد، از

مسائل استاندارد تغییراتی اعمال شد. در هر سناریو زمانی حد بالا و پایین پنجره به‌عنوان حد بالا و پایین زمان رسیدن وسایط نقلیه در نظر گرفته شده است.

میانگین $DE / rand / 1 / bin$ رخ داده است. از سوی دیگر، میانگین زمان محاسباتی راهبرد $DE / rand / 1 / bin$ با مقدار $1,446/1$ ثانیه حدود ۱ درصد بهتر است.

مثال عددی

در ادامه مثال عددی متناسب با مدل پیشنهاد شده است. آزمایش مذکور شش مشتری، یک دپو و دو وسیله نقلیه دارد. تمام پارامترهای قطعی آن به‌صورت تصادفی انتخاب، و پارامترهای غیرقطعی شامل حد بالا و پایین زمان رسیدن رقبا به مشتریان (برحسب دقیقه) در دو سناریو به‌صورت تابع توزیع یکنواخت ایجاد شده است. سناریوهای اول و دوم، و حد پایین و بالای هر دو سناریو در جدول ۴ نشان داده شده است. گفتنی است احتمال وقوع سناریو اول و دوم به‌صورت تصادفی به ترتیب برابر $0/6$ و $0/4$ است.

t_{uis} به‌صورت توزیع یکنواخت در بازه $[60, 15]$ و tl_{is} در بازه $[40, 10]$ مدنظر قرار گرفته است.

مسائل بزرگ در جدول ۳ نشان مشاهده می‌شود. ستون اول نشان‌دهنده شماره نمونه مسئله است. هریک از راهبردها نیز سه ستون دارد؛ ستون اول بیانگر بهترین جواب بهینه تابع هدف، ستون دوم نشان‌دهنده زمان محاسباتی، و ستون سوم بیان‌کننده میزان خطای راهبرد مورد بررسی از بهترین جواب به‌دست‌آمده از راهبردهاست.

میانگین خطای راهبرد $DE / current to best / 2 / bin$ و $DE / rand / 1 / bin$ به ترتیب برابر $0/37$ و $0/49$ درصد است و بیشترین خطا برای نمونه مسئله ۵ در راهبرد

جدول ۳. حل مسئله در ابعاد بزرگ

$DE / rand / 1 / bin$			$DE / current to best / 2 / bin$			نمونه مسئله
خطا (درصد)	زمان (ثانیه)	پاسخ بهینه	خطا (درصد)	زمان (ثانیه)	پاسخ بهینه	
0/100	285/3	1,025/5	0/71	290/8	1,018/3	۱
1/27	550/4	2,337/6	0/100	589/3	2,367/3	۲
0/100	1,149/1	3,752/4	0/63	1,023/6	3,728/8	۳
1/22	1,523/9	4,632/6	0/100	1,439/5	4,689/1	۴
1/59	1,836/7	1,052/8	0/100	1,763/8	1,069/5	۵
0/14	2,495/6	6,392/3	0/10	2,564/7	6,395/4	۶
0/100	583/2	3,433/5	1/10	701/3	3,396/2	۷
0/18	1,425/8	3,400/6	0/100	1438/6	3,406/6	۸
0/100	1913/5	7,692/7	0/83	1,979/2	7,629/3	۹
0/64	2,698/3	6,498/3	0/100	2,798/6	6,539/6	۱۰
0/49	1,446/1	4,021/83	0/37	1,458/9	4,024	میانگین

در این مثال، ابتدا دو مسیر توالی قطعی برای توزیع‌کننده رقیب در نظر گرفته، سپس زمان شروع سرویس‌دهی به مشتریان در هر مسیر محاسبه شده است. مدل ریاضی قطعی بدون سناریو با توجه به زمان رسیدن رقیب حل شده و نتایج به‌دست آمده است. بار دیگر به‌صورت استوار حل، و نتایج با یکدیگر مقایسه و در جدول ۵ نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، سود حاصل از سرویس‌دهی به مشتریان با استفاده از رویکرد استوار برابر $7,453$ هزار واحد است؛ درحالی‌که سود کسب‌شدنی در حل هریک از سناریوها

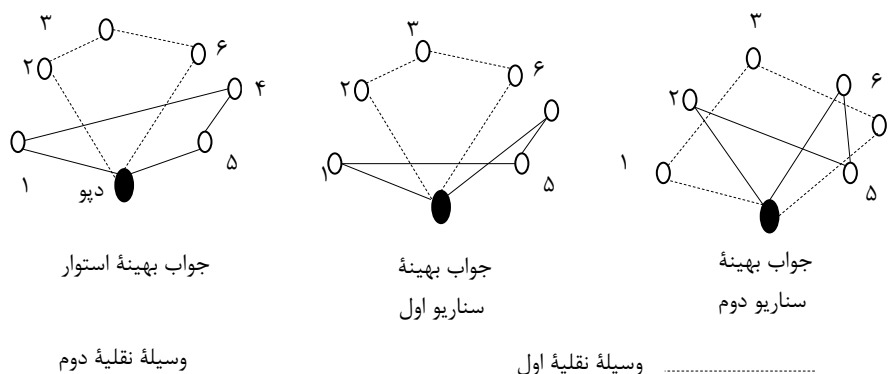
جدول ۴. داده‌های آزمایش

مشتری	سناریو اول		سناریو دوم	
	حد پایین	حد بالا	حد پایین	حد بالا
اول	20	30	10	35
دوم	30	40	15	40
سوم	10	50	40	60
چهارم	20	60	10	20
پنجم	30	40	15	30
ششم	40	60	40	60

جدول ۵. نتایج مقدار تابع هدف برای آزمایش طراحی شده (ارقام به هزار)

تابع هدف	استوار	سناریو اول	سناریو دوم
	۷,۴۵۳	۷,۰۷۶	۶,۸۲۳

به صورت قطعی برای سناریو اول و دوم به ترتیب ۵ و ۸/۵ درصد در مقایسه با حل مسئله بر مبنای رویکرد استوار کمتر است. نحوه سرویس دهی به مشتریان با وسایط نقلیه در هریک از رویکردهای فوق در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴. نحوه سرویس دهی به مشتریان

الگوریتم پیشنهادی بود. سپس مسئله در ابعاد بزرگ حل و نتایج با یکدیگر مقایسه شد. نتایج به دست آمده نشان دهنده آن است که رویکرد $DE / current\ to\ best / 2 / bin$ با وجود زمان محاسباتی بالاتر دارای جواب هایی با کیفیت مناسب تر است. به منظور تحقیقات آتی پیشنهاد می شود علاوه بر توجه به زمان سرویس دهی رقبا به مشتریان، میزان تقاضای مشتریان نیز به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شود، همچنین توجه به رقابت در دیگر حالت های مسئله مسیریابی، موضوع جذابی برای تحقیقات آتی است. در نهایت، حل مسئله مطرح با روش های دقیق در ابعاد متوسط و بالا، همچنین بررسی کیفیت جواب های الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با حل دقیق ارزشمند است.

نتیجه گیری

در این مقاله رویکرد استوار سناریومحور به منظور مسیریابی دوره ای وسایط نقلیه با در نظر گرفتن پنجره زمانی به منظور بیشینه سازی سود قابل کسب از طریق سرویس دهی به مشتریان و کمینه سازی هزینه حمل و نقل از طریق انتخاب کوتاه ترین ارائه شد. در این مقاله، زمان سرویس دهی توزیع کنندگان رقیب به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده است، به همین دلیل مسئله کلاسیک PVRP و PVRPTW قابلیت حل این نوع مسئله را در حالت عدم قطعیت داده ها را ندارد. به منظور حل مدل ارائه شده از الگوریتم تکامل تقاضای استفاده شد. جهت بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی ابتدا مسئله در ابعاد کوچک حل و نتایج با نتیجه حل مسئله با روش دقیق مقایسه شد که نشان دهنده عملکرد مناسب

منابع

- Kos, C., and Karaoglan, I. (2016). "The green vehicle routing problem: A heuristic based exact solution approach", *Applied Soft Computing*, Vol. 39, No.1, PP. 154–164.
- Archetti, C., Savelsbergh, M. and Speranza, M. (2016). "Vehicle Routing Problem with Occasional Drivers", *European Journal of Operational Research*, Vol. 254, No.2, PP. 472–480.
- Noruzi, N., Sadegh-Amalnick, M. and Alinaghian, M. (2015). "Evaluating of the particle swarm optimization in a periodic vehicle routing problem", *Measurement*, Vol.62, No.2, PP. 162-169.
- Leung, S.C.H. et al. (2007). "A robust optimization model for multi-site production planning problem in an uncertain environment", *European Journal of Operational Research*, Vol. 181, No.5, PP. 224-238.

5. Kohl, N., and Madsen, O.B.G. (1997). "An optimization algorithm for the vehicle routing problem with time windows based on lagrangian relaxation", *Jornal of Operation Research*, Vol.45, No.3, PP. 395-406.
6. Coene, S., Arnout, A., and Spieksma, F. (2010). "On a periodic vehicle routing problem", *Journal of Operation Research*, Vol. 61, No.12, PP. 1719-1728.
7. Hemmelmayr, V. et al. (2011). "A heuristic solution method for node routing based solid waste collection problems", *Journal of Heuristics*, Vol.19, No.2, PP. 129-156.
8. Baptista, S., Oliveira, R.C. and Zúquete, E. (2002). "A period vehicle routing case study", *European Journal Operation Research*, Vol.139, No.2, PP. 220-229.
9. Tavakkoli-Moghaddam, R. et al. (2011). "New mathematical model for a competitive vehicle routing problem with time windows solved by simulated annealing", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol.30, No.2, PP. 83-92.
10. Norouzi, N. et al. (2012). "A New Multi-objective Competitive Open Vehicle Routing Problem Solved by Particle Swarm Optimization", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 12, No.4, PP. 609-633.
11. Erera, A., L, Morales, J. C, and Savelsbergh, M. (2010). "The vehicle routing problem with stochastic demand and duration constraints", *Journal of Transportation Science*, Vol. 44, No.4, PP. 474-49.
12. Novoa, C. and Storer, R. (2009). "An approximate dynamic programming approach for the vehicle routing problem with stochastic demands", *European Journal of Operational Research*, Vol. 196, No.2, PP. 509-515.
13. Goodson, J. C., Ohlmann, J. W, and Thomas, B. (2012). "Cyclic -order neighborhoods with application to the vehicle routing problem with stochastic demand", *European Journal of Operational Research*, Vol. 2172, No.2, PP. 312-323.
14. List, B. F., Wood, B, and Nozick, L. K. (2003). "Robust optimization for fleet planning under uncertainty", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 39, No.3, PP. 209- 227.
15. Soyster, A. (1973). "Convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming", *Journal of Operation Research*, Vol. 21, No.5, PP. 1154- 1157.
16. Mulvey J. M., Vanderbei, R. J, and Zenios, S. A. (1995). "Robust optimization of large-scale systems", *Journal of Operation Research*, Vol. 43, No.2, PP. 264-281.
17. Bahri, O., Ben Amor, N, and Talbi, EG. (2016). "Robust Routes for the Fuzzy Multi-objective Vehicle Routing Problem", *8th IFAC Conference on Manufacturing Modeling, Management and Control*, Vol.49, No.12, PP. 769-774.
18. Ben-Tal, A. and Nemirovski, A. (1998). "Robust convex optimization", *Mathematic Operation Research*, Vol. 23, No.4, PP. 769-805.
19. Ben-Tal, A. and Nemirovski, A. (2000). "Robust solutions of linear programming problems contaminated with uncertain data" *Mathematic Programming*, Vol. 88, No.3, PP. 411-424.
20. El-Ghaoui, L., Oustry, F, and Lebret, H. (1998). "Robust solutions to uncertain semi definite programs", *SIAM Journal on Optimization*, Vol. 9, No.1, PP. 33-52.
21. Sungur, I., Ordonez, F, and Dessouky, M. (2008). "A robust optimization approach for the capacitated vehicle routing problem with demand uncertainty." *IIE Transactions*, Vol. 40, PP. 509-523.
22. Gounaris, C. E., Wiseman, W, and Floudas, C. A. (2013). "The robust capacitated vehicle routing problem under demand uncertainty." *Journal of Operations Research*, Vol. 61, No.3, PP. 677-693.
23. Lee, C., Lee, K, and Park, S. (2012). "Robust vehicle routing problem with deadlines and travel time /demand uncertainty", *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 63, No.9, PP. 1294-1306.
24. Lenstra, J.K. and Rinnooy Kan, A.H.G. (1981). "Complexity of vehicle and scheduling problem", *Networks*, Vol.11, No.2, PP. 221-227.
25. Coene, S., Arnout, A, and Spieksma, F. (2010). "On a periodic vehicle routing problem", *Journal of Operation Research society*, Vol.61, No.12, PP. 1719-1728.
26. Alegre, J., Laguna, M, and Pacheco, J. (2007). "Optimizing the periodic pickup of raw materials for

- a manufacturer of auto parts”, *European Journal Operation. Research*, Vol.179, No.3, PP. 739746.
27. Alinaghian, M., et al. (2012). “A new competitive approach on multi-objective periodic vehicle routing problem”, *International Journal Applied Operation Research*. Vol.1, No.3, PP. 33-41.
 28. Angelelli, E and Speranza, M.G. (2002). “The periodic vehicle routing problem with intermediate facilities”, *European Journal of Operation Research*, Vol.137, No.2, PP. 233-247.
 29. Das, S, and Suganthan, PN. (2011). “Differential evolution: a survey of the state-of-the-art”, *transaction on Evolutionary Computation*, Vol.15. No.2, PP.4-31
 30. Kunnapapdeelert, S, and Kachitvichyanukul, V. (2013). “Differential evolution algorithm for generalized multi depot vehicle routing problem with pickup and delivery requests”, In: *Lin YK., Tsao YC., Lin SW. (Eds) Proceedings of the Institute of Industrial Engineers Asian Conference 2013. Springer, Singapore.*
 31. Kunnapapdeelert, S, and Kachitvichyanukul, V. (2015). “Modified DE Algorithms for Solving Multi-depot Vehicle Routing Problem with Multiple Pickup and Delivery Requests”, *Toward Sustainable Operations of Supply Chain and Logistics Systems, Eco Production.*
 32. Pan, F, and Nagi, R. (2010). “Robust supply chain design under uncertain demand in agile manufacturing”, *Computers and Operations Research*, Vol. 37, No.4, PP.668-683.
 33. Yu, C.S and Li H.L. (2000). “A robust optimization model for stochastic logistic problems”, *International Journal of Production Economics*, Vol.64, No.1, PP. 385-397.
 34. Leung, S.C.H, and Chan S.S.W. (2009). “A Goal Programming Model for Aggregate Production Planning with Resource Utilization Constraint”, *Computers and Industrial Engineering*, Vol.56, No.3, PP. 1053-1064.
 35. Storn, R, and Price. K. (1997). “Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces.” *Journal of Global Optimization*, Vol.11, No.4, PP. 359-431.
 36. Price, K.V., Storn, R.M, and Lampinen, J.A. (2005). “Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization”, *Natural Computing Series, Springer.*
 37. Qin, A.K, and Suganthan. P.N. (2005). “Self-Adaptive Differential Evolution Algorithm for Numerical Optimization”, *In Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation*, Vol. 2, No.3, PP.1785–1791.
 38. Lopez Cruz, I.L. et al. (2005). “Efficient Differential Evolution algorithms for multimodal optimal control problems”, *Applied Soft Computing*, Vol.3, No.2, PP. 97-122.
 39. Cordeau, J.F., Gendreau, M, and Laporte, G. (1997). “A tabu search heuristic for periodic and multi-depot vehicle routing problems”, *Networks* Vol 30. No.2, PP.105-119.

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1. Vehicle Routing Problem With Time Windows
2. Just in Time
3. Periodic Vehicle Routing Problem
4. Periodic Vehicle Routing Problem with Time Windows
5. Differential Evolution