رویکرد استوار سناریو محور برای مساله مسیریابی وسایط نقلیه تحت شرایط رقابتی با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی بهبودیافته

علیرضا سلامت بخش ورجوی، دانشجوی دوره دکتری، گروه مهندسی صنایع، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

رضا توکلی مقدم (مسئول مکاتبات)، استاد، دانشکده مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران

مهدی علینقیان، دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

اسماعیل نجفی، استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، گروه مهندسی صنایع، تهران، ایران

E-mail: tavakoli@ut.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۱۸ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۸/۳۰

چکیده

هدف از این تحقیق، ارایه یک مدل ریاضی جدید از مساله مسیریابی وسایط نقلیه به منظور بیشینه‌سازی سود قابل کسب تحت شرایط عدم قطعیت شروع سرویس‌دهی توزیع کنندگان رقیب به مشتریان با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار تحت سناریو است. با توجه به دنیای واقعی، در اکثر مواقع بیش از یک توزیع کننده در شبکه توزیع وجود دارد و زمان شروع سرویس‌دهی به مشتریان، تاثیر قابل توجهی در سود قابل کسب توزیع‌کنندگان دارد. از سوی دیگر، به دلیل تغییرات در تقاضای مشتریان، ترافیک، اوضاع جوی و غیره توالی سرویس‌دهی به مشتریان توسط رقبا تغییر می‌کند، به همین جهت برنامه‌ریزی جهت ارایه سرویس به مشتریان زودتر از رقبا با عدم قطعیت مواجه است. به همین جهت از رویکرد استوار سناریو محور در این مقاله استفاده شده است. مزیت استفاده از رویکرد پیشنهادی نسبت به رویکرد قطعی آن است که با وجود کاهش سود کسب شده، ریسک سود از دست رفته کاهش خواهد یافت و جواب‌های بهینه شدنی خواهد بود. به منظور ارزیابی کارآیی مدل ارایه شده از استراتژی الگوریتم تکامل تفاضلی بهبود یافته استفاده شد و نتایج به دست آمده در ابعاد کوچک و متوسط با نتایج حاصل از روش حل دقیق مقایسه گردید. همچنین به منظور ارزیابی الگوریتم پیشنهادی تعدادی مساله نمونه در ابعاد بزرگ ایجاد و نتایج با یکی از استراتژی‌های الگوریتم تکامل تفاضلی مقایسه و بررسی گردید. نتایج محاسباتی نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی دارای عملکرد محاسباتی بهتری در مقایسه با سایر استراتژی‌های پیشنهادی است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم تکامل تفاضلی بهبود یافته، بهینه‌سازی استوار، مسیریابی وسایل نقلیه ،شرایط رقابتی، عدم قطعیت.

۱. مقدمه

حمل و نقل یکی از بخش‌های عمده و مهم در اقتصاد هر کشور به شمار می‌رود و بعنوان یکی از مهم‌ترین بخش‌های تشکیل دهنده هزینه تمام شده محصولات نهایی به شمار می‌آید. افزایش میزان حمل و نقل کالا، نقش قابل توجهی در افزایش ترافیک، مصرف سوخت خواهد داشت و در نهایت منجر به افزایش هزینه حمل و نقل، زمان انتظار سرویس‌دهی به مشتریان و نارضایتی آنها می‌شود از سوی دیگر، به دلیل تغییرات عمده و تشدید رقابت در محیط کسب و کار، افزایش میزان بهره‌وری و کاهش هزینه حمل و نقل یکی از اهداف اصلی در فرآیندهای زنجیره تامین شرکتها محسوب می‌شود[Golden et al. 2008]. یکی از مهم‌ترین راه‌کارها در شرکت‌های دارای شبکه توزیع کالا، استفاده از مساله مسیریابی وسایط نقلیه (VRP)[1] به منظور بهینه سازی هزینه‌های حمل و نقل و افزایش سود ناشی از توزیع کالاها است [Kos and Karaoglan, 2016]; [Archetti, et al. 2016]. مساله مسیریابی وسایط نقلیه برای اولین بار توسط دنتزینگ و رامسر [Dantzig and Ramser., 1959] ارایه شد. مساله مسیریابی وسایط نقلیه شامل مجموعه‌ای از مسیرها است که در آن ناوگانی متشکل از تعدادی وسایط نقلیه با ظرفیت یکسان یا غیریکسان از یک یا چند دپو، به مشتریانی که در نقاط مختلف جغرافیایی پراکنده شده‌اند سرویس‌دهی نموده و در نهایت به همان دپو باز می‌گردند. هدف اصلی در مساله مذکور کمینه‌سازی هزینه حمل و نقل است [Norouzi *et al.* 2015]. مساله مسیریابی وسایط نقلیه با پنجره زمانی[2] (VRPTW) یکی از مهم‌ترین مسایل زیرمجموعه مساله (VRP) است که دارای کاربردهای فراوانی در سیستم‌های توزیع است. در این مساله، زمان رسیدن کالا به هر یک از مشتریان در بازه زمانی $[a_i, b_i]$ تعریف می‌شود. بطوری که a_i و b_i به ترتیب زودترین و دیرترین زمان مجاز شروع سرویس‌دهی به مشتریان است. مساله (VRPTW) به دو بخش تقسیم می‌شود. بخش اول، مسایل مسیریابی وسایط نقلیه با پنجره زمانی نرم است که سرویس‌دهی در خارج از بازه مجاز با اعمال جریمه امکان‌پذیر است و بخش دوم مساله مسیریابی وسایط نقلیه با پنجره سخت است که سرویس‌دهی در خارج از بازه مجاز امکان پذیر نیست. این مدل کاربردهای فراوانی در سیستم‌های تولید به موقع، سیستم های توزیع همانند مواد لبنی، فاسدپذیر، پست ، پول‌رسانی به بانک‌ها، سوخت‌رسانی به جایگاه‌های سوخت دارد [Norouzi et al. 2015].

مساله مسیریابی وسایط نقلیه در حالت رقابتی یکی از مسایل خاص (VRPTW) است که در آن میزان سود شرکت‌های توزیع به زمان شروع سرویس‌دهی به مشتریان بستگی دارد. در مسیریابی وسایط نقلیه کلاسیک فرض بر آن است که انحصار در میان شرکت‌های توزیع کننده وجود دارد و میزان کالای توزیع شده تاثیر در سود توزیع‌کنندگان ندارد [Norouzi et al. 2012]. با توجه به مشاهدات در دنیای واقعی، در اکثر زمان‌ها انحصار در میان توزیع‌کنندگان وجود ندارد و شرکت‌های توزیع برای زودتر رسیدن از سایر رقبا به مشتریان و کسب سود نقدینگی با یکدیگر در حال رقابت هستند. به عبارت دیگر، سود توزیع‌کنندگان وابسته تامین تقاضای مشتریان قبل از سرویس‌دهی سایر رقبا است به همین جهت، زمان شروع سرویس‌دهی به مشتریان نقش قابل توجهی در سود توزیع کنندگان دارد [سلامت بخش، توکلی مقدم، نوروزی، ۱۳۹۵]. به همین منظور توکلی مقدم و همکاران [Tavakkoli-Moghaddam et al. 2011] برای اولین بار مدل مسیریابی وسایط نقلیه رقابتی چند هدفه رقابتی ارایه نمودند که هدف از آن بیشینه‌سازی سود توزیع ناشی از سرویس‌دهی به مشتریان زودتر از سایر رقبا بود. در تحقیقات انجام شده در حوزه مسیریابی وسایط نقلیه رقابتی، فرض بر آن است که زمان رسیدن رقیب به مشتری در یک بازه زمانی مشخص اتفاق می‌افتد و سود شرکت‌های توزیع بر مبنای زمان شروع سرویس‌دهی به مشتریان

محاسبه می‌شود، اما این فرض در بسیاری از کاربردها، کارآیی لازم را ندارد. زیرا زمان بازدید رقیب در روزهای مختلف (به دلیل ترافیک، اوضاع جوی، تغییر در تقاضای مشتریان و غیره) تغییر می‌کند و باعث می‌شود که ترکیب مشتریانی که توسط رقیب در یک روز سرویس‌دهی می‌شوند با ترکیب روز دیگر متفاوت باشد. لذا به دلیل عدم قطعیت زمان شروع سرویس‌دهی ممکن است رقیب به یک مشتری در بازه‌های زمانی متفاوتی سرویس‌دهی نماید که این موضوع در این مقاله با استفاده از رویکرد استوار سناریو محور مدل سازی خواهد شد. عدم قطعیت در زمان شروع سرویس‌دهی رقبا به مشتریان، یکی از چالش‌های توزیع کنندگان در دنیای رقابتی است [Novoa and Storer, 2009]. با توجه مرور ادبیات انجام شده، در اکثر مقالات، مدل‌سازی مساله مسیریابی وسایط نقلیه در حالت عدم قطعیت با استفاده از توزیع احتمالی انجام شده است، اما تاثیر پارامترهای غیرقطعی در جواب شدنی بهینه با استفاده از برآورد نمودن میزان عدم قطعیت و تبدیل آن به پارامتر قطعی است در نظر گرفته نشده است [Erera and Savelsbergh 2010, Goodson et al. 2012].

رویکردهای مختلفی برای برخورد با عدم قطعیت ارائه شده که از جمله این رویکردها می‌توان به مدل‌های بهینه‌سازی استوار[۳] (RO) اشاره کرد. از آنجا که امکان برآورد توزیع احتمالی مشاهدات همیشه امکان پذیر نیست، استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار برای مساله مسیریابی وسایط نقلیه در شرایط عدم قطعیت پارامترها دارای ویژگی‌هایی نسبت به رویکرد بهینه‌سازی احتمالی با استفاده از برآورد توزیع احتمالی پارامترها است [List et al. 2003]. در مرور ادبیات انجام شده در خصوص حل مساله مسیریابی وسایط نقلیه با رویکرد بهینه‌سازی استوار می‌توان، به مقاله سونجرو همکاران [Sungur et al. 2008] و گونارین و همکاران [Gounaris, et al. 2013] به منظور ارایه یک مدل استوار مساله مسیریابی وسایط نقلیه با تقاضای غیرقطعی اشاره نمود. در مدل مذکور، هدف کمینه‌سازی هزینه حمل با در نظر گرفتن تامین تقاضای تمامی مشتریان است به طوری که تقاضای تامین نشده مشتریان باعث افزایش هزینه‌های حمل نشود. نتایج محاسباتی نشان می‌دهد که رویکرد بهینگی استوار توانمندی مناسبی در حل مساله مذکور دارد. سولانوکریس و همکاران [Solano-Charris, et al. 2014] از رویکرد معیار بیشینه - کمینه به منظور یافتن جواب‌های استوار در مساله مسیریابی وسایط نقلیه استفاده نمودند. این روش به دلیل در نظر گرفتن بدترین حالت ممکن به شدت محافظه کارانه بود به همین دلیل جواب‌های استوار با جواب بهینه تفاوت معناداری داشت [Bazgan and Aissi, 2009]; [Kasperski and Kule, 2009]. در ادامه، مولوی و همکاران [Mulvey et al. 1995] مدل منعطف و کاربردی بهینه‌سازی تصادفی استوار سناریو محور را به منظور کاهش سطح محافظه‌کاری ارایه نمودند. بر خلاف رویکردهای بدبینانه، در مدل مذکور انحراف جزیی در برخی از محدودیت‌ها مجاز بوده و جواب بهینه موجه و نزدیک به بهینه است [Bahri et al. 2016].

ثابت شده است که مساله مسیریابی وسایط نقلیه جز مسایل NP-Hard است [Lenstra and Rinnooy Kan, 1981]. به این منظور، برای حل مسایل در ابعاد بزرگ می‌بایست از الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده نمود. در مقالات مختلف روبکردهای متفاوتی از الگوریتم‌های فراابتکاری به منظور حل مدل‌مساله مسیریابی وسایط نقلیه ارایه شده است. به طور نمونه، توکلی مقدم و همکاران [Tavakkoli-Moghaddam et al. 2011] یک مدل مسیریابی وسایط نقلیه در حالت رقابتی با در نظر گرفتن قطعی زمان شروع سرویس‌دهی به مشتریان توسط رقبا را ارایه و مدل را توسط الگوریتم شبیه‌سازی تبرید حل نموند. علی‌نقیان و همکاران [Alinaghian, et al. 2012] مدل مسیریابی وسایط نقلیه دوره‌ای رقابتی چند هدفه با در نظر

گرفتن قطعی تقاضا ارایه و مدل را با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چند هدفه توسعه دادند. در این تحقیق، به منظور حل مدل پیشنهادی از الگوریتم تکامل تفاضلی بهبودیافته (IDE)[5] استفاده خواهد شد. الگوریتم تکامل تفاضلی (DE) به دلیل ساختار ساده و همگرایی سریع، یکی از کاربردی‌ترین الگوریتم‌های تکاملی برای برای مسایل بهینه‌سازی است [Das and Suganthan, 2011]. از مقالات مورد بررسی به منظور استفاده از الگوریتم (DE) در حل مسایل مسیریابی وسایط نقلیه به طور نمونه می‌توان به حل مساله مسیریابی وسایط نقلیه دوره‌ای با در نظر گرفتن چند دپو با احتساب برداشت و گذاشت چند باره کالا و یا مساله مسیریابی وسایط نقلیه با در نظر گرفتن تقاضا به صورت فازی اشاره نمود [Kunnapapdeelert and Kachitvichyanukul, 2015].

نوآوری ارائه شده در این مقاله به صورت خلاصه بدین ترتیب است: با توجه به دانش نویسندگان برای اولین بار عدم قطعیت موجود در زمان شروع سرویس‌دهی توسط رقبا در مدل پیشنهادی لحاظ شده است همچنین به جای یک زمان تخمینی شروع سرویس‌دهی، مجموعه ای از سناریوها برای زمان شروع سرویس‌دهی در مدل‌سازی لحاظ شده است و یک مدل استوار برای مواجه با عدم قطعیت مطرح شده ارائه شده است. همچنین در مدل پیشنهادی دو هدف بیشنه‌سازی امید ریاضی سود است. در ادامه یک روش فرا ابتکاری مبتنی بر الگوریتم فراابتکاری DE برای حل مساله پیشنهاد شده است. در نهایت نیز به بررسی کیفیت نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی پرداخته شده است.

در این مقاله در بخش دوم، مساله مسیریابی وسایط نقلیه رقابتی تعریف و ضمن تعرف متغیرها و پارامترها مدل غیرقطعی مساله (VRP) رقابتی ارایه می‌گردد. در بخش سوم، ابتدا رویکرد بهینه‌سازی استوار سناریو محور ارایه و سپس مدل قطعی مساله مسیریابی وسایط نقلیه رقابتی ارایه خواهد شد. در بخش چهارم، الگوریتم تکامل تفاضلی بهبود یافته به منظور حل مدل پیشنهادی ارایه خواهد شد در بخش پنجم نمونه مسایل در ابعاد کوچک و بزرگ حل و نتایج با یکدیگر مقایسه خواهد شد و در بخش ششم و نتایج عملکرد الگوریتم پیشنهاید بررسی و پیشنهادات برای تحقیقات آتی ارایه خواهد شد.

۲. مدل مسیریابی وسایط نقلیه درحالت رقابتی در حالت عدم قطعیت

۲-۱ تعریف مساله

با توجه به دنیای واقعی، بازه زمانی شروع سرویس‌دهی رقیب به مشتریان در روزهای مختلف ثابت نیست و چندین بازه زمانی برای مشتریان وجود دارد. از جمله دلایل موجود برای وجود تغییرات در بازه زمانی بازدید و وجود چندین بازه زمانی بازدید که سبب تغییر در الگوی بازدید رقیب در روزهای مختلف می‌شود عبارتند از:

۱. تغییر در تقاضای مشتریان در روزهای متفاوت که منجر به تغییر توالی بازدید مشتریان توسط رقبا می‌شود. (ترکیب متفاوت مشتریان در روزهای مختلف سبب می‌گردد تا تقاضای کالا به صورت روزانه تغییر نماید به همین دلیل، توالی روزانه سرویس‌دهی به مشتریان توسط رقیب متفاوت بوده و زمان بازدید از مشتریان روزانه متفاوت است).

۲. موارد اضطراری در مسیرها. (موارد اضطراری همچون تصادف و ترافیک در برخی مسیرها سبب تاخیر در زمان رسیدن رقبا به مشتریان می‌شود و در برخی موارد، باعث تغییر توالی بازدید مشتریان توسط رقیب خواهد شد).

۲-۲ مفروضات مساله

مفروضاتی که برای مساله مسیریابی وسایط نقلیه در حالت رقابتی مطرح است عبارتند از:

- زمان رسیدن رقیب از چندین سناریو پیروی می‌کند که احتمال اتفاق افتادن هر سناریو مشخص است.

- در هر سناریو، بازه زمانی رسیدن رقیب به مشتریان مشخص است.
- هر مشتری تنها توسط یک وسیله نقلیه سرویس‌دهی می‌شود.
- ظرفیت وسایط نقلیه محدود است.
- تقاضای مشتریان به زمان سرویس‌دهی وابسته است. در صورتی که شرکت توزیع دیرتر از رقبا سرویس‌دهی به مشتری را آغاز کند بخشی از تقاضای مشتری که وابسته به زمان سرویس‌دهی است از دست می‌رود.
- تعداد وسایل نقلیه ثابت است و هر وسیله نقلیه در لحظه صفر در دسترس است.
- زمان سرویس‌دهی به مشتریان وابسته به نوع وسیله نقلیه نیست.

بنا به مشاهدات در دنیای واقعی تقاضای مشتریان به دو قسمت تقسیم می‌شود. قسمت اول شامل تقاضای مستقل است که به زمان شروع سرویس‌دهی توسط رقبا بستگی ندارد و تمامی تقاضای مشتری می‌بایست تامین گردد. قسمت دوم، شامل تقاضای وابسته به زمان است بطوری که اگر زمان شروع سرویس‌دهی به مشتریان بعد از رقبا باشد سود قابل کسب متناسب با زمان شروع سرویس‌دهی به مشتریان کاهش می یابد. با در نظر گرفتن مفروضات فوق، سوالات تحقیق به شرح ذیل است:

- مدل‌سازی مساله مسیریابی وسایط نقلیه رقابتی با غیرقطعی در نظر گرفتن زمان شروع سرویس‌دهی در مقایسه با مدل‌های قطعی به چه میزان در سود قابل کسب شرکت‌های توزیع را بهبود می‌بخشد؟
- استراتژی‌های توزیع شرکت‌های رقیب چه تاثیری در سود شرکت‌های توزیع دارد؟

۲-۳ مجموعه ها و اندیس‌ها

n : تعداد مشتریان (قرارگاه مرکزی با $i = 0$ نمایش داده می شود).

nv : تعداد وسایط نقلیه در دسترس (v اندیس وسایط نقلیه).

۲-٤ پارامترها

k : ظرفیت هر وسیله نقلیه.

t_i : زمان رسیدن وسیله نقلیه v به گره i– اُم.

T : حداکثر زمان طی مسیر هر وسیله نقلیه

d_i : تقاضای گره i– اُم

t_{ij} : زمان مورد نیاز جهت طی یال از یال i به j

M: عدد بسیار بزرگ.

d_{tdi} تقاضای وابسته به زمان مشتری i – اُم.

d_{ini} : تقاضای مستقل به زمان مشتری i – اُم.

D_i : تقاضای کل مشتری i– اُم به طوری که $D_i = d_{tdi} + d_{ini}$

t_{uis} : کران بالای زمان رسیدن رقیب به مشتری i– اُم در سناریوی s– اُم.

tl_{is} : کران پایین زمان رسیدن رقیب به مشتری i– اُم در سناریوی s– اُم.

s_i : مدت زمان سرویس‌دهی به مشتری i– اُم.

۲-۵ متغیرها

متغیرهای مدل مسیریابی وسایط نقلیه در شرایط رقابتی به شرح ذیل تعریف می‌شود.

x_{ij}^{v} : اگر وسیله نقلیه v– اُم یال $i - j$ را طی نماید مقدار یک می‌گیرد و در غیر این صورت صفر است.

o_{is}: اگر شرکت توزیع در سناریوی s– اُم زودتر از کران پایین رقیب شروع به سرویس‌دهی نماید مقدار یک می‌گیرد و در غیر این‌صورت مقدار صفر است.

q_{is} : اگر شرکت توزیع در سناریوی s– اُم در بین بازه زودترین و دیرترین زمان شروع سرویس‌دهی رقیب شروع به

سرویس‌دهی نماید مقدار یک می‌گیرد، در غیر این‌صورت مقدار صفر است.

z_{is}: اگر شرکت توزیع در سناریوی s- اُم سرویس‌دهی به مشتری را بعد از کران بالای رقیب آغاز نماید مقدار آن یک است، در غیراین‌صورت مقدار صفر است.

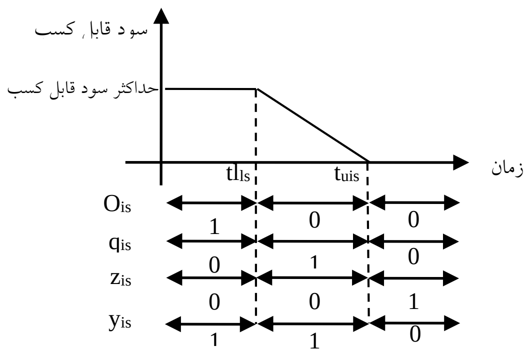
y_{is}: اگر شرکت توزیع در سناریوی s- اُم شروع سرویس‌دهی به مشتری قبل از کران بالای شروع سرویس‌دهی رقیب باشد مقدار یک می‌گیرد و در غیراینصورت مقدار صفر است.

همانگونه که در بخش تعریف مساله بیان گردید، زمان رسیدن رقبا به مشتریان بر میزان فروش شرکت توزیع تاثیر گذار است و شرکت‌های توزیع علاقه‌مندند که زودتر از رقیب به مشتریان خدمت‌رسانی کند. از سوی دیگر، رقبا با توجه به ترکیب مشتریان، وضعیت ترافیک، اوضاع جوی و غیره چندین مسیر مختلف را برای سرویس‌دهی به مشتریان انتخاب می‌کنند (سناریو) و با انتخاب هر یک از سناریوها توسط رقبا زمان شروع سرویس‌دهی به مشتریان تغییر می‌کند. شرکت توزیع قصد دارد تا با افزایش احتمال سرویس‌دهی زودتر به مشتریان سود قابل کسب خود را افزایش دهد. به همین منظور مسیرهایی را انتخاب می‌نماید که اگر رقیب هر یک از مسیرهای در دسترس خود را خود را نیز انتخاب نماید آنگاه سود معقولی نصیب شرکت توزیع شود. همان‌گونه که توضیح داده شد متغیرهای مسیریابی شرکت توزیع متغیرهای مرحله اول هستند و قبل از تشکیل مسیرهای رقیب، مسیرهای شرکت انتخاب می‌شوند، تنها متغیرهای مرحله دوم، متغیرهای محاسبه سود هستند که پس از مشخص شدن مسیر رقیب و با توجه به مسیرانتخابی شرکت توزیع مقدارشان بر حسب سناریو مشخص می‌شود. نحوه اعمال متغیرهای تصمیم در شکل (۱) نشان داده شده است:

۲-٤ تابع هدف مدل

نحوه محاسبه امید ریاضی فروش در این مدل با توجه به فرض احتمالی بودن زمان شروع سرویس‌دهی رقیب به مشتری در این قسمت توضیح داده خواهد شد. اگر شرکت توزیع کننده قبل از زودترین زمان شروع سرویس‌دهی(tl_{is}) شرکت‌های رقیب در سناریو s – اُم شروع به سرویس‌دهی به مشتری i- اُم نماید حداکثر سود قابل کسب شامل تقاضای مستقل(d_{ini}) و تقاضای وابسته به زمان (d_{tdi}) را از آن خود می‌نماید. اگر فرض شود که زمان سرویس دهی رقیب در سناریوی s- اُم در بازه زمانی(t_{lis}, t_{uis}) اتفاق بیفتد، در صورتی که وسیله نقلیه در بازه زمانی مورد نظر به مشتری برسد امید ریاضی زمان شروع سرویس‌دهی به مشتری نسبت به رقیب در سناریوی s- اُم و میزان تامین تقاضای وابسته به زمان با توجه به رابطه (۱) محاسبه خواهد شد:

$$\left(\frac{t_{uis} - t_i}{t_{uis} - t_{lis}}\right) d_{tdi} \qquad (۱)$$



شکل ۱. تابع توزیع نقدینگی قابل کسب در حالت رقابتی

در صورتی که که شرکت توزیع کننده بعد از t_{uis} شروع به سرویس‌دهی نماید، هیچ سودی ناشی از تامین تقاضای وابسته به زمان را کسب نخواهد کرد و فقط سود ناشی از تامین تقاضای مستقل (d_{ini}) را کسب خواهد شد. میزان کل امید ریاضی فروش $E(S)$ ناشی از تامین تقاضای وابسته به زمان در سناریوی s– اُم به شرط آنکه شرکت توزیع در زمان t_i به مشتری i– اُم برسد به صورت رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$E(S) = \sum_{i=1}^{N} \left(o_{is} d_{tdi} + q_{is} \left(\frac{t_{uis} - t_i}{t_{uis} - t_{lis}} \right) d_{tdi} \right) \quad (۲)$$

در رابطه (۲)، o_{is} و q_{is} در سناریوی s– اُم با توجه به زمان رسیدن وسیله نقلیه مقادیر صفر و یک می‌گیرند. همچنین برای تخصیص مناسب این متغیرها محدودیت‌های ذیل نیز به مدل اضافه شده است.

$$(t_{uis} - t_i) + M(1 - q_{is}) \geq 0 \qquad i = 1,2,\dots,n, \quad s \in \Omega \quad (۳)$$

$$(t_{lis} - t_i) + M(1 - o_{is}) \geq 0 \qquad i = 1,2,\dots,n\,, \quad s \in \Omega \quad (٤)$$

$$(t_{lis} - t_i) + M(\varpi_{is}) \leq 0 \qquad i = 1,2,\dots,n, \quad s \in \Omega \quad (٥)$$

$$q_{is} + \varpi_{is} = 1 \qquad i = 1,2,\dots,n, \quad s \in \Omega \quad (٦)$$

همان‌گونه که از مدل مشخص است در صورتی که وسیله نقلیه بعد از بازه سرویس‌دهی رقیب به شروع به سرویس دهی نماید، متغیرهای o_{is} و q_{is} مقدار صفر می‌گیرند که این مقادیر در تابع هدف با امید ریاضی برابر صفر نشان داده خواهد شد. در صورتی که زمان شروع سرویس دهی در بین بازه مورد بحث باشد، مقدار q_{is} آزاد خواهد بود ولی به دلیل آن که تابع هدف بیشینه‌سازی است متغیر q_{is} مقدار یک می‌گیرد. همچنین در این بازه زمانی متغیر o_{is} مقدار صفر دارد. در صورتی که زمان شروع سرویس دهی زودتر از t_{lis} باشد تمامی سود را کسب می نماید و در این بازه زمانی متغیر o_{is} آزاد از علامت است.

۲–۷ مدل ریاضی

برای مدل سازی این بخش از تابع هدف که مربوط به بیشینه کردن امید ریاضی میزان پوشش تقاضای وابسته به زمان مشتریان از روابط ذیل استفاده شده است:

رابطه (۷) نشان دهنده تابع هدف مساله به منظور بیشینه نمودن میانگین قابل کسب در هر سناریو است. محدودیت‌های (۸) و (۹) نشان دهنده آن است که هر مشتری فقط توسط یک وسیله نقلیه خدمت دریافت کند. محدودیت (۱۰) بیان می‌کند که اگر وسیله نقلیه‌ای به گره‌ای وارد شود بایستی از آن خارج شود و به این ترتیب پیوستگی مسیرها برقرار خواهد شد. محدودیت (۱۱) بیانگر آن است که زمان سرویس‌دهی به مشتریان و عبور از مسیرها باید از حد مشخص شده کمتر باشد. محدودیت (۱۲) نشان‌دهنده زمان شروع سرویس‌دهی به مشتریان است. محدودیت‌های (۱۳) الی (١٦) بیان‌گر آن هستند اگر وسیله نقلیه v– اُم در سناریو s– اُم زودتر از زمان t_{uis} به مشتری i– اُم سرویس‌دهی نماید باید تمام تقاضای مشتری i– اُم را به اندازه D_i از قرارگاه مرکزی با خود حمل نماید. این رویکرد باعث می‌شود که شرکت توزیع کننده زودتر از سایر رقبا شروع به سرویس‌دهی کند و تمامی سود را کسب نماید. در صورتی که زمان شروع سرویس‌دهی به مشتری i– اُم بعد از t_{uis} باشد در آن صورت سود قابل کسب فقط به میزان مقدار تقاضای مستقل خواهد بود. محدودیت‌های (۱۷) الی (۲۰) مربوط به بیشینه‌سازی سود هستند. محدودیت (۲۱) مربوط به حذف زیر گردش‌ها و محدودیت (۲۲) مربوط به متغیرهای مدل است.

همان‌طور که در توضیح محدودیت‌های (۱۳) الی (١٦) بیان شد، استراتژی بارگیری کالا از قرارگاه مرکزی بر مبنای استراتژی زمان شروع سرویس دهی به مشتریان تعریف شده است. در صورتی که زمان شروع سرویس‌دهی به مشتری i – اُم در سناریو

Model (1) (۷)

$$\text{Max } Z=\sum_{s\in\Omega}\sum_{i=1}^{n}\left(o_{is}d_{tdi}+q_{is}\left(\frac{t_{uis}-t_i}{t_{uis}-t_{lis}}\right)d_{tdi}\right)$$

s.t.

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{v}^{nv}x_{ij}^{v}=1 \qquad j=2,\dots,n \tag{۸}$$

$$\sum_{j=1}^{n}\sum_{v=1}^{nv}x_{ij}^{v}=1 \qquad i=2,\dots,n \tag{۹}$$

$$\sum_{j=0}^{n}x_{ij}^{v}-\sum_{j=0}^{n}x_{ji}^{v}=0 \qquad i=0,1,2,\dots,n \quad v=1,\dots,nv \tag{۱۰}$$

$$\sum_{i=1}^{n}s_i\sum_{j=1}^{n}x_{ij}^{v}+\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}t_{ij}\,x_{ij}^{v}\le T \qquad v=1,\dots,nv \tag{۱۱}$$

$$t_j=\sum_{i=1}^{n}t_i\sum_{v=1}^{nv}x_{ij}^{v}+\sum_{i=1}^{n}\sum_{v=1}^{nv}(t_i+t_{ij})\,x_{ij}^{v} \qquad j=2,\dots,n \tag{۱۲}$$

$$\sum_{i=2}^{n}(D_i-d_{tdi}z_{is})\sum_{j=1}^{n}x_{ij}^{v}-\delta_s\le k_v \qquad v=1,2,\dots,nv \quad s\epsilon\Omega \tag{۱۳}$$

$$(t_{uis}-t_i)-M(y_i)\le 0 \qquad i=1,2,\dots,n \quad s\in\Omega \tag{۱٤}$$

$$(t_{uis}-t_i)-M(z_{is})\ge 0 \qquad i=1,2,\dots,n \quad s\in\Omega \tag{۱۵}$$

$$z_{is}+y_{is}=1 \qquad i=1,2,\dots,n \quad s\in\Omega \tag{۱٦}$$

$$(t_{uis}-t_i)+M(1-q_{is})\ge 0 \qquad i=1,2,\dots,n \quad s\in\Omega \tag{۱۷}$$

$$(t_{lis}-t_i)+M(1-o_{is})\ge 0 \qquad i=1,2,\dots,n \quad s\in\Omega \tag{۱۸}$$

$$(t_{lis}-t_i)+M\varpi_{is}\le 0 \qquad i=1,2,\dots,n \quad s\in\Omega \tag{۱۹}$$

$$q_{is}+\varpi=1 \qquad i=1,2,\dots,n \quad s\in\Omega \tag{۲۰}$$

$$\sum_{v=1}^{nv}\sum_{j\in S}\sum_{j\notin S}x_{ij}^{v}\le |s|-r(s) \qquad \forall\, S\subseteq A-\{1\} \quad s\ne\phi \tag{۲۱}$$

$$x_{ij},o_{is},y_{is},z_{is},q_{is},\varpi_{is}\in[0,1] \tag{۲۲}$$

s– اُم قبل از زمان t_{uis} باشد، بنابراین $(t_{uis}-t_i)\ge 0$ خواهد شد و بر مبنای روابط (۱٤) الی (۱٦) متغیرهای y_i و z_i به ترتیب یک و صفر خواهند شد. این رویکرد باعث خواهد شد که در محدودیت (۱۳) وسیله نقلیه v–اُم در قرارگاه مرکزی تمامی تقاضا، شامل مجموع تقاضای وابسته به زمان و مستقل از زمان را بارگیری نماید. در صورتی که زمان شروع سرویس‌دهی به مشتری i –اُم بعد از زمان t_{uis} باشد، در این صورت $(t_{uis}-t_i)\le 0$ خواهد بود و بنا به روابط (۱٤) الی (۱٦) متغیرهای

y_i و z_i به ترتیب صفر و یک خواهند شد. بنابراین در محدودیت (۱۳) وسیله نقلیه فقط تقاضای مستقل از زمان (d_{ini}) را از قرارگاه مرکزی حمل خواهد نمود. با مقایسه مدل ریاضی مذکور با آن‌چه در ادبیات موضوع اشاره شده، مشخص می‌شود که در زمینه بهینه‌سازی استوار مساله مسیریابی وسایط نقلیه در حالت رقابتی با در نظر گرفتن عدم قطعیت زمان شروع سرویس‌دهی رقبا به مشتریان برای اولین بار در مورد مطالعه قرار گرفته شده است.

۳. قطعی نمودن مدل ریاضی بوسیله مدل استوار سناریو محور

احتمال آن که مدل (۱) به ازای تمامی ســناریوها $s\in \Omega$ به طور همزمان موجه و بهینه باشـد بسـیار کم اسـت، به همین دلیل لازم اسـت که مبادله بین اسـتواری مدل و اسـتواری جواب بررسی و ارزیابی شـود. در ادامه پس مدل بهینه‌سـازی استوار سناریو محور نحوه ارایه خواهد شد:

۳-۱ مدل استوار سناریو محور

از دیدگاه مول‌وی و همکاران [Mulvey, et al. 1995] دو

Model (3):

$$\text{Min}\ \ \sigma(\text{x}, y_1, y_2, \dots, y_s) + \omega\rho(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_s) \qquad (۲۷)$$

s.t.

$$Ax = b \qquad (۲۸)$$

$$B_s x + C_s y + \delta_s = e_s \qquad \forall\, s \in \Omega \qquad (۲۹)$$

$$x \geq 0 \quad y_s \geq 0 \quad \delta_s \geq 0 \qquad \forall\, s \in \Omega \qquad (۳۰)$$

تعریف مهم در مدل‌سازی مسایل استوار وجود دارد. جواب استوار و مدل استوار که در ادامه به هر یک اشاره خواهد شد. جواب مدل بهینه‌سازی هنگامی استوار شناخته می‌شود که برای همه سناریوهای تعریف شده نزدیک به بهینه باقی بماند. همچنین هنگامی مدل استوار نامیده می‌شود که تقریبا برای همه سناریوهای داده‌های ورودی موجه باشد. در مدل بهینه‌سازی استوار دو نوع متغیر طراحی و کنترل وجود دارد. در متغیرهای طراحی ثابت و قطعی هستند و داده‌های آنها تحت هیچ شرایط تغییر نمی‌کنند اما در متغیرهای کنترلی داده‌های ورودی غیر قطعی هستند. برای بیان بهتر موضوع مدل برنامه‌ریزی خطی زیر را در نظر بگیرید.

Model (2)

$$\text{Min}\ cx + dy \qquad (۲۳)$$

s.t.

$$Ax = b \qquad (۲٤)$$

$$Bx + Cy = e \qquad (۲٥)$$

$$x, y \geq 0 \qquad (۲٦)$$

در مدل فوق x بردار متغیرهای طراحی و y بردار متغیرهای کنترل هستند. همچنین A,B, C پارامترهای مدل هستند و e و b بردار مقادیر سمت راست هستند. به منظور تعریف مساله بهینه‌سازی استوار، هر یک از پارامترهای غیرقطعی تحت یک سناریو s و احتمال وقوع پارامترهای غیرقطعی سناریو s شامل $\{\text{B}_\text{s}, \text{C}_\text{s}, \text{d}_\text{s}\ \text{and}\ \text{e}_\text{s}\}$ با نماد p_s تعریف می‌شود و مجموعه سناریو ها با نماد $\Omega = \{1,2, \dots, \text{S}\}$ تعریف می‌شود بطوری که $\sum_{s=1}^{S} p_s = 1$ خواهد بود. همچنین متغیر کنترلی y، که یک متغیر تنظیمی است طوری تعریف می‌شود که وقتی یک سناریو تحقق می‌یابد، می‌تواند به عنوان y_s برای هر سناریو s نشان داده شود. به دلیل غیرقطعی بودن پارامتر، مدل ممکن است برای برخی سناریوها نشدنی باشد. به این منظور δ_s، امکان ناپذیری مدل را در سناریو s نشان می‌دهد. اگر مدل شدنی باشد، δ_s صفر خواهد بود، در غیر این‌صورت، δ_s مقدار مثبت به خود می‌گیرد [Pan and Nagi, 2010]. یک مدل بهینه‌سازی پایدار به در روابط ذیل نشان داده شده است:

قسمت اول رابطه (۲۷)، $\{\text{y}_1, \text{y}_2, \dots, \text{y}_\text{s}\}$ برای هر سناریو $\text{s}\in \Omega$، مجموعه‌ای از متغیرهای کنترلی تعریف می‌شود. قسمت دوم پایداری مدل را نشان می‌دهد که شامل جواب‌های دارای جریمه که تقاضا در یک سناریو را برآورده نمی‌کنند یا محدودیت‌هایی فیزیکی دیگر نظیر ظرفیت را نقض می‌کنند. از

ξ برای نشان دادن $f(x, y)$، 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 می‌تواند باعث تغییرات عمده در تابع هدف شود.مول‌وی و همکاران [Mulvey et al. 1995]معادله زیر را برای ارائه پایداری جواب به‌کار برد:

$$\sigma(o) = \sum_{s\in\Omega} p_s\,\xi_s + \gamma \sum_{s\in\Omega} p_s(\xi_s - \sum_{s'\in\Omega} p_{s'}\,\xi_{s'})^2 \qquad (۳۱)$$

بطوری که γ یک مقدار ثابت مثبت است. رابطه (۳۱) یک عبارت درجه دوم غیر خطی است به همین جهت یو و لی [Yu and Li, 2000] به منظور خطی‌سازی معادله درجه دوم یک اختلاف مطلق را به جای عبارت درجه دوم استفاده نمودند که در رابطه (۳۲) نشان داده شده است:

$$\sigma(o) = \sum_{s\in\Omega} p_s\,\xi_s + \gamma \sum_{s\in\Omega} p_s|\xi_s - \sum_{s'\in\Omega} p_{s'}\,\xi_{s'}| \qquad (۳۲)$$

گرچه تابع (۳۲) یک تابع غیرخطی است، می‌تواند با تبدیل مساله به یک مدل برنامه‌ریزی خطی دارای تابع هدف خطی با محدودیت‌های خطی و با واردکردن دو متغیر اختلافی نامنفی بهینه شود. بر اساس مقاله لئونگ و چن [Leung and Chan, 2009] به جای کمینه‌سازی مجموع اختلافات قدر مطلق از مساله برنامه‌ریزی خطی استفاده می‌شود.

$$\text{Min } \sum_{s\in\Omega} p_s\,\xi_s + \gamma \sum_{s\in\Omega} p_s[(\xi_s - \sum_{s'\in\Omega} p_{s'}\,\xi_{s'}) + 2\theta_s] \qquad (۳۳)$$

s.t.

$$\xi_s - \sum_{s\in\Omega} p_s\,\xi_s + \theta_s \ge 0 \qquad \forall\, s\in\Omega \qquad (۳٤)$$

$$\theta_s \ge 0 \qquad \forall\, s\in\Omega \qquad (۳٥)$$

از آن جایی‌که ξ_s بزرگ‌تر از $\sum_{s\in\Omega} p_s\xi_s = 1$ است، بنابراین $\theta_s = 0$ است. درحالتی‌که مقدار $\sum_{s\in\Omega} p_s\xi_s$ بزرگ‌تر از ξ_s است، در نتیجه، $\theta_s = \sum_{s\in\Omega} p_s\xi_s - \xi_s$.

عبارت دوم در تابع هدف، $\rho(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_s)$، یک تابع احتمال جریمه نشدنی‌بودن است و برای جبران خطاهای محدودیت‌های کنترل در برخی سناریوها به‌کار می‌رود. خطا در قیدهای کنترل به معنی به‌دست آمدن جواب‌های نشدنی در برخی سناریوها است. با استفاده از وزن ω بین استواری جواب و پایداری مدل در فرایند تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده می‌شود. به همین منظور تابع هدف می‌تواند به صورت ذیل ارایه شود:

$$\text{Min } \sum_{s\in\Omega} p_s\,\xi_s + \gamma \sum_{s\in\Omega} p_s[(\xi_s - \sum_{s'\in\Omega} p_{s'}\,\xi_{s'}) + 2\theta_s] + \omega \sum_{s\in\Omega} p_s\,\delta_s \qquad (۳٦)$$

با توجه به توضیحات فوق مدل مسیریابی وسایط نقلیه در حالت رقابتی با در نظر گرفتن غیرقطعی بودن زمان شروع سرویس‌دهی رقبا به مشتریان (مدل ۱) بر مبنای رویکرد بهینه‌سازی استوار سناریو محور به صورت مدل (٤) ذیل بازنویسی می‌شود:

Model (4):

$$\begin{aligned}\text{Max } Z = \sum_{s\in\Omega} p_s & \left[\sum_{i=1}^{n}\left(o_{is}d_{tdi} + q_{is}\left(\frac{t_{uis}-t_i}{t_{uis}-t_{lis}}\right)d_{tdi}\right)\right] \\ & + \gamma \sum_{s\in\Omega} p_s\left[\left(\sum_{i=1}^{n}\left(o_{is}d_{tdi} + q_{is}\left(\frac{t_{uis}-t_i}{t_{uis}-t_{lis}}\right)d_{tdi}\right)\right.\right. \\ & \left.\left. - \sum_{s'\in\Omega} p_{s'}\left[\sum_{i=1}^{n}\left(o_{is'}d_{tdi} + q_{is'}\left(\frac{t_{uis'}-t_i}{t_{uis'}-t_{lis'}}\right)d_{tdi}\right)\right]\right) + 2\theta_s\right] - \omega \sum_{s\in\Omega} p_s\,\delta_s\end{aligned} \qquad (۳۷)$$

s.t.

محدودیت‌های ۸ الی ۲۲

$$\sum_{i=1}^{n}\left(o_{is}d_{tdi}+q_{is}\left(\frac{t_{uis}-t_i}{t_{uis}-t_{lis}}\right)d_{tdi}\right)-\sum_{s\in\Omega}p_s\left(\sum_{i=1}^{n}\left(o_{is}d_{tdi}+q_{is}\left(\frac{t_{uis}-t_i}{t_{uis}-t_{lis}}\right)d_{tdi}\right)\right)+\theta_s\geq 0 \quad s\in\Omega \tag{۳۸}$$

$$\theta_s\geq 0\,, integer \tag{۳۹}$$

٤. الگوریتم تکامل تفاضلی بهبود یافته

به منظور حل مدل پیشنهادی در این بخش ابتدا الگوریتم تکامل تفاضلی ارایه و سپس ضمن معرفی استراتژی‌های الگوریتم مذکور الگوریتم تکامل تفاضلی بهبود یافته که یکی دیگر از جنبه‌های نوآوری این مقاله است ارایه خواهد شد. تکامل تفاضلی یک الگوریتم بهینه‌سازی تصادفی و مبتنی بر جمعیت است که برای اولین بار توسط استورن و پرایس [Storn and Price, 1997] ارائه شد و به علت سرعت بالا و قدرت خوب آن در حل مسائل و سادگی دارای کاربردهای فروانی در حل مسایل بهینه‌سازی دارد. بر خلاف سایر الگوریتم‌ها در این الگوریتم، ابتدا عملگر جهش به منظور ایجاد جمعیت فرزندان ایجاد می‌شود و سپس عملگر تقاطع بر روی اعضای جمعیت اعمال می‌شود[Price and Lampinen, 2005]. شبه‌کد اجرای الگوریتم تکامل تفاضلی در شکل دو نشان داده شده است.

٤-١ عملگر جهش

در الگوریتم تکامل تفاضلی به ازای هر بردار $x_i(t)$ به طوری که $i=\{1,2,\dots n_s\}$ یک بردار آزمون $u_i(t)$ تعریف می‌شود. از این بردار در عملگر تقاطع به منظور ایجاد بردار فرزند $x'_t(t)$ استفاده خواهد شد. به منظور اجرای عملگر جهش گام‌های ذیل را اجرا می‌شود:

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 $i\neq i_1\neq i_2\neq i_3$ و $i_2,i_3\sim U(1,n_s)$.

گام سوم: بردار آزمون $u_i(t)$ را به صورت ذیل تعریف می‌شود.

$$u_i(t)=x_i(t)+\beta\big(\hat{x}(t)-x_i(t)\big)+\beta\big(x_{i_2}(t)-x_{i_3}(t)\big) \tag{٤٠}$$

به طوری که $x_{i2,k}(t)-x_{i3,k}(t)$ نشان دهنده بردار تفاضل k–اُم است و β عددی مثبت که جهت کنترل اندازه‌ی تغییرات اعمال شونده به بردار هدف است.

٤-٢ عملگر تقاطع

به منظور ایجاد بردار فرزند $x'_t(t)$، از ترکیب گسسته بردار آزمون $u_i(t)$ و بردار والد $x_i(t)$ استفاده بر طبق رابطه ذیل استفاده می‌شود.

$$x'_{ij}(t)=\begin{cases}u_{ij}(t) & if\ j\in\varsigma\\ x_{ij}(t) & otherwise\end{cases} \tag{٤١}$$

شمارشگر تعداد تکرارها را برابر صفر قرار دهید$t = 0$.

به تعدادn_s 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 نشده‌اند 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 $f(x_i(t))$ محاسبه نمائید.

بردار آزمون $u_i(t)$ را با استفاده از عملگر جهش بوجود آورید.

با استفاده از بردار آزمون $u_i(t)$ بردار فرزند$x_t'(t)$ را با استفاده از عملگر تقاطعی بدست بیاورید.

اگر تابع برازش بردار آزمون$f(x_t'(t))$ از تابع برازش والد$f(x_i(t))$ بهتر بود **آنگاه:**

عضو فرزند $x_t'(t)$ 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 ۲. شبه کد الگوریتم تکامل تفاضلی

ژنj^* را از مجموعه $\{1,2,\ldots,n_x\}$ بطور تصادفی انتخاب کنید و آن را به مجموعه Jاضافه کنید.

پارامتر کنترلی p_r را مقداردهی کنید.

به ازای تمام ژن‌های $j\epsilon\{1,2,\ldots,n_x\}$ مراحل ذیل را تکرار کنید:

اگر $p_r > (0,1)$ یا $J \neq j^*$باشد:

ژن j–اُم را به مجموعهJ اضافه کنید.

پایان (اگر)

پایان (به ازای)

پایان حلقه‌ی تکرار (تا هنگامی که).

شکل ۳. شبه کد الگوریتم عملگر تقاطع

به طوری که $x_{ij}(t)$ نشان دهنده عنصر j–اُم بردار $x_i(t)$ است و ς نشان دهنده مجموعه‌ای از نقاط تقاطع است که عملگر تقاطع در آن اعمال می‌شود. در این مقاله از عملگر تقاطع دو جمله‌ای استفاده شده است، بطوری که اگر n_xنشان دهنده تعداد مشتریان یا به عبارت دیگر تعداد ژن های بردار$x_i(t)$ تعریف شود آنگاه نقاط تقاطع ς از میان اعداد مجموعه‌ی$\{1,2,\ldots,n_x\}$ به صورت تصادفی‌انتخاب می‌شوند.

در روش دو جمله‌ای p_r نشان دهنده احتمال انتخاب شدن هر ژن از بردار آزمون $u_i(t)$ است. شبه کد الگوریتم عملگر تقاطع دوجمله‌ای در شکل (۳) نشان داده شده است.

۳–٤الگوریتم تکامل تفاضلی بهبود یافته

مطالعات تجربی نشان می دهد مدل $DE/rand/1/bin$ که در آن بردار هدف به طور تصادفی انتخاب می‌شود تنوع خوبی

در جوابها ایجاد می‌کنند و قابلیت مناسبی برای همگرایی جواب‌ها دارند[Qin and Suganthan, 2005].

$$u_i(t) = x_i(t) + \beta(\hat{x}(t) - x_i(t)) + \beta(x_{i_2}(t) - x_{i_3}(t)) \quad (٤٢)$$

که در آن بردار تفاضل اول، از اختلاف $\hat{x}(t)$ بهترین بردار موجود با بردار والد $x_i(t)$ بدست می‌اید و بردار تفاضل دوم از اختلاف دو بردار $x_{i_2}(t), x_{i_3}(t)$ که به طور تصادفی انتخاب شده‌اند، محاسبه شده است.

از سوی دیگر، استراتژی تکامل تفاضلی با عملگر جهشی بهترین عضو موجود باعث بوجود آمدن همگرایی در جواب‌ها خواهد شد که در رابطه ذیل نشان داده شده است [Qin and Suganthan, 2005]; [L´opez Cruz, et al. 2005].

$$u_i(t) = x_i(t) + \beta(\hat{x}(t) - x_i(t)) + \beta(x_{i_2}(t) - x_{i_3}(t)) \quad (٤٣)$$

که در آن بردار تفاضل اول، از اختلاف $\hat{x}(t)$ بهترین بردار موجود با بردار والد $x_i(t)$ بدست می‌آید و بردار تفاضل دوم از اختلاف دو بردار $x_{i_2}(t), x_{i_3}(t)$ که به طور تصادفی انتخاب شده‌اند، محاسبه شده است.

به منظور استفاده بهینه از استراتژی‌های مذکور از الگوریتم تفاضلی بهبود یافته استفاده شده است به طوری که در آن هر یک از استراتژی‌ها به صورت پویا با یکدیگر جابجا می‌شوند. به این صورت که، هر یک از استراتژی‌ها به صورت احتمالی به استفاده خواهند شد. اگر $p_{s,1}$ احتمال استفاده از استراتژی $DE/rand/1/bin$ به منظور انتخاب اعضای نسل بعدی تعریف شود آنگاه $p_{s,2} = 1 - p_{s,1}$ احتمال استفاده از استراتژی $DE/current - to\ best/2/bin$ تعریف می‌شود. احتمال $p_{s,1}$ بر مبنای رابطه ذیل تعریف می‌شود.

به طوری که $n_{s,1}$ و $n_{s,2}$ به ترتیب نشان دهنده تعداد اعضای فرزند $x'_i(t)$ است که به ترتیب بر مبنای استراتژی انتخاب

$$p_{s,1} = \frac{n_{s,1}(n_{s,2} + n_{f,2})}{n_{s,2}(n_{s,1} + n_{f,1}) + n_{s,1}(n_{s,2} + n_{f,2})} \quad (٤٤)$$

تصادفی و انتخاب بهترین عنصر در نسل بعدی $c(t+1)$ انتخاب شده‌اند و $n_{f,1}$ و $n_{f,2}$ تعداد اعضایی فرزندی هستند که در هر استراتژی به نسل بعدی انتقال نمی‌یابند. هر چه تعداد فرزندان انتخاب شده برای انتقال به نسل بعدی از یک استراتژی بیشتر باشد احتمال انتخاب آن استراتژی در نسل بعدی بیشتر است. تنظیم پارامترهای الگوریتم با سعی و خطا و حل چند مساله نمونه انجام گرفت و $\beta = 0.5$ و $n_s = 200$ و $p_r = 0.6$ انتخاب شده است که دارای عملکرد مناسبی در حل مدل پیشنهادی هستند.

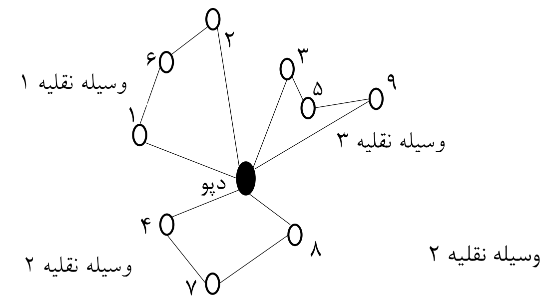
٤-٤ نمایش جواب‌ها

به منظور نشان دادن جواب ها در مساله مسیریابی وسایط نقلیه به صورت پیوسته جهت حل مدل پیشنهادی توسط الگوریتم تکامل تفاضلی، بردار $x_i(t)$ به اندازه $\tau\, n_x$ ژن طوری تعریف نمایید که در آن n_x نشان دهنده تعداد مشتریان است و τ نشان دهنده تعداد روزهای سرویس‌دهی است. به ازای هر ژن $j\epsilon\{1, \ldots, \tau\, n_x\}$ یک عدد تصادفی صحیح در بازه $(0, kv + 1 - \varepsilon]$ که نشان دهنده شماره وسیله نقلیه تخصیصی به مشتری j – اُم است در صورتی تخصیص می‌یابد که محدودیت‌های ظرفیت وسیله نقلیه، زمان سرویس‌دهی، ترکیب در روزهای سرویس‌دهی و سایر قیود مساله رعایت شود، در غیراین‌صورت مقدار کمتر از یک به مشتری j – اُم تخصیص می‌یابد. 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. با مرتب نمودن مقدار اعشاری تخصیص داده به صورت صعودی ترتیب عبور وسیله نقلیه از تور مشخص می‌شود. شکل(٤) نشان

دهنده نحوه نمایش جواب‌ها برای بردار $x_i(t)$ با ۹ مشتری (ژن) و ۳ وسیله نقلیه نشان داده شده است.

شکل ٤. روش نمایش جواب‌ها در مدل پیشنهادی

۳/۳	۳/۲	۳/۱	۲/۳	۲/۲	۲/۱	۱/۳	۱/۲	۱/۱
۹	۵	۳	۸	۷	٤	۲	٦	۱
ترتیب مسیر عبور وسیله نقلیه سوم			ترتیب مسیر عبور وسیله نقلیه دوم			ترتیب مسیر عبور وسیله نقلیه اول		



۵. نتایج محاسباتی

در این قسمت به منظور مقایسه عملکرد الگوریتم تکامل تفاضلی بهبود یافته با استراتژی‌های انتخاب تصادفی و انتخاب بهترین عضو نمونه مسایل در ابعاد کوچک، متوسط بزرگ ایجاد و نتایج مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در بخش اول، مسایل در ابعاد کوچک و متوسط توسط استراتژی‌های مختلف الگوریتم تکامل تفاضلی حل و نتایج با جواب‌های بهینه ناشی از روش حل دقیق مقایسه خواهد شد. در قسمت دوم، مسایل ابعاد بزرگ ایجاد شده و توسط استراتژی الگوریتم تکامل تفاضلی پیشنهادی حل و دقت محاسباتی به همراه زمان محاسباتی بررسی خواهد شد. کدنویسی استراتژی‌های الگوریتم تکامل تفاضلی توسط نرم افزار MATLAB 7 با پردازنده core i7 با توانایی GHZ ۲/۳ و حافظه‌ی داخلی GB ۲ استفاده انجام شده است.

۵-۱ ارزیابی استراتژیهای الگوریتم تکامل تفاضلی پیشنهادی در حل مسایل در ابعاد کوچک و متوسط

به منظور بررسی توانمندی استراتژی‌های معرفی شده در الگوریتم تکامل تفاضلی به منظور حل مدل ارایه شده ۹ نمونه مساله در ابعاد کوچک و متوسط توسط استراتژی‌های مختلف الگوریتم تکامل تفاضلی حل و نتایج با جواب‌های بهینه ناشی از روش حل دقیق CPLEX با استفاده از نرم افزار GAMS 23.6 مقایسه شد. داده‌های مورد نیاز به منظور ایجاد مساله در ابعاد کوچک به صورت توزیع یکنواخت ایجاد و در جدول (۱) نشان داده شده است. در جدول (۲)، نتایج محاسباتی حل مسایل در ابعاد کوچک و متوسط نشان داده شده است. ستون اول نشان‌دهنده شماره مساله است. در هر یک از استراتژیهای الگوریتم تکامل تفاضلی و روش حل دقیق، ستون اول و دوم برای هریک از روش‌های حل به ترتیب نشان دهنده پاسخ بهینه و زمان محاسباتی است و ستون آخر نشان دهنده خطای محاسباتی اختلاف مقدار تابع هدف حل دقیق و استراتژی مورد بررسی است.

جدول ۱. داده‌های اسمی مساله در ابعاد کوچک و متوسط

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

همان‌طور که در جدول (۲) نشان داده شده است تمامی الگوریتم‌ها ۲۰۰ مرتبه تکرار شد و نتایج گزارش شده است. در تمامی نمونه‌ها تکامل تفاضلی بهبود یافته توانسته است جواب بهینه را بدون خطا محاسبه نماید.

در استراتژی‌های DE/current – to best/2/bin و DE/rand/1/bin تنها در دو نمونه مساله خطا مشاهده شد که میانگین خطای آنها به ترتیب برابر ۰/۱۸ ٪ و ۰/۱۲٪ است که نشان‌دهنده کارآیی استراتژی‌های استفاده شده به منظور حل مساله پیشنهادی است. میانگین زمان محاسباتی روش حل دقیق برابر ۲۷/٤ ثانیه است در حالی که استراتژی DE/current – to best/2/bin با میانگین زمان ٥/٦ ثانیه دارای کمترین میانگین زمان حل در مقایسه با سایر استراتژی‌های پیشنهادی است.

۲-٥ ارزیابی استراتژی‌های الگوریتم تکامل تفاضلی پیشنهادی در حل مسایل در ابعاد بزرگ

از آنجایی که در ادبیات موضوع نمونه مسایل در ابعاد بزرگ در مسیریابی دوره‌ای وسایط نقلیه با پنجره زمانی وجود ندارد از نمونه مسایل استاندارد مسیریابی وسایط نقلیه دوره ای با پنجره زمانی ارایه شده توسط کوردیو و همکاران [Cordeau et al. 1997] استفاده می‌شود.

جدول ۲. حل مسایل در ابعاد کوچک

نمونه مساله	روش CPLEX تابع هدف	روش CPLEX زمان (ثانیه)	الگوریتم IDE تابع هدف	الگوریتم IDE زمان (ثانیه)	الگوریتم IDE خطا (٪)	$DE/current\ to\ best/2/bin$ تابع هدف	$DE/current\ to\ best/2/bin$ زمان (ثانیه)	$DE/current\ to\ best/2/bin$ خطا (٪)	$DE/rand/1/bin$ تابع هدف	$DE/rand/1/bin$ زمان (ثانیه)	$DE/rand/1/bin$ خطا (٪)
۱	۷,٤٥۳	۲٥/۲	۷,٤٥۳	٥/۳	۰/۰	۷,٤٥۳	٤/۲	۰/۰	۷,٤٥۳	٤/۹	۰/۰
۲	۱۲,٦۰۷	۲٦/۲	۱۲,٦۰۷	٦/٥	۰/۰	۱۲,٦۰۷	٦/٥	۰/۰	۱۲,٦۰۷	٥/۸	۰/۰
۳	۱٥,۳٥٤	۲٥/٥	۱٥,۳٥٤	٥/۲	۰/۰	۱٥,۳٥٤	٤/۸	۰/۰	۱٥,۳٥٤	٥/۱	۰/۰
٤	۲۱,٤۹۷	۲۷/۸	۲۱,٤۹۷	۷/٤	۰/۰	۲۱,٤۹۷	٦/۳	۰/۰	۲۱,٤۹۷	۷/۱	۰/۰
٥	۲۹,٦۳٤	۲٤/۱	۲۹,٦۳٤	٤/۸	۰/۰	۲۹,٦۳٤	٥/۱	۰/۰	۲۹,٦۳٤	۳/۲	۰/۰
٦	۲۲,۳٦۸	۲۸/٤	۲۲,۳٦۸	٦/۲	۰/۰	۲۲,۳٦۸	٥/۹	۰/۰	۲۲,۳٦۸	٥/۳	۰/۰
۷	۳۲,٦۹۸	۳۰/۲	۳۲,٦۹۸	۷/۹	۰/۰	۳۲,۱۷۳	٦/٤	۱/٦۳	۳۲,٦۹۸	۷/۲	۰/۰
۸	۳٥,۳٦۷	۳۱/۳	۳٥,۳٦۷	۷/۷	۰/۰	۳٥,۳٦۷	٦/۹	۰/۰	۳٤,۹۹۳	۷/۲	۱/۰۷
۹	۳٦,۷۸۳	۲۷/۸	۳٦,۷۸۳	٦/٥	۰/۰	۳٦,۷۸۳	٥/۱	۰/۰	۳٦,۷۸۳	٦/۲	۰/۰
میانگین	۲۳,۷٥۱	۲۷/۳۹	۲۳,۷٥۱	٦/۳۹	۰/۰	۲۳,٦۹۲	٥/٦	۰/۱۸	۲۳,۷۰۹	٥/۷۸	۰/۱۲

جدول ۳. حل مسایل در ابعاد بزرگ

نمونه مساله	الگوریتم IDE تابع هدف	الگوریتم IDE زمان (ثانیه)	الگوریتم IDE خطا (٪)	$DE/current\ to\ best/2/bin$ تابع هدف	$DE/current\ to\ best/2/bin$ زمان (ثانیه)	$DE/current\ to\ best/2/bin$ خطا (٪)	$DE/rand/1/bin$ تابع هدف	$DE/rand/1/bin$ زمان (ثانیه)	$DE/rand/1/bin$ خطا (٪)
۱	۱۰,۰۳٥/۹	۳٦٥/۸	۰/۰	۱۰,۰۳٥/۹	۲۸٥/۳	۰/۰	۱۰,۰۳٥/۹	۱,۰۲۳/٥	۰/۰
۲	۲۰,٤۲۹/۳	٥۹۸/۳	۰/۰	۲۰,٤۲۹/۳	٥٥۰/٦	۰/۰	۲۰,٤۲۹/۳	٥۰۳/۹	۰/۰
۳	۲۳,۷٥۲/۹	۱,۳٦۷/٦	۰/۰	۲۲,۹۸۳/۹	۱,۱۳۷/٦	۳/۳٥	۲۲,۸۹٥/۷	۱,۰۰۲/۹	۳/۷٤
٤	۲٤,۲۷۸/۰	۱,٦۸۲/٥	۰/۰	۲٤,۲۷۸/۰	۱,٥٤۹/۹	۰/۰	۲۳,۸۳٦/۱	۱,۸۰۱/٦	۱/۸٥
٥	۱۰,۸٦۹/٥	۱,٦۸٦/۸	۱/٤	۱۱,۰۲۸/٥	۱,۸۳٦/۳	۰/۰	۱۱,۰۲۸/٥	٥۱,۱۲٤	۰/۰

٦	٤٦,٧٢٣/٤	٢,٣٦٧/٧	٠/٠	٤٦,٧٢٣/٤	٢,٤٣٥./٢	٠/٠	٤٥,٦٤٢/٤	٢,٥٧٥/٣	٢/٣٧
٧	٤٣,٠٠٩/٣	٦٢٤/٦	١/٣٥	٤٢,٨٢٤/٣	٥٨٣/٦	١/٧٩	٤٣,٥٨٩/٨	١,٤٢٣/٨	٠/٠
٨	٣٣,٢٦٩/٤	١,٦٥٨/٦	٢/٠١	٣٣,٩٣٧/٦	١,٤٣٢/٨	٠/٠	٣٣,٢٥٣/٦	١,٢٣٥/٦	٢/٠٦
٩	٢٧,٢٥٧/٣	١,٩٣٥/٢	٠/٠	٢٦,٥٣٢/٤	١,٩٢٤/٥	٢/٧٣	٢٧,٢٥٧/٣	١,٩٢١/٣	٠/٠
١٠	٤٦,٢٣٩/٦	٢,٨٣٦/٦	٠/٠	٤٦,٢٣٩/٦	٢,٧٥٢/٣	٠/٠	٤٥,١٢٣/٥	٢,٨٣٩/٣	٢/٤٧
میانگین	٢٨,٥٨٦/٤	١,٥١٢/٣	٠/٤٨	٢٨,٥٠١/٢	١,٤٤٨/٨	٠/٧٩	٢٨,٣٠٩/٢١	١,٥٤٥/١	١/٢٥

با توجه به تفاوت مدل پیشنهادی با مساله وسایط نقلیه با پنجره زمانی در نمونه مسایل استاندارد تغییراتی اعمال شد. به ازای هر سناریو حد بالا و حد پایین پنجره زمانی به عنوان حد بالا و پایین زمان رسیدن وسایط نقلیه در نظر گرفته شد. به طوری که حد بالای زمان رسیدن به مشتریان در تمامی سناریوها t_{uis} به صورت توزیع یکنواخت در بازه [٦٠, ١٥] و حد پایین زمان رسیدن رقبا به مشتریان در تمامی سناریوها tl_{is} به صورت توزیع یکنواخت در بازه [٤٠, ١٠] در نظر گرفته شد.

جدول (٣) عملکرد استراتژی‌های پیشنهادی در نمونه مسایل بزرگ در ابعاد بزرگ نشان داده شده است. ستون اول نشان دهنده شماره نمونه مساله است و هریک از استراتژی‌ها دارای سه ستون است که ستون اول نشان دهنده بهترین جواب بهینه تابع هدف، ستون دوم نشان دهنده زمان محاسباتی و ستون سوم نشان دهنده میزان خطای استراتژی مورد بررسی از بهترین جواب بدست آمده از استراتژی‌ها است. با توجه به داده‌ها، بیشترین خطا در نمونه مساله ٣ در استراتژی $DE/rand/1/bin$ مشاهده شده است و میانگین خطای الگوریتم تکامل تفاضلی بهبودیافته برابر ٠/٤٨ درصد است که کمترین میزان خطا را در مقایسه با سایر استراتژی‌ها دارا است. از نظر زمان محاسباتی، استراتژی بهترین عضو از اعضای جمعیت با میانگین ١,٤٤٦/٢ ثانیه دارای زمان محاسباتی بهتری نسبت به سایر استراتژی‌ها است. نتایج محاسباتی نشان می‌دهد جواب‌های بدست آمده توسط الگوریتم تکامل تفاضل بهبودیافته با وجود زمان محاسباتی بیشتر در مقایسه با سایر استراتژی‌های مورد بررسی دارای کیفیتی بسیار مناسب است.

٥-٣ تحلیل حساسیت

در ادامه به منظور تحلیل حساسیت نسبت به عدم قطعیت موجود در مدل و تأثیر جریمه ها، یک مثال عددی حل و نتایج حاصل از حل مساله به صورت عدم قطعیت با جواب های حاصل از حل هریک از سناریوها به صورت قطعی با یکدیگر مقایسه شده است. آزمایش مذکور دارای هشت مشتری، یک دپو و سه وسیله نقلیه است تمامی پارامترهای قطعی آن به صورت تصادفی انتخاب شده‌اند. پارامترهای غیرقطعی شامل حد بالا و پایین زمان رسیدن رقبا به مشتریان (بر حسب دقیقه) در دو سناریو به صورت تابع توزیع یکنواخت ایجاد شد.

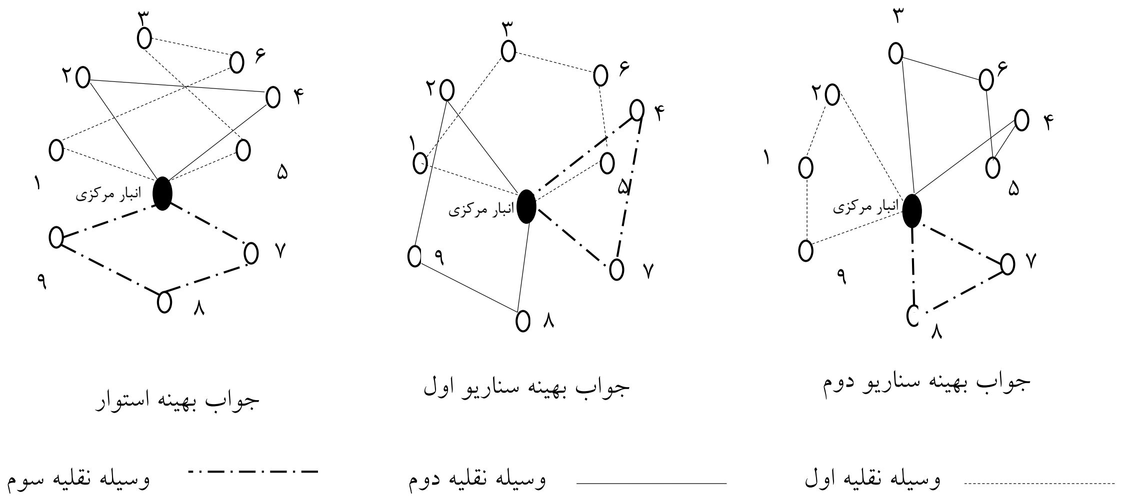
سناریوهای اول و دوم و حد پایین و بالای هر دو سناریو در جدول (٤) نشان داده شده است. در این مثال ابتدا سه مسیر توالی قطعی برای توزیع کننده رقیب در نظر گرفته شده است، سپس زمان شروع سرویس دهی به مشتریان در هر مسیر محاسبه گردید. مدل ریاضی قطعی بدون سناریو با توجه به زمان رسیدن رقیب حل و نتایج بدست آمد. بار دیگر به صورت استوار حل و نتایج با یکدگر مقایسه شد که مقدار تابع هدف برای حل مساله به صورت قطعی برای سناریو اول، دوم و مدل قطعی سناریو محور (احتمال وقوع سناریو اول و دوم به ترتیب ٠/٤ و ٠/٦ است) به ترتیب برابر ١٦,٢٥٧، ١٥,٩٥٣ و ١٥,٠٢٨ است. که سود ناشی ناشی از حل مساله بر مبنای مدل قطعی سناریو محور به ترتیب ٨ و ٦ درصد کمتر است. قیمت استواری در دیدگاه

مدیریتی بسیار مهم است. به همین جهت می توان نتیجه گرفت، اگر مدل ریاضی مذکور با در نظر گرفتن سناریو اصلی (داده‌های قطعی) حل شود جواب‌های شدنی و با کیفیت خوبی را ارایه خواهد داد اما ریسک سود از دست رفته به شدت افزایش می‌یابد. اما با استفاده از رویکرد احتمالی ریسک سود از دست رفته کاهش خواهد شد، اما سود قابل کسب کاهش خواهد یافت. بنابراین، می‌توان با پذیرش مقدار قابل قبولی از سود از دست رفته از رویکرد احتمالی برای مدل‌های غیر قطعی استفاده نمود. نحوه سرویس دهی به مشتریان توسط وسایط نقلیه به مشتریان در هر یک از رویکردهای فوق در شکل (۵) نشان داده شده است.

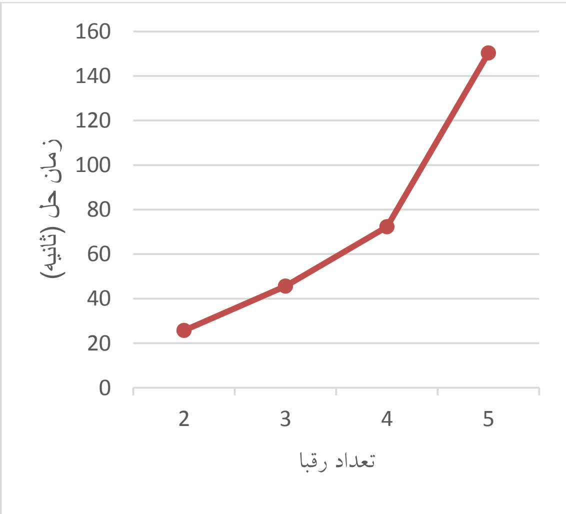
در ادامه تاثیرتعداد رقبا بر میزان سود شرکت‌های توزیع تحلیل شده است. همانطور که در شکل (٦) نشان داده شده است با افزایش تعداد رقبا سود قابل کسب برای شرکت توزیع کاهش خواهد یافت. تفاوت تابع هدف بهینه بین مدل قطعی و استوار پس از حل مدل، قیمتی است که برای جلوگیری از نشدنی بودن و یا تضمین شدنی بودن تحت همه‌ی سناریوها (حتی بدترین آنها) پرداخته می‌شود.اما همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد سناریوها تفاوت بین مدل قطعی و استوار کاهش می‌یابد. از سوی‌دیگر با توجه به شکل (۷)، با افزایش تعداد رقبا، زمان محاسباتی استوار به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد.

جدول ٤. داده‌های آزمایش

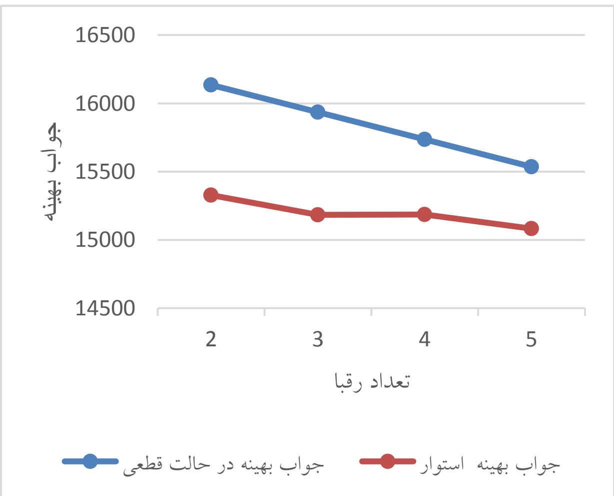
مشتری	سناریو اول		سناریو دوم	
	حد پایین	حد بالا	حد پایین	حد بالا
اول	۲۰	۳۰	۱۰	۳۵
دوم	۳۰	٤۰	۱۵	٤۰
سوم	۱۰	۵۰	٤۰	٦۰
چهارم	۲۰	٦۰	۱۰	۲۰
پنجم	۳۰	٤۰	۱۵	۳۰
ششم	٤۰	٦۰	٤۰	٦۰
هفتم	۳۵	۵۸	۳٦	۵۸
هشتم	٤۳	٦۲	٤۲	٦۸
نهم	٤۸	۷۵	٤۵	۷۲



شکل ٥. نحوه سرویس‌دهی به مشتریان در حالت قطعی و سناریومحور



شکل ٦. تابع هدف بهینه بین مدل قطعی و استوار



شکل ۷. زمان محاسباتی حل مساله در مدل استوار

٦. نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک مدل ریاضی استوار برای مساله مسیریابی دوره‌ای رقابتی با در نظر گرفتن عدم قطعیت زمان بازدید مشتریان توسط رقبا ارایه گردید. با توجه به دانش نویسندگان برای اولین بار عدم قطعیت موجود در زمان شروع سرویس‌دهی توسط رقبا در مدل پیشنهادی لحاظ شد. همچنین به جای یک زمان تخمینی شروع سرویس دهی، مجموعه ای از سناریوها برای زمان شروع سرویس‌دهی در مدل‌سازی در نظر گرفته شد. به منظور دستیابی به جواب بهینه از الگوریتم تکامل تفاضلی بهبود یافته استفاده شد و سپس به منظور بررسی کارآیی الگوریتم پیشنهادی، ابتدا تعداد مساله نمونه در ابعاد کوچک حل و نتایج با الگوریتم‌های حل دقیق مقایسه شد که نتایج نشان دهنده کارآیی مناسب الگوریتم پیشنهادی است. به منظور برآورد عمکرد الگوریتم پیشنهادی در ابعاد بزرگ، تعدادی مساله در ابعاد بزرگ تولید و سپس نتایج بدست آمده از الگوریتم تکامل تفاضلی بهبود یافته با سایر استراتژی‌های الگوریتم DE مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد جواب بهینه محاسباتی الگوریتم تکامل تفاضلی بهبود یافته با وجود زمان محاسباتی بیشتر در مقایسه با سایر استراتژی‌ها دارای کیفیتی مناسب‌تر است. به منظور تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود علاوه بر غیرقطعی در نظر گرفتن زمان سرویس‌دهی رقبا به مشتریان، میزان تقاضای مشتریان نیز به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شود. همچنین در نظر گرفتن رقابت در دیگر حالت‌های مساله مسیریابی می‌تواند موضوع جذابی برای تحقیقات آتی باشد.

۷. پی‌نوشت‌ها

1. Vehicle Routing Problem (VRP)
2. Vehicle Routing Problem With Time Windows
3. Robust Optimization (RO)
4. Improved Differential Evaluation (IDE)
5. Differential Evaluation (DE)

۸. مراجع

- سلامت بخش، علی‌رضا، توکلی مقدم، رضا و نوروزی، نرگس (۱۳۹۵) "مسأله مسیریابی وسایل نقلیه باز با در نظر گرفتن رضایت رانندگان: الگوریتم تکاملی چند هدفه بر مبنای تجزیه" فصل‌نامه مهندسی حمل و نقل، سال هفتم، شماره سوم، بهار ۱۳۹۵، ص ٤٤٩-٤٦٢.

- Alinaghian, M., Ghazanfari, M., Salamatbakhsh, A. and Norouzi, N. (2012) "A new competitive approach on multi-objective periodic vehicle routing problem", International Journal of Applied Operations Research, Vol. 1, pp. 33-41.

- Archetti, C., Savelsbergh, M. and Speranza, M. (2016) "Vehicle routing problem with occasional drivers", European Journal of Operational Research, Vol. 254, pp. 472–480.

- Bahri, O., Ben Amor, N. and Talbi, E. G. (2016) "Robust routes for the fuzzy multi-objective vehicle routing problem", Proc. of the 8th IFAC Conference on Manufacturing Modeling, Management and Control, pp.769-774.

- Bazgan, C. and Aissi, H. (2009) "Min-max and min-max regret versions of combinatorial optimization problems: A survey", Journal of Operational Research, Vol. 197, pp. 427-438.

- Cordeau, J. F., Gendreau, M. and Laporte, G. (1997) "A tabu search heuristic for periodic and multi-depot vehicle routing problems", Networks, An International Journal, Vol. 30, pp. 105-119.

- Das, S. and Suganthan, P. N. (2011) "Differential evolution: A survey of the stateproblem with pickup and delivery requests." In: Lin Y. K., Tsao Y. C., Lin, S.W. (Eds.) Proceedings of the Institute of Industrial Engineers Asian Conference 2013. Springer, Singapore.

- Lenstra, J. K. and Rinnooy, Kan, A. H. G. (1981) "Complexity of vehicle and scheduling problem", Networks, Vol. 11, pp. 221-227.

- Leung, S. C. H. and Chan S. S. W. (2009) "A goal programming model for aggregate production planning with resource utilization constraint", Computers & Industrial Engineering, Vol. 56, pp. 1053-1064.

- 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, pp. 209–227.

- L´opez Cruz, I. L., , Willigenburg, van L.G., and Van Straten, G. (2005) "Efficient differential evolution algorithms for multimodal optimal control problems", Applied Soft Computing, Vol. 3, pp. 97-122.

- Mulvey, J. M., Vanderbei, R. J. and Zenios, S. A. (1995) "Robust optimization of large-scale systems", Operations Research, Vol. 43, pp. 264–281.

- Norouzi, N., Sadegh-Amalnick, M. and Tavakoli-Moghadam, R. (2015) "A time-dependent vehicle routing problem developed by improved simulated annealing", Proceedings of Romanian Academy - Series A, Vol. 16, pp. 458–465.

- Norouzi, N., Tavakkoli-Moghaddam, R., Gazanfari, M., Alinaghian, M. and Salamatbakhsh, A. (2012) "A new multi-objective competitive open vehicle routing of-the-art", IEEE Transaction on Evolutionary Computation, Vol. 15, pp. 4-31.

- Dantzig, G. and Ramser, J. H. (1959) "The truck dispatching problem", Management Science, Vol. 6, pp. 80-91.

- Erera, A. L., Morales, J. C. and Savelsbergh, M. (2010) "The vehicle routing problem with stochastic demand and duration constraints", Transportation Science, Vol. 44, pp. 474–49.

- 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, pp. 677–693.

- Golden, B., Raghavan, S. and Wasil, E. A. (2008) "The vehicle routing problem: latest advances and new challenges", Operations Research/Computer Science Interfaces Series, Vol. 43. Boston: Springer.

- 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, pp. 312–323.

- Kasperski, A. and Kule, M. (2009) "Choosing robust solutions in discrete optimization problems with fuzzy costs", Journal of Fuzzy Sets and Systems, Vol. 160, pp. 384-395.

- Kos, C. and Karaoglan, I. (2016) "The green vehicle routing problem: A heuristic based exact solution approach", Applied Soft Computing, Vol. 39, pp. 154–164.

- Kunnapapdeelert, S. and Kachitvichyanukul, V. (2013) "Differential evolution algorithm for generalized multi depot vehicle routing vehicle routing problem", Combinatorial Optimization, Vol. 8596, pp. 384-395.

- Storn, R. and Price, K. (1997) "Differential evolution – A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces", Journal of Global Optimization, Vol. 4, pp. 359-431.

- 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.

- Tavakkoli-Moghaddam, R., Gazanfari, M., Alinaghian, M., Salamatbakhsh, A. and Norouzi, N. (2011) "A new mathematical model for a competitive vehicle routing problem with time windows solved by simulated annealing", Journal of Manufacturing Systems, Vol. 30, pp. 83-92.

- Yu, C. S. and Li H. L. (2000) "A robust optimization model for stochastic logistic problems", International Journal of Production Economics, Vol. 64, pp. 385-397.

problem solved by particle swarm optimization", Journal of Manufacturing Systems, Vol. 12, pp. 609-633.

- 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, pp. 509–515.

- Pan, F. and Nagi, R. (2010) "Robust supply chain design under uncertain demand in agile manufacturing", Computers and Operations Research, Vol. 37, pp. 668-683.

- Price, K.V., Storn, R. M. and Lampinen, J. A. (2005) "Differential evolution: A practical approach to global optimization", Natural Computing Series, Springer.

- 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, pp. 1785–1791.

- Solano-Charris, E., Prins, C. and Santos, A. (2014) "Heuristic approaches for the robust

علی رضا سلامت‌بخش ورجوی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع گرایش تولید صنعتی را در سال ۱۳۸۷ از دانشگاه علم و صنعت، درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع گرایش صنایع را در سال ۱۳۸۹ از دانشگاه آزاد اسلامی - واحد تهران جنوب و درجه دکتری در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۹۶ از دانشگاه آزاد اسلامی - واحد علوم و تحقیقات اخذ نمود. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه وی مساله مسیریابی وسایط نقلیه، الگوریتم‌های فراابتکاری، برنامه ریزی عدم قطعیت، بهینه‌سازی سیستم‌های توزیع است.

رضا توکلی مقدم، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳٦۷ از دانشگاه علم و صنعت ایران و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۷۲ از دانشگاه ملبورن - استرالیا اخذ نمود. در سال ۱۳۷٦ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی صنایع از دانشگاه سوین‌برن - استرالیا گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان طراحی سیستم‌های صنعتی (مکان‌یابی و استقرار تسهیلات)، مسیریابی وسایط حمل و نقل، لجستیک و طراحی شبکه زنجیره تامین، زمانبندی و توالی عملیات، الگوریتم‌های فراابتکاری در بهینه‌سازی بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استاد تمام در دانشگاه تهران است.

مهدی علینقیان، دانشیار دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها در دانشگاه صنعتی اصفهان است. ایشان دوره کارشناسی خود را در رشته مهندسی صنایع - گرایش تولید صنعتی، در سال ۱۳۸۳ از دانشگاه صنعتی شریف-دانشکده فنی مهندسی گلپایگان سپری کرده و مدرک کارشناسی ارشد را از دانشگاه تهران در سال ۱۳۸۵ و مدرک دکتری تخصصی خود در رشته مهندسی صنایع، گرایش مهندسی صنایع را در سال ۱۳۹۰ از دانشگاه علم وصنعت ایران اخذ نموده‌اند. زمینه‌های تحقیقاتی ایشان شامل مدل‌سازی زنجیره تامین، بهینه‌سازی سیستم‌های توزیع، مسیریابی وسائط نقلیه و برنامه‌ریزی عدم قطعیت است.

سید اسماعیل نجفی، استادیار گروه مهندسی صنایع در دانشگاه آزاد اسلامی - واحد علوم و تحقیقات است. ایشان مدرک کارشناسی خود را در رشته مهندسی مکانیک در سال ۱۳۷٦ از دانشگاه شهید عباسپور مدرک کارشناسی ارشد خود را در رشته مهندسی صنایع - گرایش مهندسی سیستم و بهره‌وری در سال ۱۳۸۳ از دانشگاه آزاد اسلامی - واحد اراک و دکتری تخصصی خود را در رشته مهندسی صنایع - گرایش مدیریت سیستم و بهره‌وری در سال ۱۳۸۸ از دانشگاه آزاد - واحد علوم و تحقیقات تهران اخذ نمود. زمینه‌های تحقیقاتی ایشان شامل مدل‌سازی زنجیره تامین، تحلیل پوششی داده‌ها، مسیریابی وسایط نقلیه، بهره وری و تجزیه و تحلیل سازمان‌ها، مدیریت کیفیت است.