مسأله مسیریابی وسائط نقلیه دوره‌ای با پنجره زمانی در حالت رقابتی با روش شبیه‌سازی تبرید بهبودیافته

رضا توکلی‌مقدم، استاد، دانشکده مهندسی صنایع، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

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

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

E-mail: tavakoli@ut.ac.ir

دریافت:۱۳۹۲/۰۴/۲۵ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۲/۱۴

چکیده:

در این مقاله، حالت جدیدی از ترکیب مسأله مسیریابی دورهای با در نظر گرفتن پنجره زمانی در حالت رقابتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به دنیای واقعی، همیشه، چندین توزیع کننده به منظور خدمت‌دهی به مشتریان وجود دارد. بر این اساس همیشه رقابت بین رقبا و تمایل به دسترسی سریع تر به مشتریان با ارزش بالا برای کسب نقدینگی بیشتر علاوه بر یافتن مسیرهای کوتاه وجود دارد. به همین جهت، هدف این مقاله ارایه مدلی است که با کوتاه ترین مسیر و کمترین هزینه، در کوتاه‌ترین زمان ممکن و زودتر از رقبا به مشتریان سرویس‌دهی کند تا حداکثر سود را کسب کنند. به دلیل کاربرد فراوان این مدل در توزیع دوره ای محصولات، مسأله مسیریابی وسائط نقلیه دوره‌ای در حالت رقابتی در این مقاله مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به اینکه مسأله مورد نظر حالتی از مسیریابی وسائط نقلیه است، این مسأله جزءِ مسایل NP-Hard قرار می‌گیرد. از همین رو در این مقاله، از روش شبیه‌سازی تبرید (SA) و روش شبیه‌سازی تبرید بهبود یافته (ISA) جهت حل مدل پیشنهادی استفاده می شود. از این رو تعدادی مسأله در ابعاد متنوع تولید شده و سپس برای نشان‌دادن کارآیی الگوریتم‌های ارایه شده پاسخ‌های به دست آمده با الگوریتم دقیق شاخه و کران مقایسه می شود و پاسخ‌های به دست آمده مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد. نتایج نشان دهنده آن است که درصد خطای روش SA و ISA در ابعاد کوچک به طور میانگین به ترتیب ۱ درصد و صفر درصد است که کارآیی الگوریتم‌های پیشنهادی را نشان می‌دهد. علاوه بر این، زمان حل مسایل در روشهای فرا ابتکاری نشان دهنده خطی بودن افزایش زمان رسیدن به پاسخ با افزایش ابعاد مسأله است، ولی مدت زمان رسیدن به پاسخ توسط روش دقیق با افزایش ابعاد مسأله به صورت نمایی افزایش می‌یابد. در ابعاد بزرگ به طور میانگین از نظر زمانی الگوریتم ISA تقریبا ۲۰ درصد کند تر از روش SA عمل می‌کند، اما کیفیت پاسخ‌های الگوریتم به طور میانگین ISA ۳ درصد بهتر از الگوریتم SA است. همچنین حداکثر میزان بهبود روش ISA نسبت به SA نیز ۷ درصد بوده است. این امر نشان می‌دهد که بهبود ایجاد شده در الگوریتم SA تاثیر مناسبی در بهبود پاسخ‌ها داشته است.

واژه‌های کلیدی: مسأله مسیریابی وسائط نقلیه[۱] (VRP)، پنجره زمانی رقابتی، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید[۲] (SA)، الگوریتم بهبود یافته شبیه‌سازی تبرید[۳] (ISA).

۱. مقدمه

عموماً، در مورد مسیریابی تسهیلات، فرض بر این است که نوعی انحصار در محیط وجود دارد و هیچ‌گونه توجهی به تاثیر مسیریابی مناسب بر رقابت در نظر گرفته نشده است. در محیط واقعی، رقابتی بین رقبا در محیط بر سر کسب نقدینگی بیشتر وجود دارد و عدم توجه به این اصل باعث کاهش کارآیی مسیرها در ارضای نیاز مدیران در کسب نقدینگی بیشتر می‌شود.

به منظور بررسی توزیع کالا در حالت رقابتی می‌بایست مسأله مسیریابی وسائط نقلیه با پنجره زمانی مورد بررسی قرار گیرد. این نوع مسأله کاربرد فراوانی در سیستم‌های توزیع همانند توزیع کالاهای فاسدشدنی، مواد خطرناک، سیستم تولید بهنگام[۴] (JIT) در تولید و غیره دارد. این نوع مسأله به دو دسته مسأله مسیریابی وسائط نقلیه با پنجره زمانی نرم و مسأله مسیریابی وسائط نقلیه با پنجره زمانی سخت تقسیم می‌شود که به ترتیب در اولی، میزان تاخیر در سرویس‌دهی به مشتری در بازه زمانی مشخصی با اعمال تابع جریمه امکان پذیر است، ولی در دومی به هیچ وجه امکان تاخیر در سرویس‌دهی وجود ندارد [Toth and Vigo, 2002]. در مسأله کلاسیک مسیریابی وسائط نقلیه با پنجره زمانی بازه سرویس‌دهی به مشتریان یک روزه در نظر گرفته می‌شد. اما با گذشت زمان و تغییر در درخواست مشتریان در شیوه سرویس‌دهی نوع دیگری از مسأله مسیریابی وسائط نقلیه با پنجره زمانی به نام مسأله مسیریابی دوره‌ای وسائط نقلیه با پنجره زمانی توسعه داده شد که در آن، بازه خدمت‌دهی به مشتریان به جای یک روز در یک بازه زمانی چند روزه در نظر گرفته می‌شد. در این مسأله هر یک از مشتریان، روزهای مورد نظر خود را که در آن روزها نیاز به خدمت‌گیری دارند مشخص می‌کنند. علاوه بر این، مشتریان می‌توانند چندین ترکیب از روزهای دوره را برای این منظور معرفی کنند. این مسأله برای اولین‌بار توسط بلترامی و بودین [Beltrami and Bodin, 1974] در مسأله تخصیص کامیون‌های فشرده‌ساز در جمع‌آوری زباله‌های شهری مطرح شد. در آن مقاله نویسندگان، نحوه‌ی مراجعه‌ی دوره‌ای وسائط نقلیه به مراکز تجمع زباله در دوره‌های مختلف را نشان دادند. آنها در ادامه به ارایه چندین روش ابتکاری برای حل مسأله پرداختند ولی هیچگونه مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای مسأله خود ارایه ندادند.

در مسأله مسیریابی وسائط نقلیه دورهای با پنجره زمانی[۵] (PVRPTW)، هر مشتری $v_i \in V$ نشان‌دهنده مجموعه‌ای از $k(i)$ ترکیب است که در آن ترکیب روزهایی که باید به مشتری سرویس‌دهی شود، مشخص شده است. برای مثال، یک بازه سرویس دهی ۶ روزه را در نظر بگیرید. اگر مشتری v_i دارای دو ترکیب سرویس‌دهی همانند {}۱،۳،۵ و {} ۶،۴،۲باشد، در این صورت اگر وسیله نقلیه ترکیب اول را انتخاب کند، باید به مشتری در روزهای اول، سوم و پنجم خدمت رسانی کند و اگر ترکیب دوم را انتخاب کند، باید در روزهای دوم، چهارم، ششم به مشتری سرویس‌دهی کند. در ادامه، راسل و ایگو [Russell and Igo, 1974] به بررسی مسأله مسیریابی وسائط نقلیه دوره‌ای پرداخته و مدل آن را به صورت برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط در نظر گرفتند، ولی در مقاله خود مدلی برای حل دقیق مسأله ارایه نکردند، اما سه روش ابتکاری ارایه کردند. توکلی مقدم و همکاران (۱۳۸۵) مسأله مسیریابی با پنجره زمانی نرم را با استفاده از یک الگوریتم تلفیقی که ترکیبی از الگوریتم شبیه سازی تبرید و اپراتورهای الگوریتم ژنتیک بود حل کرده و مورد بررسی قرار دادند. در ادامه ربانی و همکاران (۱۳۸۷) مسأله مسیریابی متصل به حمل و نقل چند وجهی را ارایه کردند. آنها برای حل مسأله در ابعاد کوچک از الگوریتم شاخه و کران بهره بردند آنها برای حل مدل از یک روش ابتکاری به نام SB_RAB استفاده کردند. کریستوفید و بیسلی[Christofides and Beasley 1984] اولین مدل برنامه‌ریزی صفر و یک را برای مسأله مسیریابی وسائط نقلیه دوره‌ای[۶] (PVRP) گسترش دادند. آنها در این

مدل از دو نوع متغیر استفاده کردند، متغیرهایی که ترکیب بهینه هر مشتری را مشخص کردند و متغیرهایی که برای هر روز از روزهای دوره زمانی مسیر هر وسیله نقلیه را مشخص کردند. گلدن و همکاران[Golden, et. al, 1977] مدل ارایه شده توسط کریستوفید و بیزلی را تصحیح کردند. آنها به جای استفاده از دو متغیر تصمیم‌گیری از سه متغیر بهره بردند. تن و بیسلی [Tan and Beasley 1984] مدلی ارایه کردند که بسیار ساده‌تر از مسأله PVRP بود. آنها در مدل خود از مدل معروف فیشر و جایکومار [Fisher and Jaikumar, 1981]استفاده کردند.

لِبلانس و همکاران [le Blance et. al, 2004] مسأله مسیریابی وسائل نقلیه دوره‌ای را برای توزیع مواد در یک زنجیره تامین مورد استفاده قرار دادند. شبکه مورد استفاده در این زنجیره تامین، شبکه قیمت‌گذاری در کارخانه[۷] بود. نویسندگان برای حل مدل خود از روشی ابتکاری استفاده کردند. پارتهناده و لجنران [Parthanadee and Logendran, 2006]مسأله چند محصولی چند دپویی چند دوره‌ای را حل کردند. آنها مسأله مسیریابی وسائل نقلیه دوره‌ای را به عنوان یک زیرمسأله از مسأله کل، در نظر گرفته و به حل آن پرداختند. مسأله مسیریابی وسائل نقلیه دوره‌ای در ادبیات موضوع لجستیک نیز یافت می‌گردد. گلدن و واسیل [Golden and Wasil, 1987] مسأله مسیریابی وسائل نقلیه دوره‌ای را برای توزیع نوشابه های غیرالکلی بکار بردند. در این مسأله، هر راننده مشتریان خود را در روزهای مشخصی ملاقات می‌کرد تا تقاضای او را تامین کند. در این مقاله در مورد سیستم ایده‌آل توزیع نوشیدنی‌های غیرالکلی مطالبی عنوان شده است. سیستمی می‌تواند برای توزیع این محصولات مناسب باشد که به مناطقی که هر یک از راننده‌ها به آن آشنایی دارد، توجه کرده و توازن بین زمان سفر برای تمامی رانندگان مد نظر قرار گیرد و تعداد بازدید از مشتری در یک دوره زمانی قابل بررسی باشد.

کارتر و همکاران [Carter, et. al, 1996]مسأله را برای توزیع محصولات بین سوپرمارکتها در نظر گرفتند و مدل خود را با فرضیات اضافه به وسیله روش لاگرانژ حل کردند. گار و فیشر[Gaur and Fisher, 2004] مسأله مسیریابی وسائل نقلیه دوره‌ای و مسأله زمانبندی تحویل را برای زنجیره ای از سوپرمارکت های اروپایی حل کردند. آنها مسأله مسیریابی وسائل نقلیه دوره‌ای را به عنوان یک زیر مسأله در نظر گرفتند.

نویسندگان مقاله برای حل مسأله زمانبندی مسأله زمانبندی از روش ابتکاری ترکیبی با خوشه بندی حل کردند و مسأله مسیریابی وسائل نقلیه دوره‌ای را با استفاده از آزادسازی لاگرانژ حل کردند. کلازن و هندریکس ,Claassen and Hendriks] [2007 در مقاله خود به کاربرد مسیریابی وسائل نقلیه دوره‌ای در جمع‌آوری شیر پرداختند. آنها با در نظر نگرفتن هزینه مسیرها به صورت مستقیم بر روی تخصیص مشتریان به خوشه‌ها و پیدا کردن بهترین ترکیب مشتریان پرداختند و سپس با توجه به خصوصیات مسأله، مسأله را کاهش داده و به صورت دقیق، مسأله را حل کردند.

استفاده زیاد از مسیریابی وسائط نقلیه دوره‌ای در شرایط واقعی و مواجه با مسائل با ابعاد بزرگ از یک طرف و مشکل بودن مسأله از سوی دیگر باعث شده است تا رویکردهای ابتکاری و فرابتکاری برای مسأله مورد توجه قرار گیرند. بر این اساس راسل و ایگو در مقاله خود یک روش ابتکاری بهبود دهنده و دو روش سازنده ارایه کردند. آنها در روش ابتکاری خود، در ابتدا تمامی مشتریانی که تنها یک ترکیب سرویس‌گیری داشتند را در نظر گرفته و مسأله‌های VRP روزانه را حل کردند سپس بقیه مشتریان بر اساس تعداد روزهای مورد نیاز به صورت کاهشی مرتب شدند و برای هر مشتری ترکیبی انتخاب گردید که مجموع کمترین فواصلش با میانگین خوشه‌های ایجاد شده در روزهای ترکیب کمترین مقدار بود. در گام بعدی برای هر مشتری سعی می‌شد که ترکیب بهتری پیدا شود[Russell and Igo, 1979].

روش ابتکاری دوم یک روش بهبود دهنده بود و بر اساس روشی ابتکاری ارایه شده برای مسألهM-Tour توسط راسل,Russell (1977) پایه‌گذاری شده بود. مبنای این روش بر تغییردر ترکیب انتخاب شده مشتریان و بهبود سریع تورهای جدید ایجاد شده بود. آنها بر اساس مقاله منبای لین و کرنیگان ,Lin and Kernighan] [1973 روش خود را توسعه داده بودند. روش سوم بر مبنای روش ذخیره‌سازی کلارک و رایت,Clarke and Wright] [1964 است و تنها چندین شرط به خاطر روزهای مختلف هر ترکیب مشتری و برای موجه باقی ماندن پاسخ پس از هر تغییر در نظر گرفته شد.همچنین راسل و گریبینروشیRussell and] [Gribbin,1991 مدلی را ارایه کردند که در ابتدا به تشکیل ابتدای مسیرها می‌پرداخت و در مراحل بعدی سعی در بهبود پاسخ می کرد.

گودیسو و پالاتا[Gaudioso and Paletta, 1992] در مقاله خود، تابع هدف کمینه‌کردن ناوگان توزیع در کنار تابع هدف کمینه‌کردن مسیرها را، با در نظر گرفتن قیود حداکثر ظرفیت و زمان طی مسیرها ارایه کردند. با توجه به طبقه‌بندی ارایه شده توسط کردیو و همکاران [Cordeau, et. al, 1997] در مورد روشهای ابتکاری در حوزه مسیریابی، تمامی روش‌های ارایه شده برای مسأله مسیریابی وسائط نقلیه دوره‌ای در دسته روشهای ابتکاری سازنده- بهبود دهنده قرار می‌گیرد. در مورد روشهای فراابتکاری، چائوو همکاران روشی خاص را برای حل مسأله مسیریابی وسائط نقلیه دوره‌ای توسعه دادند. در این روش ابتدا پاسخی موجه تولید می‌شود و سپس با روش تک جمعیتی و با گام‌هایی تکراری سعی در بهبود پاسخ می‌شود[Chao et al. 1995] .

کردیو و همکاران[Cordeau, et. al. 1997] الگوریتم فراابتکاری جستجوی ممنوع را برای حل چندین مسأله مسیریابی PVRP به کار بردند. در این روش آنها برای عدم مواجه با پاسخهای غیرموجه از جریمه در تابع هدف استفاده کردند. آنها با توجه به میزان افزایش تقاضای هر تور نسبت به ظرفیت خودرو جریمه‌ای را به تابع هدف اعمال کردند. درومند و همکاران[Drummond, et. al, 2001] از روشی ترکیبی بین الگوریتم ژنتیک و چندین روش جستجوی محلی برای یافتن پاسخ استفاده کردند. کروموزوم استفاده شده آنها تنها شامل ترکیبهای مختلف مشتریان بوده و برای پیدا کردن میزان تابع هدف هر کرومزوم از روش کلارک و رایتClarke] [and Wright, 1964 استفاده شد. الگره و همکاران ,Alegre] [et. al, 2007 مسأله را به وسیله روش جستجوی پراکنده حل کردند. همل‌مایر و همکاران[Hemmelmayr, et al, 2009] مسأله مسیریابی وسائط نقلیه دوره‌ای را با روش نزدیکترین همسایگی حل کردند. آنها روش خود را برای حل مسأله فروشنده دوره‌گرد دوره‌ای نیز بکار بردند. در مورد حل مسأله با رویکرد ریاضی، فرانسیس و همکاران[Francis et al, 2006] روشی برای حل دقیق مسأله PVRP ارایه کردند که بر مبنای آزادسازی لاگرانژ استوار است. این مدل برای مسأله گسترده‌تری نوشته شده ولی در حالت خاص، مسأله مسیریابی وسائط نقلیه دوره‌ای را نیز شامل می‌شود. این مقاله اولین مقاله‌ای بود که روشی دقیق برای حل مسأله PVRP ارایه کرد. مورگایا و واندریکMourgaya] [and Vanderbeck, 2006 مسأله PVRP را با در نظر گرفتن مسأله‌ای واقعی حل کردند. تابع هدف آنها متوازن کردن تعداد مشتریان تخصیص داده شده به وسیله نقلیه و تخصیص جغرافیایی خودروها بود . همچنین سپهری و همکاران (۱۳۸۷) یک مدل ریاضی صفر و یک برای مسأله مسیرابی وسائط نقلیه با حمل در بازگشت با ناوگان ناهمگن ارایه کرده و سپس برای حل مسأله دو روش حل ابتکاری پیشنهاد نمودند.

مسأله مسیریابی رقابتی برای اولین بار توسط توکلی مقدم و همکاران [Tavakkoli-Moghaddam et. al. 2011] مطرح شد. در این مقاله مسأله مسیریابی وسائل نقلیه در حالت ساده و تک دوره‌ای تعریف شد. نوروزی و همکاران مسأله مسیریابی

وسائل نقلیه را در حالت باز در نظر گرفتند. آنها در مقاله خود سه تابع هدف کاهش هزینه های سفر، افزایش امید ریاضی کسب سود و بیشنه سازی بالانس بار را به طور همزمان در نظر گرفتند [Norouzi et. al, 2012].

در یک نگاه جامع، شرکتهای توزیع معمولا به صورت دوره‌ای برنامه‌ریزی توزیع محصولات خود را انجام می دهند، و برنامه‌ریزی کل دوره توزیع می‌تواند نتایج مناسب‌تر و اثربخش‌تری نسبت به مسیر یابی تک روزه برای شرکت‌های توزیع به همراه داشته باشند. نوآوری های موجود در این پژوهش به طور خلاصه در سه مورد قابل خلاصه سازی است: (۱) در این مقاله مسأله مسیریابی رقابتی در حالت چند دوره‌ای مورد توجه قرار گرفته است، (۲) از رویکرد پنجره زمانی برای مواجه با مبحث رقابت بهره برده شده است و (۳) از الگوریتم فراابتکاری شبیه‌سازی تبرید و الگوریتم پیشنهادی شبیه سازی تبرید بهبود یافته برای حل مسأله در ابعاد بزرگ استفاده شده است.

در این مقاله و در بخش دوم، مسأله مورد نظر این مقاله تعریف می‌شود، در بخش سوم مدل ریاضی مسأله مطرح ارایه می‌شود. به دلیل غیرخطی بودن مدل، به خطی‌سازی مدل پرداخته می‌شود. در بخش چهارم روش شبیه‌سازی تبرید ارایه شده است و در بخش پنجم روش‌های ایجاد پاسخ اولیه و بهبود آنها ارایه می‌شود. در بخش ششم نتایج محاسباتی تجربه تحلیل می‌شوند و در پایان، نتیجه‌گیری در بخش هفتم ارایه می‌شود.

۲. تعریف مسأله

در این مقاله، مدل مسیریابی وسائط نقلیه دوره‌ای در حالت رقابتی و با توابع هدف چندگانه توسعه داده خواهد شد. تاکنون در تحقیقات مسیریابی وسائط نقلیه و بویژه در مورد مسیریابی وسائط نقلیه دوره‌ای، در نظر گرفتن رقابت در محیط مورد نظر قرارگرفته نشده است. عدم توجه به ویژگی‌های فضای حاکم بر محیط باعث خواهد شد که مدل حاصل از مسیریابی وسائط نقلیه صِرف، به کاهش فروش منجر شود و خسارت ایجاد شده به خاطر از دست رفتن بازار فروش، ویژگی مسیرهای کوتاه و هزینه‌های پایین‌تر حمل و نقل را از بین ببرد. در نظر گرفتن رفتار رقیب در سرویس‌دهی به مشتریان و تلاش در ارایه مسیرهای رقابتی برای کسب نقدینگی بیشتر و فروش بالاتر مبحثی است که در این مقاله به آن پرداخته خواهد شد. برنامه‌ریزی صحیح در محیط رقابتی می‌تواند دو نوع سود برای توزیع‌کننده داشته باشد این سود را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد.

۱. سود حاصل از فروش بیشتر محصولات: این سود ناشی از فروش بیشتر محصولات شرکت است. در محیط رقابتی، محصولات شرکت(های) رقیب محصولات جایگزین برای شرکت محسوب می‌شوند و زمان رسیدن رقیب می‌تواند در فروش شرکت تاثیرگذار باشد.

۲. سود ناشی از دریافت نقدی پرداخت‌های مشتری: در شرایطی که پرداخت‌ها توسط مشتری و به صورت نقدی انجام گیرد به خاطر ثابت بودن نقدینگی موجود نزد مشتری، در صورت تاخیر در سرویس‌دهی ممکن است پرداخت‌ها به دوره بعدی بازدید موکول شود و باعث می‌شود تا نقدینگی کاهش یابد.

با توجه به موارد ذکر شده، هدف، ارایه مدلی است که شرکت توزیع کننده مد نظر بتواند با توجه به مسیرهای طی شده توسط رقیب بیشترین سود را کسب کند. در این میان توجه به توابعی مانند کاهش هزینه‌های مسیر نیز مد در نظر گرفته می‌شود. برای پیدا کردن مسیرهای مناسب برای وسائط نقلیه، توزیع کننده مسیرهای مختلفی را در نظر می‌گیرد که توجه به تمامی آنها می‌تواند میزان رضایت از پاسخهای حاصل از حل مدل را به طور قابل توجهی افزایش دهد. به این منظور یافتن پاسخ‌های مناسب با توجه به اهداف شناسایی شده یکی دیگر از اهداف ارایه این مقاله است که در ادامه توضیح داده خواهد شد.

کاربردهای مدل ارایه شده را می توان به صورت زیر در نظر گرفت: از یک سو در محیطهایی که برند کالا تاثیر کمی در میزان فروش داشته و دسترس پذیری کالا بر فروش تاثیر بیشتری می‌گذارد، این مدل با ارایه مسیرهای کارا تاثیر بسزایی در رقابت بر زمان شروع سرویس به مشتریان خواهد گذاشت. از سوی دیگر در محیط رقابتی هنگاهی که برای نگهداری کالا نیاز به تجهیزات نگهداری خاص همچون تجهیزات سردکننده با ظرفیت محدود باشد و این محدودیت باعث محدودیت خرید مشتریان گردد نیز این مدل می تواند در رقابت بین شرکتهای توزیع راهگشا باشد. کاربرد دیگر این مدل زمانی است که نقدینگی مشتریان محدود است و زمان شروع سرویس دهی به مشتریان تاثیر مناسبی بر جذب نقدینگی مشتری دارد و در نهایت در یک نگاه جامع، شرکتهای توزیع، معمولا به صورت دوره‌ای برنامه‌ریزی توزیع محصولات خود را انجام می‌دهند و برنامه‌ریزی کل دوره توزیع می‌تواند نتایج مناسب‌تر و اثربخش‌تری نسبت به مسیریابی تک روزه برای شرکت‌های توزیع به همراه داشته باشند.

۳. مدل ریاضی مسأله مسیریابی وسائط نقلیه دوره‌ای با پنجره زمانی رقابتی

در این قسمت، ابتدا پارامترهای مسأله بیان می‌شود. سپس با فرض احتمالی بودن زمان رسیدن رقیب به مشتریان- توزیع یکنواخت- مدل ریاضی مسأله با پنجره زمانی رقابتی مطرح می‌شود و در نهایت مدل ارایه شده خطی می‌گردد.

a. پارامترها و متغیرهای مدل

گره مبدا: با اندیس صفر و بقیه گره ها با اندیسهای i و j مشخص می‌گردند. اندیس k برای وسائط نقلیه مشخص می‌گردد و تعداد آنها با اندیس K مشخص می شود.

x_{ijk}^{δ}: این متغیر وقتی مقدار یک می‌گیرد که در روز δ-اُم مسیر (i-j) توسط وسیله نقلیه k-اُم پیموده شود. در غیر این صورت مقدار صفر خواهد گرفت.

z_i^s: این متغیر با مقدار یک در مدل نشان دهنده انتخاب شدن ترکیب s-اُم مشتری i-اُم برای سرویس‌دهی است.

N: تعداد مشتریان.

D: تعداد روزهای دوره.

S_i: تعداد کل ترکیبهای مشتری i-اُم.

C: حداکثر ظرفیت وسیله نقلیه.

L: حداکثر زمان در دسترس در هر روز توسط هر وسیله نقلیه.

t_{ij}: زمان بین دو گره i و j.

t_i: مدت زمان سرویس دهی به گره i.

w_i:تقاضای مشتری i-اُم در هر روز از ترکیب.

w_{id}:تقاضای وابسته به زمان مشتری i-اُم در هر روز از ترکیب.

C_{ij}:هزینه عبور از یال (i-j).

$a_{\delta si}$: اگر روز δ-اُم در ترکیب s-اُم مشتری i-اُم باشد مقدار یک می‌گیرد در غیراین صورت مقدار صفر می‌گیرد.

v_i^{δ} : اگر روز δ-اُم برای سرویس‌دهی به مشتری i-اُم انتخاب شود مقدار یک می‌گیرد و در غیراین صورت مقدار صفر می‌گیرد.

$o_{\delta i}$: اگر در روز δ-اُم، وسیله نقلیه زودتر از کران پایین رسیدن رقیب به مشتری i-اُم، سرویس دهی به مشتری را شروع کند یک و در غیراین صورت صفر.

$\theta_{\delta i}$: اگر در روز δ-اُم، وسیله نقلیه در بازه زمانی رسیدن رقیب به مشتری i- اُم، سرویس دهی به مشتری را شروع کند، یک و در غیراین صورت صفر.

$\varpi_{\delta i}$: اگر در روز δ-اُم، وسیله نقلیه دیرتر از کران پایین رسیدن رقیب به مشتری i-اُم، سرویس‌دهی به مشتری را شروع کند آزاد در مقدار است و در غیراین صورت، مقدار صفر می‌گیرد.

$\zeta_{\delta i}$: اگر زمان رسیدن وسیله نقلیه کمتر از کران بالای بازه رسیدن رقیب در روز δ -اُم باشد صفر و در غیر این صورت یک است.

$\psi_{\delta i}$: هنگامی که زمان رسیدن وسیله نقلیه به مشتری i–اُم کمتر از کران بالای بازه رسیدن رقیب در روز δ–اُم باشد یک و در غیراین صورت صفر.

$\lambda_{\delta i}$: کران پایین بازه رسیدن رقیب به مشتری i–اُم در روز δ–اُم.

$\upsilon_{\delta i}$: کران بالای بازه رسیدن رقیب به مشتری i–اُم در روز δ–اُم.

b. مدل ریاضی مسأله مسیریابی وسائط نقلیه دوره‌ای با پنجره زمانی رقابتی

با فرض فرض احتمالی بودن زمان رسیدن رقیب به مشتریان– توزیع یکنواخت مدل مدل ریاضی مسأله با پنجره زمانی رقابتی به شرح ذیل است:

$$\min Z_1 = \sum_{\delta=1}^{D}\sum_{i=0}^{N}\sum_{j=0}^{N}\sum_{\kappa=1}^{K} C_{ij} x_{ij\kappa}^{\delta} \quad (۱)$$

$$\max \quad Z_2 = \sum_{\delta=1}^{D}\sum_{i=1}^{N} (o_{\delta i}\, w_{di} + \theta_{\delta i}(\frac{\upsilon_{\delta i} - \tau_{\delta i}}{\upsilon_{\delta i} - \lambda_{\delta i}}) w_{di}) \quad (۲)$$

s.t.

s.t.

$$\sum_{s=1}^{S_i} z_i^s = 1 \qquad ; \quad \forall\, i=1,...,N \quad (۳)$$

$$v_i^{\delta} = \sum_{s=1}^{S_i} z_i^s . a_{\delta si} \qquad ; \quad \forall\, \delta = 1,...,D \;\; ; \;\; i=1,...,N \quad (۴)$$

$$v_0^{\delta} = 1 \qquad ; \quad \forall\, \delta = 1,...,D \quad (۵)$$

$$\sum_{\kappa=1}^{K} x_{ijk}^{\delta} \le \frac{v_i^{\delta} + v_j^{\delta}}{2} \qquad ; \quad \forall\, \delta = 1,...,D \;\; ; \;\; i,j=0,1,...,N \quad (۶)$$

$$\sum_{j=0}^{N} x_{ijk}^{\delta} = \sum_{j=0}^{N} x_{jik}^{\delta} \qquad ; \quad \forall\, k = 1,...,K \;\; ; \;\; i = 0,1,...,N \;\; ; \;\; \delta = 1,...,D \quad (۷)$$

$$\sum_{k=1}^{K}\sum_{i=0}^{N} x_{ijk}^{\delta} = v_j^{\delta} \quad ; \quad \forall\, j = 1,...,N \;\; ; \;\; \delta = 1,...,D \quad (۸)$$

$$\sum_{i=1}^{N} x_{i0k}^{\delta} = 1 \qquad ; \quad \forall\, \delta = 1,..,D \;\; ; \;\; k = 1,..,K \quad (۹)$$

$$\sum_{i=1}^{N} (w_i - w_{di}\zeta_{\delta i}) \sum_{j=0}^{N} x^{\delta}{}_{ijk} \le C \quad ; \quad k = 1,...,K \;\; ; \;\; \delta = 1,...,D \quad (۱۰)$$

$$(\upsilon_{\delta i} - \tau_{\delta i}) - M(\psi_{\delta i}) \le 0 \quad ; \quad i = 1,...,N \;\; ; \;\; \delta = 1,...,D \quad (۱۱)$$

$$(\upsilon_{\delta i} - \tau_{\delta i}) + M(\zeta_{\delta i}) \ge 0 \quad ; \quad i = 1,...,N \;\; ; \;\; \delta = 1,...,D \quad (۱۲)$$

$$\zeta_{\delta i} + \psi_{\delta i} = 1 \quad ; \quad i = 1,...,N \;\; ; \;\; \delta = 1,...,D \quad (۱۳)$$

$$\sum_{i=0}^{N}\sum_{j=0}^{N} (t_i + t_{ij}) . x_{ijk}^{\delta} \le L \qquad ; \quad \forall\, k = 1,...,K \;\; ; \;\; \delta = 1,...,D \quad (۱۴)$$

$$\tau_{\delta j} = \sum_{i=0}^{N} \tau_{\delta i} \sum_{k=1}^{K} x_{ijk}^{\delta} + \sum_{i=0}^{N} \sum_{k=1}^{K} (t_i + t_{ij}).x_{ijk}^{\delta} \quad ; \quad \forall\, j = 1,...,N \quad ; \quad \delta = 1,..,D \qquad (۱۵)$$

$$\sum_{\kappa=1}^{K} \sum_{i=0}^{N} \sum_{\delta=1}^{D} x_{ii\kappa}^{\delta} = 0 \qquad (۱۶)$$

$$(\upsilon_{\delta i} - \tau_{\delta i}) + M(1 - \theta_{\delta i}) \geq 0 \quad ; \quad i = 1,...,N \quad ; \quad \delta = 1,...,D \qquad (۱۷)$$

$$(\lambda_{\delta i} - \tau_{\delta i}) + M(1 - o_{\delta i}) \geq 0 \quad ; \quad i = 1,...,N \quad ; \quad \delta = 1,...,D \qquad (۱۸)$$

$$\varpi_{\delta i} + \theta_{\delta i} = 1 \quad ; \quad i = 1,...,N \quad ; \quad \delta = 1,...,D \qquad (۱۹)$$

$$o_{\delta i} \leq v_i^{\delta} \quad \text{and} \quad \theta_{\delta i} \leq v_i^{\delta} \quad ; \quad i = 1,...,N \quad ; \quad \delta = 1,...,D \qquad (۲۰)$$

$$\sum_{i,j \in Q} x_{ijk}^{\delta} \leq |Q| - 1 \quad ; \quad \forall\, Q \subseteq N \quad ; \quad 2 \leq Q \quad ; \quad \delta = 1,...,D \qquad (۲۱)$$

$$z_i^s,\ \varpi_{\delta i},\ \theta_{\delta i},\ x_{ijk}^{\delta},\ o_{\delta i},\ \psi_{\delta i},\ \zeta_{\delta i} \in \{0,1\} \quad ; \quad \forall\, i,j = 1,...,N \quad ; \quad \delta = 1,...,D \quad ; \quad k = 1,...,K \quad ; \quad s = 1,...,S \qquad (۲۲)$$

$$0 \leq \tau_{\delta i} \quad ; \quad \delta \in D \quad ; \quad i \in N \qquad (۲۳)$$

رابطه ۱، تابع هدف اول مسأله است که در حالت استاندارد مسافت پیموده شده را کمینه می‌کند. رابطه ۲، تابع هدف دوم مسأله است که به بیشینه‌سازی میزان فروش وابسته به زمان می‌پردازد. قید ۳، این اطمینان را ایجاد می‌کند که از بین ترکیب‌های پیشنهای هر مشتری یکی و تنها یک ترکیب انتخاب گردد. قید ۴، مربوط به انتخاب روزهای ترکیب انتخابی برای سرویس دهی به مشتریان است. قید ۵، تضمین می‌کند که دپو در تمامی روزها قابل دسترس است. قید ۶، تضمین می‌کند که تنها هنگامی که روز δ- اُم در ترکیب انتخابی مشتری i-اُم و j-اُم باشد یال (i-j) امکان انتخاب شدن را دارا است. قید ۷، بیان می‌کند که اگر وسیله نقلیه‌ای در روز خاصی و با وسیله نقلیه مشخصی وارد گرهی شد بایستی در همان روز و همان وسیله نقلیه از گره خارج گردد. قید ۸، مربوط به سرویس‌دهی به مشتریان در روزهای ترکیب انتخاب شده است. قید ۹، مربوط به ختم مسیرها به گره مبدا است. ترکیب این قید و قید ششم باعث می‌شود که هر وسیله نقلیه از گره مبدا، مسیر خود را آغاز و به آن ختم نماید. قیود ۱۰ تا ۱۳ مربوط حداکثر کالایی است که هر وسیله نقلیه می تواند حمل کند این قیدها به گونه‌ای هستند که اگر زمان رسیدن وسیله نقلیه بعد از کران بالای رسیدن رقیب اتفاق بیافتد، از ابتدا کالای وابسته به زمان مشتری حمل نمی‌گردد. قید ۱۴، مربوط به حداکثر زمان طی مسیر است. قید ۱۵، مربوط به محاسبه زمان رسیدن وسیله نقلیه به مشتری است. قید ۱۶، مربوط به حذف حلقه است. قیود ۱۷ تا ۲۱ مربوط به تابع هدف دوم است. قید ۲۲، زیر تورها را در هر روز حذف می کند. قید ۲۳، مربوط به تعریف متغیرها است.

c. خطی سازی مدل

متاسفانه مدل ارایه شده غیرخطی بوده و به دلیل آنکه مدل‌های غیرخطی سخت‌تر از مدل‌های خطی حل می‌شوند. در این قسمت تلاش شده است تا با خطی‌سازی عبارت‌های غیرخطی موجود در مدل، مدل ارایه شده خطی شود. به طور کلی دو نوع عبارت غیرخطی در مدل وجود دارد: در حالت اول دو متغیر باینری در هم ضرب شده‌اند (تابع هدف، قید (۱۵) که مربوط به محاسبه زمان است) و در حالت دوم یک متغیر باینری در یک

متغیر پیوسته ضرب شده است. قید (۱۰) که مربوط به ظرفیت وسائط نقلیه است که در بخشهای بعدی به تفضیل در مورد نحوه خطی‌سازی آنها توضیحاتی ارایه شده است.

i. خطی سازی ضرب دو متغیر صفر و یک

فرض کنید، $z = x_1 \times x_2$ حاصل ضرب دو متغیر صفر و یک باشد. به بیان دیگر متغیر Z تنها وقتی یک می شود که هر دو متغیر باینری مقدار یک بگیرند و در غیراین صورت مقدار صفر می‌گیرند. با بهره‌گیری از قیود کمکی زیر می توان قید غیرخطی را در مدل به یک سری قیود خطی تبدیل کرد [Norouzi, et al., 2012]

$$Z \le x_1 \quad (۲۴)$$

$$Z \le x_2 \quad (۲۵)$$

$$Z \ge x_1 + x_2 - 1 \quad (۲۶)$$

$$\sum_{i=1}^{N} w_i \sum_{j=0}^{N} x^{\delta}_{ijk} - \sum_{i=1}^{N} w_{di} \{\zeta_{\delta i} \sum_{j=0}^{N} x^{\delta}_{ijk}\} \le C \quad ; \quad k = 1,...,K \quad ; \quad \delta = 1,...,D \quad (۲۷)$$

$$\sum_{i=1}^{N} w_i \sum_{j=0}^{N} x^{\delta}_{ijk} - \sum_{i=1}^{N} w_{di} r_{\delta ik} \le C \quad ; \quad k = 1,...,K \quad ; \quad \delta = 1,...,D \quad (۲۸)$$

$$r_{\delta ik} \le \sum_{j=0}^{N} x^{\delta}_{ijk} \quad ; \quad \forall\, i = 1,..,N \quad ; \quad \delta = 1,..,D \quad ; \quad k = 1,..,K \quad (۲۹)$$

$$r_{\delta i\kappa} \le \zeta_{\delta i} \quad ; \quad \forall\, i = 1,...,N \quad ; \quad \delta = 1,...,D \quad ; \quad k = 1,...,K \quad (۳۰)$$

$$r_{\delta ik} \ge \zeta_{\delta i} + \sum_{j=0}^{N} x^{\delta}_{ijk} \quad ; \quad \forall\, i = 1,...,N \quad ; \quad \delta = 1,...,D \quad ; \quad k = 1,...,K \quad (۳۱)$$

ii. خطی سازی ضرب متغیر باینری در متغیر پیوسته

فرض کنید متغیر $Z = x_1 \times x_2$ حاصلضرب یک متغیر باینری (x_1) در یک متغیر پیوسته(x_2) باشد .در این صورت وقتی متغیر باینری مقدار یک می گیرد متغیر Z مقداری برابر با مقدار متغیر پیوسته خواهد گرفت و در غیر این صورت مقدار صفر می گیرد برای خطی سازی این عبارت از سه قید به صورت زیر استفاده می‌گردد [Glover and Woolsey, 1974].

$$Z \le x_2 \quad (۳۲)$$

$$Z \le M \times x_1 \quad (۳۳)$$

$$Z \ge x_2 - M(1 - x_1) \quad (۳۴)$$

در مدل ارایه شده قید ظرفیت قیدی غیرخطی از نوع مذکور است. در قید (۱۰)، عبارت غیرخطی از ضرب یک متغیر صفر و یک در مجموع چند متغیر صفر و یک حاصل شده است. برای بیان بهتر موضوع این قید در معادله (۲۷) بازنویسی شده است و بخش غیرخطی در داخل کروشه نمایش داده شده است.

با توجه به قیدهای مدل مجموع متغیرهای باینری $\sum_{j=0}^{N} x^{\delta}_{ijk}$ مذکور می‌تواند حداکثر برابر یک باشد بنابراین می تواند عبارت مربوط به مجموع چند متغیر صفر و یک را یک متغیر صفر و یک در نظر گرفت. با توجه به توضیحات ذکر شده قید ۱۰، با قیدهای ذیل جایگزین می‌گردد.

با خطی سازی این قسمت از مدل تعداد (D) × (N)×(K) متغیر جدید به مدل اضافه می شود و تعداد (D) × (N)×(K) ×۳ قید جدید نیز به مدل اضافه می گردد.

در مدل ارایه شده تابع هدف دوم و قید ۱۵ شامل عباراتی غیرخطی با ترکیب فوق هستند که در ادامه به تفکیک به خطی‌سازی آنها پرداخته می‌شود.

iii. خطی سازی عبارت تابع هدف

تابع هدف دوم ارایه شده تابع هدفی غیرخطی است در عبارت غیر خطی موجود در تابع هدف دوم ضرب دو متغیر باینری و

پیوسته وجود دارد. برای وضوح بیشتر تابع هدف دوم در معادلات ۳۵ و۳۶ بازنویسی شده و این بخش از تابع هدف در کروشه قرار داده شده است. برای خطی سازی تابع هدف ارایه شده و بر اساس مباحث مربوط به خطی سازی بخش قبل، متغیر پیوسته $\rho_{\delta i}$ و سه قیود ۳۷ تا ۳۹ به ازای هر روز و هر مشتری در مدل تعریف شد.

iv خطی سازی عبارت محاسبه زمان

قید۱۵، مربوط به محاسبه زمان رسیدن وسائط نقلیه به مشتریان است. در این قید عبارت غیرخطی با ترکیب ضرب متغیر باینری در متغیر پیوسته است. در این قید یک متغیر پیوسته در مجموع چند متغیر گسسته ضرب شده است. با توجه به قیود مدل مجموع متغیرهای گسسته حداکثر می‌تواند یک باشد و بنابراین می توان این مجموع را به عنوان یک متغیر صفر و یک در نظر گرفت. قید بازنویسی شده در معادله ۴۰ و۴۱ نشان داده شده است.

برای خطی سازی این بخش $\phi_{\delta i}$ تعریف گردید و سه قید ۴۲ تا ۴۴ به مدل اضافه شد (Chang and Chang, 2000). در ادامه روش الگوریتم بهینه‌سازی شبیه‌سازی تبریدکه برای حل مدل پیشنهادی استفاده شده است، توضیح داده خواهد شد.

۴. الگوریتم شبیه‌سازی تبرید (SA)

در این بخش، به معرفی الگوریتم شبیه سازی تبرید (SA) برای حل مسأله پرداخته می‌شود. این الگوریتم و یک رهیافت تکراری برای حل مسأله بوده و ایده آن از فرآیند ذوب یک جامد به سمت یک حالت دارای حداقل انرژی به وجود آمده است. فرآیند فعالیت این الگوریتم همانند شکل‌گیری کریستال‌های فلزگداخته درهنگام سرد شدن است. فرآیند فیزیکی سرمایش که هدف از آن کاهش دمای ماده به پایین ترین سطح انرژی است، تعادل‌گرمایی نامیده می‌شود. فرآیند سرمایش با ماده‌ای در وضعیت گداخته

$$\sum_{\delta=1}^{\Delta}\sum_{i=1}^{N}(o_{\delta i}\, w_{di}+\theta_{\delta i}(\frac{\upsilon_{\delta i}}{\upsilon_{\delta i}-\lambda_{\delta i}})w_{di}-\{\theta_{\delta i}.\tau_{\delta i}\}(\frac{1}{\upsilon_{\delta i}-\lambda_{\delta i}})w_{di}) \quad (۳۵)$$

$$\sum_{\delta=1}^{\Delta}\sum_{i=1}^{N}(o_{\delta i}\, w_{di}+\theta_{\delta i}(\frac{\upsilon_{\delta i}}{\upsilon_{\delta i}-\lambda_{\delta i}})w_{di}-\rho_{\delta i}(\frac{1}{\upsilon_{\delta i}-\lambda_{\delta i}})w_{di}) \quad (۳۶)$$

$$\rho_{\delta i}\le\tau_{\delta i}\quad ;\quad \forall\, i=1,...,N\ ;\ \delta=1,...,D \quad (۳۷)$$

$$\rho_{\delta i}\le M\theta_{\delta i}\quad ;\quad \forall\, i=1,...,N\ ;\ \delta=1,..,D \quad (۳۸)$$

$$\rho_{\delta i}\ge\tau_{\delta i}-M(1-\theta_{\delta i})\quad ;\quad \forall\, i=1,...,N\ ;\ \delta=1,...,D \quad (۳۹)$$

$$\tau_{\delta j}=\sum_{i=0}^{N}\{\tau_{\delta i}(\sum_{k=1}^{K}x_{ij\kappa}^{\delta})\}+\sum_{i=0}^{N}\sum_{k=1}^{K}(t_i+t_{ij}).x_{ij\kappa}^{\delta}\quad ;\quad \forall\, j=1,..,N\ ;\ \delta=1,..,D \quad (۴۰)$$

$$\tau_{\delta j}=\sum_{i=0}^{N}\{\phi_{\delta i}\}+\sum_{i=0}^{N}\sum_{k=1}^{K}(t_i+t_{ij}).x_{ijk}^{\delta}\quad ;\quad \forall\, j=1,...,N\ ;\ \delta=1,...,D \quad (۴۱)$$

$$\phi_{\delta i}\le\tau_{\delta i}\quad ;\quad \forall\, i=1,...,N\ ;\ \delta=1,...,D \quad (۴۲)$$

$$\phi_{\delta i}\le M\sum_{k=1}^{K}x_{ij\kappa}^{\delta}\quad ;\ \forall\, i=1,...,N\ ;\ \delta=1,...,D \quad (۴۳)$$

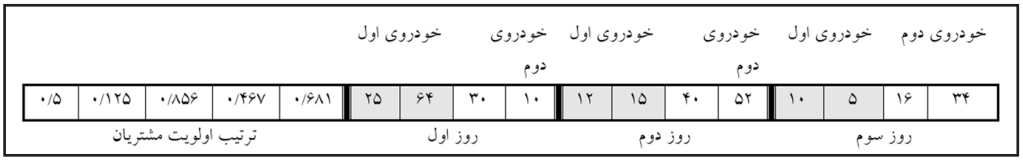
$$\phi_{\delta i}\ge\tau_{\delta i}-M(1-\sum_{k=1}^{K}x_{ijk}^{\delta})\quad ;\ \forall\, i=1,...,N\ ;\ \delta=1,...,D \quad (۴۴)$$

آغاز می‌شود و سپس بتدریج دمای آن کاهش می‌یابد. در هر دما جسم، مجاز به رسیدن تعادل گرمایی است. دما نباید خیلی به سرعت کاهش یابد، بویژه در مراحل اولیه، در غیراین صورت، برخی کاستیها در ماده پدیدار شده و ماده به وضعیت انرژی کمینه نخواهد رسید. کاهش دما شبیه به کاهش مقدار تابع هدف (در مسایل کمینه‌سازی) است که توسط یک سری تغییرات بهبود دهنده انجام می‌گیرد. برای اینکه دما به آهستگی کاهش یابد، باید تغییرات غیر بهبود دهنده تابع هدف نیز با احتمال معینی انتخاب شوند بطوریکه وقتی تابع هدف کاهش می‌یابد این احتمال نیز کاهش یابد. این امر موجب می‌شود که الگوریتم در بهینه‌های موضعی گرفتارنشود [Kirkpatrick and Vecci, 1983; Hajek, 1985]شکل ۱ نشان‌دهنده شبه کد مربوط به این الگوریتم است. در ادامه روش‌نمایش پاسخ‌ها و همچنین روشهای بهبود دهنده پاسخ‌های مسأله به منظور استفاده در روش ISA نشان داده شده است.

۵. نمایش پاسخ‌ها

به منظور آشنایی با روش کدینگ استفاده شده در این مقاله، مثالی مطابق شکل ۲ ارایه شده است. در این مثال، ۵ مشتری باید توسط دو وسیله نقلیه در طول سه روز سرویس‌دهی شوند. در شکل۲، ترتیب اولویت مشتریان به وسیله عدد اعشاری بین صفر و یک نشان داده شده است. به طور مثال، اولویت تقاضای مشتری اول برابر ۰/۳۴۵ و برای مشتری دوم برابر ۰/۱۲۵ است. همچنین شکل ۲ نشان دهنده نقاط فرضی استقرار وسائط نقلیه در روزهای اول

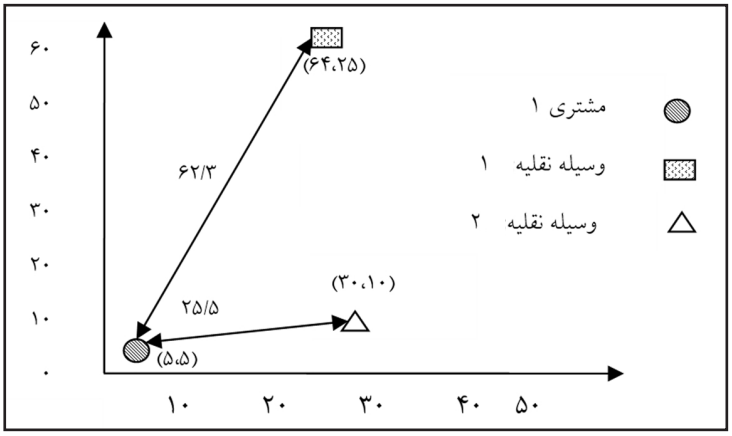
شکل ۱. شبه کد الگوریتم شبیه سازی تبرید



شکل ۲. نحوه نمایش پاسخها

جدول ۱. مختصات و تقاضای ترکیبی مشتریان

شماره مشتری	مختصات x	مختصات y	ترکیب اول	ترکیب دوم	ترکیب
۱	۵	۵	۳،۱	۱،۲	–
۲	۳	۲۷	۱،۲،۳	–	–
۳	۴۰	۱۴	۱،۲	۱،۳	–
۴	۱۸	۲۴	۱	۲	۳
۵	۳۳	۹	۱،۳	۱،۲	–



شکل ۳. نحوه انتخاب وسائط نقلیه توسط مشتری اول در روز اول

الی سوم نیز هست، به طوری که مختصات فرضی محل استقرار وسیله نقلیه اول در روز اول برابر (۲۵/۶۴) و در روز دوم برابر (۱۵/۱۲) است. همچنین، علاوه بر هر وسیله نقلیه، مشتریان نیز دارای مختصات ویژه و ترکیب‌های مختلف از تقاضای کالا در روزهای مختلف هستند که از پیش تعیین شده‌اند. این اطلاعات در جدول ۱ نشان داده شده است. در این جدول، ستون اول نشان دهنده شماره مشتری، ستون دوم و سوم به ترتیب نشان‌دهنده مختصات x و y است و ستون‌های چهارم الی ششم، نشان‌دهنده ترکیب تقاضاها در روزهای مختلف است. به طور مثال، تقاضای مشتری اول یا روز اول و سوم و یا روز اول و دوم باید برآورد شود و برای مشتری دوم باید در هر سه روز به تقاضایش پاسخ داده شود.

با توجه به مطالب بیان شده کدینگ اطلاعات بر اساس مراحل زیر صورت می‌گیرد.

در مرحله اول، ترتیب اولویت مشتریان را ابتدا مشخص کرده و سپس آنها را به صورت صعودی مرتب نمائید. برای مثال ذکر شده مشتری دوم با اولویت مقداری ۰/۱۲۵ بیشترین اولویت را دارد و بعد از آن مشتریان ۱،۴،۵،۳ به ترتیب دارای بیشترین اولویت‌ها هستند.

پس از تعیین اولویت‌ها در مرحله دوم می‌بایست نحوه خدمت‌گیری مشتریان از وسائط نقلیه را مشخص کنید. به همین منظور ابتدا فاصله‌ی بین دپوی وسائط نقلیه و مشتری را محاسبه کنید و وسیله‌ای که کمترین فاصله را با مشتری دارد را انتخاب نمایید. شکل ۳، نشان دهنده نحوه انتخاب وسیله نقلیه توسط مشتری اول در روز اول برای مثال ذکر شده است.

در شکل ۳، ابتدا فاصله بین مشتری اول وسیله نقلیه اول و دوم محاسبه شد. به دلیل آنکه فاصله وسیله نقلیه دوم (۲۵/۵) از وسیله نقلیه اول (۶۲/۳) کمتر است، به همین دلیل وسیله نقلیه اول به مشتری اول در روز اول سرویس می‌دهد. با توجه به مثال ذکر شده، جدول۲ نشان دهنده وسائط نقلیه‌ای است که در روزهای متفاوت به مشتریان سرویس می‌دهند.

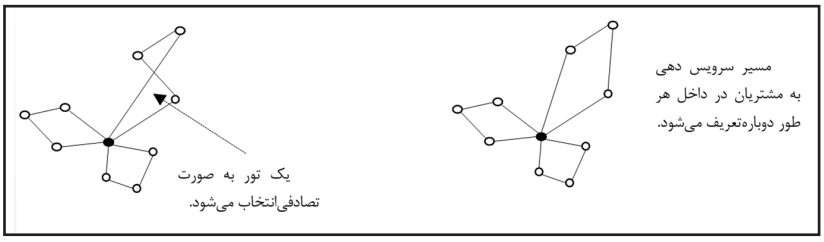
پس از تخصیص وسائط نقلیه به مشتریان، ابتدا مشتری که دارای

جدول۲. نحوه سرویس دهی وسائط نقلیه به مشتریان در هر روز

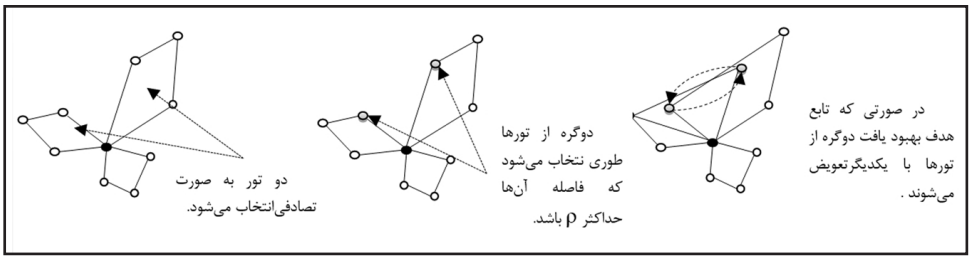
شماره مشتری	روز اول		روز دوم		روز سوم	
	وسیله نقلیه۱	وسیله نقلیه۲	وسیله نقلیه۱	وسیله نقلیه۲	وسیله نقلیه۱	وسیله نقلیه۲
۱	۲	۱	۱	۲	۱	۲
۲	۲	۱	۱	۲	۲	۱
۳	۲	۱	۱	۲	۲	۱
۴	۲	۱	۱	۲	۲	۱
۵	۲	۱	۱	۲	۱	۲

بالاترین اولویت است را انتخاب کنید. سپس مشتریان بعدی را بر اساس فهرست اولویت‌ها انتخاب کنید. هزینه انتخاب هر مشتری در هر روز به صورت زیر تعیین می‌شود. پس از انتخاب مشتری، وسیله نقلیه ای را که باید به آن سرویس‌دهی شود انتخاب کنید. اگر ظرفیت وسیله نقلیه توانایی تامین تقاضای مشتری را داشته باشد، آن را به فهرست مشتریانی که توسط وسیله نقلیه باید سرویس دهی کند اضافه کنید. در غیراین صورت، وسیله نقلیه بعدی که کمترین فاصله را با مشتری دارد انتخاب کنید و اگر هیچ وسیله نقلیه‌ای نتوانست قید ظرفیت را ارضا نماید، آن مشتری را برای آن روز کنار گذاشته و اعلام کنید که هزینه سرویس دهی به مشتری بی‌نهایت است. بعد از اضافه کردن مشتری به فهرست وسیله نقلیه قیود دیگر، نظیر مدت زمان خدمت رسانی را بررسی کنید. اگر قید زمانی تغییرات جدی را در تورهای داخلی و جستجوی محلی ایجاد نکرد، آنگاه یک تابع جریمه به تابع هزینه آن مشتری در آن روز اضافه کنید و آن را قبول کنید. در غیراین صورت وسیله نقلیه دیگری را انتخاب کنید و همچنین اگر هیچ وسیله نقلیه‌ای نتوانست قید زمانی را بدون تغییرات اساسی در جستجوهای محلی و تورهای دخلی ارضا کند، آنگاه، آن مشتری را برای آن روز کنار گذاشته و اعلام کنید که هزینه سرویس دهی به مشتری بی‌نهایت است. در مرحله بعدی، بهترین ترکیب از مشتریان را به دست آورید. منظور از بهترین ترکیب، ترکیبی است که کمترین هزینه را داشته و تمامی مشتریان را در ترکیب تقاضای روزها که از پیش تعیین شده است، پاسخ دهد. بعد از مشخص کردن بهترین ترکیب، در هر روز مشتریانی را که باید توسط وسائط نقلیه سرویس‌دهی شوند مشخص کنید و سپس به منظور بهینه سازی پاسخ‌ها در مسأله مسیریابی وسائط نقلیه از روش‌های بهبود همانند تعویض گره در تور داخلی و روش 2-opt* در تورهای هر وسیله نقلیه در هر روز استفاده کنید. روشهای بهبود بکار رفته برای حل این مدل به صورت زیر است.

- **تعویض گره در تور داخلی:** این روش جستجوی محلی می‌تواند در تورهای مسأله استفاده شود. در این روش جستجوی محلی، ابتدا، دو گره (مشتری) در داخل یک تور انتخاب می‌شوند سپس ترتیب عبوری وسیله نقلیه در آن دو گره (مشتری) با یکدیگر تعویض می‌شوند. اگر این تعویض هزینه تور را کاهش داد، آن را انتخاب کنید، در غیراین صورت تور دو گرهی دیگر را انتخاب کرده و سپس مسیر آنها را با یکدیگر تعویض کنید. این کار را برای تمامی گره‌های موجود در تور باید انجام دهید و هر تعویضی که بیشترین کاهش را در هزینه داشت انتخاب کنید (شکل ۴).
- **روش 2-opt*:** در این روش ابتکاری ابتدا دو تور به طور تصادفی انتخاب می‌شوند. در اولین گام در اجرای این روش ابتدا در هر تور یک گره انتخاب می‌شود، به‌طوری که فاصله این دو گره از یکدیگر از مقدار مشخص، ρ، بیشتر نباشد. دلیل استفاده از این مقدار جلوگیری از انتخاب گره‌های با فاصله زیاد است که منجر به بوجود آمدن جستجوی نامناسب می‌شود (شکل ۵). یکی دیگر از الگوریتم‌های استفاده شده در این مقاله به منظور



شکل۴. تعویض گره در تور داخلی



شکل۵. روش 2-opt*

حل مسائل الگوریتم توسعه‌داده شبیه‌سازی تبرید ISA است که در این الگوریتم، در هر تکرار در محاسبه مقدار تابع برازندگی از هر دو روش بهبودِ، تعویض گره در تور داخلی و روش *-۲ opt استفاده می‌شود، در صورتی که از این دو روش در روش شبیه‌سازی تبرید استفاده نمی‌شود. با استفاده از این دو روش پیش‌بینی می‌شود که زمان حل در SA کمتر از زمان حل از ISA باشد، ولی پاسخ‌های ارایه شده توسط ISA از پاسخ های ارایه شده از SA بهتر شود.

۶. نتایج محاسباتی

در این بخش به منظور بررسی روشهای فراابتکاری ارایه شده، دسته‌ای از مسائل نمونه توسط روشهای فراابتکاری حل شده و پاسخ‌های حاصل با پاسخهای حاصل از حل مدل با روش شاخه و کران مقایسه می‌گردند. هدف از این آزمایش، بررسی توانایی روشهای فراابتکاری در رسیدن به پاسخهای بهینه در مقایسه با حل مدل ریاضی است. همچنین در این بخش عملکرد روشهای فرا ابتکاری در حل مسائل با یکدیگر مقایسه می‌گردند. برای انجام این آزمایشها از نرم افزار لینگو و متلب استفاده شد و برای اجرای برنامه‌ها از رایانه دو هسته با توانایی ۲/۳ GHZ و حافظه داخلی GB ۲ استفاده گردید.

در ادامه، به بررسی عملکرد روشهای فراابتکاری و مدل خطی صفر و یک درحل مسائل نمونه می‌پردازیم. برای این منظور تعدادی مسأله با ابعاد مختلف تولید شد و این مسائل توسط هر یک از روشهای قطعی و فراابتکاری توضیح داده شده، حل شد. برای ایجاد مسائل از توزیع احتمال یکنواخت استفاده شده است. برای تولید اعداد مربوط به مختصات هر مشتری از توزیع یکنواخت با پارامترهای ۰ و ۲۰ واحد استفاده شده است. میزان تقاضای مشتریان با استفاده از توزیع یکنواخت در بازه ۱ و ۱۰ واحد به دست آمده است. همچنین، مدت زمان لازم برای سرویس‌دهی با استفاده از توزیع یکنواخت در بازه ۱ و ۵ واحد به دست آمده است. برای ایجاد پارامتر کران پایین زمان رسیدن رقیب (e_i) از توزیع یکنواخت با پارامترهای ۵ و ۲۰ واحد استفاده شده و برای ایجاد کران بالایی این زمان از توزیع یکنواخت با پارامترهای e_i)+۵) و e_i)+۲۰) استفاده شده است. همچنین برای مشخص کردن تعداد بازدید مورد نیاز مشتری در دوره مشخص شده از توزیع یکنواخت با پارامترهای ۱ و t استفاده شد (در اینجا t تعداد روزهای دوره است.) جدول ۳، به طور خلاصه توزیع‌های مورد استفاده را نشان می‌دهد.

جدول ۳. توزیع پارامترها در مسائل نمونه

ردیف	پارامتر	توزیع مورد استفاده
۱	مختصات	U(0,20)
۲	تقاضای مشتری	U(1,10)
۳	زمان سرویس دهی	U(1,5)
۴	کران پایین زمان رسیدن رقیب	U(5,20)
۵	پارامتر کران پایین زمان رسیدن	U(e_i+5, e_i+20)
۶	تعداد بازدید مورد نیاز مشتری	U(1,t)

جدول۴. مشخصات مسائل نمونه کوچک

مسائل نمونه	تعدادمشتریان	تعدادوسائط نقلیه	تعداد روزهای سرویس دهی	تعداد دفعات خدمت‌رسانی		
				۱	۲	۳
۱	۴	۲	۲	۲	۲	
۲	۵	۲	۲	۳	۲	
۳	۶	۲	۲	۴	۲	
۴	۵	۳	۲	۳	۲	
۵	۶	۳	۲	۴	۲	
۶	۶	۳	۳	۴	۰	۲
۷	۷	۳	۳	۱	۳	۳
۸	۸	۳	۳	۲	۴	۴

جدول ۵. پارامترهای الگوریتم های SA و ISA

تعداد تکرارها	۵۰۰
نرخ کاهش دما	۰/۹۵

برای بررسی الگوریتم‌های مورد نظر تعداد هشت مسأله تولید شد که مشخصات مسائل در جدول ۴ ارایه شده است. در این جدول ستون اول همان شماره مسأله است، ستونهای دوم تا چهارم شامل تعداد مشتریان تعداد وسائط نقلیه در هر روز و تعداد روزهای مسأله به ترتیب است. ستون پنجم (F_1) شامل تعداد مشتریانی است که در طول دوره به یک بازدید نیاز دارند و ستونهای ششم (F_2) و هفتم (F_3) نیز مشخص کننده تعداد مشتریان با تعداد بازدید مورد نیاز دوتایی و سه‌تایی است. همچنین جدول ۵ نشان‌دهنده پارامترهای استفاده شده در الگوریتم‌های SA و ISA هستند.

جدول۶ نتایج حاصل از حل مسائل نمونه توسط الگوریتم‌های SA و ISA و مدل ریاضی را نشان می‌دهد. در این جدول برای هر هدف بهترین مقدار و مقدار نَدیرگزارش شده است. برای به دست آوردن این مقادیر ابتدا هر مسأله با در نظر گرفتن تابع هدف اول حل گردید و پاسخ حاصل به عنوان بهترین پاسخ مربوط به تابع هدف اول در نظر گرفته شد مقدار به دست آمده برای تابع هدف دوم از پاسخ حاصله به عنوان مقدار ندیر این تابع هدف در نظر گرفته شد با حل مسائل با تابع هدف دوم، بهترین مقدار تابع هدف دوم و مقدار نَدیر تابع هدف اول نیز حاصل شد. در این جدول برای هر مثال نمونه دو سطر در نظر گرفته شده است، سطر اول اطلاعات مربوط به حل مسأله با تابع هدف اول را نشان می‌دهد و سطر دوم نشانگر اطلاعات حل مسأله با تابع هدف دوم است.

همچنین در این جدول برای هر یک از روشهای حل چهار ستون

مجزا در نظر گرفته شده است که ستون اول مربوط به بهترین پاسخ برای توابع هدف است (Ideal Solution)، ستون دوم مربوط به پاسخهای ندیر (Nadir) توابع هدف مسأله، ستون سوم مربوط به زمان حل (بر حسب ثانیه) و ستون چهارم خطای پاسخ است.

همان گونه که از جدول ۶ مشخص است، از نظر میزان خطا SA کمی بهتر از ISA عمل کرده است خطای الگوریتمهای SA و ISA به ترتیب ۰ و۱ درصد بوده که نشان دهنده توانایی این الگوریتم‌ها برای رسیدن به پاسخ مناسب است. مقدار این خطا از طریق فرمول (Answer-Best)/Best به دست می‌آید. در این عبارت Answer مقدارپاسخی است که توسط الگوریتم گزارش شده است و Best بهترین مقدار مربوط به مسأله است. متاسفانه به دلیل NP-Hard بودن مسأله زمان حل مدل ریاضی با افزایش ابعاد مسأله به صورت نمایی افزایش می‌یابد، بنابراین برای حل مسائل در صورتی که زمان حل مسأله از یک ساعت فراتر می‌رفت، اجرای مدل متوقف شده و بهترین پاسخ حاصل به عنوان پاسخ مسأله در نظر گرفته شد. این امر برای مسائل نمونه هفتم و هشت اتفاق افتاد و لینگو در زمان یک ساعت نتوانست به پاسخ بهینه توابع دست یابد. همچنین در حل این مسأله با در نظر گرفتن تابع هدف دوم لینگو نتوانست در زمان یک ساعت به پاسخ موجهی دست یابد، بنابراین هیچ مقداری برای بهترین پاسخ تابع هدف دوم و مقدار ندیر تابع هدف اول گزارش نشد. متوسط میزان خطای لینگو ۴ درصد بود این خطا به دلیل توقف برنامه پس از یک ساعت اجرا ایجاد شده است.

به طور کلی با افزایش اندازه مسأله اختلاف بین پاسخهای ندیر و بهتر، پاسخها برای تمامی روشها افزایش می یابد. دلیل این امر آن است که با افزایش اندازه مسأله فضای جستجوی پاسخ افزایش یافته و این امر باعث می شود تا فاصله بین بهترین

جدول۶. نتایج محاسباتی مسأله توسط لینگو، SA و ISA

مسائل نمونه	حل توسط لینگو				حل توسط SA				حل توسط ISA			
	بهترین پاسخ	پاسخ Nadir	زمان(ثانیه)	خطا(٪)	بهترین پاسخ	پاسخ Nadir	زمان(ثانیه)	خطا(٪)	بهترین پاسخ	پاسخ Nadir	زمان(ثانیه)	خطا(٪)
۱	۱۲۰/۲۸	۱۲۱/۶۸	۹/۰۰	۰/۰۰	۱۲۰/۲۹	۱۲۰/۲۹	۶/۸۳	۰/۰۰	۱۲۰/۲۹	۱۲۰/۲۹	۹/۸۳	۰/۰
	۱۱/۰۰	۰/۰۰	۴۲/۰۰	۰/۰۰	۱۱/۰۰	۹/۵۰	۷/۲۴	۰/۰۰	۱۱/۰۰	۹/۵۰	۱۰/۸۱	/۰
۲	۱۱۴/۷۲	۱۱۴/۷۳	۳۹/۰۰	۰/۰۰	۱۱۴/۷۳	۱۱۴/۷۳	۸/۲۴	۰/۰۰	۱۱۴/۷۳	۱۱۴/۷۳	۱۲/۳۸	/۰۰
	۱۰/۸۰	۰/۰	۲۱۱/۰۰	۰/۰۰	۱۰/۸۰	۸/۷۹	۸/۹۷	۰/۰۰	۱۰/۸۰	۱۰/۸۰	۱۱/۷۳	/۰۰
۳	۱۲۲/۸۵	۱۲۴/۸۹	۹۳/۰۰	۰/۰۰	۱۲۲/۸۶	۱۲۴/۹۱	۱۰/۰۲	۰/۰۰	۱۲۲/۸۶	۱۲۴/۹۱	۱۴/۱۰	/۰۰
	۱۳/۴۲	۰/۰	۶۹۲/۰۰	۰/۰۰	۱۳/۴۲	۹/۱۲	۱۰/۸۷	۰/۰۰	۱۳/۴۲	۶/۰۷	۱۴/۷۰	/۰۰
۴	۱۳۴/۵۲	۱۳۴/۵۲	۸۶/۰۰	۰/۰۰	۱۳۴/۵۲	۱۳۴/۵۲	۱۰/۴۴	۰/۰۰	۱۳۴/۵۲	۱۳۴/۵۲	۱۵/۷۸	/۰۰
	۱۱/۲۹	۱۱/۲۹	۳۷۴/۰۰	۰/۰۰	۱۱/۲۹	۱۱/۰۰	۱۰/۱۱	۰/۰۰	۱۱/۲۹	۱۱/۲۹	۱۶/۸۰	/۰۰
۵	۱۲۷/۹۲	۱۵۱/۱۹	۱۹۴/۰۰	۰/۰۰	۱۲۷/۹۴	۱۵۱/۱۹	۱۰/۷۰	۰/۰۰	۱۲۷/۹۴	۱۵۱/۱۹	۱۵/۰۴	/۰۰
	۱۹/۴۸	۰/۰۰	۲۰۰۸/۰۰	۰/۰۰	۱۹/۴۹	۱۴/۱۱	۱۰/۳۲	۰/۰۰	۱۹/۴۸	۱۴/۱۱	۱۸/۸۸	/۰۰
۶	۱۸۳/۹۶	۲۰۹/۲۷	۹۵۵/۰۰	۰/۰۰	۱۸۳/۹۹	۲۰۹/۲۷	۱۲/۴۷	۰/۰۰	۱۸۳/۹۹	۲۱۰/۸۱	۲۱/۲۷	/۰۰
	۱۹/۴۹	۰/۰۰	۶۸۳/۰۰	۰/۰۰	۲۰/۲۰	۱۲/۱۲	۱۳/۱۷	۰/۰۴	۱۹/۴۹	۱۲/۱۲	۲۸/۵۱	/۰۰
۷	۲۸۲/۰۴	۳۲۲/۷۵	۳۶۰۰/۰۰	۰/۱۴	۲۶۴/۷۱	۳۶۱/۶۱	۱۴/۴۲	۰/۰۳	۲۴۶/۸۵	۳۲۲/۷۵	۳۱/۳۶	/۰۰
	۳۹/۲۷	۰/۰۰	۳۶۰۰/۰۰	۰/۰۵	۳۸/۲۱	۲۶/۰۱	۱۵/۹۴	۰/۰۱	۳۷/۵۵	۲۵/۷۲	۴۰/۳۴	/۰۰
۸	۳۸۹/۱۵	–	۳۶۰۰/۰۰	۰/۳۴	۳۱۱/۳۹	۳۹۸/۲۱	۲۱/۲۶	۰/۰۷	۲۸۹/۶۳	۳۸۹/۶۰	۵۵/۸۸	/۰۰
	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۶۰۰/۰۰	–	۲۲/۴۱	۱۳/۷۳	۲۱/۴۲	۰/۰۰	۲۲/۴۱	۳/۲۰	۷۲/۰۹	/۰۰
میانگین			۱۲۳۶/۶۳	۰/۰۴			۱۲/۲۱	۰/۰۱			۲۶/۳۴	/۰۰

پاسخها و پاسخهای ندیر افزایش یابد. هر چند پاسخهایISA از پاسخهای الگوریتم SA کمی بهتر هستند، اما میانگین زمان این الگوریتم تقریبا دو برابر میانگین زمان حل SA است. حل مسائل برای لینگو، SA و ISA به ترتیب ۱۲۳۶/۶۳ ، ۱۲/۲۱ و ۲۶/۳۴ ثانیه است. زمان حل مسائل با توابع هدف اول و دوم برای الگوریتم‌های فراابتکاری تفاوت چندانی نداشت، اما لینگو به طور متوسط هر مسأله با توابع دوم را ۳۱٪ کندتر نسبت به تابع هدف اول حل کرد. این مقدار از رابطه /(SObjTime-FObjTime) FobjTime به دست آمد. در این عبارت FObjTime و SObjTime به ترتیب برابر با متوسط زمان حل مسائل با توابع هدف اول و متوسط زمان حل مسائل با تابع هدف دوم هستند. در الگوریتم های فرا ابتکاری زمان حل مسائل با افزایش سایز مسأله به صورت تقریبا خطی افزایش می یابد. با اعمال رگرسیوم خطی بر زمان حل مسائل با الگوریتم SA معادله خط تغییرات زمان با افزایش سایز مسأله $y=2.526x$ با مقدار $R^2=0.71$ به دست آمد که نشان دهنده صحت خطی بودن رابطه است. زمان حل برای نرم افزار لینگو رابطه‌ای خطی را نشان نمی‌دهد و با افزایش اندازه مسأله زمان حل به صورت نمایی افزایش می‌یابد.

جدول ۷. نتایج حل مسأله در ابعاد بزرگ توسط الگوریتم‌های SA و ISA

تعداد نمونه	حل توسط SA			حل توسط ISA		
	بهترین پاسخ	زمان (ثانیه)	خطا (٪)	بهترین پاسخ	زمان (ثانیه)	خطا (٪)
۱	۱۰۴۳/۸۹ ۳۹۵۶/۵۸ ۵۸۲/۵۴ ۲۵۹۵/۹۷	۷۵۱/۸۳	۰/۰۲	۱۰۲۲/۶۵ ۳۹۳۶/۸۳ ۵۸۲/۸۳ ۲۵۷۱/۷۲	۱۱۷۷/۴۲	۰/۰۰
۲	۸۲۶۵/۲۸ ۱۱۳۳/۸۶ ۳۹۴۲/۷۳	۱۷۳۴/۷۸	۰/۰۱	۸۲۱۷/۹۴ ۱۱۲۹/۲۴ ۳۹۰۶/۹۹	۲۵۹۴/۵۲	۰/۰۰
۳	۱۲۸۲۰/۸۷ ۶۳/۱۷۷۵/۶۳ ۴۹۹۰/۶۴	۲۸۵۶/۷۴	۰/۰۱	۱۲۸۳۳/۹۷ ۱۷۸۵/۴۰ ۴۸۱۷/۹۱	۴۳۳۲/۹۲	۰/۰۰
۴	۱۶۰۶۱/۶۴ ۲۲۱۴/۲۰ ۱۳۲۱/۲۲	۳۸۶۷/۸۹	۰/۰۴	۱۵۸۶۹/۴۴ ۲۲۱۰/۳۱ ۱۲۶۵/۶۵	۵۸۶۲/۸۴	۰/۰۰
۵	۱۷۷۱/۴۳ ۳۲۹۰/۰۴ ۶۷۱۵/۷۶	۴۶۶۳/۳۰	۰/۰۴	۱۷۹۱۸/۵۴ ۳۳۳۰/۵۸ ۵۹۹۲/۹۱	۶۶۹۱/۶۶	۰/۰۰
۶	۲۳۳۹۸/۶۶ ۳۳۳۶/۵۸ ۳۷۶۰/۹۸	۶۳۴۰/۷۲	۰/۱۲	۲۲۷۴۸/۸۲ ۳۳۵۱/۱۸ ۳۷۳۹/۹۰	۹۸۵۱/۴۲	۰/۰۰
۷	۱۰۱۳۵/۷۳ ۱۲۷۴/۹۵ ۳۷۰۴/۳۳	۱۶۴۱/۴۰	۰/۰۱	۱۰۱۹۲/۷۸ ۱۲۹۰/۵۸ ۳۵۳۵/۳۵	۲۳۱۲/۹۱	۰/۰۰
۸	۱۷۸۵۷/۶۵ ۲۸۳۰/۶۶ ۷۶۰۳/۳۴	۳۴۱۹/۹۲	۰/۰۵	۱۷۶۵۴/۱۳ ۲۸۲۳/۷۶ ۷۰۸۳/۶۳	۵۷۶۷/۸۰	۰/۰۰
۹	۲۶۹۶۲/۴ ۳۸۷۱/۸۳ ۶۸۲۰/۳۲	۵۵۷۱/۷۹	۰/۰۷	۲۶۶۵۱/۵۲ ۳۹۱۳/۵۸ ۶۳۳۰/۶۶	۸۷۴۱/۹۶	۰/۰۰
۱۰	۳۴۳۸۰/۲۵ ۵۵۱۱/۹۹	۷۷۴۰/۵۴	۰/۰۸	۳۴۲۲۱/۸۳ ۵۵۷۸/۲۳	۷۷۴۰/۵۴	۰/۰۰
میانگین		۳۸۵۸/۸۹	۰/۰۴		۵۸۵۷/۲۹	۰/۰۰

جدول ۸. نتایج حل مسأله در ابعاد بزرگ توسط الگوریتم‌های SA و ISA

تعداد نمونه	حل توسط SA			حل توسط ISA		
	بهترین پاسخ	زمان (ثانیه)	خطا (٪)	بهترین پاسخ	زمان (ثانیه)	خطا (٪)
۱	۴۳۳/۳۳	۷۲۱/۰۶	۰/۰۲	۴۲۵/۶۲	۱۲۲۳/۱۲	۰/۰۰
	۲۴۶۲/۱۵			۲۴۵۳/۸۷		
	۴۰۵/۷۶			۴۰۵/۶۵		
	۸۹۶/۸۸			۸۷۳/۶۶		
۲	۸۴۹۲/۵۴	۱۹۹۱/۶۳	۰/۰۳	۸۴۸۱/۳۶	۲۷۴۳/۳۵	۰/۰۰
	۱۵۱۹/۱۳			۱۵۲۱/۵۴		
	۱۴۷۹/۹۴			۱۴۷۹/۸۰		
۳	۱۱۱۰۹/۶۳	۴۲۲۲/۰۱	۰/۰۰	۱۱۱۰۹/۴۹	۴۵۵۳/۶۵	۰/۰۰
	۱۹۲۵/۹۴			۱۹۲۵/۹۴		
	۱۸۲۲/۱۶			۱۸۰۷/۳۹		
۴	۱۶۷۵۴/۲۹	۳۹۲۳/۷۸	۰/۰۱	۱۶۷۵۱/۱۹	۶۵۱۱/۲۷	۰/۰۰
	۲۹۸۶/۴۳			۲۹۸۸/۷۶		
	۲۳۲۱/۱۸			۲۲۱۲/۳۴		
۵	۱۸۶۵۴/۴۳	۶۴۴/۱۶	۰/۰۵	۱۸۶۴۱/۸۹	۷۲۵۲/۷۷	۰/۰۰
	۳۲۶۶/۶۵			۳۲۸۵/۹۱		
	۶۸۸۵/۶۵			۶۸۶۰/۵۸		
۶	۲۳۱۵۸/۶۹	۶۸۶۴/۵۵	۰/۰۰	۲۳۱۵۶/۷۳	۸۹۹۶/۹۶	۰/۰۰
	۳۲۵۴/۶۱			۳۲۵۹/۲۳		
	۶۲۳۸/۲۵			۶۰۵۴/۵۵		
۷	۱۱۳۳۸/۵۷	۲۸۷۶/۳۹	۰/۰۳	۱۱۲۳۴/۶۵	۳۳۸۱/۶۴	۰/۰۰
	۱۰۲۰/۰۷			۱۰۳۶/۰۲		
	۵۵۴۶/۴۸			۵۱۶۹/۱۷		
۸	۱۸۰۸۳/۵۹	۵۴۷۶/۸۲	۰/۰۷	۱۷۷۱۵/۱۲	۶۸۲۶/۴۱	۰/۰۰
	۲۵۰۷/۴۲			۱۹/۲۵۰۹		
	۱۰۲۶۹/۵۲			۱۰۲۱۳/۹۷		
۹	۲۷۱۷۳/۹۰	۹۱۹۶/۹۹	۰/۰۱	۲۷۱۶۱/۶۷	۱۲۶۲۱/۸۶	۰/۰۰
	۳۳۸۰/۸۷			۳۳۸۹/۵۴		
	۱۰۱۳۶/۷۷			۹۸۳۸/۸۳		
۱۰	۳۵۳۳۰/۶۰	۱۳۷۵۶/۵۶	۰/۰۳	۳۵۳۱۲/۱۸	۱۶۱۲۴/۴۵	۰/۰۰
	۵۰۳۸/۷۷			۵۰۹۴/۶۷		
میانگین		۵۵۴۷/۰۹	۰/۰۲		۷۰۲۳/۵۴	۰/۰۰

در ابعاد بزرگ به طور میانگین از نظر زمانی الگوریتم پیشنهادی تقریبا ۲۰ درصد کند تر از روش SA عمل میکند اما کیفیت پاسخهای الگوریتم ISA ۳ درصد بهتر از الگوریتم SA است. همچنین حداکثر میزان بهبود نیز ۷ درصد بوده است این امر نشان میدهد که بهبود ایجاد شده در الگوریتم پیشنهادی تاثیر مناسبی در بهبود پاسخها داشته است.

۷. نتیجه‌گیری

در این مقاله، به بررسی مسیریابی وسائل نقلیه رقابتی در حالت چند دورهای پرداخته شده و از رویکرد پنجره زمانی برای مواجه با مبحث رقابت بهره برده شده است. با توجه به NP-Hard بودن مسأله از الگوریتم‌های شبیه سازی تبرید و الگوریتم پیشنهادی شبیه سازی تبرید بهبود یافته به منظور حل مدل پیشنهادی استفاده

گردید. به منظور نشان دادن کارآیی الگوریتم‌های SA و ISA ابتدا مسائلی در ابعاد کوچک با روش دقیق شاخه و کران حل شد و پاسخ‌های به دست آمده با پاسخ‌های به دست آمده از دو الگوریتم پیشنهادی مقایسه گردید. میزان خطای دو روش فراابتکاری شبیه سازی تبرید و الگوریتم پیشنهادی شبیه‌سازی تبرید بهبود یافته در این ابعاد به ترتیب ۱ درصد و صفر درصد است. این امر نشان دهنده کارآیی الگوریتمهای پیشنهادی است. در ادامه به منظور بررسی کارآیی الگوریتم‌های پیشنهادی در ابعاد بزرگ مسائلی در ابعاد بزرگ توسط الگوریتم‌های پیشنهادی حل شد. همان گونه که از داده‌های جدول ۷ و ۸ مشهود است کیفیت پاسخهای حاصل از الگوریتم ISA به طور میانگین در حدود ۳ درصد از پاسخهای الگوریتم SA بهتر است. از نظر زمانی اما متوسط زمان حل الگوریتم بهبود یافته در حدود ۲۰درصد از الگوریتم SA کندتر میباشد. نتایج حاصله نشان دهنده کارآیی الگوریتم پیشنهادی شبیه‌سازی تبرید در حل مسأله مطرح شده میباشد.

۸. سپاسگزاری

از حمایت مالی دانشگاه تهران از این تحقیق در قالب طرح پژوهشی شماره ۱۴-۱-۸۱۰۶۰۴۳ قدردانی می گردد.

۹. پی‌نوشت‌ها

1. Vehicle Routing Problem (VRP)
2. Simulated Annealing (SA)
3. Improved Simulated Annealing (ISA)
4. Just In Time (JIT)
5. Periodic Vehicle Routing Problem with Time Window (PVRPTW)
6. Periodic Vehicle Routing Problem (PVRP)
7. Factory Gate Pricing

۱۰. مراجع

- توکلی مقدم، رضا، ربانی، مسعود، شریعت، محمد علی و صفائی، نیما (۱۳۸۵) " حل مسایل مسیریابی وسایط نقلیه با پنجره‌های زمانی نرم با استفاده از یک الگوریتم فرا ابتکاری تلفیقی" نشریه فنی دانشگاه تهران، جلد ۴۰، شماره ۴، مهر ۱۳۸۵، ص. ۴۷۶-۴۶۹.

- ربانی، یوسف، سپهری، محمدمهدی، ذگردی، سید حسام الدین (۱۳۸۷)" مسأله مسیریابی وسیله نقلیه متصل به حمل ونقل چند وجهی رویکرد یکپارچه" پژوهشنامه حمل و نقل، سال پنجم، شماره چهارم، زمستان ۱۳۸۷ ص. ۳۰۷-۳۱۸.

- سپهری، محمد مهدی و حسینی مطلق، سید مهدی (۱۳۸۷) "مسیریابی بهینه سیستم‌های حمل و نقل در انبارهای اتوماتیک"، پژوهشنامه حمل و نقل، سال پنجم، شماره ۲، ص. ۱۲۷-۱۴۴.

- Alegre, J., Laguna, M. and Pacheco, J. (2007) "Optimizing the periodic pick-up of raw materials for a manufacturer of auto parts", European Journal of Operational Research, Vol. 179, No. 3, June, pp.736–746.

- Beltrami, E.J. and Bodin, L.D. (1974) "Networks and vehicle routing for municipal waste collection", Networks, Vol. 4, No. 1, pp. 65–94.

- Carter, M.W, Farvolden, J. M. Laporte, G and Xu, J. (1996) "Solving an integrated logistics problem arising in grocery distribution". INFOR, Vol. 34, No. 4, pp.306–290 .

- Chang, C.T. and Chang C. C. (2000) "A linearization method for mixed1–0 polynomial programs", Computers & Operations Research, Vol. 27, No. 10,

September, pp.1005–1016.

- Chao, I. M., Golden, B. L. and Wasil, E.A. (1995) "An improved heuristic for the period vehicle routing problem", Networks, Vol. 26, No. 1, pp. 25–44.

- Christofides, N. and Beasley, J. E. (1984) "The period routing problem", Networks, Vol. 14, No.1, pp. 237–256.

- Claassen, G.D.H. and Hendriks, T. H. B. (2007)"An application of Special Ordered Sets to a periodic milk collection problem". European Journal of Operational Research, Vol. 180, No. 2, July, pp. 754–769.

- Clarke, G. and Wright, J. (1964) "Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points", Operations Research, Vol. 12, No. 4, July, pp. 568–581.

- Cordeau, F., Gendreau, M. and Laporte, G. (1997) "A tabu search heuristic for periodic and multi-depot vehicle", Journal routing problems, Networks, Vol. 30, No. 2, pp.105-119.

- Drummond, L.M.A., Ochi, L.S. and Vianna, D.S. (2001) "An asynchronous parallel metaheuristic for the period vehicle routing problem", Future Generation Compute Systems, Vol. 17, No. 4, pp.379–386.

- Gaur, V. and Fisher, M. L. (2004) "A periodic inventory routing problem at a supermarket chain", Operations Research, Vol. 52, No. 6, pp.813–822.

- Golden, B. L. and Wasil, E.A. (1987) "Computerized vehicle routing in the soft drink industry". Operations Research, Vol. 35, No. 1, pp.6–17.

- Fisher, M. L. and Jaikumar, R. (1981) "A generalized assignment heuristic for vehicle routing problems", Networks, Vol. 11, No. 2, pp.109–124.

- Francis, P. M., Smilowitz, K.R. and Tzur, M. (2006) "The period vehicle routing problem with service choice", Transportation Science, Vol. 40, No. 4, October, pp. 439–454.

- Gaudioso, M. and Paletta, G. (1992) "A heuristic for the period vehicle routing problem" Transportation Science, Vol. 26, No. 2, pp. 86–92.

- Glover F. and Woolsey, L. (1974) "Converting the 0–1 polynomial programming problem to a 0–1 linear program", Operation Research, Vol. 22, No. 1, January, pp. 180–182.

- Golden, B.L., Magnanti, T. L. and Nguyen, H. Q. (1977) "Implementing vehicle routing algorithms", Networks, Vol. 7, No. 2, pp. 113–148.

- Hajek, B. (1985) "Cooling schedules for optimal annealing", Mathematics of Operations Research, Vol. 13, No. 2, May, pp. 311–329.

- Hemmelmayr, V., Doerner, K. and Hartl, R. (2009) "A variable neighborhood search heuristic for periodic routing problems", European Journal of Operational Research, Vol. 195, No. 3, June, pp. 791–802.

- Kirkpatrick, F., Gelatt, C. and Vecci, M. (1983) "Optimization by simulated annealing", American Association for the Advancement of Science, Vol. 220, No. 4598, May, pp. 671–680.

- le Blanc, H. M., F. Cruijssen, H. A. Fleuren, and M.

B. M. de Koster. Factory gate pricing: An analysis of the Dutch retail distribution. Working paper; http://econpapers.repec.org/paper/dgreureri/30001575.htm. (2004).

- Lin, S. and Kernighan, B.W. (1973) "An effective heuristic for the traveling salesman problem" Operations Research, Vol. 21, No. 2, March, pp. 498–516.

- Mourgaya, M. and Vanderbeck, F. (2006) "Column generation based heuristic for tactical planning in multi-period vehicle routing", European Journal of Operational Research, Vol. 183, No. 3, pp. 1028–1041.

- Norouzi, N., Tavakkoli-Moghaddam, R., Ghazanfari, M., Alinaghian, M. and salamatbakhsh, A. (2012) "A new multiobjective competitive open vehicle routing problem solved by particle swarm optimization", Networks and Spatial Economics, Vol. 14, No.4, pp. 603–633.

- Parthanadee, P. and Logendran, R. (2006) "Periodic product distribution from multi-depots under limited supplies", IIE Transactions, Vol.38 , No.11 , pp. 1026–1009.

- Russell, R. A. (1977) "An effective heuristic for the M-tour traveling salesman problem with some side conditions" Operations Research, Vol. 25, No. 3, pp. 517–524.

- Russell, R. A. and Gribbin, D. (1991) "A multiphase approach to the period routing problem", Networks, Vol. 21, No. 7, pp.765–747 .

- Russell, R. A. and Igo, W. (1979) "An assignment routing problem", Networks, Vol.9 , No. 1, pp. 1–17.

- Tan, C. C. R. and Beasley, J. E. (1984) "A heuristic algorithm for the period vehicle routing problem", Omega, Vol. 12, No. 5, pp. 497–504.

- Tavakkoli-Moghaddam, R., Ghazanfari, M., Alinaghian, M., salamatbakhsh, A. and Nourozi, 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, No. 2, pp. 83–92.

- Toth, P. and Vigo, D. (2002) "The vehicle routing problem", University Degli Studi di Bologna, Italy.