

توسعه‌ی الگوریتم ترکیبی ازدحام گربه‌ها با عملگرهای ژنتیکی برای حل مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت پنجره‌ی زمانی

بهناز یادگاری (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان

امیرمسعود رحیمی* (دانشیار)

دانشکده‌ی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان

محسن ابوطالبی اصفهانی (دانشیار)

دانشکده‌ی عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان

مهندسی عمران شریف، (زمستان ۱۴۰۳)
دوره‌ی ۴۰، شماره‌ی ۴، صص. ۸۵-۹۵، (یادداشت فنی)

حمل و نقل کارآمد کالا برای کاهش هزینه‌ها، تسریع زمان تحویل، و بهبود کیفیت خدمات ضروری است. مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت پنجره‌ی زمانی (VRPTW)، یک مسئله‌ی بهینه‌سازی NP-hard در لجستیک است. در نوشتار حاضر، یک الگوریتم ترکیبی ازدحام گربه‌ها با عملگرهای ژنتیکی برای حل مؤثر مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت پنجره‌ی زمانی ارائه شده است. تابع هدف روی کمیته‌سازی کل مسافت طی شده و تعداد وسائط نقلیه‌ی استفاده‌شده تمرکز دارد. برای ارزیابی اثربخشی، الگوریتم با مجموعه‌ی داده‌های شبیه‌سازی‌شده از نمونه‌های سالمون آزمایش شده است. تجزیه و تحلیل مقایسه‌ی با سایر الگوریتم‌های موجود برتری آن را از نظر کیفیت راه‌حل و کارایی محاسباتی برجسته می‌کند. برای نمونه‌های با اندازه‌ی ۵۰ مشتری تا ۵۹/۴۸٪ بهبود در پاسخ‌های پیشین و برای نمونه‌های با اندازه‌ی ۱۰۰ مشتری در تعدادی از نمونه‌ها پاسخ‌های بهینه‌سراسری به‌دست‌آمده از نوشتارهای پیشین به‌دست‌آمده است. الگوریتم پیشنهادی برای سیستم‌های حمل و نقل و لجستیک با مشتری محدود مناسب است و منجر به کاهش هزینه‌ها، بهبود زمان تحویل، و افزایش کیفیت خدمات می‌شود.

واژگان کلیدی: بهینه‌سازی ترکیبی انتخاب‌میسر- وسیله‌ی نقلیه، مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه، پنجره‌ی زمانی، بهینه‌سازی ازدحام گربه‌ها، الگوریتم ژنتیک.

behnazyadegari@gmail.com
amrahimi@znu.ac.ir
m.aboutalebi.e@eng.ui.ac.ir

۱. مقدمه

در نظر گرفتن سرویس بیشینه و استفاده‌ی بهینه از سرمایه و تجهیزات حاصل کند. توزیع بهینه‌ی مواد غذایی، روزنامه، محموله‌های پستی، نظافت خیابان‌ها، حمل‌ونقل داخل سازمانی، مسیر حرکت اتوبوس‌ها، سرویس مدارس، سیستم‌های توزیع و نگهداری پخش پول، و سرویس‌های بانکی و جمع‌آوری زباله‌های صنعتی و تجاری، و غیره از جمله مسائلی است که می‌توان در این زمینه به آن‌ها اشاره کرد.

مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت پنجره‌ی زمانی (VRPTW)^۱ اهمیت قابل توجهی در سیستم‌های حمل و نقل و لجستیک دارد؛ که شامل طراحی مسیرهای کارآمد برای ناوگان وسائط نقلیه برای خدمت به مجموعه‌ی مشتریان است. هر مسیر از انبار شروع و با انبار پایان می‌یابد و هر مشتری دقیقاً توسط یک وسیله‌ی نقلیه و فقط یک بار بازدید می‌شود. علاوه بر این، مسیرها باید به محدودیت‌های ظرفیت وسیله‌ی نقلیه و محدودیت‌های زمانی اعمال شده توسط مشتریان پایبند باشند.

حمل و نقل، یکی از بخش‌های عمده و مهم از اقتصاد هر کشوری به‌شمار می‌رود و همچنین یکی از مهم‌ترین بخش‌های تشکیل‌دهنده‌ی هزینه‌ی تمام‌شده‌ی محصول‌های نهایی است. توسعه‌ی روزافزون شهرنشینی، صنایع، و بخصوص صنایع پشتیبانی، جایجایی انسان و کالا را به‌صورت مسئله‌ی درآورده است که پیچیدگی آن دائماً در حال افزایش است. رشد شهری و شهرنشینی باعث افزایش فزاینده‌ی تقاضا در صنعت حمل و نقل شده است، که به‌تبع آن شهرها و صنایع بزرگ را دست به گریبان مشکلات زیادی در زمینه‌های تراکم ترافیک، آلودگی هوا، اتلاف وقت طولانی در مسیر سفرهای روزانه‌ی افراد، افزایش مصرف سوخت، و استهلاک وسائط نقلیه، و غیره کرده است. برای حل مشکلات ترافیکی و مسائل اقتصادی، اجتماعی، و زیست‌محیطی ناشی از آن در شهرهای بزرگ، صنایع تولیدی و بخش خدمات نیاز به یک سیستم مجهز و کارآمد حمل و نقل دارند. همچنین لازم است که سیستم مذکور، صرفه جویی در هزینه‌ها را با

*نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۱۳، تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۲/۱۲/۲۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۲.

استناد به این مقاله:

یادگاری، بهناز، رحیمی، امیرمسعود، و ابوطالبی اصفهانی، محسن، ۱۴۰۳. توسعه‌ی الگوریتم ترکیبی ازدحام گربه‌ها با عملگرهای ژنتیکی برای حل مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت پنجره‌ی زمانی، ۴۰(۴)، صص. ۸۵-۹۵. DOI: 10.24200/j30.2024.63335.3268

^۱ Vehicle Routing Problem with Time Window

نصب صحیح و به موقع کنتورهای هوشمند از مسائل فنی، مالی، و امنیتی حائز اهمیت است.

مسائل مسیریابی و برنامه‌ریزی زمان‌بندی مراقبت‌های بهداشتی در منزل^۳ (HHCRSP)، به جایگاه مراقبت‌های بهداشتی در منزل (شامل یک طیف گسترده از خدمات بهداشتی که در منزل بیماران در صورت بیماری یا آسیب ارائه می‌شود)، می‌پردازد. در سطح عملیاتی، دو مسئله‌ی اصلی وجود دارد: مسئله‌ی اختصاص اپراتور و مسئله‌ی مسیریابی و برنامه‌ریزی زمان‌بندی مراقبت‌های بهداشتی در منزل، که راه‌حل‌های مسیریابی و برنامه‌ریزی زمان‌بندی از مدل‌های موجود متمایز می‌شوند.

وانگ و واسیل^۴ (۲۰۲۱)، کاملاً ادبیات موضوع اخیر را بررسی کرده‌اند. هر دو رویکرد دقیق و احتمالی برای حل مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت پنجره‌ی زمانی پیشنهاد شده‌اند. محدودیت پنجره‌ی زمانی توسط سالامون^۵ (۱۹۸۷)، به VRP کلاسیک اضافه شد و مجموعه‌ی از مسائل معیار را معرفی کرد، که به‌عنوان "مسائل سالامون" شناخته می‌شود. سالامون، مسئله‌ی برنامه‌ریزی و مسیریابی وسائط نقلیه با پنجره‌ی زمانی را به‌عنوان یک مسئله‌ی عدد صحیح مختلط فرموله کرد و روش‌های بهینه‌سازی بر مبنای ابتکاری‌های خوشه-مسیر ارائه‌شده توسط فیشر و جایکوماراف را برای حل آن توسعه داد. دسرووچرس^۶ و همکاران (۱۹۸۴)، یک رویکرد دقیق را با استفاده از روش تولید ستونی برای VRPTW توسعه داده‌اند.^{۱۵} روش‌های ابتکاری برای حل مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با پنجره‌ی زمانی توسط سالامون (۱۹۸۵) ارائه شد، که وی از چهار الگوریتم ابتکاری: روش درج، روش نزدیک‌ترین همسایگی زمین‌گرا، روش صرفه‌جویی کلارک، و روش جاروکردن برای حل مسئله‌ی اخیر استفاده کرده است.^{۱۶}

مطالعات بسیاری در زمینه‌ی توسعه‌ی الگوریتم‌های دقیق برای حل مسئله مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با پنجره‌ی زمانی ارائه شده است، که یک مرور کلی بر روی آن‌ها در نوشتار کالیپوگ^۷ و همکاران (۲۰۰۷)،^{۱۷} بررسی شده است. با این حال، برای نمونه‌های مسائل بزرگ، همان‌طور که در عمل اتفاق می‌افتد، باید از روش‌های ابتکاری (فرا ابتکاری) برای استخراج راه‌حل‌های تقریبی در زمان قابل قبول استفاده کرد.

در نوشتار حاضر، یک روش نوین برای حل مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با پنجره‌ی زمانی ارائه شده است، که از ترکیب الگوریتم ازدحام‌گره‌ها (CSO)^۸ و عملگرهای الگوریتم ژنتیکی بهره می‌برد. در روش مذکور، ابتدا با استفاده از الگوریتم ازدحام‌گره‌ها، جمعیتی از گره‌ها به‌عنوان حلقه‌های مسیر ایجاد می‌شود. سپس با استفاده از عملگرهای ژنتیکی، جهت بهبود جمعیت و به دست‌آوردن حل بهینه، عملیات تکاملی انجام می‌شود. علاوه بر این، از روش تولید تصادفی (PFIH)^۹ برای ایجاد حل اولیه استفاده می‌شود، تا به یک جمعیت اولیه‌ی کارآمد برای الگوریتم ژنتیکی منجر شود.

ترکیب اخیر الگوریتم‌ها امکان بهبود عملکرد و دقت الگوریتم را افزایش

مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت پنجره‌ی زمانی دو هدف کلیدی را در بر می‌گیرد. هدف اصلی، کمینه‌سازی تعداد وسائط نقلیه‌ی موردنیاز برای خدمات‌رسانی مؤثر به همه‌ی مشتریان است. با بهینه‌سازی تخصیص وسیله‌ی نقلیه، هزینه‌های حمل و نقل را می‌توان کاهش داد و راندمان عملیاتی را افزایش داد. هدف ثانویه در کمینه‌سازی کل مسافت طی‌شده توسط وسائط نقلیه متمرکز است. هدف بخش حاضر، بهینه‌سازی مسیریابی برای اطمینان از بهره‌وری سوخت، کاهش انتشار کربن، و زمان تحویل کوتاه‌تر است. پرداختن به مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت پنجره‌ی زمانی برای بهبود کارایی حمل و نقل و لجستیک بسیار مهم است. با حل مسئله‌ی اخیر، شرکت‌ها می‌توانند از طریق کاهش استفاده از خودرو، افزایش رضایت مشتری به‌دلیل تحویل به موقع و بهبود استفاده از منابع به صرفه‌جویی در هزینه‌ها دست یابند. الگوریتم‌ها و رویکردهای بهینه‌سازی مختلف برای یافتن راه‌حل‌های بهینه یا نزدیک به بهینه، برای مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت پنجره‌ی زمانی در حال توسعه هستند. این پیشرفت‌ها در روش‌های بهینه‌سازی مسیریابی به اثربخشی و عملکرد کلی سیستم‌های حمل و نقل و لجستیک کمک می‌کند.

مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت پنجره‌ی زمانی یک مسئله‌ی شناخته‌شده^{۱۱} Np-Hard^{۱۱} است، که در زمینه‌ی لجستیک و تجارت الکترونیک امروزی به ابزاری حیاتی تبدیل شده است. مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت پنجره‌ی زمانی، یکی از مهم‌ترین انواع مسئله‌ی کلاسیک مسیریابی وسیله‌ی نقلیه در زمینه‌ی پژوهش عملیاتی است. مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت پنجره‌ی زمانی، کاربردهای گسترده‌ی دارد. به‌عنوان مثال، در خدمات تحویل آنلاین مواد غذایی (AHD)^۲ کاربرد دارد. محبوبیت تحویل مواد غذایی در طول همه‌گیری اخیر کوید ۱۹ افزایش یافته است.

مشخصه‌ی اصلی مسائل AHD این است که مشتریانی که مواد غذایی را به‌صورت آنلاین سفارش داده‌اند، باید در محل باشند تا سفارش‌های خود را دریافت کنند؛ زیرا کالاهای فاسدشدنی را نمی‌توان بدون مراقبت مانند بسته‌های معمولی تحویل داد. تحویل متعهدانه‌ی سفارش‌ها، مستلزم تنظیم پنجره‌های زمانی است، که در طی آن مشتریان در محل حاضر هستند تا سفارش خود را دریافت کنند. برای این منظور، شرکت‌هایی که مواد غذایی را به‌صورت آنلاین می‌فروشند باید با VRPTW سروکار داشته باشند، تا خدماتی را تضمین کنند که برای مشتریان‌شان رضایت‌بخش باشد و در عین حال برای شرکت مقرون به‌صرفه باشد. نمونه‌های بیشتر برای مسئله‌ی مسیریابی وسائط نقلیه با محدودیت‌های پنجره‌ی زمانی عبارت‌اند از:

برنامه‌ریزی نصب کنتورهای هوشمند،^{۱۲} که به برنامه‌ریزی شیفت‌های اپراتورهای خدمات کنتور هوشمند در مناطق روستایی اتریش می‌پردازد. برنامه‌ریزی نصب کنتورهای هوشمند، نقش مهمی در بهینه‌سازی مصرف انرژی، کاهش هزینه‌های انرژی، و افزایش کارایی انرژی دارد. علاوه بر این،

^۶ Desrosiers

^۷ Kallehauge

^۸ Cat Swarm Optimization

^۹ Push-Forward Insertion Heuristic

^۱ Non-deterministic Polynomial Time

^۲ Attended Home Delivery

^۳ The Home Health Care Routing and Scheduling Problem

^۴ Wang & Wasil

^۵ Solomon

می‌دهد، زیرا هر کدام از آن‌ها، ویژگی‌ها و مزایای خاص خود را دارند، که با ترکیب آن‌ها، عملکرد بهتری برای حل مسئله ارائه می‌دهند.

الگوریتم ازدحام گریه‌ها در ابتدا توسط چو^۱ و همکارانش (۲۰۰۸)^[۸] پیشنهاد شد و در سال‌های اخیر به شدت مطالعه و انواع مختلفی از آن ایجاد شد. ژئی^۲ و همکاران (۲۰۲۰)^[۹] نیز از یک روش بهبودیافته‌ی الگوریتم CSO برای حل یک مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه استفاده کرده و کارایی الگوریتم را برای حل مسائل مذکور نشان داده‌اند. الوارنجا^۳ و همکاران (۲۰۰۷)^[۱۰] از الگوریتم CSO در شکل اصلی خود و بدون روش‌های بهبوددهنده برای حل مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت پنجره‌ی زمانی استفاده کردند، که بر روی یک مجموعه داده‌ی معیار به نام نمونه‌های سالامون آزمون شده و نتایج نشان داده است که الگوریتم CSO بدون روش‌های بهبوددهنده تا نمونه‌های با ۲۵ مشتری را پاسخگو است. در نوشتار مذکور با پیاده‌سازی و ترکیب عملگرهای ژنتیکی بر روی الگوریتم CSO، کارایی الگوریتم CSO برای نمونه‌های بزرگ‌تر برآورد شده است.

مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت پنجره‌ی زمانی، یک مسئله‌ی بهینه‌سازی ترکیبی است، که یک گراف کامل است و هر راه‌حل، یک گراف زیرمجموعه‌ی گراف کامل است. پاسخ‌های اولیه با استفاده از روش PFH تولید شده‌اند. محدودیت‌های مسئله در طی ایجاد راه‌حل برآورده می‌شوند. الگوریتم دو هدف مسئله را با استفاده از یک روش تصمیم‌گیری ترکیبی می‌کند. استفاده از یک تابع تانژانت وارون برای نرمال‌سازی فاصله‌ی کل پیموده‌شده توسط وسائط نقلیه در بازه‌ی [۰، ۱]، باعث می‌شود که کمینه‌سازی تعداد وسائط نقلیه نسبت به فاصله‌ی پیموده‌شده اولویت داشته باشد. روش نرمال‌سازی ذکرشده برای اهداف مسئله، ساده و مفید است.

الگوریتم پیشنهادی برای مسئله‌ی مذکور بر روی ۵۶ نمونه‌ی سالامون آزمایش شده و نتایج آزمایش‌ها، کارایی الگوریتم پیشنهادی را برای نمونه‌های با مشتری کم نشان داده است. برای نمونه‌های با تعداد مشتری بیش از ۱۰۰ در دسته‌های C عملکرد خوبی نشان داده است. در ادامه‌ی نوشتار، مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت پنجره‌ی زمانی در بخش دوم تعریف و سپس در بخش سوم، الگوریتم ترکیب‌شده‌ی CSO با عملگرهای ژنتیکی شرح داده شده است. در بخش چهارم، الگوریتم مذکور برای مسئله، نتایج عددی در بخش پنجم، و نتیجه‌گیری در بخش ششم ارائه شده‌اند.

۲. مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه

در مسئله‌ی مسیریابی وسائط نقلیه همراه با پنجره‌ی ناوگانی از وسائط نقلیه‌ی V وجود دارد، که باید به مجموعه‌ی مشتریان با پنجره‌های زمانی خاص خدمات ارائه دهند. هدف، کمینه‌سازی کل مسافت طی‌شده یا تعداد وسائط نقلیه‌ی استفاده‌شده با رعایت محدودیت‌های پنجره‌ی زمانی است.

هر مسیر از دیو شروع می‌شود و پس از ارائه‌ی خدمات به تعدادی از مشتریان با برگشت به دیو خاتمه پیدا می‌کند. تعداد مسیرها برابر با تعداد وسائط نقلیه یعنی K است. برای هر مسیر، هزینه C_{ij} و زمان t_{ij} فاصله‌ی اقلیدسی بین دو مشتری i و j را نشان می‌دهند. هر مشتری در شبکه فقط یک بار و

q_k توسط یک وسیله‌ی نقلیه سرویس می‌گیرند.

ظرفیت هر وسیله‌ی نقلیه، m_i تقاضای هر مشتری، $[e_i, l_i]$ پنجره‌ی زمانی هر مشتری، t_i بیان‌کننده‌ی زمان شروع سرویس در گره‌ی i ، s_i زمان سرویس‌دهی برای هر مشتری، w_i زمان انتظار برای شروع پنجره‌ی زمانی برای وسائط نقلیه‌ی که زودتر می‌رسند، r_k بیشینه‌ی زمان سفر هر وسیله‌ی نقلیه و متغیر x_{ijk} نشان‌دهنده‌ی وجود یا عدم وجود سفر، که در آن‌ها $i, j = 0, 1, 2, \dots, N; i \neq j$ و $k = 0, 1, 2, \dots, K$ است.

هدف این تابع (رابطه‌ی ۱)، پیدایش مجموعه‌ی از مسیرهاست، که در آن‌ها تمامی مشتریان در حالی سرویس ببینند که تمام محدودیت‌های مسئله ارضاء شود.

$$\text{Minimize } Z_1 = NV \text{ and Minimize } Z_2 = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0, j \neq i}^N \sum_{k=1}^K c_{ij} x_{ijk} \quad (1)$$

که در آن، روابط ۲ الی ۱۰ برقرار است:

$$\text{for } i = 0 \quad \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N x_{ijk} \leq K \quad (2)$$

$$\text{for } i = 0 \quad \text{and} \quad k \in 1, \dots, K \quad \sum_{j=1}^N x_{ijk} = \sum_{j=1}^N x_{jik} \leq 1 \quad (3)$$

$$\text{for } i \in 1, \dots, N \quad \sum_{k=1}^K \sum_{j=0, j \neq i}^N x_{ijk} = 1 \quad (4)$$

$$\text{for } j \in 1, \dots, N \quad \sum_{k=1}^K \sum_{i=0, i \neq j}^N x_{ijk} = 1 \quad (5)$$

$$\text{for } k \in 1, \dots, K \quad \sum_{i=1}^N m_i \sum_{j=0, j \neq i}^N x_{ijk} \leq q_k \quad (6)$$

$$\text{for } k \in 1, \dots, K \quad \sum_{i=0}^N \sum_{j=0, j \neq i}^N x_{ijk} t_{ijk} + s_i + w_i \leq r_k \quad (7)$$

$$t_i = w_i = f. \quad (8)$$

$$\text{for } j \in 1, \dots, N \quad \sum_{i=0}^N \sum_{k=1}^K x_{ijk} t_i + t_{ij} + s_i + w_i \leq t_j \quad (9)$$

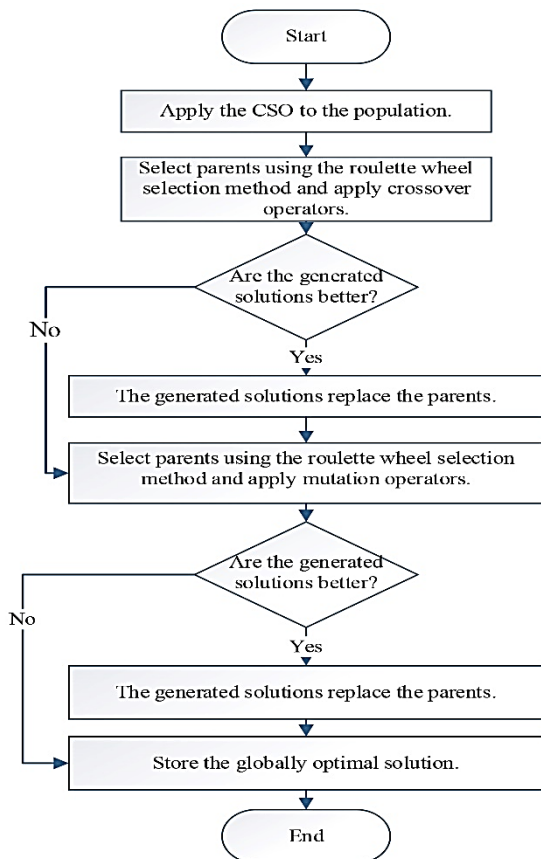
$$\text{for } i \in 1, \dots, N \quad e_i \leq t_i + w_i \leq l_i \quad (10)$$

رابطه‌ی ۱، نشان‌دهنده‌ی تابع هدف مسئله است. رابطه‌ی ۲ بیان می‌کند که بیشینه‌ی K مسیر از دیو خارج می‌شوند. رابطه‌ی ۳ تضمین می‌کند که شروع و پایان هر مسیر در دیو است. رابطه‌های ۴ و ۵ بیان می‌کنند که همه‌ی مشتری‌ها فقط یک بار و توسط یک وسیله‌ی نقلیه باید سرویس داده شوند. رابطه‌ی ۶، محدودیت ظرفیت را در بردارد. رابطه‌ی ۷، محدودیت بیشینه‌ی زمان سفر را بیان می‌کند. رابطه‌های ۸ الی ۱۰، محدودیت پنجره‌ی زمانی را اعمال می‌کنند. این فرمول‌سازی یک جواب موجه برای مسئله مشخص می‌کند.

^۲ Alvarenga

^۱ CHU

^۲ Ji



شکل ۱. فلوچارت مراحل اعمال عملگرهای بهبود.

می‌شود. هر کدام از عملگرهای تقاطع و جهش به تعداد تکرارهای تنظیم‌شده تکرار می‌شوند و در پایان اعمال عملگرهای بهبود، پاسخ بهینه‌ی سراسری به‌روز رسانی و ذخیره می‌شود. استفاده از روش‌های انتخاب باعث می‌شود که پاسخ‌هایی با کیفیت بهتر به‌عنوان والد انتخاب شوند. در روش انتخاب تورنمنت، K عضو از اعضا به‌صورت تصادفی انتخاب و از بین آن‌ها، بهترین عضو به‌عنوان والد انتخاب می‌شود. روش انتخاب تورنمنت باعث می‌شود که $K-1$ عضو بدتر اعضا هیچ‌گاه به‌عنوان والد انتخاب نشوند. در شکل ۱، فلوچارت مراحل اعمال عملگرهای بهبود مشاهده می‌شود.

۱.۳. الگوریتم‌های بهبود مسیر

بسیاری از الگوریتم‌های بهبود مسیر (دور یا تور) براساس فرآیند مقایسه‌ی هزینه‌ی مسیرهای همسایگی چند مشتری توسعه یافته‌اند. تمام عملگرهای همسایگی به‌کار گرفته‌شده، جزء عملگرهایی هستند که به تبادیل و تعویض مشتری‌ها (گره‌ها) می‌پردازند. در واقع، عملگرها به تعداد دفعات از پیش تنظیم‌شده، در دوره‌های ساخته‌شده به جستجو می‌پردازند تا فواصل موجه، کوتاه‌تر، و با هزینه‌ی کمینه کشف شوند؛ و با مسیرهایی که هزینه‌ی بیشتری دارند، جایگزین شوند. از جمله مزایای الگوریتم‌های بهبود، افزایش تولید جواب‌های موجه‌تری که می‌توان ارزیابی کرد، کاهش زمان محاسبات، کاهش زمان دستیابی به جواب‌های با کیفیت‌تر، و در راستای آن، افزایش همگرایی الگوریتم به‌سوی بهینه‌ی سراسری است.

• مرحله‌ی بازسازی

یکی از جنبه‌های منحصر به فرد و مهم روش‌های الگوریتم ژنتیک، نقش مهمی است که بازسازی (به‌طور سنتی، به شکل عملگر تقاطع) ایفا می‌کند.

برای مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت پنجره‌ی زمانی، تابع‌های هدف‌های متفاوتی در نظر گرفته می‌شود. در پژوهش حاضر، مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت پنجره‌ی زمانی دو هدف دارد. هدف اول، کمینه‌سازی تعداد وسائط نقلیه و هدف دوم، کمینه‌سازی مسافت طی‌شده است؛ که آن‌ها مطابق رابطه‌ی ۱۱ ترکیب می‌شوند:

$$fitness \ x_i = NV \ x_i + normalize \ TD \ x_i \quad (11)$$

که در آن، NV تعداد وسائط نقلیه‌ی استفاده‌شده و TD مسافت کل طی‌شده است و نرمال‌سازی فاصله‌ی کل طبق رابطه‌ی ۱۲ محاسبه می‌شود؛ که طبق آن، برابری هر گربه به تعداد وسائط نقلیه و فاصله‌ی کل طی‌شده بستگی دارد. با توجه به اینکه NV ، یعنی هدف اولیه همیشه دارای یک مقدار صحیح است و برای دو راه‌حل مختلف همیشه: $|NV \ x_i - NV \ x_j| \geq 1$ برقرار است، با نرمال‌سازی فاصله‌ی کل در بازه‌ی $[0, 1]$ ، کمینه‌سازی تعداد وسائط نقلیه در اولویت تابع هدف قرار می‌گیرد.

$$normalize(x) = \arctan(x) / \left(\frac{\pi}{2}\right) \quad (12)$$

۳. الگوریتم ترکیبی بهینه‌سازی ازدحام گربه‌ها با عملگرهای ژنتیکی

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام گربه‌ها، یک الگوریتم مبتنی بر جمعیت با الهام از الگوی رفتاری گربه‌هاست. گربه‌ها رفتار اجتماعی جذابی را نشان می‌دهند، که به‌مدت طولانی توجه انسان را جذب می‌کند. گربه‌ها بیشتر وقت خود را صرف استراحت می‌کنند، آن‌ها همیشه گوش به زنگ باقی می‌مانند، و می‌توانند یک مهارت شکار خوب را داشته باشند. الگوریتم گربه‌ها بدون روش‌های بهبوددهنده در نوشتار یادگاری و همکاران (۱۴۰۱)،^[۱۱] شرح داده شده است.

در ابتدا تعداد N گربه تولید و موقعیت، سرعت، و مقدار رجیستر پرچم برای هر گربه مقداردهی می‌شود. با توجه به تابع شایستگی، گربه‌ها ارزیابی می‌شوند و موقعیت گربه‌ی که بهترین مقدار شایستگی را دارد، ذخیره می‌شود. با توجه به مقدار رجیستر پرچم و اینکه گربه در چه حالتی قرار دارد، فرآیند مربوط به آن حالت اجرا می‌شود. یعنی اگر گربه در حالت جستجو است، فرآیند جستجو و اگر گربه در حالت ردیابی غذاست، فرآیند ردیابی اجرا می‌شود. با توجه به پارامتر MR ، گربه‌ها به‌صورت تصادفی در دو حالت جستجو و ردیابی قرار می‌گیرند. اگر جواب مسئله، راضی‌کننده باشد، حل مسئله به پایان رسیده است؛ و در غیر این‌صورت، مراحل الگوریتم تکرار می‌شود.^[۸]

پس از اعمال مراحل الگوریتم ازدحام گربه‌ها بر جمعیت، عملگرهای الگوریتم ژنتیک (تقاطع و جهش) بر روی اعضا منتخب اعمال می‌شود. در هر تکرار پس از حلقه‌ی به‌روزرسانی جمعیت براساس الگوریتم ازدحام گربه‌ها، در ابتدا عملگر تقاطع BCRC بر روی ۲ عضو از جمعیت، که با استفاده از روش انتخاب تورنمنت به‌عنوان والد انتخاب شده‌اند، اعمال می‌شود و در صورت بهتربودن پاسخ‌های کشف‌شده، فرزندان تولیدشده با والد‌های خود جایگزین می‌شوند و در غیر این‌صورت، والد‌ها در جمعیت به‌صورت دست‌نخورده باقی می‌مانند. پس از آن عملگر جهش بر روی عضو انتخاب‌شده توسط روش انتخاب تورنمنت اعمال و در صورت بهبود پاسخ کشف‌شده با عضو منتخب جایگزین

در این مورد، مشتری ۳ ابتدا در بهترین مکان یافت شده در C_1 (همان طور که در بخش **b** مشاهده می شود) قبل از وارد شدن ۷ وارد شده است در بخش C نیز اگر نقطه‌ی ورودی در مسیرها با محدودیت‌های ظرفیت وسیله‌ی نقلیه یا پنجره‌ی زمان مواجه شود، به آن موقعیت غیر قابل قبول محسوب می شود. بهترین محل قرارگیری محلی است که کمینه‌ی هزینه در کل مسیرها به دست می آید. در مثال ۱، مشتریان ۳ و ۷ هر دو در مسیر ۳ والد P_1 قرار گرفته‌اند (بخش **c**). گاهی اوقات هیچ نقطه‌ی امکان‌پذیری قابل مشاهده نیست و مسیر جدیدی آغاز می شود. برای مثال، در ایجاد C_2 ، مشتری ۶ نمی تواند در مسیرهای فعلی برای P_2 وارد شود و از این رو یک مسیر جدید ایجاد شده است.

• **فرآیند جهش**

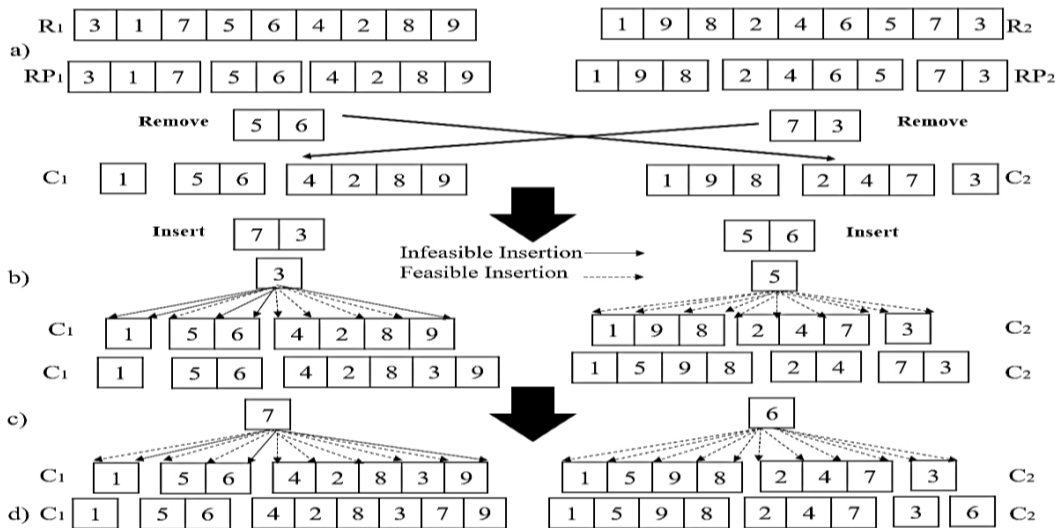
جهش برای جادادن ویژگی‌های جدید در جمعیت فعلی ضروری است. عملگرهای بسیار تخصصی برای سرعت بخشیدن به تکامل جمعیت ایجاد شده‌اند. در پژوهش حاضر، در مجموع از ۴ عملگر مختلف استفاده شده است.

✓ **جهش شماره‌ی ۱: (جابجایی تصادفی مشتری)؛** این عملگر یک وسیله‌ی نقلیه و یک مشتری مربوط به آن را به صورت تصادفی انتخاب می کند. جابجایی مشتری موردنظر به سایر وسائط نقلیه امتحان می شود. اگر با جابجایی، یک مسیر امکان پذیر به دست آید، مستقل از تابع هزینه جدید پذیرفته می شود (شکل ۳).^{۱۱۱}

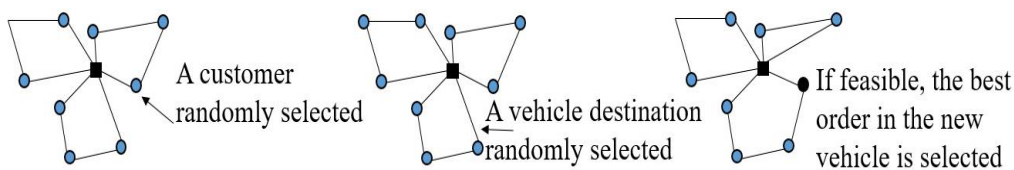
✓ **جهش شماره‌ی ۲: (مسیریابی مجدد با استفاده از PFIH تصادفی)؛** این عملگر یک مجموعه از مسیرها را به صورت تصادفی انتخاب می کند و روش

از میان عملگرهای تقاطع که برای VRPTW سخت وجود دارد، یک عملگر تقاطع خاص (تقاطع بهترین هزینه‌ی مسیر، BCRC^۱ است که هدف آن کاهش همزمان تعداد وسائط نقلیه و هزینه‌ها با برقراری تمام محدودیت‌های مسئله است، که در پژوهش حاضر از آن استفاده شده است.

در شکل ۲ (مثال ۱)، ایجاد دو فرزند C_1 و C_2 از دو والد P_1 و P_2 با استفاده از یک نمونه مسئله‌ی اختیاری با اندازه‌ی مشتری ۹ برای توضیح اهداف مشاهده می شود. RP_1 و RP_2 مجموعه‌ی مسیرهای مربوط به P_1 و P_2 را در نسل فعلی ارائه می دهند. برای مثال، P_1 دارای سه مسیر (R_1-R_3) با مشتری‌های مرتبط، یعنی: $R_1: 3\ 1\ 7$ ؛ $R_2: 5\ 6$ ؛ $R_3: 4\ 2\ 8\ 9$ است. همان طور که در مثال ۱ (بخش **a**) نشان داده شده است، از هر والد، یک مسیر به صورت تصادفی انتخاب می شود. در این مورد، برای P_1 مسیر R_2 با مشتری‌های ۵ و ۶ و برای P_2 مسیر R_3 با مشتریان ۳ و ۷ انتخاب شده است. سپس، برای یک والد داده شده، مشتریان انتخاب شده از مسیر والد مخالف حذف می شوند. به عنوان مثال، در بخش **a** برای والد P_1 ، مشتریان ۳ و ۷ (که متعلق به انتخاب تصادفی انتخاب در P_2 است) از P_1 حذف و به دنبال آن فرزند ۱ ایجاد شده است. به همین ترتیب مشتریان ۵ و ۶ که متعلق به انتخاب تصادفی در P_1 هستند، از مسیر P_2 حذف و در نتیجه C_2 ایجاد شده است. همان طور که در مثال ۱ بخش **b** نشان داده شده است، الگوریتم نیاز به دوباره وارد کردن مشتریان ۳ و ۷ به فرزند C_1 و مشتریان ۵ و ۶ به فرزند C_2 دارد. توجه داشته باشید که انتخاب مشتری اول برای وارد کردن به صورت تصادفی انجام می شود. به عنوان مثال، در ایجاد C_1 ، ترتیب درج ۳ و ۷ به صورت اختیاری انجام می شود.

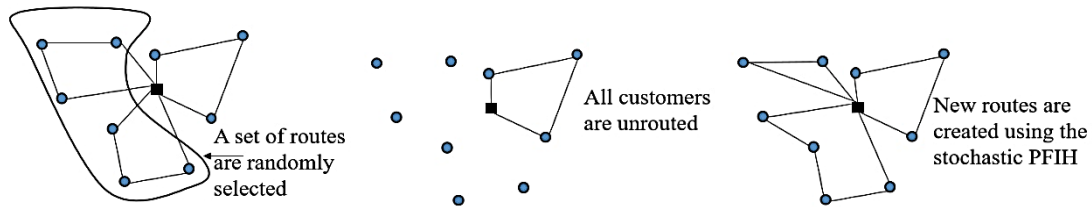


شکل ۲. مثال ۱: نمونه‌ی برای عملگر BCRC

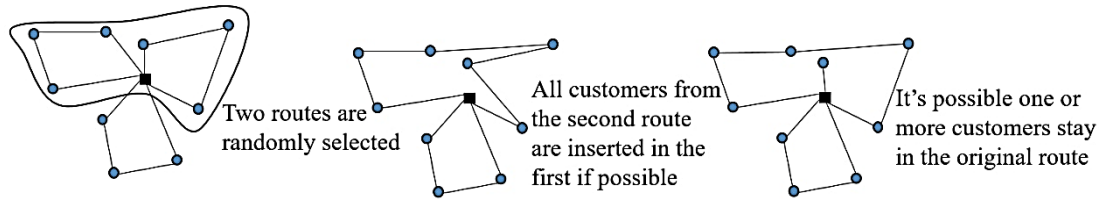


شکل ۳. جهش شماره‌ی ۱: جابجایی تصادفی مشتری.^{۱۱۱}

^۱ Best Cost Route Crossover



شکل ۴. جهش شماره‌ی ۲: مسیریابی مجدد با استفاده از PFIIH تصادفی.^[۱۱]



شکل ۵. جهش شماره‌ی ۳: ادغام دو مسیر.^[۱۱]



شکل ۶. جهش شماره‌ی ۴: دوباره وارد کردن مشتری.^[۱۱]

PFIIH تصادفی را بر آن‌ها اعمال می‌کند (شکل ۴).^[۱۱]

بهبوددهنده برای مسئله با اندازه‌های کوچک نمونه مناسب است. برای بهبود الگوریتم تغییرات ابداعی استفاده شده از این قرار هستند:

۱. استفاده از جهش نرمال در بدنه‌ی الگوریتم اصلی ازدحام گربه‌ها؛
۲. اعمال عملگر جهش برای هر گربه در هر تکرار بعد از بروزرسانی اصلی در بدنه‌ی الگوریتم اصلی ازدحام گربه‌ها؛
۳. استفاده از بهترین موقعیت هر گربه در بروزرسانی جمعیت در حالت ردیابی (مانند الگوریتم ازدحام ذرات)؛
۴. ترکیب الگوریتم با عملگرهای الگوریتم ژنتیک؛

۵. استفاده از عملگر تقاطع BCRC؛

۶. استفاده از عملگرهای جهش مناسب برای مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه.

۷. به‌کارگیری عملگر انتخاب تورنمنت برای انتخاب پاسخ‌های با کیفیت و اعمال مجدد الگوریتم‌ها.

برای تولید پاسخ‌های اولیه، هر گربه نشان‌دهنده‌ی یک دور همیلتونی است که نحوه‌ی قرارگرفتن مشتری‌ها را به نمایش می‌گذارد. برای حل هر پاسخ به صورت مسیریابی هر وسیله‌ی نقلیه با استفاده از روش کدینگ دو قسمتی پیوسته و یک روش رمزگشایی (Decode) که در نوشتار یادگاری و همکاران (۱۴۰۱)،^[۱۰] شرح داده شده است، مجموعه‌ی از مسیرها تشکیل می‌شود، که

✓ جهش شماره‌ی ۳: (ادغام دو مسیر)؛ این عملگر دو مسیر تصادفی را انتخاب و تلاش می‌کند تا آن‌ها را به‌صورت تصادفی ادغام کند (شکل ۵).^[۱۱]

✓ جهش شماره‌ی ۴: (دوباره وارد کردن مشتری)؛ این عملگر یک مشتری تصادفی را در موقعیت بهتر، یعنی موقعیت در همان مسیر با کمینه‌ی فاصله‌ی سفر قرار می‌دهد (شکل ۶).^[۱۱]

۴. پیاده‌سازی الگوریتم برای حل مسئله‌ی مسیریابی

وسيله‌ی نقلیه با محدودیت پنجره‌ی زمانی

الگوریتم ازدحام گربه‌ها، جزء الگوریتم‌های پیوسته و جمعیت‌محور محسوب می‌شود. الگوریتم اصلی در حالت کلی از این ۳ مرحله تشکیل می‌شود:

۱. تولید پاسخ‌های اولیه و ارزیابی آن‌ها؛
۲. مرحله‌ی به‌روزرسانی جمعیت براساس پرچم آن‌ها (حالت جستجو و ردیابی) و ارزیابی پاسخ‌ها؛
۳. مرحله‌ی به‌روزرسانی بهترین موقعیت.

طبق مطالعات پژوهشگران، الگوریتم ازدحام گربه‌های اصلی برای مسائل بهینه‌سازی پیوسته، پاسخ‌های مناسب دارد، ولی برای حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی نیاز به اعمال تغییرات جهت ایجاد بهبودهای کارآمد در عملکرد الگوریتم برای دستیابی به اکتشاف و جستجویی باکیفیت بیشتر است. در نوشتار سالامون^۱ (۱۹۸۷)،^[۶] بیان شده است، که الگوریتم بدون روش‌های

^۱ Solomon

هر مسیر از دیو آغاز می‌شود و با ارائه‌ی خدمت به هر مشتری، در نهایت به دیو خاتمه می‌یابد.

۵. نتایج عددی

در بخش حاضر، نتایج عددی آزمایش بر روی نمونه‌های پنج مارک سالامون در ۶ دسته‌ی ارائه‌شده مطرح شده است. نمونه‌های سالامون در سه نوع کلاس بر حسب توزیع مشتریان به این شرح قرار گرفته‌اند و در هر نوع کلاس، دو دسته قرار دارد.

✓ توزیع تصادفی (R_1 و R_2);

✓ توزیع خوشه‌بندی (C_1 و C_2);

✓ توزیع تصادفی و خوشه‌بندی (RC_1 و RC_2).

در کلاس‌های R_1 و R_2 مشتری‌ها به صورت تصادفی توزیع شده‌اند؛ در کلاس‌های C_1 و C_2 مشتری‌ها در گروه‌هایی خوشه‌بندی شده‌اند؛ و در نهایت در کلاس‌های RC_1 و RC_2 زیرمجموعه‌یی از مشتریان به صورتی تصادفی توزیع و مابقی خوشه‌بندی شده‌اند.

فاصله‌ی بین دو مشتری به صورت فاصله‌ی اقلیدسی ساده است. هر مشتری i یک پنجره‌ی زمانی $[a_i, b_i]$ دارد، که بازه‌ی زمانی برای رسیدن به هر مشتری را نشان می‌دهد. ظرفیت وسائط نقلیه و تقاضای مشتریان در هر کلاس متفاوت در نظر گرفته شده است. در مجموع، دارای ۵۶ نمونه برای همه‌ی ابعاد طبقه‌بندی مسئله است، که شامل ۲۵، ۵۰، و ۱۰۰ مشتری است، که داده‌های منتخب از ساییت <http://web.cba.neu.edu/~msolomon/problems.htm> برداشت شده‌اند.

نتایج عددی به دست‌آمده با بهترین پاسخ‌های شناخته‌شده‌ی مسائل نمونه‌ی سالامون، که از الگوریتم‌های مختلف دقیق، ابتکاری، و فرا ابتکاری به دست آمده‌اند، مقایسه شده‌اند. نتایج اجرای الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم جمعیت‌محور تراکم ذرات گسسته‌ی ارائه‌شده توسط گونگ^۱ و همکاران (۲۰۱۲)^[۱۲] نیز مقایسه شده است. کارایی الگوریتم ازدحام گربه‌ها بر روی نمونه‌های کوچک تا ۲۵ مشتری در نوشتار یادگاری و همکاران (۱۴۰۱)^[۱۰] نشان داده شده است. با توجه به استفاده از بهبوددهنده‌ها برای کارایی بیشتر الگوریتم ازدحام گربه‌ها، آزمایش‌ها فقط بر روی نمونه‌هایی با اندازه‌های ۵۰ و ۱۰۰ مشتری انجام شده است. الگوریتم ارائه‌شده برای نمونه‌های با اندازه‌ی ۵۰ مشتری در ۲۸ نمونه، پاسخ بهینه ارائه داده است، که بیشترین بهبود برای نمونه‌ی R_{201} با $59/48\%$ و کمترین بهبود برای نمونه‌ی R_{109} با $7/33\%$ بوده است. همچنین، بدترین پاسخ به دست‌آمده برای نمونه‌ی R_{106} با $60/45\%$ افزایش در پاسخ بوده است، که تعداد وسائط نقلیه بیش از تعداد وسائط نقلیه‌ی بهینه به دست آمده است؛ در نتیجه الگوریتم پیشنهادی برای ۵۵ نمونه از ۵۶ نمونه توانایی ارائه‌ی پاسخ بهینه را دارد. برای نمونه‌های با اندازه‌ی ۱۰۰ مشتری برای دسته‌های C_1 و C_2 ، پاسخ بهینه‌ی سراسری به دست‌آمده از نوشتارهای پیشین به دست آمده و در ۳۳ نمونه از ۵۶ نمونه، توانایی ارائه‌ی پاسخ بهینه با تعداد وسائط نقلیه‌ی بهینه را داشته و

بدترین پاسخ به دست‌آمده، نمونه‌ی R_{204} با $46/54\%$ افزایش پاسخ بوده است.

۶. نتایج و مقایسه‌ها

در جدول‌های ۱ و ۲، نتایج به دست‌آمده از اجرای الگوریتم پیشنهادی بر روی نمونه‌های سالامون به صورت بهترین پاسخ‌ها و نیز میانگین پاسخ‌های به دست‌آمده ارائه شده است. NV ، نشان‌دهنده‌ی تعداد وسائط نقلیه و TD مجموع مسافت پیموده شده است. تابع هزینه‌ی استفاده شده در الگوریتم بر حسب بهینه‌سازی مسافت و تعداد وسائط نقلیه است. علامت * و ** مقادیر بولد، نمایانگر بهبود در پاسخ نمونه‌ی مورد نظر و علامت * نمایانگر جواب نزدیک و قابل قبول برای پاسخ نمونه‌ی مورد نظر است.

۱) **نمونه با ۵۰ مشتری:** مطابق جدول ۱، برای نمونه با ۵۰ مشتری؛ الگوریتم پیشنهادی برای ۳۱ نمونه از ۵۶ نمونه نسبت به بهترین نتایج پیشین، نتیجه‌ی بهتری نشان داده است؛ که شامل ۴ مورد از مجموعه‌ی داده‌ی نوع R_1 ، ۱۱ مورد از مجموعه‌ی داده‌ی نوع R_2 ، ۸ مورد از مجموعه‌ی داده‌ی نوع C_2 ، و ۸ مورد از مجموعه‌ی داده‌ی نوع RC_2 است. در بقیه‌ی موارد، هم نتایجی نزدیک و قابل قبول ارائه شده است. همچنین برای ۵۵ مورد از ۵۶ نمونه با ۵۰ مشتری پاسخ بهینه ارائه داده است.

۲) **نمونه با ۱۰۰ مشتری:** مطابق جدول ۲، برای نمونه‌های ۱۰۰ مشتری؛ الگوریتم پیشنهادی برای هیچ‌یک از نمونه‌ها نتایج بهتری ارائه نداده و برای ۳۳ مورد از ۵۶ نمونه با ۱۰۰ مشتری پاسخ بهینه ارائه داده است.

همچنین در مقایسه با الگوریتم گسسته‌ی ازدحام ذرات^[۱۱] الگوریتم پیشنهادی برای نمونه‌های ۲۵ مشتری، ۷ نمونه از ۵۶ نمونه، و برای نمونه‌های ۵۰ مشتری، ۴ نمونه از ۵۶ نمونه، و برای نمونه‌های ۱۰۰ مشتری، ۱۸ نمونه از ۵۶ نمونه، پاسخ بهبود در جواب بهینه به دست آمده است. همچنین نمودار برازش که نشان‌دهنده‌ی فرآیند بهبود پاسخ‌ها و روند همگرایی مناسب و یکنواخت جواب‌های به دست‌آمده است، برای دو نمونه از بهترین پاسخ‌های نمونه‌ها (C_{201} و C_{101}) در شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود.

هر شکل در چهار قسمت ارائه شده است، که قسمت (الف)، شامل تصویر گرافیکی از بهترین پاسخ به دست‌آمده توسط الگوریتم پیشنهادی برای نمونه‌ی مورد نظر است. تصاویر گرافیکی از بهترین پاسخ به دست‌آمده شامل موقعیت قرارگیری مشتری‌ها و همین‌طور دوره‌های ساخته‌شده و مسیرهای طی‌شده توسط وسائط نقلیه است. مشاهده می‌شود هر دور ساخته‌شده‌ی کامل از دیو‌ی مرکزی شروع و با ملاقات مشتری‌ها توسط یک وسیله‌ی نقلیه مجدداً به دیو باز می‌گردد. در گراف‌های مذکور، محور افقی، مختصات X مشتری‌ها و محور عمودی، مختصات Y مشتری‌ها را نشان می‌دهند.

قسمت (ب)، نشان‌دهنده‌ی مقدار تابع هزینه بر حسب تکرار، قسمت (پ) تعداد وسائط نقلیه بر حسب تکرار، و قسمت (ت)، مسافت پیموده شده بر حسب تکرار است. در نمودارهای قسمت (ب) تا قسمت (ت)، محور افقی دربرگیرنده‌ی تعداد تکرار کلی چرخه‌ی اصلی الگوریتم برای دستیابی به

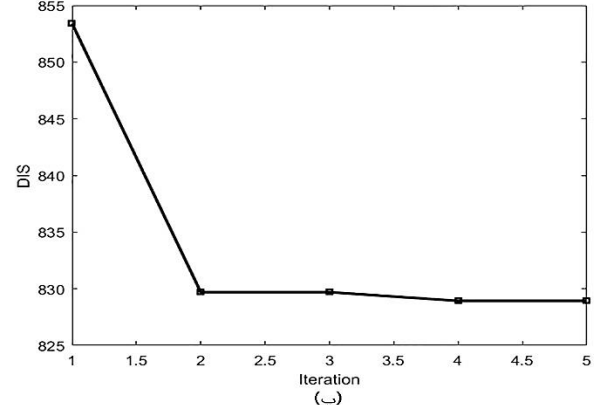
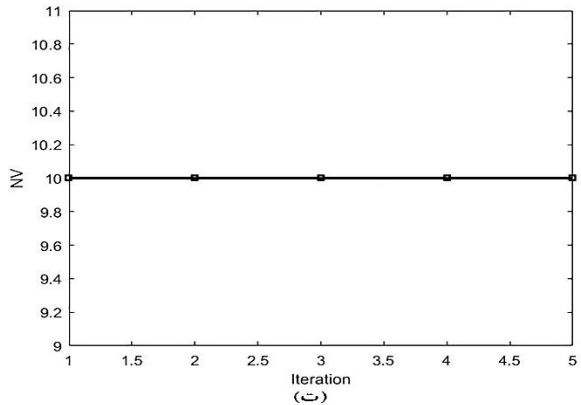
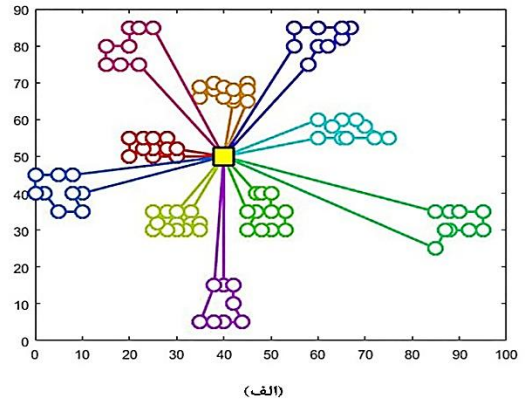
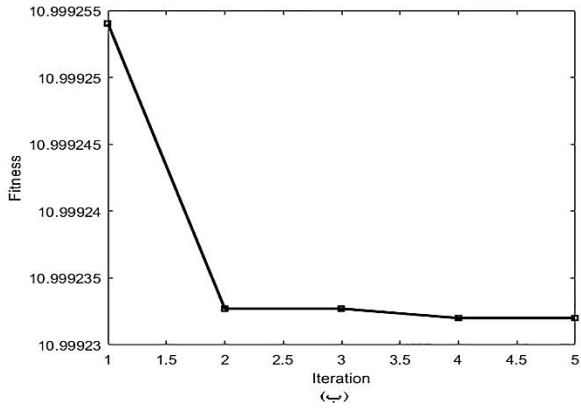
^۱ Gong

جدول ۱. ارزیابی پاسخ‌ها برای نمونه‌های سالامون (۵۰ مشتری).

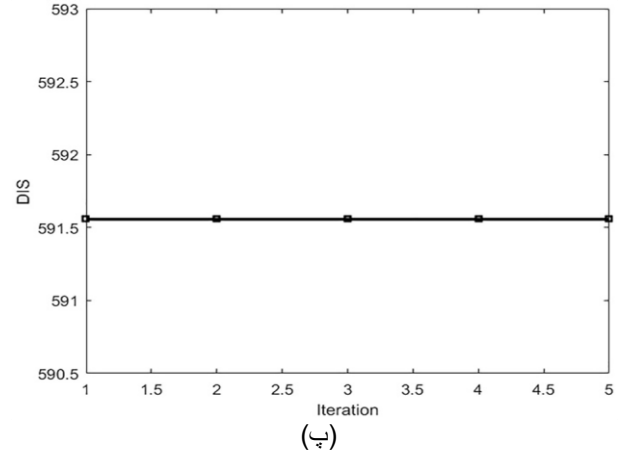
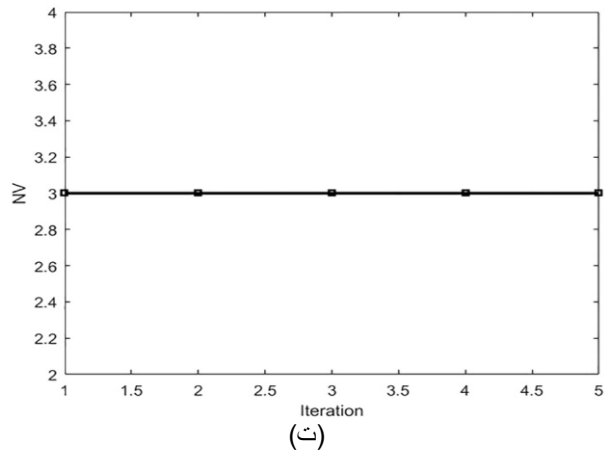
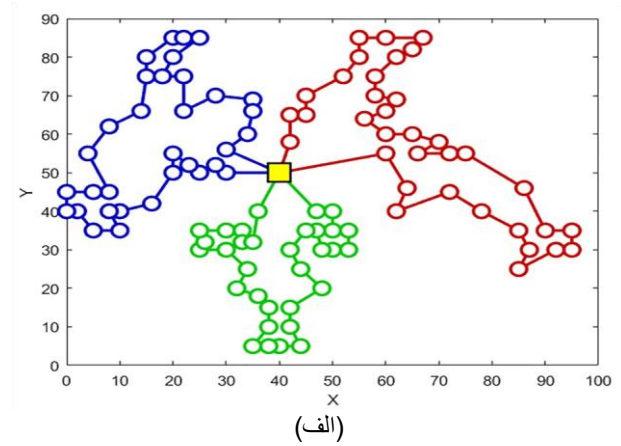
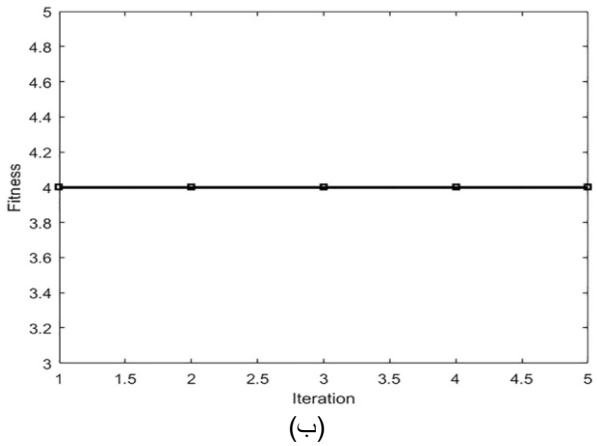
| نمونه | الگوریتم مورد استفاده | بهترین پاسخ شناخته شده | | الگوریتم پیشنهادی | | | | الگوریتم تراکم ذرات گسسته | | | |
|---------|-----------------------|------------------------|--------|-------------------|---------|-----------------|---------|---------------------------|---------|-----------------|---------|
| | | NV | TD | بهترین پاسخ | | میانگین پاسخ‌ها | | بهترین پاسخ | | میانگین پاسخ‌ها | |
| | | | | NV | TD | NV | TD | NV | TD | NV | TD |
| R101* | KDMSS | ۱۲ | ۱۰۴۴/۰ | ۱۲ | ۱۰۵۵/۷۲ | ۱۲ | ۱۰۶۴/۴۴ | ۱۱ | ۱۱۰۰/۷۲ | ۱۱/۸ | ۱۰۶۰/۱۱ |
| R102** | KDMSS | ۱۱ | ۹۰۹ | ۱۰ | ۹۲۴/۱۸ | ۱۰ | ۹۲۸/۱۵ | ۱۰ | ۹۲۳/۷۱ | ۱۰ | ۹۲۷/۱۳ |
| R103** | KDMSS | ۹ | ۷۲۲/۹ | ۸ | ۷۸۹/۹۴ | ۸ | ۷۹۵/۴۱۶ | ۸ | ۷۹۰/۱۷ | ۸ | ۸۰۸/۹۹ |
| R104* | KDMSS | ۶ | ۶۲۵/۴ | ۶ | ۶۴۳/۸۲ | ۶ | ۶۴۸/۶۱ | ۶ | ۶۳۱/۵۸ | ۶ | ۶۳۸/۸۳ |
| R105* | KDMSS | ۹ | ۸۹۹/۳ | ۹ | ۹۱۷/۵۹ | ۹ | ۹۲۴/۲۷۴ | ۸ | ۹۸۳/۴۹ | ۹ | ۹۳۳/۶۷ |
| R106 | KDMSS | ۵ | ۷۹۳ | ۸ | ۷۹۵/۲۵ | ۸ | ۸۲۰/۵۷۲ | ۷ | ۸۶۵/۹۳ | ۷/۵ | ۸۵۱/۱۷ |
| R107** | KDMSS | ۷ | ۷۱۱/۱ | ۶ | ۷۶۴ | ۶/۸ | ۷۳۹/۸۷ | ۶ | ۷۳۷/۱۰ | ۶/۱ | ۷۵۱/۷۷ |
| R108* | CR+KLM | ۶ | ۶۱۷/۷ | ۶ | ۶۲۷/۰۷ | ۶ | ۶۳۶/۹۸ | ۶ | ۶۲۴/۲۹ | ۶ | ۶۳۲/۷۳ |
| R109** | KDMSS | ۸ | ۷۸۶/۸ | ۷ | ۸۲۳/۲۷ | ۷ | ۸۴۶/۷۴ | ۷ | ۸۰۱/۹۷ | ۷ | ۸۱۵/۴۴ |
| R110* | KDMSS | ۷ | ۶۹۷/۰ | ۷ | ۷۱۴/۹۲ | ۷ | ۷۳۳/۰۶ | ۷ | ۷۲۰/۴۰ | ۷ | ۷۳۱/۷۹ |
| R111* | CR+KLM | ۷ | ۷۰۷/۲ | ۷ | ۷۱۵/۵۲ | ۷ | ۷۲۰/۳۱ | ۶ | ۷۵۶/۳۵ | ۶/۹ | ۷۲۲/۵۵ |
| R112* | CR+KLM | ۶ | ۶۳۰/۲ | ۶ | ۶۴۲/۰۶ | ۶ | ۶۵۳/۵۴ | ۶ | ۶۳۸/۴۹ | ۶ | ۶۴۵/۷۵ |
| R201** | CR+KLM | ۶ | ۷۹۱/۹ | ۲ | ۹۶۲/۶۳ | ۲ | ۹۷۶/۶۹ | ۲ | ۹۵۳/۲۹ | ۲/۶ | ۹۱۱/۸۶ |
| R202** | CR+KLM | ۵ | ۶۹۸/۵ | ۲ | ۸۲۱/۸۳ | ۲ | ۸۲۵/۴ | ۲ | ۸۱۵/۲۳ | ۲ | ۸۳۳/۹۰ |
| R203** | IV+C | ۵ | ۶۰۵/۳ | ۲ | ۶۷۲/۸۷ | ۲ | ۶۸۹/۲۶ | ۲ | ۶۶۸/۳۶ | ۲ | ۶۸۸/۸۴ |
| R204* | IV | ۲ | ۵۰۶/۴ | ۲ | ۵۱۸/۵۲ | ۲ | ۵۳۰/۵۷ | ۲ | ۵۱۸/۵۷ | ۲ | ۵۲۵/۷۸ |
| R205** | IV+C | ۴ | ۶۹۰/۱ | ۲ | ۷۶۸/۵۳ | ۲ | ۸۰۱/۵۷ | ۲ | ۷۵۶/۳۸ | ۲ | ۷۷۳/۲۴ |
| R206** | IV+C | ۴ | ۶۳۲/۴ | ۲ | ۶۷۱/۱۷ | ۲ | ۶۷۴/۲۱ | ۲ | ۶۶۱/۵۵ | ۲ | ۶۷۶/۲۵ |
| R207** | | | | ۲ | ۵۹۹/۷۶ | ۲ | ۶۰۴/۷۱ | ۲ | ۵۹۳/۹۵ | ۲ | ۶۱۱/۰۴ |
| R208** | | | | ۲ | ۵۱۳/۱۳ | ۲ | ۵۱۵/۳۲ | ۲ | ۵۰۸/۴۱ | ۲ | ۵۱۸/۸۳ |
| R209** | IV+C | ۴ | ۶۰۰/۶ | ۲ | ۶۵۹/۱۹ | ۲ | ۶۷۳/۲۵ | ۲ | ۶۵۸/۲۸ | ۲ | ۶۷۱/۵۴ |
| R210** | IV+C | ۴ | ۶۴۵/۶ | ۲ | ۶۷۳/۰۷ | ۲ | ۶۹۷/۲ | ۲ | ۶۷۰/۹۹ | ۲ | ۶۸۲/۷۰ |
| R211** | IV+DLP | ۳ | ۵۳۵/۵ | ۲ | ۵۶۰/۲۸ | ۲ | ۵۶۶/۲۴ | ۲ | ۵۶۲/۷۴ | ۲ | ۵۷۶/۰۳ |
| C101* | KDMSS | ۵ | ۳۶۲/۴ | ۵ | ۳۶۳/۲۵ | ۵ | ۳۶۳/۲۵ | ۵ | ۳۶۳/۲۵ | ۵ | ۳۶۳/۲۵ |
| C102* | KDMSS | ۵ | ۳۶۱/۴ | ۵ | ۳۶۲/۱۷ | ۵ | ۳۶۲/۱۷ | ۵ | ۳۶۲/۱۷ | ۵ | ۳۷۳/۶۴ |
| C103* | KDMSS | ۵ | ۳۶۱/۴ | ۵ | ۳۶۲/۱۷ | ۵ | ۳۶۲/۴۹ | ۵ | ۳۶۲/۱۷ | ۵ | ۳۶۸/۸۵ |
| C104* | KDMSS | ۵ | ۳۵۸/۰ | ۵ | ۳۶۰/۲۴ | ۵ | ۳۶۲/۹۱ | ۵ | ۳۵۸/۸۸ | ۵ | ۳۶۲/۸۸ |
| C105* | KDMSS | ۵ | ۳۶۲/۴ | ۵ | ۳۶۳/۲۵ | ۵ | ۳۶۳/۲۵ | ۵ | ۳۶۳/۲۵ | ۵ | ۳۶۳/۲۵ |
| C106* | KDMSS | ۵ | ۳۶۲/۴ | ۵ | ۳۶۳/۲۵ | ۵ | ۳۶۳/۲۵ | ۵ | ۳۶۳/۲۵ | ۵ | ۳۶۳/۲۵ |
| C107* | KDMSS | ۵ | ۳۶۲/۴ | ۵ | ۳۶۳/۲۵ | ۵ | ۳۶۳/۲۵ | ۵ | ۳۶۳/۲۵ | ۵ | ۳۷۴/۸۷ |
| C108* | KDMSS | ۵ | ۳۶۲/۴ | ۵ | ۳۶۳/۲۵ | ۵ | ۳۶۳/۲۵ | ۵ | ۳۶۳/۲۵ | ۵ | ۳۶۶/۷۲ |
| C109* | KDMSS | ۵ | ۳۶۲/۴ | ۵ | ۳۶۳/۲۵ | ۵ | ۳۶۴/۰۴ | ۵ | ۳۶۳/۲۵ | ۵ | ۳۶۵/۱۷ |
| C201** | CR+L | ۳ | ۳۶۰/۲ | ۲ | ۴۴۴/۹۶ | ۲ | ۴۴۴/۹۶ | ۲ | ۴۴۴/۹۶ | ۲ | ۴۴۴/۹۶ |
| C202** | CR+KLM | ۳ | ۳۶۰/۲ | ۲ | ۴۰۳/۸۱ | ۲ | ۴۰۳/۸۱ | ۲ | ۴۰۳/۸۱ | ۲ | ۴۰۷/۲۵ |
| C203** | CR+KLM | ۳ | ۳۵۹/۸ | ۲ | ۴۰۳/۲۵ | ۲ | ۴۰۳/۹۲ | ۲ | ۴۰۲/۵۲ | ۲ | ۴۰۶/۷۱ |
| C204** | KLM | ۲ | ۳۵۰/۱ | ۲ | ۳۶۴/۷ | ۲ | ۳۶۵/۰۷۵ | ۲ | ۳۵۶/۷۷ | ۲ | ۳۶۴/۰۲ |
| C205** | CR+KLM | ۳ | ۳۵۹/۸ | ۲ | ۴۴۴/۰۸ | ۲ | ۴۴۴/۰۸ | ۲ | ۴۲۹/۱۲ | ۲ | ۴۴۵/۴۵ |
| C206** | CR+KLM | ۳ | ۳۵۹/۸ | ۲ | ۴۲۶/۴ | ۲ | ۴۲۶/۴ | ۲ | ۴۱۲/۵۰ | ۲ | ۴۳۷/۶۶ |
| C207** | CR+KLM | ۳ | ۳۵۹/۶ | ۲ | ۴۲۶/۲۳ | ۲ | ۴۲۳/۳۷ | ۲ | ۴۲۶/۱۳ | ۲ | ۴۴۴/۶۲ |
| C208* | CR+KLM | ۲ | ۳۵۰/۵ | ۲ | ۳۵۲/۱۲ | ۲ | ۳۵۲/۱۲ | ۲ | ۳۵۲/۲۹ | ۲ | ۳۵۳/۵۶ |
| RC101* | KDMSS | ۸ | ۹۴۴ | ۸ | ۹۴۵/۵۸ | ۸ | ۹۴۷/۰۳ | ۸ | ۹۴۵/۵۸ | ۸ | ۹۴۶/۶۶ |
| RC102* | KDMSS | ۷ | ۸۲۲/۵ | ۷ | ۸۲۳/۹۷ | ۷ | ۸۲۵/۸۵ | ۷ | ۸۲۳/۹۷ | ۷ | ۸۲۷/۸۹ |
| RC103* | KDMSS | ۶ | ۷۱۰/۹ | ۶ | ۷۱۲/۵۶ | ۶ | ۷۱۳/۶۶ | ۶ | ۷۱۲/۹۱ | ۶ | ۷۱۴/۶۷ |
| RC104* | KDMSS | ۵ | ۵۴۵/۸ | ۵ | ۵۴۸/۱۴ | ۵ | ۵۴۹/۲۸ | ۵ | ۵۴۶/۵۱ | ۵ | ۵۴۷/۹۵ |
| RC105* | KDMSS | ۸ | ۸۵۵/۳ | ۸ | ۸۵۶/۹۷ | ۸ | ۸۶۳/۰۵ | ۸ | ۸۵۶/۹۷ | ۸ | ۸۸۶۰/۵۰ |
| RC106* | KDMSS | ۶ | ۷۲۳/۲ | ۶ | ۷۲۴/۶۵ | ۶ | ۷۲۶/۶۷ | ۶ | ۷۲۴/۶۵ | ۶ | ۷۲۹/۶۲ |
| RC107* | KDMSS | ۶ | ۶۴۲/۷ | ۶ | ۶۴۶/۱۷ | ۶ | ۶۴۶/۶۴ | ۶ | ۶۴۵/۷۰ | ۶ | ۶۵۳/۵۴ |
| RC108* | KDMSS | ۶ | ۵۹۸/۱ | ۶ | ۶۰۶/۴۷ | ۶ | ۶۰۶/۴۷ | ۶ | ۵۹۹/۱۷ | ۶ | ۶۱۳/۴۱ |
| RC201** | L+KLM | ۵ | ۶۴۸/۸ | ۳ | ۸۳۸/۷۶ | ۳ | ۸۴۴/۳۱ | ۳ | ۸۳۸/۷۶ | ۳ | ۸۵۵/۶۱ |
| RC202** | IV+C | ۵ | ۶۱۳/۶ | ۲ | ۸۶۸/۶۷ | ۲ | ۸۷۵/۸۶ | ۲ | ۸۶۷/۲۶ | ۲ | ۸۸۹/۵۰ |
| RC203** | IV+C | ۴ | ۵۵۵/۳ | ۲ | ۶۸۸/۵۵ | ۲ | ۶۸۹/۴۸ | ۲ | ۶۷۴/۴۴ | ۲ | ۶۸۰/۴۶ |
| RC204** | DLP | ۳ | ۴۴۴/۲ | ۲ | ۴۸۰/۲۱ | ۲ | ۴۸۵/۲۸ | ۲ | ۴۷۹/۲۲ | ۲ | ۴۸۵/۴۴ |
| RC205** | IV+C | ۵ | ۶۳۰/۲ | ۳ | ۷۶۱/۹۱ | ۳ | ۷۶۷/۷ | ۳ | ۷۶۵/۰۲ | ۳ | ۷۷۵/۹۹ |
| RC206** | IV+C | ۵ | ۶۱۰/۰ | ۲ | ۷۵۵/۱۳ | ۲ | ۷۶۳/۹۴ | ۲ | ۷۵۵/۱۳ | ۲ | ۷۶۴/۶۵ |
| RC207** | C | ۴ | ۵۵۸/۶ | ۲ | ۶۵۵/۸۱ | ۲ | ۶۵۸/۵۴ | ۲ | ۶۵۵/۸۱ | ۲ | ۶۷۷/۲۱ |
| RC208** | | | | ۲ | ۵۱۳/۶۱ | ۲ | ۵۱۹/۶۸ | ۲ | ۴۹۸/۷۹ | ۲ | ۵۱۸/۸۰ |

جدول ۲. ارزیابی پاسخها برای نمونههای سالامون (۱۰۰ مشتری).

| نمونه | الگوریتم مورد استفاده | بهترین پاسخ شناخته شده | | الگوریتم پیشنهادی | | | | الگوریتم تراکم ذرات گسسته | | | |
|--------|-----------------------|------------------------|---------|-------------------|----------|----------------|---------|---------------------------|----------|----------------|----------|
| | | NV | TD | بهترین پاسخ | | میانگین پاسخها | | بهترین پاسخ | | میانگین پاسخها | |
| | | | | NV | TD | NV | TD | NV | TD | NV | TD |
| R101* | H | ۱۹ | ۱۶۴۵/۷۹ | ۱۹ | ۱۶۶۰/۹۷ | ۱۹/۸ | ۱۷۱۹/۹۶ | ۱۹ | ۱۶۵۲/۰۰۱ | ۱۹ | ۱۶۵۷/۸۹۰ |
| R102 | RT | ۱۷ | ۱۴۸۶/۱۲ | ۱۸ | ۱۴۹۱/۸۵ | ۱۸ | ۱۲۴۶/۸۲ | ۱۷ | ۱۵۰۰/۸۰۹ | ۱۷/۸ | ۱۵۰۶/۶۲۶ |
| R103 | LLH | ۱۳ | ۱۲۹۲/۶۸ | ۱۴ | ۱۲۵۰/۶۵ | ۱۴ | ۱۲۵۸/۱ | ۱۴ | ۱۲۴۲/۶۴۹ | ۱۴ | ۱۲۶۸/۵۹۱ |
| R104 | M | ۹ | ۱۰۰۷/۲۴ | ۱۰ | ۱۰۵۱/۰۳ | ۱۰ | ۱۰۵۳/۰۸ | ۱۰ | ۱۰۴۲/۲۱۶ | ۱۰/۵ | ۱۰۹۷/۷۶۸ |
| R105* | RT | ۱۴ | ۱۳۷۷/۱۱ | ۱۴ | ۱۴۱۵/۴۲۷ | ۱۴/۸ | ۱۴۰۷/۵۱ | ۱۴ | ۱۳۵۸/۰۸۲ | ۱۴/۳ | ۱۴۰۵/۳۷۵ |
| R106* | M | ۱۲ | ۱۲۵۱/۹۸ | ۱۲ | ۱۲۹۵/۹۹۸ | ۱۲/۶ | ۱۲۹۳/۱۳ | ۱۲ | ۱۲۹۴/۸۶۹ | ۱۲/۹ | ۱۲۸۷/۰۲۶ |
| R107 | S97 | ۱۰ | ۱۱۰۴/۶۶ | ۱۱ | ۱۱۰۶/۶۶ | ۱۱ | ۱۱۲۹/۸۸ | ۱۱ | ۱۱۲۳/۹۸۱ | ۱۱ | ۱۱۶۰/۰۲۳ |
| R108 | BB | ۹ | ۹۶۰/۸۸ | ۱۰ | ۹۸۱/۱۸ | ۱۰ | ۱۰۱۵/۴۹ | ۱۰ | ۱۰۱۱/۶۸۲ | ۱۰/۱ | ۱۰۶۶/۲۹۰ |
| R109 | HG | ۱۱ | ۱۱۹۴/۷۳ | ۱۲ | ۱۱۹۹/۶ | ۱۲/۸ | ۱۲۱۱/۶۶ | ۱۲ | ۱۲۱۱/۶۳۰ | ۱۲/۴ | ۱۲۵۲/۷۸۷ |
| R110 | M | ۱۰ | ۱۱۸/۵۹ | ۱۲ | ۱۱۶۰/۰۹ | ۱۲ | ۱۱۶۸/۵۳ | ۱۱ | ۱۱۹۰/۳۶۲ | ۱۲ | ۱۱۹۰/۳۸۰ |
| R111 | RGP | ۱۰ | ۱۰۹۶/۷۲ | ۱۱ | ۱۱۱۳/۴۶ | ۱۱/۸ | ۱۱۶۰/۳۹ | ۱۱ | ۱۱۰۲/۹۸۷ | ۱۱/۳ | ۱۱۶۳/۲۷۱ |
| R112 | GTA | ۹ | ۹۸۲/۱۴ | ۱۰ | ۱۰۲۷/۲ | ۱۰/۸ | ۱۰۴۱/۶۳ | ۱۰ | ۱۰۲۹/۱۲۴ | ۱۰/۸ | ۱۱۰۳/۰۶۸ |
| R201* | HG | ۴ | ۱۲۵۲/۳۷ | ۴ | ۱۳۱۳/۸۶ | ۴ | ۱۳۲۶/۱۶ | ۴ | ۱۲۷۲/۹۶۹ | ۴ | ۱۲۹۸/۲۷۶ |
| R202 | RGP | ۳ | ۱۱۹۱/۷۰ | ۴ | ۱۱۳۱/۶۵ | ۴ | ۱۱۶۶/۰۵ | ۳ | ۱۲۴۷/۰۳۳ | ۳/۵ | ۱۲۵۹/۸۳۹ |
| R203* | M | ۳ | ۹۳۹/۵۴ | ۳ | ۹۹۵/۱۷ | ۳ | ۱۰۴۰/۲۹ | ۳ | ۱۰۵۲/۷۱۲ | ۳ | ۱۱۰۰/۷۹۹ |
| R204 | BVH | ۲ | ۸۲۵/۵۲ | ۳ | ۸۰۶/۴۷ | ۳ | ۸۱۵/۷۴ | ۳ | ۸۴۴/۱۶۱ | ۳ | ۹۲۸/۰۴۰ |
| R205* | RGP | ۳ | ۹۹۴/۴۲ | ۳ | ۱۰۸۳/۱۲ | ۳ | ۱۰۸۸/۱۴ | ۳ | ۱۰۶۱/۶۴۰ | ۳ | ۱۱۳۵/۷۰۳ |
| R206* | SSSD | ۳ | ۹۰۶/۱۴ | ۳ | ۹۶۶/۸۷ | ۳ | ۹۸۶/۶۴ | ۳ | ۱۰۱۶/۳۴۶ | ۳ | ۱۰۶۵/۶۰۷ |
| R207* | BVH | ۲ | ۸۹۳/۳۳ | ۳ | ۸۶۵/۱۹ | ۳ | ۸۷۸/۶۴ | ۳ | ۹۴۶/۷۷۸ | ۳ | ۱۰۳۶/۸۶۴ |
| R208* | M | ۲ | ۷۲۶/۷۵ | ۲ | ۸۰۳/۴۹ | ۲ | ۸۰۴/۴۲ | ۲ | ۸۳۴/۷۲۱ | ۲/۶ | ۸۸۰/۳۱۳ |
| R209* | H | ۳ | ۹۰۹/۱۶ | ۳ | ۹۸۵/۰۲ | ۳ | ۹۸۹/۰۵ | ۳ | ۱۰۰۲/۱۸۸ | ۳ | ۱۰۷۶/۹۴۹ |
| R210* | M | ۳ | ۹۳۹/۳۴ | ۳ | ۹۸۴/۱۳ | ۳ | ۹۹۶/۱۴ | ۳ | ۱۰۴۰/۵۴۴ | ۳ | ۱۰۹۰/۳۵۶ |
| R211 | BVH | ۲ | ۸۹۲/۷۱ | ۳ | ۸۱۷/۶۹ | ۳ | ۸۳۱/۹۹ | ۳ | ۸۶۱/۳۲۳ | ۳ | ۹۳۸/۱۵۰ |
| C101* | RT | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ |
| C102* | RT | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۳۴/۸۵ | ۱۰ | ۸۲۹/۷۱۲ | ۱۰ | ۸۵۰/۸۲۷ |
| C103* | RT | ۱۰ | ۸۲۸/۰۶ | ۱۰ | ۸۳۴/۶۰۴ | ۱۰ | ۸۴۳/۶۲۴ | ۱۰ | ۸۵۱/۳۷۳ | ۱۰ | ۸۸۶/۳۲۷ |
| C104* | RT | ۱۰ | ۸۲۴/۷۸ | ۱۰ | ۸۵۴/۰۷ | ۱۰ | ۸۷۴/۴۹ | ۱۰ | ۸۶۵/۵۲۱ | ۱۰ | ۹۵۸/۴۹۱ |
| C105* | RT | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۳۰/۴۳۵ |
| C106* | RT | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ |
| C107* | RT | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۶۵/۳۰۱ |
| C108* | RT | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۲۹/۳۱ | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۲۹/۰۷۸ |
| C109* | RT | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۲۹/۲۹ | ۱۰ | ۸۳۲/۷۱ | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۲۹/۵۷۹ |
| C201* | RT | ۳ | ۵۹۱/۵۶ | ۳ | ۵۹۱/۵۵۷ | ۳ | ۵۹۱/۵۵۷ | ۳ | ۵۹۱/۵۵۷ | ۳ | ۶۲۱/۷۷۷ |
| C202* | RT | ۳ | ۵۹۱/۵۶ | ۳ | ۵۹۱/۵۵۷ | ۳ | ۵۹۱/۵۵۷ | ۳ | ۵۹۱/۵۵۷ | ۳ | ۶۱۶/۳۷۸ |
| C203* | RT | ۳ | ۵۹۱/۱۷ | ۳ | ۶۰۸/۲۰ | ۳ | ۶۱۸/۳۵ | ۳ | ۵۹۱/۱۷۳ | ۳ | ۶۰۵/۸۳۶ |
| C204* | RT | ۳ | ۵۹۰/۶۰ | ۳ | ۶۱۲/۶۶ | ۳ | ۶۲۳/۶۲۵ | ۳ | ۶۱۵/۴۳۰ | ۳/۲ | ۶۷۸/۰۸۴ |
| C205* | RT | ۳ | ۵۸۸/۸۸ | ۳ | ۵۸۸/۸۷۶ | ۳ | ۵۸۸/۸۷۶ | ۳ | ۵۸۸/۸۷۶ | ۳ | ۶۰۰/۳۰۸ |
| C206* | RT | ۳ | ۵۸۸/۴۹ | ۳ | ۵۸۸/۴۹ | ۳ | ۵۸۹/۵۱ | ۳ | ۵۸۸/۸۷۶ | ۳ | ۵۹۲/۹۴۹ |
| C207* | RT | ۳ | ۵۸۸/۲۹ | ۳ | ۵۸۸/۲۹ | ۳ | ۵۸۹/۱۲ | ۳ | ۵۹۱/۳۵۰ | ۳ | ۵۹۶/۵۳۹ |
| C208* | RT | ۳ | ۵۸۸/۳۲ | ۳ | ۵۸۸/۳۲ | ۳ | ۵۹۰/۳ | ۳ | ۵۸۸/۴۹۳ | ۳ | ۵۹۱/۵۹۳ |
| RC101 | TBGGP | ۱۲ | ۱۶۹۶/۹۴ | ۱۵ | ۱۷۱۱/۲۷ | ۱۵/۶ | ۱۷۱۰/۲۸ | ۱۵ | ۱۶۴۱/۲۰۴ | ۱۵ | ۱۶۶۸/۸۷۸ |
| RC102 | TBGGP | ۱۲ | ۱۵۵۴/۷۵ | ۱۳ | ۱۶۱۵/۱۲ | ۱۳/۸ | ۱۵۶۸/۰۱ | ۱۳ | ۱۵۱۰/۹۵۲ | ۱۳/۸ | ۱۵۰۶/۸۰۵ |
| RC103 | S98 | ۱۲ | ۱۲۶۱/۶۷ | ۱۲ | ۱۳۴۷/۳ | ۱۲ | ۱۳۶۳/۴۲ | ۱۱ | ۱۲۹۴/۳۳۹ | ۱۱/۷ | ۱۳۰۵/۹۲۱ |
| RC104* | CLM | ۱۰ | ۱۱۳۵/۴۸ | ۱۰ | ۱۲۳۲/۴۸ | ۱۰/۸ | ۱۲۳۴/۵۵ | ۱۰ | ۱۱۹۰/۵۴۵ | ۱۰/۸ | ۱۲۱۹/۳۲۴ |
| RC105 | BB | ۱۳ | ۱۶۲۹/۴۴ | ۱۵ | ۱۵۷۶/۵۳ | ۱۵ | ۱۶۱۲/۸۲ | ۱۴ | ۱۶۰۳/۷۰۷ | ۱۴/۹ | ۱۵۸۱/۷۹۷ |
| RC106 | BB | ۱۱ | ۱۴۲۴/۳۳ | ۱۳ | ۱۴۴۲/۲۹ | ۱۳ | ۱۴۸۶/۲ | ۱۲ | ۱۴۱۰/۹۳۱ | ۱۲/۸ | ۱۴۱۶/۱۶۲ |
| RC107 | S97 | ۱۱ | ۱۲۳۰/۴۸ | ۱۲ | ۱۲۶۴/۲۶ | ۱۲ | ۱۳۰۰/۴۱ | ۱۱ | ۱۲۴۹/۷۹۵ | ۱۱/۳ | ۱۲۷۷/۹۷۰ |
| RC108 | TBGGP | ۱۰ | ۱۱۳۹/۸۲ | ۱۱ | ۱۲۱۷/۲۳ | ۱۱ | ۱۲۶۴/۹۴ | ۱۱ | ۱۱۸۱/۸۷۰ | ۱۱ | ۱۲۳۰/۹۲۴ |
| RC201* | M | ۴ | ۱۴۰۶/۹۱ | ۴ | ۱۴۸۱/۲۱ | ۴ | ۱۵۵۰/۸۳ | ۴ | ۱۴۲۳/۵۱۹ | ۴ | ۱۴۷۲/۷۱۱ |
| RC202 | CC | ۳ | ۱۳۶۷/۰۹ | ۴ | ۱۳۳۲/۳۸ | ۴ | ۱۲۵۲/۲۷ | ۴ | ۱۱۹۲/۵۹۱ | ۴ | ۱۲۸۶/۵۲۲ |
| RC203* | CC | ۳ | ۱۰۴۹/۶۲ | ۳ | ۱۱۹۱/۵۸ | ۳ | ۱۲۲۸/۱۲ | ۳ | ۱۱۲۳/۴۱۹ | ۳ | ۱۲۲۲/۸۱۰ |
| RC204* | M | ۳ | ۷۹۸/۴۱ | ۳ | ۸۲۸/۹۱ | ۳ | ۸۵۸/۵۳ | ۳ | ۸۹۴/۱۱۷ | ۳ | ۹۶۴/۵۰۲ |
| RC205* | M | ۴ | ۱۲۹۷/۱۹ | ۴ | ۱۴۳۷/۲۸ | ۴ | ۱۴۸۵/۱۲ | ۴ | ۱۳۲۱/۴۲۹ | ۴ | ۱۳۸۲/۲۰۴ |
| RC206 | H | ۳ | ۱۱۴۶/۳۲ | ۴ | ۱۱۱۸/۶ | ۴ | ۱۱۳۹/۴۲ | ۳ | ۱۳۰۷/۹۰۰ | ۴ | ۱۲۲۵/۴۰۰ |
| RC207 | BVH | ۳ | ۱۰۶۱/۱۴ | ۴ | ۱۰۶۰/۴۱ | ۴ | ۱۰۹۰/۷۲ | ۳ | ۱۱۳۰/۳۶۸ | ۳/۷ | ۱۱۹۲/۵۳۳ |
| RC208* | IKMUY | ۳ | ۸۲۸/۱۴ | ۳ | ۹۴۵/۱۳ | ۳ | ۹۸۱/۸۱ | ۳ | ۹۵۸/۲۳۶ | ۳ | ۱۰۸۴/۹۲۵ |



شکل ۷. نمایش شماتیک برای حل نمونه‌ی C101.



شکل ۸. نمایش شماتیک برای حل نمونه C201.

برای ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، الگوریتم بر روی ۵۶ نمونه‌ی استاندارد از مسائلی که توسط سالامون ارائه شده است؛ اجرا شده است. نتایج نشان می‌دهند که الگوریتم پیشنهادی پاسخ‌های بسیار مناسب و قابل‌قبولی در حل مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت پنجره‌ی زمانی ارائه داده است. به‌طور خاص، الگوریتم ارائه‌شده برای ۳۱ نمونه با ۵۰ مشتری، در ۳۱ مورد جواب بهینه‌ی نسبت به سایر روش‌ها ارائه کرده و برای ۵۵ مورد از ۵۶ نمونه نیز توانایی ارائه‌ی جواب بهینه را داشته است. همچنین در مورد نمونه‌هایی که ۱۰۰ مشتری دارند، در ۳۳ مورد از ۵۶ نمونه، توانایی ارائه‌ی جواب بهینه را داشته است. با توجه به عملکرد الگوریتم در افزایش اندازه‌ی نمونه‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد الگوریتم برای نمونه‌های با اندازه‌ی کوچک‌تر، مناسب‌تر است.

پاسخ بهینه و محور عمودی نیز دربرگیرنده‌ی بهترین جواب مسئله است. همگرایی رفتار الگوریتم پیشنهادی برای مسئله‌ی VRPTW، توانایی جستجو و عملکرد مناسب و منطقی الگوریتم را نشان می‌دهد.

۷. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، یک الگوریتم ترکیبی ازدحام گربه‌ها برای حل مسئله (VRPTW) (مسئله‌ی مسیریابی وسائط نقلیه با پنجره‌ی زمانی) توسعه داده شده است. در الگوریتم مذکور، هر گربه با ارائه‌ی یک مجموعه مسیر برای وسائط نقلیه، موقعیت خود را نمایش می‌دهد. برای ایجاد پاسخ‌های اولیه، الگوریتم PFH نیز استفاده شده است. علاوه بر این، از یک روش تصمیم‌گیری VRPTW برای کنترل هدف‌های اولیه و ثانویه مسئله نیز استفاده شده است.

References – منابع

1. Lenstra, J.K. and Kan, A.R., 1981. Complexity of vehicle routing and scheduling problems. *Networks*, 11(2), pp.221-227. DOI: <https://doi.org/10.1002/net.3230110211>.
2. Bucur, P.A., Hungerländer, P., Jellen, A., Maier, K., and Pachatz, V., 2021. Shift planning for smart meter service operators. In: *Data Science–Analytics and Applications: Proceedings of the 3rd International Data Science Conference–iDSC2020*. Springer Fachmedien Wiesbaden, pp.8-10. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-658-32182-6_2.
3. Cissé, M., Yalçındağ, S., Kergosien, Y., Şahin, E., Lenté, C., and Matta, A., 2017. OR problems related to home health care: A review of relevant routing and scheduling problems. *Operations Research for Health Care*, 13, pp.1-22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.orhc.2017.06.001>.
4. Wang, X. and Wasil, E., 2021. On the road to better routes: Five decades of published research on the vehicle routing problem. *Networks*, 77(1), pp.66-87. DOI: <https://doi.org/10.1002/net.21942>.
5. Desrosiers, J., Soumis, F., and Desrochers, M., 1984. Routing with time windows by column generation. *Networks*, 14(4), pp.545-565. DOI: <https://doi.org/10.1002/net.3230140406>.
6. Solomon, M.M., 1987. Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. *Operations Research*, 35(2), pp.254-265. DOI: <https://doi.org/10.1287/opre.35.2.254>.
7. Kallehauge, B., Boland, N., and Madsen, O.B., 2007. Path inequalities for the vehicle routing problem with time windows. *Networks: An International Journal*, 49(4), pp.273-293. DOI: <https://doi.org/10.1002/net.20178>.
8. Chu, S.-C., Tsai, P.-w., and Pan, J.-S., 2006. Cat swarm optimization. In: *Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg*. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-36668-3_94.
9. Ji, X.F., Pan, J.S., Chu, S.C., Hu, P., Chai, Q.W., and Zhang, P., 2020. Adaptive cat swarm optimization algorithm and its applications in vehicle routing problems. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, pp.1-14. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/1291526>.
10. Yadegari, Y.B., Rahimi, A.M., and Aboutalebi Esfahani, M., 2020. Solving the vehicle routing problem with time windows using cat swarming optimization algorithm. In: *The 19th International Conference on Transportation and Traffic Engineering, Tehran*. [In Persian].
11. Alvarenga, G.B., Mateus, G.R., and de Tomi, G., 2007. A genetic and set partitioning two-phase approach for the vehicle routing problem with time windows. *Computers & Operations Research*, 34(6), pp.1561-1584. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2005.07.025>.
12. Gong, Y.J., Zhang, J., Chung, H.S.H., Chen, W.N., Huang, R.Z., and Wang, T., 2012. Optimizing the vehicle routing problem with time windows: A discrete particle swarm optimization approach. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 42(2), pp.254-267. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSMCC.2011.2148712>.