# توسعه الگوریتم ترکیبی ازدحام گربه‌ها با عملگرهای ژنتیکی برای حل مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با محدودیت پنجره زمانی

بهناز یادگاری[۱]، امیرمسعود رحیمی [۲*]، محسن ابوطالبی اصفهانی [۳]

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان

۲- دانشیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان

۳- دانشیار دانشکده عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- behnazyadegari@gmail.com

۲- amrahimi@znu.ac.ir

۳- m.aboutalebi.e@eng.ui.ac.ir

**چکیده:**

حمل و نقل کارآمد کالا برای کاهش هزینه‌ها، تسریع زمان تحویل و بهبود کیفیت خدمات ضروری است. مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با محدودیت پنجره زمانی (VRPTW) یک مسئله بهینه‌سازی NP-hard در لجستیک است. این مقاله یک الگوریتم ترکیبی ازدحام گربه‌ها با عملگرهای ژنتیکی را برای حل مؤثر مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با محدودیت پنجره زمانی ارائه می‌کند. تابع هدف روی به حداقل رساندن کل مسافت طی شده و تعداد وسایل نقلیه استفاده شده تمرکز دارد. برای ارزیابی اثربخشی، الگوریتم با مجموعه داده‌های شبیه‌سازی شده از نمونه‌های سالامون آزمایش شد. تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای با سایر الگوریتم‌های موجود برتری آن را از نظر کیفیت راه حل و کارایی محاسباتی برجسته می‌کند. برای نمونه‌های با اندازه ۵۰ مشتری تا ۵۹/۴۸ درصد بهبود در پاسخ‌های پیشین حاصل‌شده است و برای نمونه‌های با اندازه ۱۰۰ مشتری در تعدادی از نمونه‌ها پاسخ‌های بهینه سراسری به‌دست‌آمده از مقالات 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:**

بهینه سازی ترکیبی انتخاب مسیر-وسیله نقلیه، مسئله مسیریابی وسیله نقلیه، پنجره زمانی، بهینه‌سازی ازدحام گربه‌ها، الگوریتم ژنتیک.

---

* امیرمسعود رحیمی ، دانشیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان.

ایمیل: amrahimi@znu.ac.ir (نویسنده مسئول مقاله)

ویراستاری نشده

# Development of Hybrid Cat Swarming algorithm with genetic operators to solve Vehicle Routing Problem with time window constraint

**B. Yadegari[۱], A.M. Rahimi[۲], M. Aboutalebi Esfahani[۳]**

۱- MSc. Graduated of Transportation Planning, Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan, Isfahan, Iran.

۲- Associate Professor, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

۳- Associate Professor, Department of Railway Engineering and Transportation Planning, Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan, Isfahan, Iran.

**Abstract:**

Efficient transportation of goods is crucial for cost reduction, improved delivery time, and enhanced service quality. Advanced logistics systems analyze data to find the most efficient routes. This minimizes fuel consumption and decreases transportation costs. The Vehicle Routing Problem with Time Window Constraints (VRPTW) is a classic optimization problem in the field of operations research and logistics. It is a challenging optimization problem in logistics, classified as NP-hard. Hybrid approaches combine multiple optimization techniques to improve the quality and efficiency of solutions. This paper presents a hybrid cat swarming algorithm that utilizes genetic operators to effectively address the VRPTW problem. The goal is to determine the optimal routes for the vehicles, considering both the vehicle capacity constraints and the time window constraints at each customer location. In this paper the objective function of the algorithm aims to minimize both the total distance traveled and the number of vehicles utilized, ensuring efficient and cost-effective routing. The hybrid cat swarming algorithm proposed in this study offers a novel approach to tackle the challenges posed by the VRPTW problem. By integrating genetic operators such as crossover and mutation, the algorithm enhances performance and improves the quality of solutions. Its primary objective of minimizing total distance and vehicle usage guarantees efficient and economically viable routing strategies. To evaluate the effectiveness of the algorithm, it was tested using a simulated dataset of salmon samples as a benchmark. For samples comprising ۵۰ customers, an improvement of up to ۴۸ to ۵۹ percent in previous response rates has been achieved. For samples comprising ۱۰۰ customers, optimal global responses, as obtained from previous articles, have been observed in several instances. The proposed algorithm is suitable for transportation and logistics systems with limited customers and leads to cost reduction, improved delivery times, and increased service quality.

**Keywords:** Hybrid optimization vehicle routing-scheduling, Vehicle routing problem, Time window, Cat swarm optimization, Genetic algorithm.

## ۱ ـ مقدمه و پیشینه تحقیقات

حمل‌ونقل یکی از بخش‌های عمده و مهم، از اقتصاد هر کشوری به شمار می‌رود و همچنین یکی از مهم‌ترین بخش‌های تشکیل‌دهنده هزینه تمام‌شده محصولات نهایی است. توسعه روزافزون شهرنشینی، صنایع و بخصوص صنایع پشتیبانی، جابجایی انسان و کالا را به‌صورت مسئله‌ای درآورده است که پیچیدگی آن دائماً در حال افزایش است. رشد شهری و شهرنشینی باعث افزایش فزاینده تقاضا در صنعت حمل‌ونقل شده 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 روزانه افراد، افزایش مصرف سوخت و استهلاک وسایل 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 حمل‌ونقل دارند. همچنین نیاز وجود دارد که این سیستم، صرفه‌جویی در هزینه‌ها را با در نظر گرفتن حداکثر سرویس و استفاده بهینه از سرمایه و تجهیزات حاصل نماید. توزیع بهینه 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 ازجمله مسائلی است که می‌توان در این زمینه به آن‌ها اشاره کرد.

مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با محدودیت پنجره زمانی (VRPTW[۱]) اهمیت قابل توجهی در سیستم‌های حمل و نقل و لجستیک دارد. این مسئله شامل طراحی مسیرهای کارآمد برای ناوگان وسایل نقلیه برای خدمت به مجموعه‌ای از مشتریان است. هر مسیر از انبار شروع و با انبار پایان می‌یابد و هر مشتری دقیقاً توسط یک وسیله نقلیه و فقط یک بار بازدید می‌شود. علاوه بر این، مسیرها باید به محدودیت‌های ظرفیت وسیه نقلیه و محدودیت‌های زمانی اعمال‌شده توسط مشتریان پایبند باشند.

مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با محدودیت پنجره زمانی دو هدف کلیدی را در بر می‌گیرد. هدف اصلی به حداقل رساندن تعداد وسایل نقلیه مورد نیاز برای خدمات رسانی مؤثر به همه مشتریان است. با بهینه‌سازی تخصیص وسیله نقلیه، هزینه‌های حمل و نقل را می‌توان کاهش داد و راندمان عملیاتی را افزایش داد. هدف ثانویه بر به حداقل رساندن کل مسافت طی شده توسط وسایل نقلیه متمرکز است. هدف این بخش بهینه‌سازی مسیریابی برای اطمینان از بهره‌وری سوخت، کاهش انتشار کربن و زمان تحویل کوتاه‌تر است. پرداختن به مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با محدودیت پنجره زمانی برای بهبود کارایی حمل و نقل و لجستیک بسیار مهم است. با حل این مسئله، شرکت‌ها می‌توانند از طریق کاهش استفاده از خودرو، افزایش رضایت مشتری به دلیل 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 مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با محدودیت پنجره زمانی در حال توسعه هستند. این پیشرفت‌ها در تکنیک‌های بهینه‌سازی مسیریابی به اثربخشی و عملکرد کلی سیستم‌های حمل و نقل و لجستیک کمک می‌کند.

مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با محدودیت پنجره زمانی به عنوان مسئله Np-Hard[۲] شناخته شده [۱] و در زمینه لجستیک و تجارت الکترونیک امروزی به ابزاری حیاتی تبدیل شده است. مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با محدودیت پنجره زمانی یکی از مهم‌ترین انواع مسئله کلاسیک مسیریابی وسیله نقلیه در زمینه تحقیق در عملیات است. مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با محدودیت پنجره زمانی کاربردهای گسترده‌ای دارد. به عنوان مثال در خدمات تحویل آنلاین مواد غذایی که در ادبیات علمی AHD[۳] نامیده می‌شود، کاربرد دارد. محبوبیت تحویل مواد غذایی در طول همه‌گیری اخیر کوید ۱۹ افزایش یافت.

مشخصه اصلی مسائل AHD این است که مشتریانی که مواد غذایی را به صورت آنلاین سفارش داده‌اند باید در محل باشند تا سفارشات خود را دریافت کنند زیرا کالاهای فاسد شدنی را نمی‌توان بدون مراقبت مانند بسته‌های معمولی تحویل داد. تحویل متعهدانه سفارشات مستلزم تنظیم پنجره‌های زمانی است که در

---

[۱] Vehicle Routing Problem with Time Window

[۲] Non-determinist ic Polynomial Time

[۳] Attended Home Delivery

طی آن مشتریان در محل حاضر هستند تا سفارش خود را دریافت کنند. برای این منظور، شرکت‌هایی که مواد غذایی را به صورت آنلاین می‌فروشند باید با VRPTW سروکار داشته باشند تا خدماتی را تضمین کنند که برای مشتریان‌شان رضایت‌بخش باشد و در عین حال برای شرکت مقرون‌به‌صرفه باشد. نمونه‌های بیشتر برای مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با محدودیت‌های پنجره زمانی عبارتند از:

برنامه‌ریزی نصب کنتورهای هوشمند [۲] 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، 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 (HHCRSP[۱]) [۳] 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 مسئله اصلی وجود دارد: مسئله اختصاص اپراتور و مسئله مسیریابی و برنامه‌ریزی زمان‌بندی مراقبت‌های بهداشتی در منزل که راه‌حل‌های مسیریابی و برنامه‌ریزی زمان‌بندی از مدل‌های موجود متمایز می‌شوند.

در مرجع [۴] ادبیات اخیر این موضوع به طور کامل مورد بررسی قرار گرفته است. هر دو رویکرد دقیق و احتمالی برای حل مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با محدودیت پنجره زمانی پیشنهاد شده‌اند. محدودیت پنجره زمانی توسط سالامون، به VRP کلاسیک اضافه شد و مجموعه‌ای از مسائل معیار را معرفی کرد که به‌عنوان "مسائل سالامون" شناخته می‌شود. سالامون، مسئله برنامه‌ریزی و مسیریابی وسایل نقلیه با پنجره زمانی را به‌عنوان یک مسئله عدد صحیح مختلط فرموله کرد و روش‌های بهینه‌سازی بر مبنای ابتکاری‌های خوشه - مسیر ارائه شده توسط فیشر و جایکومارف را برای حل آن توسعه داد. در سال ۱۹۸۴دسروویچرس و همکاران یک رویکرد دقیق را با استفاده از روش تولید ستونی برای VRPTW توسعه دادند[۵]. روش‌های ابتکاری برای حل مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با پنجره زمانی توسط سالامون در سال ۱۹۸۵ ارائه گردید که وی از چهار الگوریتم ابتکاری، روش درج، روش نزدیک‌ترین همسایگی زمین‌گرا، روش صرفه‌جویی کلارک و روش جارو کردن برای حل این مسئله استفاده کرد [۶].

تحقیقات زیادی در زمینه توسعه الگوریتم‌های دقیق برای حل مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با پنجره زمانی ارائه شده است که یک مرور کلی برروی آن‌ها در [۷] بررسی شده است. با این حال، برای نمونه‌های مسئله بزرگ، همانطور که در عمل اتفاق می‌افتند، باید از روش‌های ابتکاری (فراابتکاری) برای استخراج راه‌حل‌های تقریبی در زمان قابل قبول استفاده کرد.

در این مقاله، یک روش نوین برای حل مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با پنجره زمانی ارائه شده است که از ترکیبی از الگوریتم ازدحام گربه‌ها (CSO[۲]) و عملگرهای الگوریتم ژنتیکی بهره می‌برد. در این روش، ابتدا با استفاده از الگوریتم ازدحام گربه‌ها، جمعیتی از گربه‌ها به عنوان حلقه‌های مسیر ایجاد می‌شود. سپس با استفاده از عملگرهای ژنتیکی، جهت بهبود جمعیت و به دست آوردن حل بهینه، عملیات تکاملی انجام می‌شود. علاوه بر این، از روش تولید تصادفی (PFIH[۳]) برای ایجاد حل اولیه استفاده می‌شود تا به یک جمعیت اولیه کارآمد برای الگوریتم ژنتیکی منجر شود.

این ترکیب الگوریتم‌ها امکان بهبود عملکرد و دقت الگوریتم را افزایش می‌دهد، زیرا هر کدام از این الگوریتم‌ها ویژگی‌ها و مزایای خاص خود را دارند که با ترکیب آن‌ها، عملکرد بهتری برای حل مسئله ارائه می‌دهند.

الگوریتم ازدحام گربه‌ها در ابتدا توسط چو[۴] و همکارانش در سال ۲۰۰۶ [۸] پیشنهاد شد. در سال‌های اخیر به شدت مورد مطالعه قرار گرفت و انواع مختلفی از آن ایجاد شد. در مرجع [۹] از یک روش بهبود یافته الگوریتم CSO برای حل یک مسئله مسیریابی وسیله نقلیه استفاده شده و کارایی الگوریتم برای حل این مسائل نشان داده شده است. در مرجع [۱۰] از الگوریتم CSO در

---

[۱] The Home Health Care Routing and Scheduling Problem

[۲] Cat Swarm Optimization

[۳] Push-Forward Insertion Heuristic

[۴] CHU

شکل اصلی خود و بدون روش‌های بهبود دهنده برای حل مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با محدودیت پنجره زمانی استفاده شد. الگوریتم استفاده شده بر روی یک مجموعه داده معیار به نام نمونه‌های سالامون تست شده است و نتایج نشان می‌دهد الگوریتم CSOبدون روش‌های بهبود دهنده تا نمونه‌های با ۲۵ مشتری را پاسخگو می‌باشد. در این مقاله با پیاده‌سازی و ترکیب عملگرهای ژنتیکی بر روی الگوریتم CSO کارایی این الگوریتم برای نمونه‌های بزرگتر برآورد می‌گردد.

مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با محدودیت پنجره زمانی یک مسئله بهینه‌سازی ترکیبی است. این مسئله یک گراف کامل است و هر راه حل یک گراف زیر مجموعه گراف کامل است. پاسخ‌های اولیه با استفاده از روش PFIH تولید شده‌اند. محدودیت‌های مسئله در طی ایجاد راه‌حل برآورده می‌شوند. الگوریتم دو هدف مسئله را با استفاده از یک روش تصمیم‌گیری ترکیب می‌کند. یک تابع تانژانت وارون برای نرمالسازی فاصله کل پیموده شده توسط وسایل نقلیه در بازه [۰, ۱] استفاده می‌شود که باعث می‌شود به حداقل رساندن تعداد وسایل نقلیه نسبت به فاصله پیموده شده اولویت داشته باشد. این روش نرمالسازی برای اهداف مسئله ساده و مفید است.

الگوریتم پیشنهادی برای این مسئله بر روی ۵۶ نمونه سالامون آزمایش شده است. نتایج آزمایش‌ها کارایی الگوریتم پیشنهادی را برای نمونه‌های با مشتری کم نشان می‌دهد. برای نمونه‌های با تعداد مشتری بیش از ۱۰۰ در دسته‌های C عملکرد خوبی نشان می‌دهد. در ادامه مقاله، مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با محدودیت پنجره زمانی در بخش دوم تعریف و سپس در بخش سوم الگوریتم ترکیب شده CSO با عملگرهای ژنتیکی شرح داده می‌شود. در بخش چهارم الگوریتم مذکور برای مسئله و نتایج عددی در بخش پنجم ارائه و در بخش ششم به نتیجه گیری پرداخته شده است.

## ۲- مسئله مسیریابی وسیله نقلیه

در مسئله مسیریابی وسایل نقلیه همراه با پنجره ناوگانی از وسایل نقلیه V وجود دارد که باید به مجموعه‌ای از مشتریان با پنجره‌های زمانی خاص خدمات ارائه دهند. هدف، به حداقل رساندن کل مسافت طی شده یا تعداد وسایل نقلیه استفاده شده با رعایت محدودیت‌های پنجره زمانی است.

هر مسیر از دپو شروع می‌شود و پس از ارائه خدمات به تعدادی از مشتریان با برگشت به دپو خاتمه پیدا می‌کند. تعداد مسیرها برابر با تعداد وسایل نقلیه یعنی K می‌باشد. برای هر مسیر هزینه $C_{ij}$ و زمان $t_{ij}$ فاصله اقلیدسی بین دو مشتری $i$ و $j$ را نشان می‌دهند. هر مشتری در شبکه تنها یکبار و توسط یک وسیله نقلیه سرویس می‌گیرند.

$q_k$ ظرفیت هر وسیله نقلیه، $m_i$ تقاضای هر مشتری، $[e_i, l_i]$ پنجره زمانی هر مشتری، $t_i$ بیان‌کننده زمان شروع سرویس در گره i، $s_i$ زمان سرویس‌دهی برای هر مشتری، $w_i$ زمان انتظار برای شروع پنجره زمانی برای وسایل نقلیه‌ای که زودتر می‌رسند، $r_k$ حداکثر زمان سفر هر وسیله نقلیه و متغیر $x_{ijk}$ نشان دهنده وجود یا عدم وجود سفر، که در آن‌ها $\{i, j = 0,1,2,...,N; i \neq j\}$ و $\{k = 0,1,2,...K\}$ می‌باشد.

هدف این تابع، پیدایش مجموعه‌ای از مسیرها است که در آن‌ها تمامی مشتریان در حالی سرویس ببینند که تمام محدودیت‌های مسئله ارضا گردد.

$$Minimize \quad Z_1 = NV \quad (۱)$$

and

$$Minimize \quad Z_2 = \sum_{i=0}^{N}\sum_{j=0, j\neq i}^{N}\sum_{k=1}^{K} c_{ij}x_{ijk}$$

که در آن:

$$for \quad i = 0$$

$$\sum_{k=1}^{K}\sum_{j=1}^{N} x_{ijk} \leq K \quad (۲)$$

$$for \quad i = 0 \quad and \quad k \in \{1,..,k\}$$

$$\sum_{j=1}^{N} x_{ijk} = \sum_{j=1}^{N} x_{jik} \leq 1 \quad (۳)$$

$$for \quad i \in \{1,..N\}$$

$$\sum_{k=1}^{K}\sum_{j=0, j\neq i}^{N} x_{ijk} = 1 \quad (۴)$$

$$for \quad j \in \{1,..N\}$$

$$\sum_{k=1}^{K}\sum_{i=0, i\neq j}^{N} x_{ijk} = 1 \quad (۵)$$

$$for \quad k \in \{1,...,K\}$$
$$\sum_{i=1}^{N} m_i \sum_{j=0, j\neq i}^{N} x_{ijk} \leq q_k \qquad (۶)$$
$$for \quad k \in \{1,...,K\}$$
$$\sum_{i=0}^{N} \sum_{j=0, j\neq i}^{N} x_{ijk} \left(t_{ijk} + s_i + w_i\right) \leq r_k \qquad (۷)$$
$$t_0 = w_0 = f_0 \qquad (۸)$$
$$for \quad j \in \{1,...,N\}$$
$$\sum\sum x_{ijk} \left(t_i + t_{ij} + s_i + w_i\right) \leq t_j \qquad (۹)$$
$$for \quad i \in \{1,...,N\}$$
$$e_i \leq \left(t_i + w_i\right) \leq l_i \qquad (۱۰)$$

رابطه (۱) نشان‌دهنده تابع هدف مسئله می‌باشد. رابطه (۲) بیان می‌کند که حداکثر K مسیر از دپو خارج می‌شوند. رابطه (۳) تضمین می‌کند که شروع و پایان هر مسیر در دپو می‌باشد. رابطه (۴) و (۵) بیان می‌کنند که همه مشتریان تنها یک‌بار و توسط یک وسیله نقلیه باید سرویس داده شوند. رابطه (۶) محدودیت ظرفیت را در بردارد. محدودیت (۷) محدودیت حداکثر زمان سفر را بیان می‌کند. رابطه (۸) تا (۱۰) محدودیت پنجره زمانی را اعمال می‌کنند. این فرمول‌سازی یک جواب موجه برای مسئله مشخص می‌کند.

برای مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با محدودیت پنجره زمانی تابع هدف‌های متفاوتی در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با محدودیت پنجره زمانی دو هدف دارد. هدف اول کمینه کردن تعداد وسایل نقلیه و هدف دوم کمینه کردن مسافت طی شده می‌باشد. که آن‌ها مطابق رابطه (۱۱) ترکیب می‌شوند.

$$fitness\left(x_i\right) = NV\left(x_i\right) + normalize\left(TD\left(x_i\right)\right) \qquad (۱۱)$$

که NV تعداد وسایل نقلیه مورداستفاده و TD مسافت کل طی شده می‌باشد. و نرمال‌سازی فاصله کل طبق رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود. طبق این رابطه برازندگی هر گربه به تعداد وسایل نقلیه و فاصله کل طی شده بستگی دارد. با توجه به اینکه NV یعنی هدف اولیه همیشه دارای یک مقدار صحیح است و برای دو راه‌حل مختلف همیشه $\left|NV\left(x_i\right) - NV\left(x_j\right)\right| \geq 1$ برقرار است با نرمال‌سازی فاصله کل در بازه [۰, ۱]، کمینه کردن تعداد وسایل نقلیه در اولویت تابع هدف قرار می‌گیرد.

$$normalize\left(x\right) = \arctan\left(x\right) / \left(\frac{\pi}{2}\right) \qquad (۱۲)$$

## ۳- الگوریتم ترکیبی بهینه‌سازی ازدحام گربه‌ها با عملگرهای ژنتیکی

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام گربه‌ها یک الگوریتم مبتنی بر جمعیت با الهام از الگوی رفتاری گربه‌ها است. گربه‌ها رفتار اجتماعی جذابی را نشان داده‌اند که به مدت طولانی توجه انسان را جذب کرده‌اند. گربه‌ها بیشتر وقت خود را صرف استراحت می‌کنند، آن‌ها همیشه گوش‌به‌زنگ باقی می‌مانند و می‌توانند یک مهارت شکار خوب را دارا باشند. الگوریتم گربه‌ها بدون روش‌های بهبود دهنده در [۱۰] 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 گربه‌ای که دارای بهترین مقدار شایستگی می‌باشد، ذخیره می‌شود. با توجه با 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 غذا است، 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 این صورت مراحل الگوریتم تکرار می‌شود [۸].

پس از اعمال مراحل الگوریتم ازدحام گربه‌ها بر جمعیت، عملگرهای الگوریتم ژنتیک (تقاطع و جهش) بر روی اعضای منتخب اعمال می‌شود. در هر تکرار پس از حلقه به‌روزرسانی جمعیت بر اساس 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 بهتر بودن پاسخ‌های کشف‌شده، فرزندان تولیدشده با والدهای خود جایگزین می‌شوند و در غیر این صورت والدها در جمعیت به‌صورت

دست‌نخورده باقی می‌مانند. پس از آن عملگر جهش بر روی عضو انتخاب‌شده توسط روش انتخاب تورنمنت اعمال می‌شود و در صورت بهبود پاسخ کشف‌شده با عضو منتخب جایگزین می‌شود. هرکدام از عملگرهای تقاطع و جهش به تعداد تکرارهای تنظیم‌شده تکرار می‌شوند و در پایان اعمال عملگرهای بهبود، پاسخ بهینه 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 می‌شوند و از بین آن‌ها بهترین عضو به‌عنوان والد انتخاب می‌شود. روش انتخاب تورنمنت باعث می‌شود که K-۱ عضو بدتر اعضا هیچ‌گاه به‌عنوان والد انتخاب نشوند. شکل ۱ فلوچارت مراحل اعمال عملگرهای بهبود را نشان می‌دهد.

### ۳ ـ ۱ ـ الگوریتم‌های بهبود مسیر

بسیاری از الگوریتم‌های بهبود مسیر (دور یا تور) بر اساس فرآیند مقایسه هزینه مسیرهای همسایگی چند مشتری توسعه یافته‌اند. تمام عملگرهای همسایگی به کار گرفته‌شده، جزء عملگرهایی هستند که به تبادل و تعویض مشتری‌ها (گره‌ها) می‌پردازند. در واقع، عملگرها به تعداد دفعات از پیش تنظیم‌شده، در دورهای ساخته‌شده به جستجو می‌پردازند تا فواصل موجه، کوتاه‌تر و با هزینه کمینه کشف گردیده و با مسیرهایی که دارای هزینه بیشتری هستند، جایگزین شوند. از جمله مزایای الگوریتم‌های بهبود، افزایش تولید جواب‌های موجه‌تری که می‌توان ارزیابی کرد، کاهش زمان محاسبات، کاهش زمان دستیابی به جواب‌های باکیفیت‌تر و در راستای آن افزایش همگرایی الگوریتم به‌سوی بهینه سراسری است.

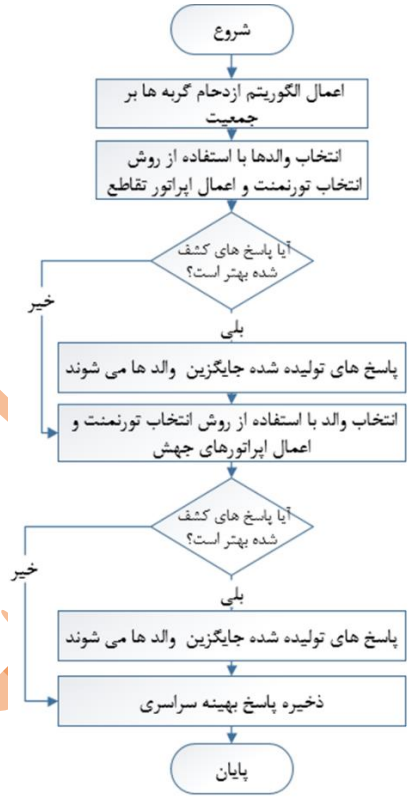
- مرحله بازسازی

یکی از جنبه‌های منحصربه‌فرد و مهم تکنیک‌های الگوریتم ژنتیک، نقش مهمی است که بازسازی (به‌طور سنتی، به شکل عملگر تقاطع) ایفا می‌کند. از میان عملگرهای تقاطع که برای VRPTW سخت وجود دارد، یک عملگر تقاطع خاص (تقاطع بهترین هزینه مسیر،[۱] BCRC) است که هدف آن کم کردن همزمان تعداد وسایل نقلیه و هزینه‌ها با برقراری تمام محدودیت‌های مسئله است، و اینجا از آن استفاده می‌شود.

در شکل ۲ مثال ۱، ایجاد دو فرزند $C_1$ و $C_2$ از دو والد، $P_1$و $P_2$را، با استفاده از یک نمونه مسئله اختیاری با اندازه مشتری ۹ برای توضیح اهداف نشان می‌دهد. $RP_1$ و $RP_2$ مجموعه مسیرهای مربوط به $P_1$ و $P_2$ را در نسل فعلی ارائه می‌دهند. برای مثال، $P_1$ دارای سه مسیر ($R_1$-$R_3$) با مشتری‌های مربوطه، یعنی $R_1$: ۳ ۱ ۷، $R_2$: ۵ ۶ و $R_3$: ۴ ۲ ۸ ۹ است. همان‌طور که در مثال ۱ بخش a نشان داده‌شده است؛ از هر والد، یک مسیر به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شود. در این مورد، برای $P_1$ ، مسیر $R_2$ با مشتریان ۵ و ۶ و برای $P_2$ مسیر $R_3$ با مشتریان ۷ و ۳ انتخاب شده است. بعد، برای یک والد داده‌شده، مشتریان انتخاب‌شده از مسیر والد مخالف حذف می‌شوند. به‌عنوان‌مثال در بخش a برای والد $P_1$، مشتریان ۷ و ۳ (که متعلق به انتخاب تصادفی انتخاب در $P_2$ می‌باشد) از $P_1$ حذف‌شده و به دنبال آن فرزند $C_1$ ایجاد می‌شود. به همین ترتیب مشتریان ۵ و ۶ که متعلق به انتخاب تصادفی در $P_1$ هستند، از مسیر $P_2$ حذف می‌شوند و در نتیجه $C_2$ ایجاد می‌شود. همان‌طور که در مثال ۱ بخش b نشان داده‌شده است، الگوریتم نیاز به دوباره واردکردن مشتریان ۷ و ۳ به فرزند $C_1$ و مشتریان ۵ و ۶ به فرزند $C_2$دارد. توجه داشته باشید که انتخاب مشتری اول برای واردکردن به‌صورت تصادفی انجام می‌شود. به‌عنوان‌مثال، در ایجاد $C_1$، ترتیب درج ۷ و ۳ به‌صورت اختیاری انجام می‌شود.

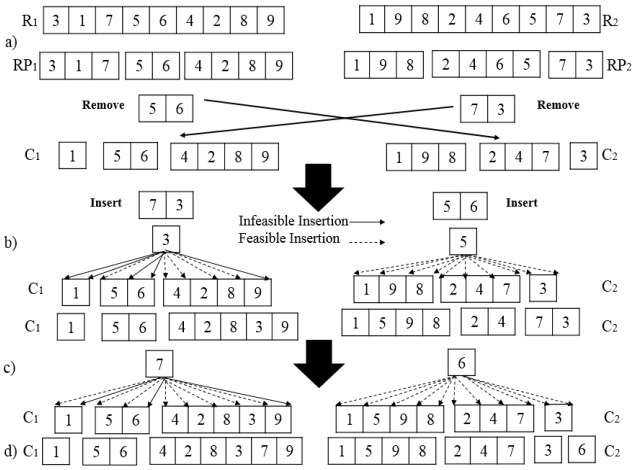
---

[۱] Best Cost Route Crossover




شکل ۱ : فلوچارت مراحل اعمال عملگرهای بهبود

در این مورد، مشتری ۳ ابتدا در بهترین مکان یافت شده در $C_1$ (همان‌طور که در بخش b نشان داده‌شده است) قبل از وارد شدن ۷ واردشده است همان‌طور که در بخش c نشان داده‌شده است. اگر نقطهٔ ورودی در مسیرها با محدودیت‌های ظرفیت وسیله نقلیه یا پنجره زمان مواجه شود به آن موقعیت غیرقابل‌قبول محسوب می‌شود. بهترین محل قرارگیری محلی است که حداقل هزینه در کل مسیرها به دست می‌آید. در این مثال، مشتریان ۳ و ۷ هر دو در مسیر ۳ والد $P_1$ قرار گرفتند که در در مثال ۱ بخش C نشان داده‌شده است. گاهی اوقات هیچ نقطه امکان‌پذیری قابل‌مشاهده نیست و مسیر جدیدی آغاز می‌شود. برای مثال، در ایجاد $C_2$، مشتری ۶ نمی‌تواند در مسیرهای فعلی برای $P_2$ وارد شود و ازاین‌رو یک مسیر جدید ایجاد شد.

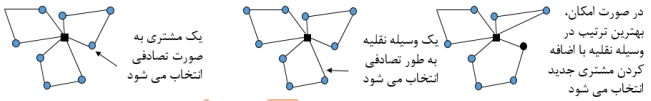



شکل ۲ : مثال ۱؛ نمونه‌ای برای عملگر ***BCRC***

## فرآیند جهش

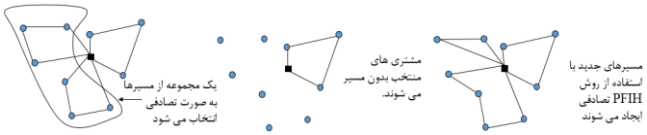
جهش برای جا دادن ویژگی‌های جدید در جمعیت فعلی ضروری است. عملگرهای بسیار تخصصی برای سرعت بخشیدن به تکامل جمعیت ایجاد شده‌اند. در این پژوهش در مجموع از ۴ عملگر مختلف استفاده‌شده است.

- ✓ **جهش شماره ۱:** (جابجایی تصادفی مشتری)؛ این عملگر یک وسیله نقلیه و یک مشتری مربوط به آن را به‌صورت تصادفی انتخاب می‌کند. جابجایی این مشتری به سایر وسایل نقلیه امتحان می‌شود. اگر با جابه‌جایی یک مسیر امکان‌پذیر به دست آید، مستقل از تابع هزینه جدید پذیرفته می‌شود (شکل ۳) [۱۱].



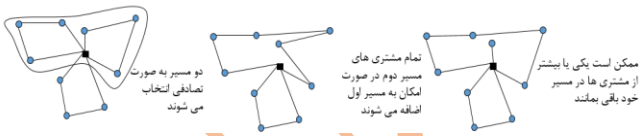

شکل ۳ : جهش شماره ۱؛ جابجایی تصادفی مشتری [۱۰]

- ✓ **جهش شماره ۲:** (مسیریابی مجدد با استفاده از PFIH تصادفی)؛ این عملگر یک مجموعه از مسیرها را به‌صورت تصادفی انتخاب می‌کند و روش PFIH تصادفی را بر آن‌ها اعمال می‌کند (شکل ۴) [۱۱].



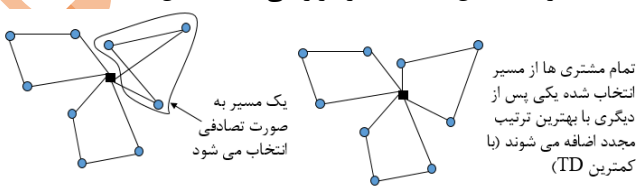

شکل ۴ : جهش شماره ۲؛ مسیریابی مجدد با استفاده از ***PFIH*** تصادفی [۱۱]

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




شکل ۵ : جهش شماره ۳؛ ادغام دو مسیر [۱۱]

✓ جهش شماره ۴: (دوباره واردکردن مشتری)؛ این عملگر یک مشتری تصادفی را در موقعیت بهتر یعنی موقعیت در همان مسیر با حداقل فاصله سفر قرار می‌دهد (شکل ۶) [۱۱].




شکل ۶ : جهش شماره ۴؛ دوباره واردکردن مشتری [۱۱]

## ۴ ـ پیاده‌سازی الگوریتم برای حل مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با محدودیت پنجره زمانی

الگوریتم ازدحام گربه‌ها، جزء الگوریتم‌های پیوسته و جمعیت محور محسوب می‌گردد. الگوریتم اصلی در حالت کلی از ۳ مرحله زیر تشکیل می‌شود:

۱. تولید پاسخ‌های اولیه و ارزیابی آن‌ها
۲. مرحله به‌روزرسانی جمعیت بر اساس پرچم آن‌ها (حالت جستجو و ردیابی) و ارزیابی پاسخ‌ها
۳. مرحله به‌روزرسانی بهترین موقعیت

طبق تحقیقات پژوهشگران، الگوریتم ازدحام گربه‌های اصلی برای مسائل بهینه‌سازی پیوسته دارای پاسخ‌های مناسب بوده 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 می‌باشد. در مرجع [۶] بیان شده است که الگوریتم بدون روش‌های بهبود دهنده برای مسئله با اندازه‌های کوچک نمونه مناسب است. برای بهبود الگوریتم تغییرات ابداعی مورد استفاده از این قرار هستند:

۱. استفاده از جهش نرمال در بدنه الگوریتم اصلی ازدحام گربه‌ها
۲. اعمال عملگر جهش برای هر گربه در هر تکرار بعد از به‌روزرسانی اصلی در بدنه الگوریتم اصلی ازدحام گربه‌ها
۳. استفاده از بهترین موقعیت هر گربه در به‌روزرسانی 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 مسئله مسیریابی وسیله نقلیه
۷. به‌کارگیری عملگر انتخاب تورنمنت برای انتخاب پاسخ‌های باکیفیت و اعمال مجدد الگوریتم‌ها

برای تولید پاسخ‌های اولیه، هر گربه نشان دهنده یک دور همیلتونی است که نحوه قرارگرفتن مشتری‌ها را به نمایش می‌گذارد. برای حل هر پاسخ به صورت مسیریابی هر وسیله نقلیه با استفاده از روش کدینگ دوقسمتی پیوسته و یک روش رمزگشایی (Decode) که در [۱۰] شرح داده شده، مجموعه‌ای از مسیرها تشکیل می‌شود که هر مسیر از دپو آغاز می‌شود و با ارائه خدمت به هر مشتری، در نهایت به دپو خاتمه می‌یابد.

## ۵ ـ نتایج عددی

در این بخش نتایج عددی آزمایش بر روی نمونه‌های بنچ مارک سالامون در شش دسته ارائه شده مطرح می‌شود. نمونه‌های سالامون در سه نوع کلاس بر حسب توزیع مشتریان به شرح ذیل قرار گرفته‌اند و در هر نوع کلاس، دو دسته قرار دارد.

✓ توزیع تصادفی (R۱ و R۲)
✓ توزیع خوشه‌بندی (C۱ و C۲)
✓ توزیع تصادفی و خوشه‌بندی (RC۱ و RC۲)

در کلاس R۱ و R۲ مشتری‌ها به‌صورت تصادفی توزیع‌شده‌اند؛ در کلاس C۱ و C۲ مشتری‌ها در گروه‌هایی خوشه‌بندی‌شده‌اند؛ و

در نهایت در کلاس $RC_1$ و $RC_2$ زیرمجموعه‌ای از مشتریان به صورتی تصادفی توزیع‌شده و مابقی خوشه‌بندی‌شده‌اند.

فاصله بین دو مشتری به‌صورت فاصله اقلیدسی ساده است. هر مشتری i دارای یک پنجره زمانی $[a_i, b_i]$ است که بازه زمانی برای رسیدن به هر مشتری را نشان می‌دهد. ظرفیت وسایل نقلیه و تقاضای مشتریان در هر کلاس متفاوت در نظر گرفته‌شده است. در مجموع دارای ۵۶ نمونه برای همه ابعاد طبقه‌بندی مسئله است که شامل ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ مشتری می‌باشد که داده‌های منتخب از http://web.cba.neu.edu/~msolomon/problems.htm برداشته شده است.

نتایج عددی به دست آمده با بهترین پاسخ‌های شناخته‌شده مسائل نمونه سالامون که از الگوریتم‌های مختلف دقیق، ابتکاری و فرا ابتکاری حاصل گردیده، مقایسه شد. نتایج اجرای الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم جمعیت محور تراکم ذرات گسسته ارائه شده توسط گونگ و همکاران (۲۰۱۲) [۱۲] نیز مقایسه شد. کارایی الگوریتم ازدحام گربه‌ها بر روی نمونه‌های کوچک تا ۲۵ مشتری در مرجع [۱۰] نشان داده شده است. با توجه به استفاده از بهبود دهنده‌ها برای کارایی بیشتر الگوریتم ازدحام گربه‌ها، آزمایشات تنها بر روی نمونه‌هایی با اندازه‌های ۵۰ و ۱۰۰ مشتری تست شده است. الگوریتم ارائه‌شده برای نمونه‌های با اندازه ۵۰ مشتری در ۲۸ نمونه پاسخ بهینه ارائه می‌دهد که بیشترین بهبود برای نمونه $R201$ با ۵۹/۴۸ درصد بهبود و کمترین بهبود برای نمونه $R109$ با ۷/۳۳ درصد بهبود می‌باشد و بدترین پاسخ به دست آمده برای نمونه $R106$ با ۶۰/۴۵ درصد افزایش در پاسخ است که تعداد وسایل نقلیه بیش از تعداد وسایل نقلیه بهینه به‌دست‌آمده است و در نتیجه الگوریتم پیشنهادی برای ۵۵ نمونه از ۵۶ نمونه توانایی ارائه پاسخ بهینه را دارد. برای نمونه‌های با اندازه ۱۰۰مشتری برای دسته‌های $C1$ و $C2$ پاسخ بهینه سراسری به‌دست‌آمده از مقالات پیشین به‌دست‌آمده است و در ۳۳ نمونه از ۵۶ نمونه توانایی ارائه پاسخ بهینه با تعداد وسایل نقلیه بهینه را دارد و بدترین پاسخ به‌دست‌آمده نمونه $R204$ با ۴۶/۵۴ درصد افزایش پاسخ می‌باشد.

## ۶ ـ نتایج و مقایسه‌ها

در جدول ۱ و ۲ نتایج به‌دست‌آمده از اجرای الگوریتم پیشنهادی بر روی نمونه‌های سالامون به صورت بهترین پاسخ به‌دست‌آمده و میانگین پاسخ‌های به‌دست‌آمده بیان‌شده است. NV نشان دهنده تعداد وسایل نقلیه و TD مجموع مسافت پیموده شده می‌باشد. تابع هزینه مورد استفاده در الگوریتم بر حسب بهینه کردن مسافت و تعداد وسایل نقلیه می‌باشد. علامت ** و مقادیر بولد نمایانگر بهبود در پاسخ نمونه موردنظر و علامت * نمایانگر جواب نزدیک و قابل‌قبول برای پاسخ نمونه موردنظر می‌باشد.

۱) نمونه با ۵۰ مشتری: همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده‌شده است، برای نمونه‌های ۵۰ مشتری؛ الگوریتم پیشنهادی برای ۳۱ نمونه از ۵۶ نمونه نسبت به بهترین نتایج پیشین، نتیجه بهتری نشان می‌دهد که شامل ۴ مورد از مجموعه داده نوع $R1$، ۱۱ مورد از مجموعه داده نوع $R2$، ۸ مورد از مجموعه داده نوع $C2$ و ۸ مورد از مجموعه داده نوع $RC2$ است. در بقیه موارد هم نتایجی نزدیک و قابل‌قبول ارائه می‌دهد. برای ۵۵ مورد از ۵۶ نمونه با ۵۰ مشتری پاسخ بهینه ارائه می‌دهد.

۲) نمونه با ۱۰۰ مشتری: همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده‌شده است، برای نمونه‌های ۱۰۰ مشتری؛ الگوریتم پیشنهادی برای هیچ یک از نمونه‌ها نتایج بهتری ارائه نمی‌دهد و برای ۳۳ مورد از ۵۶ نمونه با ۱۰۰ مشتری پاسخ بهینه ارائه می‌دهد.

همچنین در مقایسه با الگوریتم گسسته 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 حاصل شده است. همچنین نمودار برازش که نشان‌دهنده فرآیند بهبود پاسخ‌ها و روند همگرایی مناسب و یکنواخت جواب‌های به‌دست‌آمده می‌باشد، برای دو نمونه از بهترین پاسخ‌ها نمونه‌ها ($C101$ و $C201$) در شکل ۷ و ۸ ترسیم‌شده است.

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

| نمونه | الگوریتم مورداستفاده | بهترین پاسخ شناخته‌شده | | الگوریتم پیشنهادی | | | | الگوریتم تراکم ذرات گسسته | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | بهترین پاسخ | | میانگین پاسخ‌ها | | بهترین پاسخ | | میانگین پاسخ‌ها | |
| | | NV | TD | NV | TD | NV | TD | NV | TD | NV | TD |
| R۱۰۱* | KDMSS | ۱۲ | ۱۰۴۴/۰ | ۱۲ | ۱۰۵۵/۷۲ | ۱۲ | ۱۰۶۴/۴۴ | ۱۱ | ۱۱۰۰/۷۲ | ۱۱/۸ | ۱۰۶۰/۱۱ |
| R۱۰۲** | KDMSS | ۱۱ | ۹۰۹ | **۱۰** | ۹۲۴/۱۸ | ۱۰ | ۹۲۸/۱۵ | ۱۰ | ۹۲۳/۷۱ | ۱۰ | ۹۲۷/۱۳ |
| R۱۰۳** | KDMSS | ۹ | ۷۲۲/۹ | **۸** | **۷۸۹/۹۴** | ۸ | ۷۹۵/۴۱۶ | ۸ | ۷۹۰/۱۷ | ۸ | ۸۰۸/۹۹ |
| R۱۰۴* | KDMSS | ۶ | ۶۲۵/۴ | ۶ | ۶۴۳/۸۲ | ۶ | ۶۴۸/۶۱ | ۶ | ۶۳۱/۵۸ | ۶ | ۶۳۸/۸۳ |
| R۱۰۵* | KDMSS | ۹ | ۸۹۹/۳ | ۹ | ۹۱۷/۵۹ | ۹ | ۹۲۴/۲۷۴ | ۸ | ۹۸۳/۴۹ | ۹ | ۹۳۳/۶۷ |
| R۱۰۶ | KDMSS | ۵ | ۷۹۳ | ۸ | ۷۹۵/۲۵ | ۸ | ۸۲۰/۵۷۲ | ۷ | ۸۶۵/۹۳ | ۷/۵ | ۸۵۱/۱۷ |
| R۱۰۷** | KDMSS | ۷ | ۷۱۱/۱ | **۶** | **۷۶۴** | ۶/۸ | ۷۳۹/۸۷ | ۶ | ۷۳۷/۱۰ | ۶/۱ | ۷۵۱/۷۷ |
| R۱۰۸* | CR+KLM | ۶ | ۶۱۷/۷ | ۶ | ۶۲۷/۰۷ | ۶ | ۶۳۶/۶۹۸ | ۶ | ۶۲۴/۲۹ | ۶ | ۶۳۲/۷۳ |
| R۱۰۹** | KDMSS | ۸ | ۷۸۶/۸ | **۷** | **۸۳۳/۲۷** | ۷ | ۸۴۶/۷۴ | ۷ | ۸۰۱/۹۷ | ۷ | ۸۱۵/۴۴ |
| R۱۱۰* | KDMSS | ۷ | ۶۹۷/۰ | ۷ | ۷۱۴/۹۲ | ۷ | ۷۳۳/۰۶ | ۷ | ۷۲۰/۴۰ | ۷ | ۷۳۱/۷۹ |
| R۱۱۱* | CR+KLM | ۷ | ۷۰۷/۲ | ۷ | ۷۱۵/۵۲ | ۷ | ۷۲۰/۳۱ | ۶ | ۷۵۶/۳۵ | ۶/۹ | ۷۲۲/۵۵ |
| R۱۱۲* | CR+KLM | ۶ | ۶۳۰/۲ | ۶ | ۶۴۲/۰۶ | ۶ | ۶۵۳/۵۴ | ۶ | ۶۳۸/۴۹ | ۶ | ۶۴۵/۷۵ |
| R۲۰۱** | CR+KLM | ۶ | ۷۹۱/۹ | **۲** | **۹۶۲/۶۳** | ۲ | ۹۷۶/۶۹ | ۲ | ۹۵۳/۲۹ | ۲/۶ | ۹۱۱/۸۶ |
| R۲۰۲** | CR+KLM | ۵ | ۶۹۸/۵ | **۲** | **۸۲۱/۸۳** | ۲ | ۸۲۵/۴ | ۲ | ۸۱۵/۲۳ | ۲ | ۸۳۳/۹۰ |
| R۲۰۳** | IV+C | ۵ | ۶۰۵/۳ | **۲** | **۶۷۲/۸۷** | ۲ | ۶۸۹/۲۶ | ۲ | ۶۶۸/۳۶ | ۲ | ۶۸۸/۸۴ |
| R۲۰۴* | IV | ۲ | ۵۰۶/۴ | ۲ | ۵۱۸/۵۲ | ۲ | ۵۳۰/۵۷ | ۲ | ۵۱۸/۵۷ | ۲ | ۵۲۵/۷۸ |
| R۲۰۵** | IV+C | ۴ | ۶۹۰/۱ | **۲** | **۷۶۸/۵۳** | ۲ | ۸۰۱/۵۷ | ۲ | ۷۵۶/۳۸ | ۲ | ۷۷۳/۲۴ |
| R۲۰۶** | IV+C | ۴ | ۶۳۲/۴ | **۲** | **۶۷۱/۱۷** | ۲ | ۶۷۴/۲۱ | ۲ | ۶۶۱/۵۵ | ۲ | ۶۷۶/۲۵ |
| R۲۰۷** | | | | **۲** | **۵۹۹/۷۶** | ۲ | ۶۰۴/۷۱ | ۲ | ۵۹۳/۹۵ | ۲ | ۶۱۱/۰۴ |
| R۲۰۸** | | | | **۲** | **۵۱۳/۱۳** | ۲ | ۵۱۵/۳۲ | ۲ | ۵۰۸/۴۱ | ۲ | ۵۱۸/۸۳ |
| R۲۰۹** | IV+C | ۴ | ۶۰۰/۶ | **۲** | **۶۵۹/۱۹** | ۲ | ۶۷۳/۲۵ | ۲ | ۶۵۸/۲۸ | ۲ | ۶۷۱/۵۴ |
| R۲۱۰** | IV+C | ۴ | ۶۴۵/۶ | **۲** | **۶۷۳/۰۷** | ۲ | ۶۹۷/۲ | ۲ | ۶۷۰/۹۹ | ۲ | ۶۸۲/۷۰ |
| R۲۱۱** | IV+DLP | ۳ | ۵۳۵/۵ | **۲** | **۵۶۰/۲۸** | ۲ | ۵۶۶/۲۴ | ۲ | ۵۶۲/۷۴ | ۲ | ۵۷۶/۰۳ |
| C۱۰۱* | KDMSS | ۵ | ۳۶۲/۴ | ۵ | ۳۶۳/۲۵ | ۵ | ۳۶۳/۲۵ | ۵ | ۳۶۳/۲۵ | ۵ | ۳۶۳/۲۵ |
| C۱۰۲* | KDMSS | ۵ | ۳۶۱/۴ | ۵ | ۳۶۲/۱۷ | ۵ | ۳۶۲/۱۷ | ۵ | ۳۶۲/۱۷ | ۵ | ۳۷۳/۶۴ |
| C۱۰۳* | KDMSS | ۵ | ۳۶۱/۴ | ۵ | ۳۶۲/۱۷ | ۵ | ۳۶۲/۴۹ | ۵ | ۳۶۲/۱۷ | ۵ | ۳۶۸/۸۵ |
| C۱۰۴* | KDMSS | ۵ | ۳۵۸/۰ | ۵ | ۳۶۰/۲۴ | ۵ | ۳۶۲/۹۱ | ۵ | ۳۵۸/۸۸ | ۵ | ۳۶۲/۸۸ |
| C۱۰۵* | KDMSS | ۵ | ۳۶۲/۴ | ۵ | ۳۶۳/۲۵ | ۵ | ۳۶۳/۲۵ | ۵ | ۳۶۳/۲۵ | ۵ | ۳۶۳/۲۵ |
| C۱۰۶* | KDMSS | ۵ | ۳۶۲/۴ | ۵ | ۳۶۳/۲۵ | ۵ | ۳۶۳/۲۵ | ۵ | ۳۶۳/۲۵ | ۵ | ۳۶۳/۲۵ |
| C۱۰۷* | KDMSS | ۵ | ۳۶۲/۴ | ۵ | ۳۶۳/۲۵ | ۵ | ۳۶۳/۲۵ | ۵ | ۳۶۳/۲۵ | ۵ | ۳۷۴/۸۷ |
| C۱۰۸* | KDMSS | ۵ | ۳۶۲/۴ | ۵ | ۳۶۳/۲۵ | ۵ | ۳۶۳/۲۵ | ۵ | ۳۶۳/۲۵ | ۵ | ۳۶۶/۷۲ |
| C۱۰۹* | KDMSS | ۵ | ۳۶۲/۴ | ۵ | ۳۶۳/۲۵ | ۵ | ۳۶۴/۰۴ | ۵ | ۳۶۳/۲۵ | ۵ | ۳۶۵/۱۷ |
| C۲۰۱** | CR+L | ۳ | ۳۶۰/۲ | **۲** | **۴۴۴/۹۶** | ۲ | ۴۴۴/۹۶ | ۲ | ۴۴۴/۹۶ | ۲ | ۴۴۴/۹۶ |
| C۲۰۲** | CR+KLM | ۳ | ۳۶۰/۲ | **۲** | **۴۰۳/۸۱** | ۲ | ۴۰۳/۸۱ | ۲ | ۴۰۳/۸۱ | ۲ | ۴۰۷/۲۵ |
| C۲۰۳** | CR+KLM | ۳ | ۳۵۹/۸ | **۲** | **۴۰۳/۲۵** | ۲ | ۴۰۳/۹۲ | ۲ | ۴۰۲/۵۲ | ۲ | ۴۰۶/۷۱ |
| C۲۰۴** | KLM | ۲ | ۳۵۰/۱ | **۲** | **۳۶۴/۷** | ۲ | ۳۶۵/۰۷۵ | ۲ | ۳۵۶/۷۷ | ۲ | ۳۶۴/۰۲ |
| C۲۰۵** | CR+KLM | ۳ | ۳۵۹/۸ | **۲** | **۴۴۴/۰۸** | ۲ | ۴۴۴/۰۸ | ۲ | ۴۲۹/۱۲ | ۲ | ۴۴۵/۴۵ |
| C۲۰۶** | CR+KLM | ۳ | ۳۵۹/۸ | **۲** | **۴۲۶/۴** | ۲ | ۴۲۶/۴ | ۲ | ۴۱۲/۵۰ | ۲ | ۴۳۷/۶۶ |
| C۲۰۷** | CR+KLM | ۳ | ۳۵۹/۶ | **۲** | **۴۲۶/۲۳** | ۲ | ۴۲۳/۳۷ | ۲ | ۴۲۶/۱۳ | ۲ | ۴۴۴/۶۲ |
| C۲۰۸* | CR+KLM | ۲ | ۳۵۰/۵ | ۲ | ۳۵۲/۱۲ | ۲ | ۳۵۲/۱۲ | ۲ | ۳۵۲/۲۹ | ۲ | ۳۵۳/۵۶ |

ادامه جدول ۱ : ارزیابی پاسخ‌ها برای نمونه‌های سالامون (۵۰ مشتری)

| نمونه | الگوریتم مورداستفاده | بهترین پاسخ شناخته‌شده | | الگوریتم پیشنهادی | | | | الگوریتم تراکم ذرات گسسته | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | بهترین پاسخ | | میانگین پاسخ‌ها | | بهترین پاسخ | | میانگین پاسخ‌ها | |
| | | NV | TD | NV | TD | NV | TD | NV | TD | NV | TD |
| RC۱۰۱* | KDMSS | ۸ | ۹۴۴ | ۸ | ۹۴۵/۵۸ | ۸ | ۹۴۷/۰۳ | ۸ | ۹۴۵/۵۸ | ۸ | ۹۴۶/۶۶ |
| RC۱۰۲* | KDMSS | ۷ | ۸۲۲/۵ | ۷ | ۸۲۳/۹۷ | ۷ | ۸۲۵/۸۵ | ۷ | ۸۲۳/۹۷ | ۷ | ۸۲۷/۸۹ |
| RC۱۰۳* | KDMSS | ۶ | ۷۱۰/۹ | ۶ | ۷۱۲/۵۶ | ۶ | ۷۱۳/۶۶ | ۶ | ۷۱۲/۹۱ | ۶ | ۷۱۴/۶۷ |
| RC۱۰۴* | KDMSS | ۵ | ۵۴۵/۸ | ۵ | ۵۴۸/۱۴ | ۵ | ۵۴۹/۲۸ | ۵ | ۵۴۶/۵۱ | ۵ | ۵۴۷/۹۵ |
| RC۱۰۵* | KDMSS | ۸ | ۸۵۵/۳ | ۸ | ۸۵۶/۹۷ | ۸ | ۸۶۳/۰۵ | ۸ | ۸۵۶/۹۷ | ۸ | ۸۸۶۰/۵۰ |
| RC۱۰۶* | KDMSS | ۶ | ۷۲۳/۲ | ۶ | ۷۲۴/۶۵ | ۶ | ۷۲۶/۶۷ | ۶ | ۷۲۴/۶۵ | ۶ | ۷۲۹/۶۲ |
| RC۱۰۷* | KDMSS | ۶ | ۶۴۲/۷ | ۶ | ۶۴۶/۱۷ | ۶ | ۶۴۶/۶۴ | ۶ | ۶۴۵/۷۰ | ۶ | ۶۵۳/۵۴ |
| RC۱۰۸* | KDMSS | ۶ | ۵۹۸/۱ | ۶ | ۶۰۶/۴۷ | ۶ | ۶۰۶/۴۷ | ۶ | ۵۹۹/۱۷ | ۶ | ۶۱۳/۴۱ |
| RC۲۰۱** | L+KLM | ۵ | ۶۴۸/۸ | **۳** | **۸۳۸/۷۶** | ۳ | ۸۴۴/۳۱ | ۳ | ۸۳۸/۷۶ | ۳ | ۸۵۵/۶۱ |
| RC۲۰۲** | IV+C | ۵ | ۶۱۳/۶ | **۲** | **۸۶۸/۶۷** | ۲ | ۸۷۵/۸۶ | ۲ | ۸۶۷/۲۶ | ۲ | ۸۸۹/۵۰ |
| RC۲۰۳** | IV+C | ۴ | ۵۵۵/۳ | **۲** | **۶۸۸/۵۵** | ۲ | ۶۸۹/۴۸ | ۲ | ۶۷۴/۴۴ | ۲ | ۶۸۰/۴۶ |
| RC۲۰۴** | DLP | ۳ | ۴۴۴/۲ | **۲** | **۴۸۰/۲۱** | ۲ | ۴۸۵/۲۸ | ۲ | ۴۷۹/۲۲ | ۲ | ۴۸۵/۴۴ |
| RC۲۰۵** | IV+C | ۵ | ۶۳۰/۲ | **۳** | **۷۶۱/۹۱** | ۳ | ۷۶۷/۷ | ۳ | ۷۶۵/۰۲ | ۳ | ۷۷۵/۹۹ |
| RC۲۰۶** | IV+C | ۵ | ۶۱۰/۰ | **۲** | **۷۵۵/۱۳** | ۲ | ۷۶۳/۹۴ | ۲ | ۷۵۵/۱۳ | ۲ | ۷۶۴/۶۵ |
| RC۲۰۷** | C | ۴ | ۵۵۸/۶ | **۲** | **۶۵۵/۸۱** | ۲ | ۶۵۸/۵۴ | ۲ | ۶۵۵/۸۱ | ۲ | ۶۷۷/۲۱ |
| RC۲۰۸** | | | | **۲** | **۵۱۳/۶۱** | ۲ | ۵۱۹/۶۸ | ۲ | ۴۹۸/۷۹ | ۲ | ۵۱۸/۸۰ |

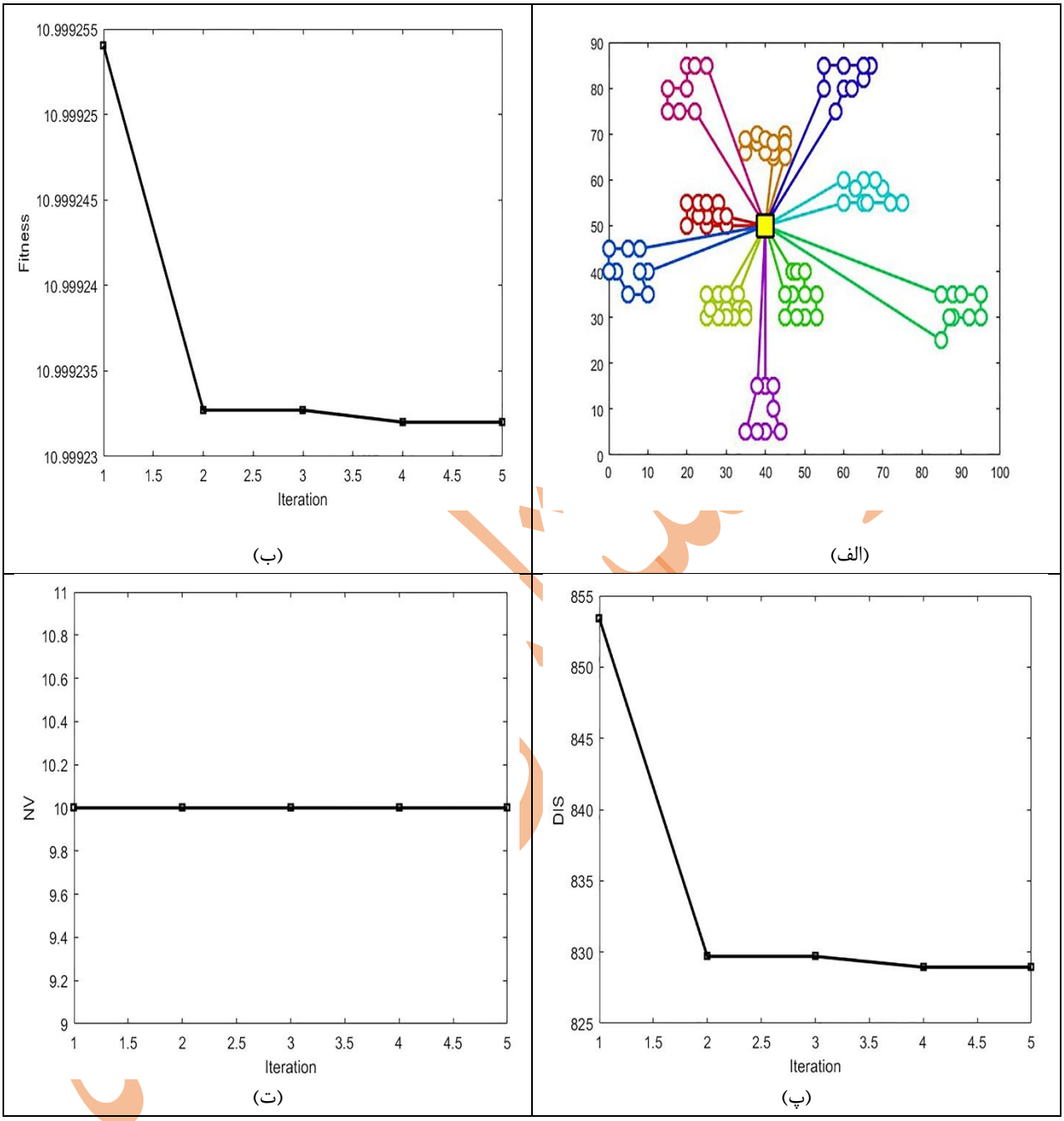
جدول ۲ : ارزیابی پاسخ‌ها برای نمونه‌های سالامون (۱۰۰ مشتری)

| نمونه | الگوریتم مورداستفاده | بهترین پاسخ شناخته‌شده | | الگوریتم پیشنهادی | | | | الگوریتم تراکم ذرات گسسته | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | بهترین پاسخ | | میانگین پاسخ‌ها | | بهترین پاسخ | | میانگین پاسخ‌ها | |
| | | NV | TD | NV | TD | NV | TD | NV | TD | NV | TD |
| R۱۰۱* | H | ۱۹ | ۱۶۴۵/۷۹ | ۱۹ | ۱۶۶۰/۹۷ | ۱۹/۸ | ۱۷۱۹/۹۶ | ۱۹ | ۱۶۵۲/۰۰۱ | ۱۹ | ۱۶۵۷/۸۹۰ |
| R۱۰۲ | RT | ۱۷ | ۱۴۸۶/۱۲ | ۱۸ | ۱۴۹۱/۸۵ | ۱۸ | ۱۲۴۶/۸۲ | ۱۷ | ۱۵۰۰/۸۰۹ | ۱۷/۸ | ۱۵۰۶/۶۲۶ |
| R۱۰۳ | LLH | ۱۳ | ۱۲۹۲/۶۸ | ۱۴ | ۱۲۵۰/۶۵ | ۱۴ | ۱۲۵۸/۱ | ۱۴ | ۱۲۴۲/۶۴۹ | ۱۴ | ۱۲۶۸/۵۹۱ |
| R۱۰۴ | M | ۹ | ۱۰۰۷/۲۴ | ۱۰ | ۱۰۵۱/۰۳ | ۱۰ | ۱۰۵۳/۰۸ | ۱۰ | ۱۰۴۲/۲۱۶ | ۱۰/۵ | ۱۰۹۷/۷۶۸ |
| R۱۰۵* | RT | ۱۴ | ۱۳۷۷/۱۱ | ۱۴ | ۱۴۱۵/۴۲۷ | ۱۴/۸ | ۱۴۰۷/۵۱ | ۱۴ | ۱۳۵۸/۰۸۲ | ۱۴/۳ | ۱۴۰۵/۲۷۵ |
| R۱۰۶* | M | ۱۲ | ۱۲۵۱/۹۸ | ۱۲ | ۱۲۹۵/۹۹۸ | ۱۲/۶ | ۱۲۹۳/۱۳ | ۱۲ | ۱۲۹۴/۸۶۹ | ۱۲/۹ | ۱۲۸۷/۰۲۶ |
| R۱۰۷ | S۹۷ | ۱۰ | ۱۱۰۴/۶۶ | ۱۱ | ۱۱۰۶/۶۶ | ۱۱ | ۱۱۲۹/۸۸ | ۱۱ | ۱۱۲۳/۹۸۱ | ۱۱ | ۱۱۶۰/۰۲۳ |
| R۱۰۸ | BB | ۹ | ۹۶۰/۸۸ | ۱۰ | ۹۸۱/۱۸ | ۱۰ | ۱۰۱۵/۴۹ | ۱۰ | ۱۰۱۱/۶۸۲ | ۱۰/۱ | ۱۰۶۶/۲۹۰ |
| R۱۰۹ | HG | ۱۱ | ۱۱۹۴/۷۳ | ۱۲ | ۱۱۹۹/۶ | ۱۲/۸ | ۱۲۱۱/۶۶ | ۱۲ | ۱۲۱۱/۶۳۰ | ۱۲/۴ | ۱۲۵۲/۷۸۷ |
| R۱۱۰ | M | ۱۰ | ۱۱۸/۵۹ | ۱۲ | ۱۱۶۰/۰۹ | ۱۲ | ۱۱۶۸/۵۳ | ۱۱ | ۱۱۹۰/۳۶۲ | ۱۲ | ۱۱۹۰/۳۸۰ |
| R۱۱۱ | RGP | ۱۰ | ۱۰۹۶/۷۲ | ۱۱ | ۱۱۱۳/۴۶ | ۱۱/۸ | ۱۱۶۰/۳۹ | ۱۱ | ۱۱۰۲/۹۸۷ | ۱۱/۳ | ۱۱۶۳/۲۷۱ |
| R۱۱۲ | GTA | ۹ | ۹۸۲/۱۴ | ۱۰ | ۱۰۲۷/۲ | ۱۰/۸ | ۱۰۴۱/۶۳ | ۱۰ | ۱۰۲۹/۱۲۴ | ۱۰/۸ | ۱۱۰۳/۰۶۸ |
| R۲۰۱* | HG | ۴ | ۱۲۵۲/۳۷ | ۴ | ۱۳۱۳/۸۶ | ۴ | ۱۳۲۶/۱۶ | ۴ | ۱۲۷۴/۹۶۹ | ۴ | ۱۲۹۸/۲۷۶ |
| R۲۰۲ | RGP | ۳ | ۱۱۹۱/۷۰ | ۴ | ۱۱۳۱/۶۵ | ۴ | ۱۱۶۶/۰۵ | ۳ | ۱۲۴۷/۰۳۳ | ۳/۵ | ۱۲۵۹/۸۳۹ |
| R۲۰۳* | M | ۳ | ۹۳۹/۵۴ | ۳ | ۹۹۵/۱۷ | ۳ | ۱۰۴۰/۲۹ | ۳ | ۱۰۵۲/۷۱۲ | ۳ | ۱۱۰۰/۷۹۹ |
| R۲۰۴ | BVH | ۲ | ۸۲۵/۵۲ | ۳ | ۸۰۶/۴۷ | ۳ | ۸۱۵/۷۴ | ۳ | ۸۴۴/۱۶۱ | ۳ | ۹۲۸/۰۴۰ |
| R۲۰۵* | RGP | ۳ | ۹۹۴/۴۲ | ۳ | ۱۰۸۳/۱۲ | ۳ | ۱۰۸۸/۱۴ | ۳ | ۱۰۶۱/۶۴۰ | ۳ | ۱۱۳۵/۷۰۳ |
| R۲۰۶* | SSSD | ۳ | ۹۰۶/۱۴ | ۳ | ۹۶۶/۸۷ | ۳ | ۹۸۶/۶۴ | ۳ | ۱۰۱۶/۳۴۶ | ۳ | ۱۰۶۵/۶۰۷ |
| R۲۰۷* | BVH | ۲ | ۸۹۳/۳۳ | ۳ | ۸۶۵/۱۹ | ۳ | ۸۷۸/۶۴ | ۳ | ۹۴۶/۷۷۸ | ۳ | ۱۰۳۶/۸۶۴ |
| R۲۰۸* | M | ۲ | ۷۲۶/۷۵ | ۲ | ۸۰۳/۴۹ | ۲ | ۸۰۴/۴۲ | ۲ | ۸۳۴/۷۲۱ | ۲/۶ | ۸۸۰/۳۱۳ |
| R۲۰۹* | H | ۳ | ۹۰۹/۱۶ | ۳ | ۹۸۵/۰۲ | ۳ | ۹۸۹/۰۵ | ۳ | ۱۰۰۳/۱۸۸ | ۳ | ۱۰۷۶/۹۴۹ |
| R۲۱۰* | M | ۳ | ۹۳۹/۳۴ | ۳ | ۹۸۴/۱۳ | ۳ | ۹۹۶/۱۴ | ۳ | ۱۰۴۰/۵۴۴ | ۳ | ۱۰۹۰/۳۵۶ |
| R۲۱۱ | BVH | ۲ | ۸۹۲/۷۱ | ۳ | ۸۱۷/۶۹ | ۳ | ۸۳۱/۹۹ | ۳ | ۸۶۱/۳۲۳ | ۳ | ۹۳۸/۱۵۰ |

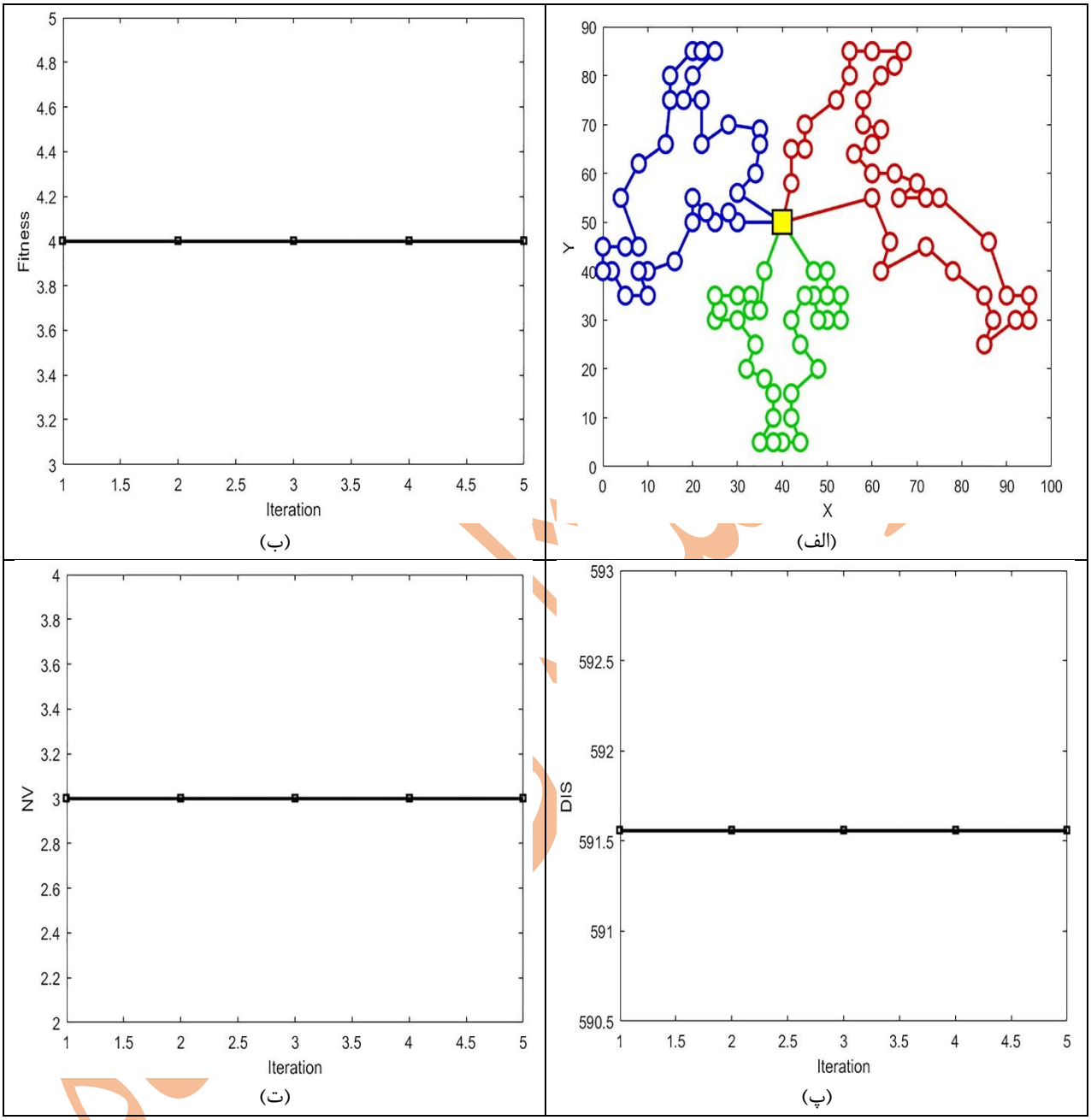
ادامه جدول ۲ : ارزیابی پاسخ‌ها برای نمونه‌های سالامون (۱۰۰ مشتری)

| نمونه | الگوریتم مورداستفاده | بهترین پاسخ شناخته‌شده | | الگوریتم پیشنهادی | | | | الگوریتم تراکم ذرات گسسته | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | بهترین پاسخ | | میانگین پاسخ‌ها | | بهترین پاسخ | | میانگین پاسخ‌ها | |
| | | NV | TD | NV | TD | NV | TD | NV | TD | NV | TD |
| C۱۰۱* | RT | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ |
| C۱۰۲* | RT | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۳۴/۸۵ | ۱۰ | ۸۲۹/۷۱۲ | ۱۰ | ۸۵۰/۸۳۷ |
| C۱۰۳* | RT | ۱۰ | ۸۲۸/۰۶ | ۱۰ | ۸۳۴/۶۰۴ | ۱۰ | ۸۴۳/۶۲۴ | ۱۰ | ۸۵۱/۳۷۳ | ۱۰ | ۸۸۶/۳۳۷ |
| C۱۰۴* | RT | ۱۰ | ۸۲۴/۷۸ | ۱۰ | ۸۵۴/۰۷ | ۱۰ | ۸۷۴/۴۹ | ۱۰ | ۸۶۵/۵۲۱ | ۱۰ | ۹۵۸/۴۹۱ |
| C۱۰۵* | RT | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۳۰/۴۳۵ |
| C۱۰۶* | RT | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ |
| C۱۰۷* | RT | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۶۵/۳۰۱ |
| C۱۰۸* | RT | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۲۹/۳۱ | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۲۹/۰۷۸ |
| C۱۰۹* | RT | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۲۹/۲۹ | ۱۰ | ۸۳۲/۷۱ | ۱۰ | ۸۲۸/۹۴ | ۱۰ | ۸۲۹/۵۷۹ |
| C۲۰۱* | RT | ۳ | ۵۹۱/۵۶ | ۳ | ۵۹۱/۵۵۷ | ۳ | ۵۹۱/۵۵۷ | ۳ | ۵۹۱/۵۵۷ | ۳ | ۶۲۱/۷۷۷ |
| C۲۰۲* | RT | ۳ | ۵۹۱/۵۶ | ۳ | ۵۹۱/۵۵۷ | ۳ | ۵۹۱/۵۵۷ | ۳ | ۵۹۱/۵۵۷ | ۳ | ۶۱۶/۳۷۸ |
| C۲۰۳* | RT | ۳ | ۵۹۱/۱۷ | ۳ | ۶۰۸/۲۰ | ۳ | ۶۱۸/۳۵ | ۳ | ۵۹۱/۱۷۳ | ۳ | ۶۰۵/۸۳۶ |
| C۲۰۴* | RT | ۳ | ۵۹۰/۶۰ | ۳ | ۶۱۲/۶۶ | ۳ | ۶۲۳/۶۲۵ | ۳ | ۶۱۵/۴۳۰ | ۳/۲ | ۶۷۸/۰۸۴ |
| C۲۰۵* | RT | ۳ | ۵۸۸/۸۸ | ۳ | ۵۸۸/۸۷۶ | ۳ | ۵۸۸/۸۷۶ | ۳ | ۵۸۸/۸۷۶ | ۳ | ۶۰۰/۳۰۸ |
| C۲۰۶* | RT | ۳ | ۵۸۸/۴۹ | ۳ | ۵۸۸/۴۹ | ۳ | ۵۸۹/۵۱ | ۳ | ۵۸۸/۸۷۶ | ۳ | ۵۹۲/۹۴۹ |
| C۲۰۷* | RT | ۳ | ۵۸۸/۲۹ | ۳ | ۵۸۸/۲۹ | ۳ | ۵۸۹/۱۲ | ۳ | ۵۹۱/۳۵۰ | ۳ | ۵۹۶/۵۳۹ |
| C۲۰۸* | RT | ۳ | ۵۸۸/۳۲ | ۳ | ۵۸۸/۳۲ | ۳ | ۵۹۰/۳ | ۳ | ۵۸۸/۴۹۳ | ۳ | ۵۹۱/۵۹۳ |
| RC۱۰۱ | TBGGP | ۱۲ | ۱۶۹۶/۹۴ | ۱۵ | ۱۷۱۱/۲۷ | ۱۵/۶ | ۱۷۱۰/۲۸ | ۱۵ | ۱۶۴۱/۲۰۴ | ۱۵ | ۱۶۶۸/۸۷۸ |
| RC۱۰۲ | TBGGP | ۱۲ | ۱۵۵۴/۷۵ | ۱۳ | ۱۶۱۵/۱۲ | ۱۳/۸ | ۱۵۶۸/۰۱ | ۱۳ | ۱۵۱۰/۹۵۲ | ۱۳/۸ | ۱۵۰۶/۸۰۵ |
| RC۱۰۳ | S۹۸ | ۱۲ | ۱۲۶۱/۶۷ | ۱۲ | ۱۳۴۷/۳ | ۱۲ | ۱۳۶۳/۴۲ | ۱۱ | ۱۲۹۴/۷۳۹ | ۱۱/۷ | ۱۳۰۵/۹۲۱ |
| RC۱۰۴* | CLM | ۱۰ | ۱۱۳۵/۴۸ | ۱۰ | ۱۲۳۲/۴۸ | ۱۰/۸ | ۱۲۳۴/۵۵ | ۱۰ | ۱۱۹۰/۵۴۵ | ۱۰/۸ | ۱۲۱۹/۳۲۴ |
| RC۱۰۵ | BB | ۱۳ | ۱۶۲۹/۴۴ | ۱۵ | ۱۵۷۶/۵۳ | ۱۵ | ۱۶۱۲/۸۲ | ۱۴ | ۱۶۰۳/۷۰۷ | ۱۴/۹ | ۱۵۸۱/۷۹۷ |
| RC۱۰۶ | BB | ۱۱ | ۱۴۲۴/۷۳ | ۱۳ | ۱۴۴۳/۲۹ | ۱۳ | ۱۴۸۶/۲ | ۱۲ | ۱۴۱۰/۹۳۱ | ۱۲/۸ | ۱۴۱۶/۱۶۲ |
| RC۱۰۷ | S۹۷ | ۱۱ | ۱۲۳۰/۴۸ | ۱۲ | ۱۲۶۴/۲۶ | ۱۲ | ۱۳۰۰/۴۱ | ۱۱ | ۱۲۴۹/۷۹۵ | ۱۱/۳ | ۱۲۷۷/۹۷۰ |
| RC۱۰۸ | TBGGP | ۱۰ | ۱۱۳۹/۸۲ | ۱۱ | ۱۲۱۷/۲۳ | ۱۱ | ۱۲۶۴/۹۴ | ۱۱ | ۱۱۸۱/۸۷۰ | ۱۱ | ۱۲۳۰/۹۲۴ |
| RC۲۰۱* | M | ۴ | ۱۴۰۶/۹۱ | ۴ | ۱۴۸۱/۲۱ | ۴ | ۱۵۵۰/۸۳ | ۴ | ۱۴۲۳/۵۱۹ | ۴ | ۱۴۷۲/۷۱۱ |
| RC۲۰۲ | CC | ۳ | ۱۳۶۷/۰۹ | ۴ | ۱۲۳۲/۳۸ | ۴ | ۱۲۵۲/۲۷ | ۴ | ۱۱۹۳/۵۹۱ | ۴ | ۱۲۸۶/۵۲۲ |
| RC۲۰۳* | CC | ۳ | ۱۰۴۹/۶۲ | ۳ | ۱۱۹۱/۵۸ | ۳ | ۱۲۲۸/۱۲ | ۳ | ۱۱۲۳/۴۱۹ | ۳ | ۱۲۲۲/۸۱۰ |
| RC۲۰۴* | M | ۳ | ۷۹۸/۴۱ | ۳ | ۸۲۸/۹۱ | ۳ | ۸۵۸/۵۳ | ۳ | ۸۹۴/۱۱۷ | ۳ | ۹۶۴/۵۰۲ |
| RC۲۰۵* | M | ۴ | ۱۲۹۷/۱۹ | ۴ | ۱۴۳۷/۲۸ | ۴ | ۱۴۸۵/۱۲ | ۴ | ۱۳۲۱/۴۲۹ | ۴ | ۱۳۸۲/۲۰۴ |
| RC۲۰۶ | H | ۳ | ۱۱۴۶/۳۲ | ۴ | ۱۱۱۸/۶ | ۴ | ۱۱۳۹/۴۲ | ۳ | ۱۳۰۷/۹۰۰ | ۴ | ۱۲۲۵/۴۰۰ |
| RC۲۰۷ | BVH | ۳ | ۱۰۶۱/۱۴ | ۴ | ۱۰۶۰/۴۱ | ۴ | ۱۰۹۰/۷۲ | ۳ | ۱۱۳۰/۳۶۸ | ۳/۷ | ۱۱۹۲/۵۳۳ |
| RC۲۰۸* | IKMUY | ۳ | ۸۲۸/۱۴ | ۳ | ۹۴۵/۱۳ | ۳ | ۹۸۱/۸۱ | ۳ | ۹۵۸/۲۳۶ | ۳ | ۱۰۸۴/۹۲۵ |

دراسی شده




شکل ۷ : نمایش شماتیک برای حل نمونه *C101*




شکل ۸ : نمایش شماتیک برای حل نمونه C۲۰۱

هر شکل در چهار قسمت ارائه شده که قسمت (الف) شامل تصویر گرافیکی از بهترین پاسخ به‌دست‌آمده توسط الگوریتم پیشنهادی برای نمونه مورد نظر است. تصاویر گرافیکی از بهترین پاسخ به‌دست‌آمده شامل موقعیت قرارگیری مشتری‌ها و همین‌طور دورهای ساخته‌شده و مسیرهای طی شده توسط وسایل نقلیه است.

مشاهده می‌شود هر دور ساخته‌شده کامل از دپوی مرکزی شروع و با ملاقات مشتری‌ها توسط یک وسیله نقلیه مجدداً به دپو بازمی‌گردد. در این گراف‌ها محور افقی مختصات X مشتری‌ها و محور عمودی مختصات Y مشتری‌ها را نشان می‌دهد.

قسمت (ب) نشان‌دهنده مقدار تابع هزینه بر حسب تکرار، قسمت (پ) تعداد وسایل نقلیه بر حسب تکرار و قسمت (ت) مسافت پیموده شده بر حسب تکرار می‌باشد. در نمودارهای قسمت (ب) تا قسمت (ت) محور افقی دربرگیرنده تعداد تکرار کلی چرخه اصلی الگوریتم برای دستیابی به پاسخ بهینه و محور عمودی نیز دربرگیرنده بهترین جواب مسئله است. همگرایی رفتار الگوریتم پیشنهادی برای مسئله VRPTW، توانایی جستجو و عملکرد مناسب و منطقی الگوریتم را نشان می‌دهد.

## نتیجه گیری

در این مقاله، یک الگوریتم ترکیبی ازدحام گربه‌ها برای حل مسئله VRPTW (مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با پنجره زمانی) توسعه داده شد. در این الگوریتم، هر گربه با ارائه یک مجموعه مسیر برای وسایل نقلیه، موقعیت خود را نمایش می‌دهد. برای ایجاد پاسخ‌های اولیه، الگوریتم PFIH نیز استفاده شد. علاوه بر این، از یک روش تصمیم‌گیری برای کنترل هدف اولیه و ثانویه مسئله VRPTW نیز استفاده شده است.

برای ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، الگوریتم بر روی ۵۶ نمونه استاندارد از مسائلی که توسط سالامون ارائه شده؛ اجرا شد. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی پاسخ‌های بسیار مناسب و قابل‌قبولی در حل مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با محدودیت پنجره زمانی ارائه می‌دهد. به طور خاص، الگوریتم ارائه شده برای ۳۱ نمونه با ۵۰ مشتری، در ۳۱ مورد جواب بهینه‌ای نسبت به سایر روش‌ها ارائه می‌دهد و برای ۵۵ مورد از ۵۶ نمونه نیز توانایی ارائه جواب بهینه را دارد. همچنین در مورد نمونه‌هایی که ۱۰۰ مشتری دارند، در ۳۳ مورد از ۵۶ نمونه، توانایی ارائه جواب بهینه را دارد. با توجه به عملکرد الگوریتم در افزایش اندازه نمونه‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد الگوریتم برای نمونه‌های با اندازه کوچک‌تر، مناسب‌تر است.

## منابع


[۱] Lenstra, J.K. and Kan, A.R., ۱۹۸۱. “Complexity of vehicle routing and scheduling problems”, Networks, ۱۱(۲), pp.۲۲۱-۲۲۷. https://doi.org/۱۰,۱۰۰۲/net.۳۲۳۰۱۱۰۲۱۱.

[۲] Bucur PA, Hungerländer P, Jellen A, Maier K, Pachatz V. Shift planning for smart meter service operators. InData Science–Analytics and Applications: Proceedings of the ۳rd International Data Science Conference–iDSC۲۰۲۰ ۲۰۲۱ (pp. ۸-۱۰). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/۱۰,۱۰۰۷/۹۷۸-۳-۶۵۸-۳۲۱۸۲-۶_۲

[۳] Cissé M, Yalçındağ S, Kergosien Y, Şahin E, Lenté C, Matta A. OR problems related to Home Health Care: A review of relevant routing and scheduling problems. Operations research for health care. , ۱۳, pp.۱-۲۲. https://doi.org/۱۰,۱۰۱۶/j.orhc.۲۰۱۷,۰۶,۰۰۱ https://doi.org/۱۰,۱۰۰۲/net.۳۲۳۰۱۴۰۴۰۶

[۴] Wang, X. and Wasil, E., ۲۰۲۱. “On the road to better routes: Five decades of published research on the vehicle routing problem”, Networks, ۷۷(۱), pp.۶۶-۸۷. https://doi.org/۱۰,۱۰۰۲/net.۲۱۹۴۲.

[۵] Desrosiers J, Soumis F, Desrochers M. Routing with time windows by column generation. Networks. ۱۹۸۴ .۱۴(۴):۵۴۵-۶۵.

[۶] Solomon, M.M., ۱۹۸۷. “Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints”, Operations research, ۳۵(۲), pp.۲۵۴-۲۶۵. https://doi.org/۱۰,۱۲۸۷/opre.۳۵,۲,۲۵۴

[۷] Kallehauge B, Boland N, Madsen OB. Path inequalities for the vehicle routing problem with time windows. Networks: An International Journal. ۲۰۰۷. ۴۹(۴):۲۷۳-۹۳. https://doi.org/۱۰,۱۰۰۲/net.۲۰۱۷۸

[۸] Chu, S.-C., P.-w. Tsai, and J.-S. Pan. “Cat Swarm Optimization”, ۲۰۰۶. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.https://doi.org/۱۰,۱۰۰۷/۹۷۸-۳-۵۴۰-۳۶۶۶۸-۳_۹۴.

[۹] Ji, X.F., Pan, J.S., Chu, S.C., Hu, P., Chai, Q.W. and Zhang, P., ۲۰۲۰. “Adaptive cat swarm optimization algorithm and its applications in vehicle routing problems”, Mathematical Problems in Engineering, ۲۰۲۰, pp.۱-۱۴. https://doi.org/۱۰,۱۱۵۵/۲۰۲۰/۱۲۹۱۵۲۶.

[۱۰] Yadegari, Y.B., A.M. Rahimi, M. Aboutalebi Esfahani, “Solving the vehicle routing problem with time windows using cat swarming optimization algorithm” the ۱۹th international conference on transportation and traffic engineering, Tehran. [in Persion]

[۱۱] Alvarenga, G.B., G.R. Mateus, and G. de Tomi, “A genetic and set partitioning two-phase approach for the vehicle routing problem with time windows”, Computers & Operations Research, ۲۰۰۷. ۳۴(۶): p. ۱۵۶۱-۱۵۸۴. https://doi.org/۱۰,۱۰۱۶/j.cor.۲۰۰۵,۰۷,۰۲۵.

[۱۲] Gong, Y.J., et al., “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), ۲۰۱۲. ۴۲(۲): p. ۲۵۴-۲۶۷.https://doi.org/۱۰,۱۱۰۹/TSMCC.۲۰۱۱,۲۱۴۸۷۱۲.