بهبود حل مسئله VRPSPD با الگوریتم جستجوی ممنوعه

مقاله علمی – پژوهشی

سید امیرعلی سیدنژاد، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
امیرمسعود رحیمی*، دانشیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: amrahimi@znu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۰– پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۵
صفحه۶۲-۴۹

چکیده

توسعه حمل و نقل تأثیر بسزایی در سیستم‌های اقتصادی اعم از تولیدی و خدماتی دارد که باعث ویژه شدن جایگاه مسئله مسیریابی وسیله‌نقلیه می‌شود. از مهم‌ترین تصمیمات در بخش‌های اجرایی توجه ویژه به یافتن مسیرهای بهینه، حذف مسیرهای غیرضروری، بهبود در میزان مسافت مسیر طی شده، و کاهش تعداد ناوگان است. در همین راستا یکی از مسائل پیچیده و در عین حال بسیار با اهمیت در شبکه حمل و نقل است. این مسئله پتانسیل بالایی در تعیین مجموعه بهینه از ناوگان وسایل‌نقلیه با هدف خدمت‌رسانی به مجموعه‌ای از مشتریان را دارد و تلاش‌های بسیاری برای حل آن صورت گرفته است. الگوریتم‌های فرا ابتکاری گوناگونی طی سال‌های اخیر توسعه پیدا کرده‌اند، یکی از آنها الگوریتم جستجوی ممنوعه است زیرا قدرت و توانایی مناسبی در حل مسائل پیچیده دارد. در این تحقیق از الگوریتم Tabu Search برای حل مسئله مسیریابی وسیله‌نقلیه با دریافت و تحویل همزمان کالا استفاده شد. با اعمال برخی تغییرات در کدنویسی آن در نرم افزار متلب و تعیین کردن مؤلفه‌های مقدار تکرار اجرای الگوریتم، مشخص کردن تعداد همسایگان و مقدار لیست ممنوعه باعث بهبود نتایج حاصل در مسافت‌های طی شده توسط وسایل‌نقلیه و بهینه کردن تعداد ناوگان گردید. نهایتاً الگوریتم پیشنهادی جدید روی ۱۴ مسئله نمونه استاندارد از سری مسائل سلهی و نگی اجرا شد و مقادیر به دست آمده با بهترین نتایج موجود از سایر الگوریتم‌ها مقایسه شد که نتایج رضایت بخشی در مسائل کوچک مقیاس داشت.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم فرا اکتشافی، الگوریتم جستجوی ممنوعه، مسئله مسیریابی وسایل‌نقلیه با تحویل و جمع‌آوری همزمان کالا

۱- مقدمه

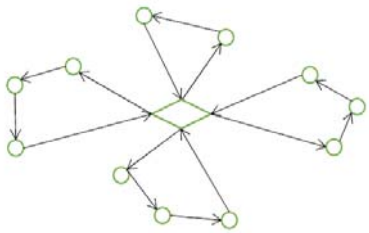
مسئله مسیریابی بدنبال تولید یک تور یا مجموعه‌ای از تورها بر روی یک شبکه یا زیرشبکه با هدف بهینه شدن یک یا چند تابع هدف است. تمامی این مسائل به نوعی یک حالت خاص از مسئله فروشنده دوره‌گرد به شمار می‌روند. در حقیقت با استفاده از این مسئله به دنبال مدلسازی موارد حقیقی است (Golden, Assad and Wasil, 2002). اجزای یک مسئله مسیریابی عبارتند از: شبکه، هزینه، تقاضا، ناوگان و اهداف توزیع کالا مربوط به سرویس‌دهی مجموعه‌ای از مشتریان توسط مجموعه‌ای از وسایل‌نقلیه است که در یک یا چند انبار قرار دارند و توسط مجموعه‌ای از خدمه (رانندگان) اداره می‌شوند و با استفاده از یک شبکه مناسب، عملیات خود را انجام می‌دهند (Koç, Laporte, and Tükenmez, 2020). به طور خاص، راه‌حل VRP برای تعیین مسیرهای مسیریابی، هر کدام توسط یک وسیله‌نقلیه واحد که از انبار خود شروع و خاتمه می‌یابد، انجام می‌شود؛ به گونه‌ای که تمام نیازهای مشتریان و تمام محدودیت‌های عملیاتی برآورده شود و همچنین هزینه حمل و نقل کلی به حداقل برسد؛ هزینه‌هایی که عمدتاً بر حمل و نقل جاده‌ای تأثیر

می‌گذارد، مربوط به موارد زیر است: ۱. قیمت سوخت، ۲. حقوق رانندگان، ۳. نگهداری ناوگان وسایل‌نقلیه، ٤. مقررات دولتی، ۵. رویدادهای وابسته به جغرافیای سیاسی ٦. نظم در حمل و نقل.

برای به حداقل رساندن تأثیر برخی از جنبه‌های ذکر شده، سعی در بهینه‌سازی مسیرهای تحویل وسیله‌نقلیه می‌شود. چنین رویکردی، یافتن مسیرهای تحویل برای ناوگان وسایل‌نقلیه را در نظر می‌گیرد به طوری که کل مسافت طی شده توسط همه آنها حداقل باشد. کاهش مسافت طی شده توسط وسایل‌نقلیه ممکنست منجر به موارد زیر شود:
۱. مصرف سوخت کمتر، ۲. بهره‌برداری کمتر از وسیله‌نقلیه، ۳. تعداد وسایل‌نقلیه مورد نیاز کمتر، ٤. زمان کار کمتر رانندگان ۵. کاهش هزینه‌های مربوط به مقررات.

ویژگی‌های معمولی مسائل مسیریابی و زمان‌بندی را با در نظر گرفتن اجزای اصلی آن‌ها (شبکه جاده، مشتریان، انبارها، وسایل‌نقلیه و رانندگان)، همچنین محدودیت‌های مختلف عملیاتی که می‌تواند بر ساخت مسیرها اعمال شود و اهداف احتمالی که باید در فرایند بهینه‌سازی به دست آید؛ توصیف می‌کنند(Michalik and Ochelska-Mierzejewska, 2021; Toth and Vigo, 2002a).

در حقیقت، مسئله مسیریابی وسایل‌نقلیه ترکیبی از دو مسئله بهینه‌سازی ترکیباتی "مسئله پُر کردن ظروف" و "مسئله فروشنده دوره‌گرد" است. چرا که در (VRP)، طبق مسئله پُر کردن ظروف، تخصیص مشتریان به وسایل‌نقلیه باید طوری باشد که مجموع تقاضاهای مشتریان اختصاص داده شده به هر وسیله‌نقلیه از ظرفیت وسیله‌نقلیه متناظر تجاوز نکند. همچنین تعداد وسایل‌نقلیه کمینه گردد و پس از تخصیص مشتریان هر وسیله‌نقلیه، مطابق مسئله فروشنده دوره‌گرد، تور هامیلتونی از مشتریان آن وسیله‌نقلیه را به گونه‌ای تعیین نمایند که هزینه و مخارج کل پیمایش وسایل‌نقلیه کمینه گردد (مسئله فروشنده دوره‌گرد چندگانه). هدف در مسئله فروشنده دوره‌گرد دستیابی به یک دوره هامیلتونی با کمترین هزینه ممکن در یک تور است (Cheikhrouhou and Khoufi, 2021; Toth and Vigo, 2002a).



شکل ۱. مدل ساختاری مسئله مسیریابی وسیله‌نقلیه
(Mohammadi, M., Mahmoodian, N., and Mohammadi, H., 2022).

VRP کلاسیک همچنین به عنوان VRP ظرفیت‌دار شناخته می‌شود، مسیرهای بهینه تحویل را طراحی می‌کند که در آن هر وسیله‌نقلیه فقط یک مسیر را می‌پیماید، هر وسیله‌نقلیه دارای ویژگی‌های یکسان است و تنها یک انبار مرکزی وجود دارد. هدف VRP یافتن مجموعه‌ای از مسیرهای کم هزینه وسایل‌نقلیه است به طوری که هر مشتری دقیقاً یک بار توسط یک وسیله‌نقلیه مورد بازدید قرار می‌گیرد، هر وسیله‌نقلیه مسیر خود را از انبار شروع و پایان می‌دهد و از ظرفیت وسایل‌نقلیه تجاوز نمی‌شود (Altabeeb et al., 2021). VRP کلاسیک به طرق مختلف با معرفی جنبه‌ها یا ویژگی‌های اضافی در زندگی واقعی گسترش یافته است، که منجر به تعداد زیادی از انواع VRP می‌شود. می‌توان این مسئله را با تغییر ظرفیت‌ها گسترش داد، که منجر به VRP ناوگان ناهمگن می‌شود، همچنین به VRP ناوگان ترکیب شده نیز معروف است؛ که به عنوان یک مسئله ترکیبی NP-Hard در نظر گرفته می‌شود، بنابراین حل آن دشوار است(Meliani et al., 2019). مدل محبوب دیگری به نام، VRP با پنجره زمانی، فرض می‌کند که تحویل به مشتری معین باید در یک بازه زمانی مشخص انجام شود، که مقدار آن در هر مشتری متفاوت است (Zhang et al., 2020). تاسان و جن، در سال ۲۰۱۲ مسئله مسیریابی وسایل‌نقلیه با تحویل و جمع‌آوری کالا اشاره کردند، که کالاها باید از یک مکان خاص برداشت و در مقصد خود رها شوند، همچنین محل جمع‌آوری و محل تخلیه باید در یک مسیر گنجانده شود زیرا بارگیری و تخلیه بار باید توسط یک وسیله‌نقلیه انجام شود. همچنین پارادا، اوپورتوس و پرادناس، در سال ۲۰۱۳ یک مسئله مرتبط مسئله مسیریابی وسایل‌نقلیه با دو مسیر و برگشت کالا را بیان کردند جایی که یک وسیله‌نقلیه تحویل و

همچنین جمع‌آوری را در یک مسیر انجام می‌دهد ولی برخی از مشتریان نیاز به تحویل دارند (که به آنها linehauls گفته می‌شود) برخی دیگر نیاز به جمع‌آوری دارند (که به آن‌ها backhaul می‌گویند). ترکیبی از این دو برای صنعت بسیار مهم محسوب می‌شود. برار و سائینی در سال ۲۰۱۱ درباره مفهوم معروف "Milk run" از موفقیت‌های حاصل از VRPB نشأت می‌گیرد راهکاری پیشنهاد دادند: با بکارگیری Milk run، هزینه‌های حمل و نقل و کل مسافت طی شده را می‌توان به میزان قابل توجهی کاهش و میزان بارگیری وسایل‌نقلیه را افزایش داد (Li et al., 2019). همچنین مونتویا تورس در سال ۲۰۱۵ در رابطه با VRP چند دپویی فرض می‌کند که انبارهای متعدد از نظر جغرافیایی بین مشتریان پخش شده است. کمپبل و ویلسون، ۲۰۱٤؛ گلچینسکی، گلدن، و واسیل در ۲۰۱۱ اظهار داشتند که VRP دوره‌ای زمانی استفاده می‌شود که برنامه‌ریزی در یک دوره معین انجام شود و تحویل به مشتری در روزهای مختلف انجام شود. برای PVRP، مشتریان را می‌توان بیش از یک بار ملاقات کرد، هر چند اغلب با تواتر محدود انجام می‌شود. اخیراً، برخی از این انواع در مسائل مسیریابی وسایل‌نقلیه به اصطلاح "rich" ترکیب شده‌اند، که به طور همزمان شامل چندین جنبه از زندگی واقعی می‌شود (Braekers, Ramaekers, and Nieuwenhuyse, 2016; Daham and Mohammed, 2021).

۲- فرموله کردن ریاضی مسئله مسیریابی وسایل‌نقلیه با تحویل و جمع‌آوری همزمان کالا

VRP با تحویل و جمع‌آوری، ناوگان وسایل‌نقلیه ناهمگن بر اساس پایانه‌های متعدد باید مجموعه‌ای از درخواست‌های حمل و نقل را برآورده کند. هر درخواست توسط یک نقطه تحویل و نقطه جمع‌آوری مربوطه تعریف می‌شود. به طور کلی هدف این مسئله به حداقل رساندن مسافت طی شده برای خدمات‌رسانی به تمامی مشتری‌ها و بهینه شدن تعداد ناوگان است (Silva et al.). علاوه بر تحویل کالا به محل آن‌ها، به طور همزمان کالاها را از مشتریان جمع‌آوری می‌کند؛ این مسئله را می‌توان بطور رسمی به صورت زیر تعریف کرد:

فرض کنید $G=(V,A)$ یک گراف باشد که در آن $v=\{v_0, v_1 ,..., v_n\}$ یک مجموعه راس است و $A=\{(V_I,V_J)|V_I,V_J\in V, i\neq j\}$ یک مجموعه قوسی است؛ مرتبط با A یک ماتریس فاصله (d_{ij}) و یک ماتریس زمان سفر (t_{ij}) است. Vertex v_0 نشان‌دهنده انباری است که m وسایل‌نقلیه همگن در آن مستقر هستند، در حالی که رئوس باقی‌مانده با n مشتری مطابقت دارد. هر مشتری یک مقدار جمع‌آوری غیر منفی p_i، مقدار تحویل q_i و یک زمان خدمات s_i دارد. هر وسیله‌نقلیه دارای هزینه ثابت f، هزینه متغیر به ازای واحد مسافت g، ظرفیت Q و محدودیت مدت سرویس D است. VRPSPD شامل طراحی مجموعه‌ای از حداکثر m مسیر است به طوری که:

(۱) هر مسیر از انبار شروع و به پایان می‌رسد.
(۲) هر مشتری دقیقاً یک بار توسط دقیقاً یک وسیله‌نقلیه بازدید می‌شود.
(۳) مجموع بار وسیله‌نقلیه در هر قوس از ظرفیت وسیله‌نقلیه اختصاص داده شده به آن تجاوز نمی‌کند (Q).
(٤) مدت زمان کل هر مسیر (از جمله زمان سفر و خدمات) از حد از پیش تعیین شده D تجاوز نمی‌کند.
(۵) کل هزینه مسیریابی به حداقل می‌رسد.

فرمول ریاضی VRPSPD در زیر ارائه شده است، که یک فرمول مبتنی بر جریان شبکه و یک برنامه خطی عدد صحیح مختلط است. این فرمول، توسعه فرمول اولیه VRP کریستوفیدس است.

متغیرهای تصمیم:

x_{ijk} : یک متغیر باینری که نشان می‌دهد آیا قوس (i, j) توسط وسیله‌نقلیه k عبور می‌کند یا خیر؟

$x_{ijk}=1$ اگر وسیله‌نقلیه k از قوس عبور کند (i, j)

$x_{ijk}=0$ اگر وسیله‌نقلیه k از قوس عبور نکند (i, j)

y_{ijk} : بار وسیله‌نقلیه k در حالی که از قوس عبور می‌کند (i, j)

δ_{ijk} : زمان شروع خدمات مشتری i با وسیله‌نقلیه k

تابع هدف:

Minimize

$$Z=f\sum_{k=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}x_{0jk}+g\sum_{i=0}^{n}\sum_{j=1}^{n+1}\sum_{k=1}^{m}d_{ij}x_{ijk} \quad (۱)$$

Subject to

$$\sum_{j=0}^{n}\sum_{k=1}^{m}x_{ijk}=1 \text{ for } 1\ll j\ll n \quad (۲)$$

$$\sum_{j=0}^{n}x_{jik}=\sum_{j=1}^{n+1}x_{ijk} \text{ for } 1\ll i\ll n,\ 1\ll k\ll m \quad (۳)$$

$$\sum_{j=1}^{n}x_{0jk}\ll 1 \text{ for } 1\ll k\ll m \quad (۴)$$

$$\delta_{ik}+s_i+t_{ij}-\delta_{jk}\ll\left(1-x_{ijk}\right)M \text{ for } 0\ll i\ll n,\ 1\ll j\ll n+1,\ 1\ll k\ll m \quad (۵)$$

$$\delta_{n+1,k}-\delta_{0k}\ll D \text{ for } 1\ll k\ll m \quad (۶)$$

$$y_{ijk}\ll x_{ijk}Q \text{ for } 0\ll i\ll n,\ 1\ll j\ll n+1,\ 1\ll k\ll m \quad (۷)$$

$$\sum_{j=1}^{n}y_{0jk}=\sum_{j=1}^{n}q_j\sum_{i=0}^{n}x_{ijk} \text{ for } 1\ll k\ll m \quad (۸)$$

$$\sum_{i=0}^{n}y_{ijk}+(p_j-q_j)\sum_{i=0}^{n}x_{ijk}=\sum_{i=1}^{n+1}y_{jik}$$
$$\text{for } 1\ll j\ll n,\ 1\ll k\ll \quad (۹)$$

$$x_{ijk}\in\{0,1\} \text{for } 0\ll i\ll n,\ 1\ll j\ll n+1,\ 1\ll k\ll m \quad (۱۰)$$

$$y_{ijk}\gg 0 \text{ for } 0\ll i\ll n,\ 1\ll j\ll n+1,\ 1\ll k\ll m \quad (۱۱)$$

$$\delta_{ik}\gg 0 \text{ for} 0\ll i\ll n+1,\ 1\ll k\ll m \quad (۱۲)$$

تابع هدف (۱) نشان می‌دهد که این مدل هزینه مسیریابی را که شامل هزینه ثابت حمل و نقل و هزینه متغیر است، به حداقل می‌رساند. محدودیت‌های (۲) و (۳) مسیرهای امکان‌پذیر وسایل‌نقلیه را تشکیل می‌دهند، به طوری که هر مشتری دقیقاً توسط یک وسیله‌نقلیه بازدید می‌شود (۲)، هر وسیله‌نقلیه‌ای که به مشتری می‌رسد باید آن مشتری را ترک کند (۳) و وسیله‌نقلیه برای خدمات‌رسانی به حداکثر یک مسیر استفاده شود.

محدودیت‌های (۵) و (۶) رابطه بین متغیرهای زمان و پارامترها را در این مدل توضیح می‌دهند. محدودیت (۵) زمان شروع خدمات یک مشتری را با مشتری دیگر مرتبط می‌کند.

اگر وسیله‌نقلیه k در حال خدمت به مشتری j پس از ارائه خدمات به مشتری $i(x_{ijk}=1)$ زمان شروع سرویس در مشتری j باید بزرگتر یا برابر با مجموع زمان شروع سرویس در مشتری i باشد همچنین زمان سرویس و زمان حمل و نقل از مشتری i به مشتری j باشد. $(\delta_{ik}+s_i+t_{ij}\leqslant\delta_{jk})$ در غیر این صورت، هیچ رابطه دقیقی بین کسانی که زمان سرویس را شروع می‌کنند $(\delta_{ik}\text{ and }\delta_{jk})$ زمانی که $x_{ijk}=0$باشد وجود ندارد. علاوه بر این، δ_{0k} نشان‌دهنده زمانی است که وسیله‌نقلیه k از انبار خارج می‌شود (فرض می‌شود که یک وسیله‌نقلیه در ابتدای یک افق برنامه‌ریزی آماده حرکت است، ($s_0=0$) و $\delta_{n+1,k}$ نشان‌دهنده زمان بازگشت وسیله‌نقلیه k به انبار است. از این رو، تفاوت بین دومی و اولی نشان‌دهنده مدت زمان سرویس / کار وسیله‌نقلیه k است و محدودیت مدت زمان سرویس در محدودیت (٦) بیان شده است .محدودیت‌های بار وسیله‌نقلیه در (۷)-(۹) توضیح داده شده است. محدودیت (۷) بیان می‌کند که اگر k وسیله‌نقلیه به مشتری j بعد از سرویس‌دهی به مشتری $i(x_{ijk}=0)$ خدمات‌رسانی می‌کند، بار مربوطه (y_{ijk}) باید حداکثر برابر با ظرفیت بار وسیله‌نقلیه (Q) باشد؛ و در غیر این صورت بار $y_{ijk}=0$ اگر $x_{ijk}=0$ باشد. محدودیت (۸) تضمین می‌کند که تمام تحویل‌های مشتری از انبار انجام می‌شود. بیان می‌کند که بار یک وسیله‌نقلیه در خروج از انبار باید برابر با کل بار برای تحویل مشتری وسیله‌نقلیه مربوطه باشد. محدودیت (۹) بار یک وسیله‌نقلیه را پس از خدمت به مشتری متعادل می‌کند. محدودیت‌های (۱۰)-(۱۲) دامنه متغیرهای تصمیم را بیان می‌کند: همه x_{ijk} متغیرهای باینری هستند، y_{ijk} و δ_{ijk} متغیرهای واقعی غیرمنفی هستند.

مخصوصاً برای δ_{ijk} معنی شروع سرویس مشتری i با وسیله‌نقلیه k فقط زمانی است که مشتری i با وسیله‌نقلیه k سرویس‌دهی شود ($x_{ijk}=1$ و در نتیجه $x_{jik}=1$).

این فرمول را می‌توان به عنوان یک مدل کلی از VRPSPD دید. با تنظیم پارامترها، این مدل می‌تواند به مدل پیشنهادی قبلی VRPSPD منجر شود. فرمول با تنظیم هزینه ثابت f = 0، هزینه متغیر g = 1، $d_{ij}=t_{ij}$ در معادله (۱) به مین کاهش می‌یابد.

همچنین محدودیت مدت زمان سرویس وسیله‌نقلیه $D=\infty$. این فرمول با تنظیم هزینه ثابت f = 0، هزینه متغیر g = 1 و محدودیت مدت خدمات $D=\infty$ به دتلوف کاهش می‌یابد. برای کاهش به تانگ و گالواو، هزینه ثابت f = 0، هزینه متغیر g = 1، زمان سرویس $S_i=0$، $d_{ij}=t_{ij}$ را تعریف کنید، و D را به عنوان حداکثر مسافت مجاز برای هر وسیله‌نقلیه تعریف کنید.

(Ai & Kachitvichyanukul, 2009).

۲-۱-تولید اطلاعات مسئله مسیریابی وسیله‌نقلیه با دریافت و تحویل همزمان کالا

مسائل نمونه استفاده شده دارای مختصات دکارتی X و Y و همچنین مقدار بار مشخص تحویل و جمع‌آوری در هر گره هستند. بر اساس فرض اصلی مسئله مسیریابی، وسیله‌نقلیه باید از دپو، که دارای مختصات معینی است، شروع به حرکت کرده و پس از ملاقات هر مشتری (گره) مجدداً به دپو بازگردد. از این رو فاصله بین مشتری‌ها با فرمول فاصله اقلیدسی محاسبه می‌شود. مسافت طی شده بین مشتری‌ها می‌بایست به یک وسیله‌نقلیه معین با ظرفیت مشخص که از دپو شروع به کار می‌کند، اختصاص یابد. از آنجایی که ناوگان وسایل‌نقلیه همگن است، تخصیص وسیله‌نقلیه به مسیرها (دورها) با توجه به شرایطی از قبیل ظرفیت و میزان بار در مسیر مورد نظر و حداقل نمودن هزینه صورت می‌گیرد. مسافت بین مشتری i و مشتری i + ۱ طبق رابطه (۱۳) به دست می‌آید :

$$d(Ti,T(i+1))=\sqrt{(x_i-x_{i+1})^2+(y_i-y_{i+1})^2} \qquad (۱۳)$$

بدیهی است که فاصله بین مشتری مورد نظر و دپو نیز از رابطه مذکور محاسبه خواهد شد.

```
for i=1:I

   for i2=i+1:I
      d(i,i2)=sqrt((x(i)-x(i2))^2+(y(i)-y(i2))^2);
      d(i2,i)=d(i,i2);
   end

   d0(i)=sqrt((x(i)-x0)^2+(y(i)-y0)^2);

end
```

شکل ۲. کُد مربوط به محاسبه فاصله بین مشتری‌ها

حال کُد مورد استفاده برای ایجاد دورهایی که باید توسط وسیله‌نقلیه طی شود در شکل ۲ نشان داده شده است. منظور از d0 فاصله بین مشتری i ام و دپو و I برابر با تعداد گره‌ها (مشتری) است.

۲-۲- اعمال محدودیت‌ها بر تابع هدف

در طراحی مسائل مهندسی، از جمله مسئله مسیریابی وسیله‌نقلیه که اغلب جزء مسائل بهینه‌سازی دارای محدودیت به حساب می‌آید؛ چگونگی برخورد با محدودیت‌های مسئله از جمله مباحث مهم است. برخی محدودیت‌های معین برای قابل حل کردن مسئله مسیریابی ضروری است. با دیدگاهی دیگر می‌توان اینگونه بیان کرد که محدودیت‌ها برای ساده‌تر نمودن مسئله به وجود آمده‌اند. یکی از محدودیت‌هایی که دارای اهمیت بسیار زیادی در تشکیل کمان‌ها میان مشتری‌ها است، محدودیت در ظرفیت وسیله‌نقلیه است. هر وسیله‌نقلیه دارای یک ظرفیت بیشینه است که این ظرفیت، یک محدودیت در وزن و بار بسته‌هایی که می‌بایست به مشتری تحویل داده شوند را داراست. به همین دلیل در ساخت دورها نباید مجموع ظرفیت کمان‌های به وجود آمده از ظرفیت وسیله‌نقلیه تجاوز کند. اگر بار درخواست شده از میزان ظرفیت وسیله‌نقلیه بیشتر شود، مقدار جریمه آن که برابر با اختلاف نسبی بار و ظرفیت وسیله‌نقلیه است با یک ضریب وزنی مناسب، که غالباً به صورت تجربی به دست می‌آید، بر تابع هدف اعمال می‌شود. حال چون مسئله مسیریابی وسیله‌نقلیه دارای قید دریافت و تحویل همزمان کالا است، بار در هر کمان برابر با اختلاف میزان بار تحویل داده شده و مقدار بار جمع‌آوری شده خواهد بود. به عبارت دیگر مقدار بار وسیله‌نقلیه، بعد از ملاقات مشتری i ام و قبل از مشتری j ام از رابطه (۱۴) حاصل می‌شود که y_k میزان بار وسیله‌نقلیه k، p_i میزان بار تحویل داده شده به مشتری i ام و q_iمقدار بار دریافتی از مشتری i ام است.

$$y_{i,j,k}=y_{i-1,j,k}-p_i+q_i \qquad (۱۴)$$

۲-۳- تولید پاسخ‌های اولیه برای حل مسئله

تولید جواب‌های اولیه در الگوریتم‌های تکاملی یکی از مراحل بحرانی و حساس است، چون می‌تواند بر سرعت همگرایی و کیفیت جواب نهایی بسیار مؤثر باشد. حال اگر اطلاعات کاملی از جواب‌های مَدِنظر در دسترس نباشد، تولید جمعیت اولیه با روش کاملاً تصادفی، امری بسیار رایج است. میزان حساسیت و تصادفی بودن جواب‌های ابتدایی بستگی به اطلاعات فضای جستجو دارد که می‌توان با گستردگی این اطلاعات، تنوع و گوناگونی جمعیت را افزایش داد. در این تحقیق در فاز تولید جواب اولیه برای ساده‌تر ماندن الگوریتم یک راه‌حل تقریباً آسان و صریح اقتباس گردید. در این راه‌حل با استفاده از روش کُدینگ تک قسمتی گسسته مجموعه‌ای از دورها که از دپو شروع شده و با خدمت‌رسانی به مشتری‌ها، مجدداً به دپو منتهی می‌گردند، تشکیل خواهد شد. در واقع روش کُدینگ تک قسمتی یک جایگشت تصادفی از مجموع تعداد مشتری‌ها و تعداد وسایل‌نقلیه منهای یک است. فرض می‌شود n مشتری توسط

m وسیله‌نقلیه ملاقات می‌شوند، راه حل ارائه شده فرمی به شکل یک بردار به طول n+m-۱ دارد. همین‌طور به ازای m وسیله‌نقلیه دارای بردار صفر هستیم که بیان کننده آغاز مسیر وسیله‌نقلیه از دپو است. برای مثال فرض می‌شود، مجموعه مشتری‌های {۰،۱،۲،۳،٤،٥،٦،۷،۸،۹} موجود هستند که صفر نشان‌دهنده دپو است و تعداد وسایل‌نقلیه ۳ عدد است. تعداد حالاتی که برای این مجموعه فرض شده می‌توان اختصاص داد برابر با فاکتوریل عدد (۱-۳+۹) است.

حالا یکی از تخصیص‌های جایگشتی مشتری‌ها به عنوان نمونه می‌تواند به ترتیب زیر باشد.

{۰،۲،٥،۷،۳،۰} = وسیله‌نقلیه اول

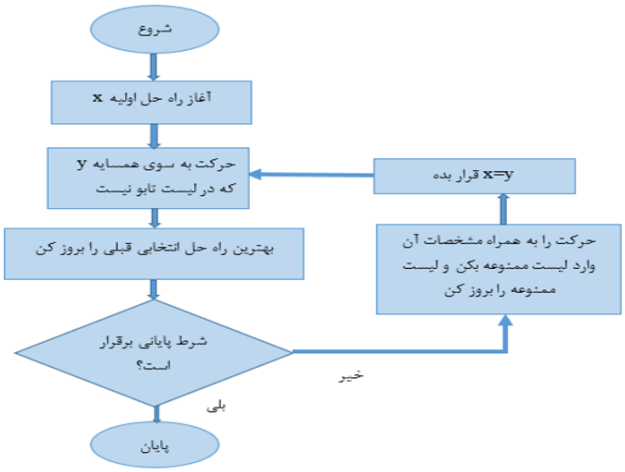
{۰،٦،۸،۰} = وسیله‌نقلیه دوم

{۰،٤،۱،۹،۰} = وسیله‌نقلیه سوم

بدین ترتیب مجموعه مشتری‌های تخصیص یافته برابر با {٤،۱،۹ *٦،۸*۲،٥،۷،۳} خواهد بود که در هنگام کُدینگ از یک جداکننده (که با علامت * مشخص گردید) برای اعمال تخصیص استفاده می‌شود (Glover and Kochenberger, 2006).

۳- الگوریتم جستجوی ممنوعه و روش پیشنهادی حل مسئله

جستجوی ممنوعه یک روش تکراری فرا استراتژی برای ساخت محله گسترده با تأکید ویژه بر اجتناب از گرفتار شدن در یک بهینه محلی است(Barbarosoglu and Ozgur, 1999). این تکنیک بهینه‌سازی در زمینه‌های مختلفی مانند شبکه توزیع شده، داده کاوی، هوش مصنوعی، شبکه عصبی، شبکه حسگر بی‌سیم و غیره کار کرده است. برای دست یافتن به جواب بهینه در یک مسئله بهینه‌سازی، ابتدا الگوریتم جستجوی ممنوعه از یک جواب اولیه شروع به حرکت می‌کند؛ در گام بعدی الگوریتم، بهترین جواب همسایه را از میان همسایه‌های فعلی انتخاب می‌کند. حال اگر این جواب در فهرست ممنوعه قرار نداشته باشد، الگوریتم به جواب همسایه حرکت می‌کند؛ در غیر این صورت الگوریتم معیاری به نام معیار تنفس را بررسی خواهد کرد. بر طبق معیار تنفس اگر جواب همسایه از جواب پیدا شده تاکنون بهتر باشد، الگوریتم به آن حرکت خواهد کرد؛ حتی اگر آن جواب در فهرست ممنوعه موجود باشد. بعد از حرکت الگوریتم به جواب همسایه، فهرست ممنوعه به روز رسانی می‌شود، به این معنا که حرکت قبل که به‌وسیله آن به جواب همسایه حرکت کردیم در فهرست ممنوعه قرار داده می‌شود تا از بازگشت مجدد الگوریتم به آن جواب و ایجاد سیکل باطل جلوگیری حاصل شود. در واقع فهرست ممنوعه در الگوریتم جستجوی ممنوعه، از قرار گرفتن الگوریتم در بهینه محلی جلوگیری می‌کند. پس از قرار دادن حرکت قبلی در فهرست ممنوعه، تعدادی از حرکت‌هایی که قبلاً در فهرست ممنوعه قرار گرفته بودند از فهرست ممنوعه خارج می‌شوند. پارامتر زمان ممنوعه، مدت زمانی که حرکت‌ها در فهرست ممنوعه قرار دارند را تعیین می‌کند. حرکت از جواب فعلی به جواب همسایه تا جایی ادامه پیدا می‌کند که شرط خاتمه دیده شود؛ همچنین فلوچارت کلی الگوریتم جستجوی ممنوعه در شکل ۳ نشان داده شده است (یقینی، اخوان کاظم زاده، ۱۳۹۵).



شکل ۳. فلوچارت الگوریتم جستجوی ممنوعه

٤- داده‌های مسئله

برای بررسی و ارزیابی الگوریتم جستجوی ممنوعه نیاز به مسائل شناخته شده و نمونه استاندارد جهت مقایسه نتایج است. داده‌های مسئله مسیریابی وسیله‌نقلیه با دریافت و تحویل همزمان کالا توسط محققینی نظیر دتلوف (۲۰۰۱ میلادی) و سلهی و نگی (۱۹۹۹ میلادی) به صورت مختصات در دستگاه دکارتی با طول و عرضی معین وجود دارد که مشخصات استفاده شده در تحقیق حاضر از مرجع (رحیمی و رجبی، ۱۳۹۱) استخراج گردید. مسائل نمونه سلهی و نگی (۱۹۹۹ میلادی) ١٤ مسئله نمونه در دو دسته X و Y را شامل می‌شود که از ۷ مسئله اصلی کریستوفیدز، مینگوتزی و توث (۱۹۷۹ میلادی) اقتباس شده‌اند که برای مسئله مسیریابی وسیله‌نقلیه با محدودیت ظرفیت مورد استفاده می‌شود. این مسائل نمونه شامل ۵۰ تا ۱۹۹ مشتری هستند. ماتریس هزینه در این مسائل با محاسبات فواصل اقلیدسی بین دو بردار به دست آمده است. سلهی و نگی برای ۷ نمونه اول با نام سری X، مقدار تحویل و دریافت برای مشتری i را به ترتیب با $d_i=r_i*dm_I$ و $p_i=(1-r_i)*dm_I$ محاسبه کردند که در آن نرخ r_Iبرابر است با $r_i=\min(x_i/y_I , y_i/x_i)$ و dm_i نیز تقاضای مشتری i ام می‌باشد. ۷ نمونه بعدی با نام سری Y نام گذاری شده که با جابجایی مقدار تحویل و دریافت برای هر مشتری تولید شده است(Goksal, Karaoglan, and Altiparmak, 2013). همچنین می‌توان ذکر کرد که تمامی مسائل نمونه مورد استفاده دارای یک دپو واحد بوده و ناوگان وسایل‌نقلیه به صورت همگن است.

٥- تنظیم پارامترها در پیاده سازی الگوریتم پیشنهادی

الگوریتم جستجوی ممنوعه، به مانند تمامی الگوریتم‌های فراابتکاری دارای پارامترهایی برای کنترل کارکرد الگوریتم است. این پارامترها عبارتند از: تعداد همسایه‌ها (NN)، تعداد تکرار الگوریتم (Maxiter) و میزان محدودیت (Limit) برای تعداد دفعات ماندن در لیست ممنوعه. نگارندگان تحقیق حاضر براساس آزمون‌های شخصی؛ مقادیر تعداد همسایه‌ها، تعداد تکرار الگوریتم و طول لیست ممنوعه را با آزمون و خطا بدست آوردند. ملاحظه شد که با در نظر گرفتن تعداد همچنین مقدار محدودیت با رابطه (۱۵) تعیین می‌شود:

$$Limit = X \times Maxiter \quad (۱۵)$$

Limit: تعداد دفعات ماندن در لیست ممنوعه

X: عددی در محدوده $0>X>0.05$

۲۰۰ همسایه، تعداد تکرار الگوریتم متغیر در محدوده ۲۰۰۰ تا ۸۰۰۰ واحد و همچنین میزان محدودیت ۲۰ تکرار در لیست ممنوعه؛ نتایج بدست آمده از کیفیت بالاتری برخوردار بوده‌اند. واضح است که با افزایش ابعاد مسئله، یا به عبارتی مسائل با تعداد مشتری (گره) بیشتر، نیاز به زمان و تکرار بیشتر برای دستیابی به جواب مناسب است، بر همین مبنا شرط توقف الگوریتم برای مسائل بزرگ و کوچک متغیر است.

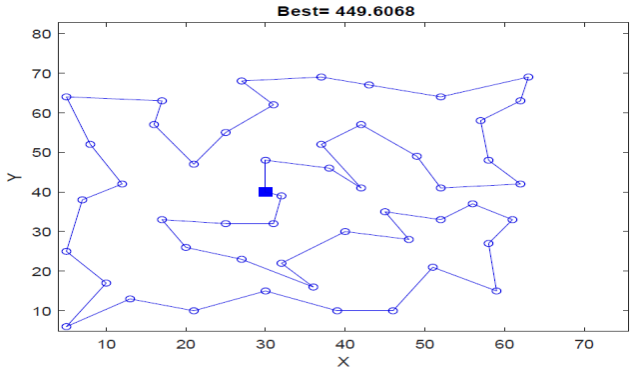
Maxiter: تعداد تکرار الگوریتم

٦- نتایج حاصل از پیاده سازی الگوریتم جستجوی ممنوعه

نتایج به دست آمده از اجرای الگوریتم پیشنهاد شده بر روی چهارده نمونه استاندارد در قالب بهترین پاسخ به دست آمده، میانگین جواب‌های به دست آمده و زمان محاسباتی در جدول ۱ آورده شده است.

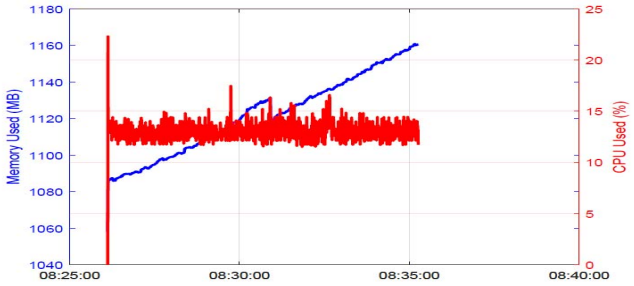
جدول ۱. مقادیر به دست آمده از اجرای الگوریتم پیشنهادی بر روی نمونه‌های استاندارد

نمونه	زمان هر چرخه (ثانیه)	میانگین جواب‌های بدست آمده	بهترین پاسخ بدست آمده	
CMT1X	۰/۲۸	٤٦۰/۸٥	٤٥۲/٥٥	
CMT1Y	۰/۲۹	٤٥۹/۷٤	٤٤۹/٦۰	
CMT2X	۰/۳٥	٦۷۱/۱۰	٦٦٤/۷۸	
CMT2Y	۰/٤۰	۷۰۲/۰۱	٦۷٦/۸٤	
CMT3X	۰/۳۸	۷۹۰/٤۷	۷۸۳/۹۰	
CMT3Y	۰/٤۰	۸٦٦/٤٦	۸۱۲/٥۹	
CMT4X	۰/٥٤	۱۰۲۷/۳۱	۹۹۸/۸۲	
CMT4Y	۰/٥٦	۱۱٦٥/۰۱	۱۱۰٥/۸۸	
CMT5X	۰/۸٦	۱۳٦۰/۹۹	۱۲۲۳/٥۳	
CMT5Y	۰/۹۱	۱٥٥٥/۲۰	۱٤۲۱/۳٦	
CMT11X	۰/٤٦	۹٦۸/۸۰	۹٤٥/۲۷	
CMT11Y	۰/٤٦	۱۰۹۰/۳۳	۱۰۸۳/۱٦	
CMT12X	۰/٤۲	۷۷۲/٥۳	۷۳٦/۰۱	
CMT12Y	۰/٤۱		۷۸۷/۷۱	۷٥۱/۲۲



شکل ۵.گراف جواب مسئله نمونه CMT1Y

نمودار مقدار استفاده شده از سخت افزار مسئله نمونه CMT1Y در شکل ٦ آورده شده است.



شکل ٦. نمودار مقدار استفاده شده از سخت افزار مسئله نمونه CMT1Y

۷- اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهادی

برای اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهادی، جواب‌های حاصل شده از آن را با تعدادی از به‌روزترین الگوریتم‌های ابتکاری و فرا ابتکاری که در حل مسائل CMT استفاده شده، مقایسه گردید. از جمله این الگوریتم‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود: الگوریتم جستجوی ممنوعه واکنشی (RTS)، الگوریتم سیستم کلونی مورچه (ACS)، الگوریتم متدولوژی حافظه اقتباسی (AMM)، الگوریتم جستجوی محلی تکرار شونده موازی (PILS)، همچنین تراکم ذرات گسسته هیبریدی (h_PSO)، و الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی(ABC)؛ (Goksal, Karaoglan, and Altiparmak, 2013; رحیمی و حمیدی، ۱۳۹۵). نتایج الگوریتم این تحقیق در ستون آخر با عنوان TS در جدول ۲ دیده می‌شود.

جدول ۲. مقایسه جواب‌های الگوریتم پیشنهادی با نتایج سایر الگوریتم‌ها

نمونه	الگوریتم مورد استفاده						
	RTS	ACS	AMM	PILS	H_PSO	ABC	TS
CMT1X	٤٦٨/٣٠	٤٦٦/٧٧	٤٦٩/٨٠	٤٦٦/٧٧	٤٦٦/٧٧	٤٦٤/٨٣	٤٥٢/٥٥
CMT1Y	–	٤٦٦/٧٧	٤٦٩/٨٠	٤٦٦/٧٧	٤٦٦/٧٧	٤٧٩/١٨	٤٤٩/٦٠
CMT2X	٦٦٨/٧٧	٦٨٤/٢١	٦٨٤/٢١	٦٨٤/٢١	٦٨٤/٢١	٦٩٤/٧٨	٦٦٤/٧٨
CMT2Y	٦٦٣/٢٥	٦٨٤/٩٤	٦٨٤/٢١	٦٨٤/٢١	٦٨٤/٢١	٧١٨/٣٦	٦٧٦/٨٤
CMT3X	٧٢١/٤٠	٧٢١/٢٧	٧٢١/٢٧	٧٢١/٢٧	٧٢١/٢٧	٧١١/٥٢	٧٨٣/٩٠
CMT3Y	٧٤٥/٤٦	٧٢١/٤٠	٧٢١/٢٧	٧٢١/٢٧	٧٢١/٢٧	٧٤٥/١٦	٨١٢/٥٩
CMT4X	٨٧٦/٥٠	٨٥٤/١٢	٨٥٢/٤٦	٨٥٢/٤٦	٨٥٢/٨٣	٨٧٠/٤٦	٩٩٨/٨٢
CMT4Y	٧٨٠/٤٤	٨٥٥/٧٦	٨٥٢/٤٦	٨٥٢/٤٦	٨٥٢/٤٦	٩٤٢/٦٦	١١٠٥/٨٨
CMT5X	١٠٤٤/٥١	١٠٣٤/٨٧	١٠١٣/٥٥	١٠٢٩/٢٥	١٠٣٣/٥٠	١٠٥٨/٨٨	١٢٢٣/٥٣
CMT5Y	١٠٥٤/٤٦	١٠٣٧/٣٤	١٠١٣/٥٥	١٠٢٩/٢٥	١٠٣٦/٠٠	١٠٥٨/٠٣	١٤٢١/٣٦
CMT11X	٨٦١/٩٧	٨٣٩/٦٦	٨٣٣/٩٢	٨٣٣/٩٢	٨٣٣/٩٢	٨٦٧/٤٥	٩٤٥/٢٧
CMT11Y	٨٣٠/٣٩	٨٤٠/١٩	٨٣٣/٩٢	٨٣٣/٩٢	٨٣٣/٩٢	٨٤٣/٩٢	١٠٨٣/١٦
CMT12X	٦٤٤/٧٠	٦٦٣/٠١	٦٦٢/٢٢	٦٦٢/٢٢	٦٦٢/٩٤	٦٤٥/٩٥	٧٣٦/٠١
CMT12Y	٦٥٩/٥٢	٦٦٣/٥٠	٦٦٢/٢٢	٦٦٢/٢٢	٦٦٣/٥٠	٦٦١/٥٦	٧٥١/٢٢

با توجه به جدول ۲ می‌توان دریافت که بهبود قابل توجهی در مسائل CMT1X، CMT1Y و CMT2X حاصل شده است.

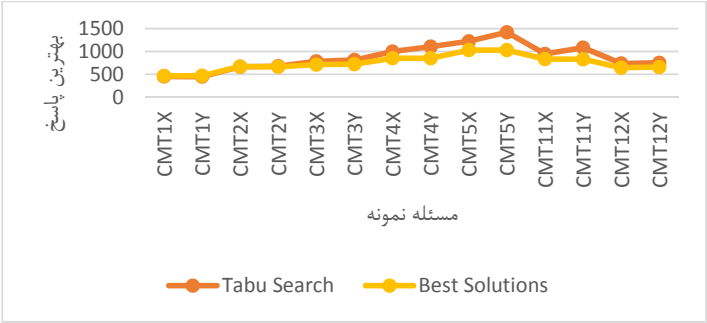
در جدول ۳ جواب‌های الگوریتم جستجوی ممنوعه پیشنهادی با بهترین جواب‌های شناخته شده از تمامی الگوریتم‌ها مقایسه شده؛ و درصد اختلاف بین دو مقدار در این جدول آورده شد که اعداد منفی نمایانگر بهبود در جواب نمونه مورد نظر و علامت مثبت نشان‌دهنده میزان خطا نسبت به بهترین جواب نیز است.

جدول ۳. مقایسه جواب‌های الگوریتم پیشنهادی با بهترین جواب‌های شناخته شده

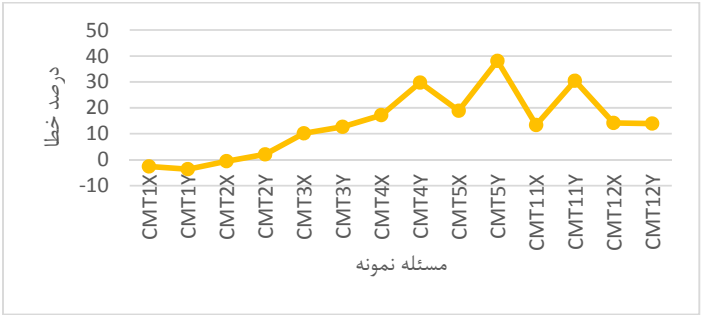
نمونه	بهترین پاسخ همه روش‌ها (B)	بهترین پاسخ الگوریتم پیشنهادی (TS)	درصد اختلاف $100*(\frac{TS-B}{B})$
CMT1X	٤٦٤/٨٣	٤٥٢/٥٥	**-٢/٦٤**
CMT1Y	٤٦٦/٧٧	٤٤٩/٦٠	**-٣/٦٧**
CMT2X	٦٦٨/٧٧	٦٤٤/٧٨	**-٠/٥٩**
CMT2Y	٦٦٣/٢٥	٦٧٦/٨٤	٢/٠٤
CMT3X	٧١١/٥٢	٧٨٣/٩٠	١٠/١٧
CMT3Y	٧٢١/٢٧	٨١٢/٥٩	١٢/٦٦

CMT4X	۸۵۲/٤٦	۹۹۸/۸۲	۱۷/۱٦
CMT4Y	۸۵۲/٤٦	۱۱۰۵/۸۸	۲۹/۷۲
CMT5X	۱۰۲۹/۲۵	۱۲۲۳/۵۳	۱۸/۸۷
CMT5Y	۱۰۲۹/۲۵	۱٤۲۱/۳٦	۳۸/۰۹
CMT11X	۸۳۳/۹۲	۹٤۵/۲۷	۱۳/۳۵
CMT11Y	۸۳۰/۳۹	۱۰۸۳/۱٦	۳۰/٤۳
CMT12X	٦٤٤/۷۰	۷۳٦/۰۱	۱٤/۱٦
CMT12Y	٦۵۹/۵۲	۷۵۱/۲۲	۳۰/۹۰

با ارزیابی جدول فوق می‌توان این گونه استناد کرد که میزان بهبود به ترتیب با بهترین نتیجه متعلق به نمونه CMT1Y برابر ۳/٦۷ درصد، نمونه CMT1X با درصد ۲/٦٤ و مقدار درصد ۰/۵۹ برای نمونه CMT2X به ثبت رسیده است؛ همچنین بیشترین خطا برای نمونه CMT5Y با مقدار ۳۸/۰۹ درصد می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم جستجوی ممنوعه برای نمونه‌های با مشتری بین ۰ تا ۷۵ بسیار عالی و نتیجه را بهبود می‌بخشد همچنین مسائلی بین ۷۵ الی ۱۵۰ نتیجه‌ای متوسط می‌دهد و در مسائل ۱۵۰ به بالا به هیچ وجه نتیجه مناسبی حاصل نمی‌شود. نمودار آورده شده در شکل ۷، مقایسه از جواب‌های به دست آمده از الگوریتم پیشنهادی به بهترین جواب‌های موجود از تمام روش‌ها در شکل ۸ نیز بیانگر درصد خطا جواب‌های به دست آمده است.



شکل ۷. نمودار مقایسه نتایج الگوریتم پیشنهادی با بهترین جواب‌های موجود



شکل ۸. نمودار درصد اختلاف نتایج حاصله از بهترین جواب شناخته شده

جدول ٤ مقدار بهینه شدن تعداد ناوگان آورده شده که می‌توان نتیجه گرفت در الگوریتم جستجوی ممنوعه کمینه شدن آن در تمامی مسائل مشهود است.

جدول ٤. مقدار کمینه شدن تعداد ناوگان بعد از اجرای الگوریتم

نمونه	تعداد ناوگان	تعداد ناوگان مورد استفاده بعد از اجرای الگوریتم	نمونه	تعداد ناوگان	تعداد ناوگان مورد استفاده بعد از اجرای الگوریتم
CMT1X	۳	۱	CMT4Y	۷	٤
CMT1Y	۳	۱	CMT5X	۱۰	۳
CMT2X	٦	۲	CMT5Y	۱۰	۹
CMT2Y	٦	٤	CMT11X	٤	۲
CMT3X	٥	۳	CMT11Y	٤	۱
CMT3Y	٥	۳	CMT12X	٥	۱
CMT4X	۷	۲	CMT12Y	٥	۳

۸- نتیجه‌گیری

در این تحقیق از الگوریتم جستجوی ممنوعه برای حل مسئله مسیریابی وسیله‌نقلیه با دریافت و تحویل همزمان کالا، با اعمال برخی تغییرات به منظور بهبود مسافت‌های طی شده توسط وسایل‌نقلیه و بهینه کردن تعداد ناوگان پیشنهاد گردید؛ الگوریتم پیشنهادی بر روی ١٤ نمونه استاندارد از مسائل ارائه شده توسط سلهی و نگی در سیستمی با مشخصات:
CPU Intel Core i7 4790 (3.6 GHz), Intel(R) HD Graphics 4600, RAM 8 GB DDR3
اجرا گردید. الگوریتم برای هر یک از مسائل نمونه به صورت جداگانه ۱۰ بار اجرا شده و میانگین و بهترین پاسخ به دست آمده گزارش شده است؛ همچنین در تنظیم پارامتر الگوریتم جستجوی ممنوعه تعداد همسایه‌ها برابر با ۲۰۰، تعداد تکرارهای الگوریتم (شرط توقف) با توجه به مشتری‌های مسئله از ۲۰۰۰ تا ۸۰۰۰ متغیر است؛ همچنین طول لیست ممنوعه برای تمامی مسائل برابر با ۲۰ در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد الگوریتم پیشنهادی دارای جواب‌های قابل قبول برای حل مسئله مسیریابی وسیله‌نقلیه با دریافت و تحویل همزمان کالا است به گونه‌ای که میزان بهبود مسافت طی شده مسائل به ترتیب در نمونه CMT1Y با ۵۰ مشتری و ۳ وسیله‌نقلیه با ظرفیت ۱٦۰ واحد به مسافت کل٤٤۹/٦۰ دست یافت که میزان چشمگیر ۳/٦۷ درصدی بهبود را نشان می‌دهد. همچنین در نمونه CMT1X با ۵۰ مشتری و ۳ وسیله‌نقلیه با ظرفیت ۱٦۰ واحد به مسافت کل ٤٥۲/٥٥ و بهبود ۲/٦٤ درصدی آن دیده می‌شود. نمونه مسئله CMT2X با ۷۵ مشتری و ٦ وسیله‌نقلیه با ظرفیت ۱٤۰ واحد به مسافت کل ٦٦٤/۷۸ حاصل شد و میزان ۰/۵۹ درصدی بهبود را نسبت به تمامی جواب‌های یافت شده تا زمان تحریر تحقیق به دست آورده شد.

همچنین میزان بهبود مسافت طی شده در نمونه مسئله CMT2Y نسبت به الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی ۵/۷۷ درصد به دست آمده است. مشاهده می‌شود که الگوریتم جستجوی ممنوعه برای نمونه‌های مسئله با تعداد ۰ تا ۵۰ (کوچک مقیاس) جواب‌های بهینه خوبی حاصل می‌شود در تعداد ۷۵ تا ۱۵۰ عدم بهبود مشاهده می‌شود؛ همچنین در تعداد مسائل ۱۵۰ به بالا، هم زمان اجرای چرخه افزایش می‌یابد و هم بهبودی مشاهده نمی‌شود که می‌توان نتیجه گرفت با افزایش تعداد مشتری‌ها (بزرگ مقیاس) کارایی ندارد. در رابطه با بهینه شدن تعداد ناوگان در تمامی مسائل، کمینه شدن مشاهده می‌شود که نتایج آن درجدول ٤ آورده شده است. در خصوص میزان استفاده از منابع سخت‌افزاری در بیشترین حالت حدود ۳۵ درصد، و بقیه نوسانات اجرای الگوریتم در محدوده ۱۵ الی ۳۵ درصد است، که این مقدار نشان از عدم پیچیدگی الگوریتم پیشنهادی است.

۹- مراجع

-وحید رجبی و امیرمسعود رحیمی. (۱۳۹۱). بهبود روش حل مسائل دریافت و تحویل همزمان کالا با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری ژنتیک. پایان نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما: امیرمسعود رحیمی، قزوین: دانشکده عمران، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره).

-فرشاد حمیدی و امیرمسعود رحیمی. (۱۳۹۵). ارزیابی کارایی الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی در حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی. پایان نامه کارشناسی ارشد. استاد راهنما: امیرمسعود رحیمی. زنجان: دانشکده عمران، دانشگاه زنجان.

-یقینی، مسعود و اخوان کاظم زاده، محمدرحیمی، (۱۳۹۵). الگوریتم‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری. جهاد دانشگاهی واحد دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

-Ai, T. J., & Kachitvichyanukul, V. (2009). A particle swarm optimization for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery. *Computers & Operations Research*, *36*(5), 1693-1702.

-Altabeeb, A. M., Mohsen, A. M., Abualigah, L., & Ghallab, A .(2021), Solving capacitated vehicle routing problem using cooperative firefly algorithm. *Applied Soft Computing*, *108*, 107403.

-Barbarosoglu, G., & Ozgur, D. (1999). A tabu search algorithm for the vehicle routing problem. *Computers & Operations Research* ,270-255,(3)26.

-Braekers, K., Ramaekers, K., & Van Nieuwenhuyse, I. (2016). The vehicle routing problem: State of the art classification and review. *Computers & Industrial Engineering*, *99*, 300-313.

-Cheikhrouhou, O., & Khoufi, I. (2021). A comprehensive survey on the Multiple Traveling Salesman Problem: Applications, approaches and taxonomy. *Computer Science Review*, *40*, 100369 .

-Daham, H. A., & Mohammed, H. J. (2021). An evolutionary algorithm approach for vehicle routing problems with backhauls. *Materials Today: Proceedings*.

-Glover, F. W., & Kochenberger, G. A. (2006). *Handbook of metaheuristics,* Vol. 57. Springer Science & Business Media.

-Goksal, F. P., Karaoglan, I., & Altiparmak, F. (2013). A hybrid discrete particle swarm optimization for vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery. *Computers & Industrial Engineering*, *65*(1), 39-53.

-Golden, B. L., Assad, A. A., & Wasil, E. A. (2002). Routing vehicles in the real world: applications in the solid waste, beverage, food, dairy, and newspaper industries. In *The vehicle routing problem,* 245-286. SIAM.

-Koç, Ç., Laporte, G., & Tükenmez, İ. (2020). A review of vehicle routing with simultaneous pickup and delivery. *Computers & Operations Research*, *122*, 104987.

-Li, L., Meng, J & ,.Chen, Y. (2019). Brief algorithm review on vehicle routing problems with different backhaul constraints. 2019 Chinese Control And Decision Conference (CCDC).

-Meliani, Y., Hani, Y., Elhaq, S. L., & El Mhamedi, A. (2019). A developed Tabu Search algorithm for heterogeneous fleet vehicle routing problem. *IFAC-PapersOnLine*, *52*(13), 1051-1056.

-Michalik, M., & Ochelska-Mierzejewska, J. (2021). Comparison of Selected Algorithms Solving Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pickup. In *Wojciechowski A.(Ed.), Napieralski P.(Ed.), Lipiński P.(Ed.)., TEWI 2021 (Technology, Education, Knowledge, Innovation), Seria: Monografie PŁ; Nr 2378, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2021,* ISBN 978-83-66741-10-2.
DOI. 10.34658/9788366741102. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej.

-Mohammadi, M., Mahmoodian, N., & Mohammadi, H. (2022). A Simulated Annealing Approach (SA) to Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW). 2022 8th International Conference on Control, Instrumentation and Automation (ICCIA).

-Silva, P. P. B., Riveros, D. P. B., & Bermudez, Y. V. C. A Hybrid Model Applied to the Vehicles Routing Problem With Simultaneous Pickups and Deliveries–VRPSPD.

-Toth, P., & Vigo, D. (2002a). An overview of vehicle routing problems. *The vehicle routing problem*, 1-26 .

-Zhang, W., Yang, D., Zhang, G., & Gen, M. (2020). Hybrid multiobjective evolutionary algorithm with fast sampling strategy-based global search and route sequence difference-based local search for VRPTW. *Expert Systems with Applications*, *145*, 113151.

Improved Solution of VRPSPD with the Tabu Search Algorithm

Seyed Amirali Seyednezhad, M.Sc., Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran.
Amir Masoud Rahimi, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

E-mail: amrahimi@znu.ac.ir

Received: June 2023- Accepted: November 2023

ABSTRACT
The development of transportation has a significant impact on economic systems, both production and service, which makes the vehicle routing problem a special issue, one of the most important decisions in executive departments is to pay special attention to finding optimal routes, eliminating unnecessary routes, improving the distance traveled and reducing the number of fleets. In this regard, it is one of the complex and very important problem in the transportation network, this problem has a high potential in determining the optimal set of vehicle fleets with the aim of serving a set of customers, which many efforts have been made to solve it. Various meta-heuristic algorithms have been developed in recent years, one of them is the tabu search algorithm because it has good performance and ability to solve NP-Hard problems, and now in this article, the tabu search algorithm is used to solve the vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery of goods which by applying some changes in its coding in MATLAB software. Determining the parameters of the repetition value of the algorithm, specifying the number of neighborhoods and the amount of the tabu list improved the results obtained in the distances traveled by vehicles and optimized the number of fleets. Finally, the new proposed algorithm was implemented on 14 standard sample problems from the Salhi and Nagi series of problems, and the obtained values were compared with the best available results from other algorithms, which had satisfactory results in small-scale problems.

Keywords: Optimization Algorithm, VRPSPD, Vehicle Routing Problem