مروری بر ادبیات و مقایسه الگوریتم‌های فراابتکاری در حل مسئله مسیریابی وسایل نقلیه

محمدرضا صدیق فرشیان[۱]، موسی مجرد[۲،۳] و حسن ارفعی‌نیا[۴]

[۱] دانشجو کارشناسی ارشد، موسسه آموزش عالی غیرانتفاعی لیان بوشهر، بوشهر، ایران، reza.farshiyan2018@gmail.com
[۲] استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، واحد فیروزآباد، دانشگاه آزاد اسلامی، فیروزآباد، ایران، m.mojarad@iauf.ac.ir
[۳] باشگاه پژوهشگران جوان، واحد فیروزآباد، دانشگاه آزاد اسلامی، فیروزآباد، ایران
[۴] مربی، موسسه آموزش عالی غیرانتفاعی لیان بوشهر، بوشهر، ایران، msc.harfaeinia@gmail.com

چکیده: حمل‌ونقل در سیستم‌های اقتصادی، تولیدی و خدماتی از جایگاه مهمی برخوردار است. به‌کارگیری رویکردهای بهینه در این حوزه منجر به کاهش هزینه‌ها در زنجیره تأمین می‌گردد. یکی از عوامل مؤثر در طراحی شبکه‌های حمل‌ونقل، ارزش اقتصادی آن در توسعه کشور و اثربخشی مؤثر آن در سودآوری شرکت‌ها و سازمان‌های خصوصی است. ازاین‌رو کشورها و سازمان‌ها بیش‌ازپیش توجه خود را به امر بهینه‌سازی شبکه حمل‌ونقل معطوف کرده‌اند. مسئله مسیریابی وسایل نقلیه (VRP) یکی از معروف‌ترین مسائل در حوزه بهینه‌سازی است. این مسئله به دلیل قرار گرفتن در رده NP-Hard دارای تنوع بسیار زیادی است. در این مسئله تعدادی وسایل نقلیه متمرکز در یک یا چند انبار باید به تعدادی از مشتریان سرویس‌دهی کنند به‌طوری‌که هر یک دارای تقاضای معینی هستند. مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با پنجره زمانی (VRPTW)، تعمیمی از مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با ظرفیت محدود (CVRP) است که در آن سرویس‌دهی باید در یک پنجره زمانی مشخصی انجام شود. هدف این مسئله بهینه‌سازی مسیر برای هر وسیله نقلیه است به‌گونه‌ای که هزینه کل مسیر و تعداد وسایل نقلیه مورداستفاده حداقل شده تا در نهایت رضایت مشتریان به حداکثر برسد. به‌طورکلی برای حل این مسئله دو نوع راه‌حل دقیق و ابتکاری مطرح می‌شود. در این تحقیق سعی در بررسی راه‌حل‌های مختلف ابتکاری است تا با بررسی و قرار دادن آن‌ها در کنار یکدیگر مرور کلی در این مسئله داشته باشیم. امید است بررسی و مقایسه انجام شده به محققین دیگر در حل این مسئله کمک کند.

کلیدواژه‌ها: *مسیریابی وسایل نقلیه، بهینه‌سازی، الگوریتم‌های ابتکاری، پنجره زمانی، ظرفیت محدود.*

۱.مقدمه

با توجه به اهمیت مسائل حمل‌ونقل در دنیای واقعی و جایگاه این مسائل در انواع سیستم‌های موجود، در این پژوهش سعی داریم به بررسی مسئله مسیریابی وسایل نقلیه (VRP[۱]) و مقایسه الگوریتم‌های ارائه‌شده برای حل آن بپردازیم. حمل‌ونقل در سیستم‌های اقتصادی اعم از خدماتی، تولیدی و توزیع از جایگاه ویژه و پراهمیتی برخوردار می‌باشد و بخش عمده‌ای از تولید ناخالص ملی کشورها را به خود اختصاص می‌دهد (گولدن و همکاران، ۲۰۰۸). بهبود در سیستم‌های حمل‌ونقل به معنای بهبود در مسیرهای طی شده و حذف مسافت‌های غیرضروری در هر سیستمی می‌باشد. مسئله مسیریابی وسایل نقلیه یکی از مفاهیم کاربردی در حوزه تحقیق در عملیات است که از دهه‌ی ۶۰ میلادی به آن پرداخته می‌شود و تلاش‌های زیادی توسط

[1] Vehicle Routing Problem (VRP)

محققین در این حوزه صورت گرفته و به دنبال آن پیشرفت‌های بزرگی به دست آمده است (براندو، ۲۰۱۸).

مسئله مسیریابی وسایل نقلیه یکی از شناخته‌شده‌ترین مسائل بهینه‌سازی باهدف طراحی مجموعه بهینه‌ای از مسیرها برای سرویس‌دهی به مشتریان است (کلارک و رایت، ۱۹۶۴). این مسئله در حالت عادی شامل یک انبار، ناوگانی از وسایل نقلیه که در انبار استقرار یافته‌اند و مجموعه‌ای از مشتریان می‌باشد که می‌بایست سرویس‌دهی شوند. هدف مسئله مسیریابی وسایل نقلیه در ساده‌ترین و معمول‌ترین حالت حداقل‌سازی هزینه‌های کلی پیمودن مسیر بر اساس حداکثر زمان کاری و حداکثر محدودیت ظرفیت وسایل نقلیه است. مسئله مسیریابی وسایل نقلیه در واقع توسعه‌ای از مسئله معروف فروشنده‌ی دوره‌گرد[2] است. می‌توان گفت به دو علت محققان به مطالعه و بررسی گسترده مسائل موجود در زمینه مسیریابی وسایل نقلیه پرداخته و پژوهش در این حوزه همچنان ادامه دارد. یکی کاربرد عملی این مسائل و دیگری سختی حل آن می‌باشد. چون با افزایش تعداد ایستگاه‌ها، تعداد مسیرهای ممکن جهت حرکت وسایل نقلیه به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد، درنتیجه فضای جواب گسترده شده و یافتن جواب بهینه در این حالت بسیار دشوار می‌گردد. در (استاوروپلو و همکاران، ۲۰۱۹) پیچیدگی مسائل مسیریابی وسایل نقلیه را محاسبه کرده و اثبات کردند که عملاً تمامی این مسائل از نوع غیر چندجمله‌ای (NP-Hard) هستند.

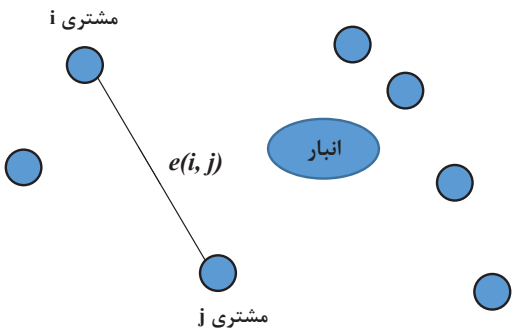
ادامه این مقاله به شرح زیر است: ادبیات تحقیق در بخش دوم بیان می‌شود. در بخش سوم به بررسی برخی از جدیدترین کارهای انجام شده می‌پردازیم، نتایج مقایسه تعدادی از الگوریتم‌های بررسی‌شده و همچنین ارزیابی آن‌ها در بخش چهارم ارائه می‌شود. درنهایت نتیجه‌گیری و پیشنهادات این تحقیق در فصل پنجم بیان شده و برای درک و فهم بهتر مطالب، در انتها فهرستی از مراجع ارائه شده است.

۲- ادبیات تحقیق

مسئله مسیریابی وسایل نقلیه توسط دانتزیگ و رامسر (۱۹۵۹) ارائه شده است و یک مسئله مهم در زمینه‌های حمل‌ونقل، توزیع و لجستیک می‌باشد. شاخه‌ای که مسئله مسیریابی مسائل نقلیه به آن مربوط می‌شود، مسائل مرتبط با گراف‌ها هستند. تئوری گراف به‌نوبه خود از گسترده‌ترین مباحث تحقیق در عملیات است (رودریگز–مارتین و همکاران، ۲۰۱۹). در این بخش انواع مسائل مسیریابی وسایل نقلیه و همچنین پارامترها و مدل ریاضی آن در تئوری گراف معرفی می‌شود.

۲-۱- مدل ریاضی مسئله مسیریابی وسایل نقلیه

معمولاً در مباحث گراف، گره‌هایی وجود دارند که این گره‌ها به‌وسیله یال با یکدیگر در ارتباط هستند، گره‌ها و یال‌ها در مباحث گراف می‌توانند مشخص‌کننده واقعیت‌های متفاوتی باشند. گراف را معمولاً با $G=(V,E)$ نمایش می‌دهند که V مجموعه گره‌ها و E مجموعه یال‌ها است. مسئله مسیریابی وسایل نقلیه می‌تواند با یک گراف کامل، بدون جهت و متقارن بیان شود. مشتری‌ها به‌عنوان گره‌ها و راه‌های ارتباطی بین مشتری‌ها به‌عنوان یال‌های گراف در نظر گرفته می‌شوند. در این مسئله مجموعه N گره به‌صورت $V=\{1,2,...,N\}$ و مجموعه یال‌ها به‌صورت $E=\{(i,j),\forall i,j\in V, i<j\}$ بیان می‌شود. هر گره $i\in V/\{0\}$ بیانگر یک مشتری است که تقاضایی مانند d_i دارد. رأس 0 به انبار مربوط می‌شود. هر یال $e(i,j)\in E$ بیانگر وجود یک مسیر از مشتری i به مشتری j است. شکل ۱ نمایی از مسئله مسیریابی وسایل نقلیه متقارن و گراف مربوط به آن را نشان می‌دهد.



شکل ۱. مسئله مسیریابی وسایل نقلیه متقارن و گراف مربوط به آن

[2] Travelling Salesman Problem (TSP)

هزینه سفر از i به j برابر c_{ij} است که $c_{ij}=c_{ji}$ و $c_{ii}=0$. در این مسئله تنها متغیر تصمیم x_{ij}^{q} است که مطابق رابطه (۱) تعیین می‌شود.

$$x_{ij}^{q}=\begin{cases}0 & i-j\\ 1 & i\leftrightarrow j\end{cases} \qquad (۱)$$

در این رابطه، $i\leftrightarrow j$ به این مفهوم است که اگر وسیله نقلیه q از گره i به گره j می‌رود و $i-j$ عکس این حالت است.

در اینجا برای بیان پارامترها از مدل‌سازی مسئله CVRP استفاده می‌شود. در CVRP ناوگانی از M وسیله نقلیه یکسان با ظرفیت K و یک انبار مرکزی که با اندیس 0 مشخص می‌شود، وظیفه تحویل سفارش‌ها را به N مشتری بر عهده دارند (لیا و هوکسین، ۲۰۱۶). هدف یافتن مجموعه‌ای از M مسیر است، به‌طوری‌که هزینه سفر در این وسایل حداقل شود. به‌طورکلی در مسئله CVRP هدف حداقل‌سازی تابع ارائه شده در رابطه (۲) است.

$$\min\sum_{q\in Q}\sum_{(i,j)\in E}c_{ij}x_{ij}^{q} \qquad (۲)$$

در تحقق رسیدن به هدف تعیین‌شده، روابط (۳) تا (۷) همواره برقرار هستند.

$$\sum_{q\in Q}\sum_{j\in V}x_{ij}^{q}=1,\quad \forall i\in V \qquad (۳)$$

$$\sum_{i\in V}d_i\sum_{j\in V}x_{ij}^{q}\leq K,\quad \forall q\in Q \qquad (۴)$$

$$\sum_{j\in V}x_{0j}^{q}=1,\quad \forall q\in Q \qquad (۵)$$

$$\sum_{i\in V}x_{ik}^{q}-\sum_{j\in V}x_{kj}^{q}=0,\quad \forall k\in V,\forall q\in Q \qquad (۶)$$

$$x_{ij}^{q}\in\{0,1\},\quad \forall(i,j)\in E,\forall q\in Q \qquad (۷)$$

رابطه (۳)، تضمین می‌کند که هر مشتری فقط توسط یک وسیله نقلیه سرویس بگیرد. در اینجا دقیقاً یک کمان از مشتری i انتخاب شده چه انتهای این کمان یک مشتری دیگر باشد چه انتهایش به انبار برسد. در رابطه (۴)، قید ظرفیت ماشین‌ها اعمال می‌گردد. به‌عبارت‌دیگر مجموع حجم تقاضای مشتری‌هایی که به یک وسیله نقلیه تخصیص داده می‌شوند باید حداکثر برابر با ظرفیت آن باشد. روابط (۵) و (۶)، تضمین می‌کند که مسیرها پیوسته باشند در این روابط موازنه جریان ورود و خروج وسایل نقلیه نشان داده شده است؛ که تعداد وسایل نقلیه‌ای که به هر گره وارد می‌شوند باید برابر با تعداد وسایل نقلیه‌ای باشد که از آن‌ها خارج می‌شوند. هر وسیله نقلیه طی مسیرش فقط یک‌بار انبار را ترک می‌کند و حق بازگشت در بین مسیر به انبار را ندارد.

۳- کارهای انجام‌شده

مسئله مسیریابی وسایل نقلیه برای اولین بار توسط دانتزیگ و رامسر (۱۹۵۹) معرفی شد. این مسئله ترکیبی از دو مسئله فروشنده دوره‌گرد و بسته‌بندی صندوق‌های پست است. همچنین مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با ظرفیت محدود و پنجره زمانی توسط اوزیدین (۲۰۰۳) مطرح شد که برای حل آن از یک روش ترکیبی و یک مدل برنامه‌ریزی خطی استفاده شده است. در سال‌های اخیر برای حل این مسئله تحقیقات فراوانی انجام شد که اغلب آن‌ها بر مبنای الگوریتم‌های بهینه-سازی و فراابتکاری می‌باشند. در این بخش تعدادی از آخرین کارهای انجام‌شده بررسی شده است.

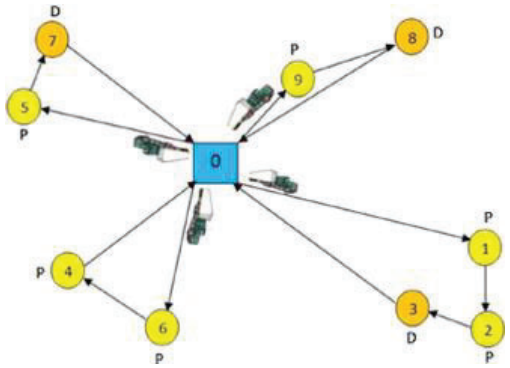
کوخ و همکاران (۲۰۱۷)، اندازه و ترکیب ناوگان در مسئله مکانیابی-مسیریابی را با در نظر گرفتن پنجره زمانی توسعه دادند. هدف این تحقیق کمینه کردن جمع هزینه‌های ثابت وسایل نقلیه، هزینه انبار و هزینه مسیر است که با یک مدل ریاضی عدد صحیح مختلط، یک دسته نابرابری معتبر و همچنین یک الگوریتم جستجوی تکاملی ترکیبی[3] (HESA) حل شده است. سویسال و همکاران (۲۰۱۵)، مسئله مسیریابی وسایل نقلیه ظرفیت‌دار را باهدف کمینه‌سازی هزینه‌ها و افزایش سطح رضایت مشتری با استفاده از روش حل دقیق با نرم‌افزار گمز حل کردند. در این روش پارامتر تقاضا تحلیل حساسیت مورد توجه است و به ترتیب دو هدف حداقل‌سازی هزینه انتقال و حداکثر-سازی تقاضای برآورده شده دنبال می‌شود. نتایج استخراج‌شده از این مدل به‌صورت زیر است:

- اگر ظرفیت وسایل نقلیه یا تعداد آن‌ها افزایش یابد، نرخ رضایتمندی گره‌ها نیز افزایش می‌یابد.
- گره‌ها با فاصله‌های نزدیک اکثر اوقات در یک مسیر می‌افتند.
- اگر تعداد وسایل نقلیه زیاد باشد تعداد مسیرها افزایش یافته و از همه آن‌ها استفاده می‌شود.

[3] Hybrid Evolutionary Search Algorithm

- با افزایش تعداد وسایل نقلیه با کل میزان ظرفیت ثابت تابع هدف تغییر می‌کند.
- با افزایش ظرفیت وسایل نقلیه، مجموع نرخ رضایتمندی گره‌ها در ابتدا به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد.
- با افزایش تقاضا و ثابت نگه داشتن ظرفیت وسایل نقلیه مجموع نرخ رضایتمندی گره‌ها به‌شدت کاهش میابد.
- تحلیل حساسیت نشان‌دهنده اهمیت پارامتر تقاضا در رضایتمندی مشتریان است. پس‌ازآن ظرفیت وسایل نقلیه اهمیت پیدا می‌کند.

تاجیک و همکاران (۲۰۱۴)، از یک رویکرد ایستا در مسئله مسیریابی آلودگی تحت عدم قطعیت گذاشت و برداشت استفاده کردند. این تحقیق یک مسئله مسیریابی آلودگی گذاشت و برداشت و با پنجره زمانی جدید (TWPDPRP) را در نظر گرفته و برای آن یک مدل ایستا برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) تحت شرایط عدم قطعیت، تعریف کرده است. مسئله TWPDPRP دارای دو گروه مشتری است. گروه اول مشتریانی است که باید بار آن‌ها برداشته شود و گروه دوم مشتریانی است که باید بار به آن‌ها تحویل داده شود. مدل برای انجام سرویس چند وسیله نقلیه در نظر گرفته است. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده، وسیله نقلیه، بعد از بارگیری از انبار و دریافت از مشتریان، شروع به توزیع بار به مشتریانی می‌کند که تقاضا دریافت بار را دارند. میزان کالایی که هر وسیله نقلیه از گره اول یعنی انبار بارگیری می‌کند برابر با میزان تقاضای گره‌های تحویل‌گیرنده است که در طول مسیر ملاقات می‌شوند. این مقدار منهای کالاهایی است که از گره‌های برداشت جمع‌آوری شده است.



شکل ۲. نمایی از مسئله مسیریابی آلودگی گذاشت و برداشت و با پنجره زمانی

در کل هدف مدل ایجاد تعادل بین مسائل اقتصادی و محیط زیستی است. رویکرد بهینه‌سازی ایستا برای پارامترهای غیرقطعی این مسئله تعریف شده است، این پارامترها شامل: هزینه مصرف سوخت، هزینه انتشار CO2، زمان سفر و زمان سرویس می‌باشد. نوآوری‌های روش تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

- تعریف جریمه نقض محدودیت پنجره زمانی گره‌های برداشت برای کاهش زمان سفر، مصرف سوخت و انتشار CO2.
- استفاده از محدودیت پنجره زمانی در مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با عملیات گذاشت و برداشت برای کاهش زمان سفر رسیدن به گره‌های تحویل‌گیرنده.
- استفاده از بهینه‌سازی استوار در محدودیت‌ها و با توجه به‌سرعت وسیله نقلیه به‌عنوان یک پارامتر غیرقطعی در مدل. این عدم قطعیت به ترافیک مربوط می‌شود و شامل توقف در پمپ‌بنزین و چراغ‌های راهنمایی می‌شود.
- هزینه مصرف سوخت و انتشار گاز CO2 متغیر در نظر گرفته شده است.
- از مفهوم ایستا برای زمان سرویس‌دهی به مشتریان در شرایط متفاوت استفاده شده است.
- ویژگی‌های فیزیکی وسیله نقلیه مثل سطح روبه‌روی وسیله نقلیه، وزن، شیب جاده در مدل در نظر گرفته شده است.

مانچینی (۲۰۱۷)، مسئله مسیریابی وسایل نقلیه ترکیبی را با الگوریتم فراابتکاری جستجوی همسایگی بزرگ حل کرد. این الگوریتم با یک جواب قابل‌قبول شروع می‌شود و سپس با استفاده از مکانیزمی، همسایگی بزرگی را در زمان محاسباتی بسیار کمی جستجو و بررسی می‌کند. در این تحقیق همچنین یک مدل توسعه‌یافته واقعی از مسئله مسیریابی سبز که شامل استفاده ترکیبی وسایل نقلیه از سوخت‌های سنتی و انرژی الکتریکی می‌باشد، ارائه شده است.

میرزایی و سیفی (۲۰۱۵)، مسیریابی-موجودی سبز برای محصولات فسادپذیر همراه با در نظر گرفتن همکاری افقی را با یک روش فراابتکاری حل کردند. تأمین‌کنندگان در مورد اینکه

چقدر و در چه زمانی محصول به مشتری تحویل دهند تصمیم می‌گیرند اما درعین‌حال مسئولیت اینکه مشتریان با کمبود مواجه نشوند را عهده‌دار می‌شوند. چنین سیستمی بهره‌وری لجستیکی بالقوه را از طریق استفاده بهینه از وسایل نقلیه به تأمین‌کنندگان پیشنهاد می‌دهد. مسئله مسیریابی-موجودی در این تحقیق شامل طرف سومی می‌شود که به‌عنوان شرکت اجاره ماشین‌آلات خدمت‌دهی می‌نماید. در این تحقیق مدل فراابتکاری با استفاده از روش محدودیت شانس ارائه شده که بار اول توسط سویسال و همکاران برای مسئله مسیریابی-موجودی به کار گرفته شده بود، اما در این پژوهش برای حالت چند تأمین‌کننده و همراه با گذاشت و برداشت مورداستفاده قرار گرفته است. تابع هدف در اینجا از سه قسمت هزینه‌های موجودی، هزینه‌های مسیریابی و هزینه‌های مواد خراب‌شده تشکیل شده است.

وانگ و جگاناتن (۲۰۱۷)، آنالیز و شبیه‌سازی یک مدل دولایه تقسیم و ادغام را با استفاده از الگوریتم جستجوی تابو برای حل مسئله مسیریابی وسایل نقلیه ارائه دادند. در این تحقیق از یک روش مبتنی بر تقاطع کوتاه و ادغام تقسیم با برنامه‌ریزی فرمولاسیون خطی ترکیبی عدد صحیح برای این مسئله استفاده شده است. محمودی زتو و همکاران (۲۰۱۱)، ترکیب الگوریتم‌های جستجوی تابو و جمعیت مورچگان را برای مسئله مسیریابی وسیله نقلیه استفاده کردند. در این روش برای جستجوی همسایگی و حرکت از یک جواب به جواب دیگر از سه حرکت درج، جابجایی و الگوریتم جمعیت مورچگان استفاده شده است. عبدالله و همکاران (۲۰۱۷)، حل بهینه‌سازی مرتبه‌ای را برای مسائل مسیریابی وسایل نقلیه پویا ارائه دادند. هدف این تحقیق کاهش همگرایی به سمت بهینه‌های محلی است که بر مبنای یک الگوریتم ژنتیک پیشرفته انجام می‌شود. بدین منظور یک رویکرد ارزیابی برازندگی وزنی بجای ارزیابی بر مبنای زمان استفاده می‌شود. الگوریتم ژنتیک توسعه داده‌شده بر اساس الگوریتم هانشار و اومبوکی-برمن کار می‌کند. ازجمله نوآوری-های این روش، ارزیابی سیستم‌های مسئله مسیریابی وسایل نقلیه پویا می‌باشد. مانگواتنا و همکاران (۲۰۱۶)، یک راه‌حل برای مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با پنجره زمانی دوهدفه بر مبنای جستجوی محلی و الگوریتم ژنتیک پیشنهاد دادند. هدف اول تعیین حداقل تعداد وسایل نقلیه مورد نیاز است و هدف دوم یافتن راه‌حلی است که کل زمان سفر را به حداقل برساند. در این تحقیق از ترکیب دو الگوریتم درج روبه‌جلو هیوریستیکی اصلاح‌شده (MPFIH[4]) و جستجو محلی نزولی λ-مبادله‌ای (λ-LSD[5]) بهره گرفته شده است.

لی و همکاران (۲۰۱۶)، نوع جدیدی از مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با چند انبار و تحت منابع مشترک را توسعه دادند و از یک الگوریتم ژنتیک ترکیبی با جستجو تطبیقی محلی برای حل آن استفاده کردند. در این مسئله، انباری که در آن وسیله نقلیه به پایان مسیر خود می‌رسد انعطاف‌پذیر است. نتایج نشان می‌دهد که انعطاف‌پذیر بودن انبار برای وسایل نقلیه باعث کاهش هزینه کل مسیر می‌شود. استهادی و همکاران (۲۰۱۷) حل مسئله مسیریابی آلودگی با عدم اطمینان تقاضا و زمان سفر را با یک رویکرد بهینه‌سازی ایستا بدبینانه سخت انجام دادند. نوآوری‌های این تحقیق «تقاضای غیرقطعی»، «زمان سفر غیرقطعی متأثر از سرعت حرکت» و همچنین «به‌کارگیری چند رویکرد ایستا برای مواجهه با عدم قطعیت» می‌باشد. بکتاش و لاپورت (۲۰۱۱)، مسئله مسیریابی آلودگی[6] (PRP) را با اهداف «کمینه کردن فاصله با فرض سرعت ثابت»، «کمینه کردن وزن بار وسیله نقلیه با فرض سرعت ثابت»، «کاهش مصرف انرژی با فرض سرعت متغیر» و «کمینه کردن هزینه‌های انتشار، سوخت و راننده» توسعه دادند. در این مسئله سرعت سفر در کمان به‌صورت حد پایین و حد بالا بیان شده است که این مقادیر با توجه به قوانین مسیرها تعیین می‌شوند.

لی و تیان (۲۰۱۶)، یک الگوریتم جستجو خود تطبیقی دوسطحی مبتنی بر همسایگی را برای حل مسئله مسیریابی وسایل نقلیه جمع‌آوری جایزه[7] (PCVRP) توسعه دادند. در این مسئله ظرفیت تمامی وسایل نقلیه در دسترس برای برآورد خواسته‌های تمام مشتریان کافی نیست؛ بنابراین بازدید تمام مشتریان در این مسئله اجباری نخواهد بود. بااین‌حال برای هر مشتری ملاقات شده یک جایزه در نظر گرفته شده که درنهایت

[4] Modified Push Forward Insertion Heuristic
[5] λ-Interchange Local Search Descent
[6] Pollution Routing Problem
[7] Prize-Collecting Vehicle Routing Problem

هدف، ایجاد مجموعه‌ای از مسیرها برای وسایل نقلیه است به‌طوری‌که هزینه مسیر نهایی حداقل شده و جوایز جمع‌آوری شده توسط تمامی وسایل نقلیه حداکثر شود، می‌باشد. الگوریتم HPSO توسط چن و شی (۲۰۱۹)، پیشنهاد شد. هدف این روش یک مطالعه مقایسه‌ای از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات روی مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با پنجره زمانی می‌باشد. در اینجا دو نسخه مختلف الگوریتم ازدحام ذرات با نام‌های PSO (الگوریتم ازدحام ذرات کلاسیک) و HPSO (ترکیب الگوریتم ازدحام ذرات و شبیه‌سازی تبرید) مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج الگوریتم HPSO را از لحاظ برتری نسبت به PSO معرفی کرده به‌طوری‌که برای مسائل با ابعاد بالا HPSO کارایی بسیار بیشتری دارد و راه‌حل‌هایی با طول مسیر کمتری را ایجاد می‌کند.

هیاسات و همکاران (۲۰۱۷)، حل مسئله مکانیابی-موجودی-مسیریابی برای اقلام فسادپذیر با استفاده از رویکرد الگوریتم ژنتیک را ارائه دادند. ساختار متمایز مسئله نیازمند توسعه نحوه‌ی نمایش جدیدی از کروموزوم‌ها و روش ابتکاری برای جستجوی محلی است. قسمت اول تابع هدف هزینه‌های تأسیس و هزینه‌های عملیات صورت گرفته در انبارهای موجود را نشان می‌دهد درحالی‌که قسمت دوم مربوط به هزینه‌های حمل‌ونقل و هزینه‌های نگهداری موجودی می‌باشد. وینسنت و همکاران (۲۰۱۷)، مسئله مسیریابی وسیله نقلیه ترکیبی را توسعه دادند. در این تحقیق، شبیه‌سازی تبرید با یک استراتژی شروع مجدد برای حل این مسئله استفاده می‌شود و شامل دو نسخه می‌باشد. نسخه اولیه، احتمال پذیرش بدترین جواب را با استفاده از تابع بولتزمان تعیین می‌کند. نسخه دوم، احتمال پذیرش بدترین جواب را با استفاده از تابع کوشی تعیین می‌کند. الگوریتم تبرید شبیه‌سازی‌شده برای مسائل مسیریابی وسیله نقلیه ترکیبی، نحوه نمایش مشخص و خاصی را دارد.

روش DA-HSO توسط مانگواتنا و همکاران (۲۰۱۹) مبتنی بر یک الگوریتم شبیه‌سازی تبرید تطبیقی با سه اپراتور جستجو هیبرید برای مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با پنجره زمانی ارائه شد. در این روش از یک تکنیک حرکتی قطعی و سه اپراتور جستجو برای یافتن راه‌حل نزدیک به مطلوب در یک زمان مناسب استفاده شده است. علاوه بر این، مفهوم مینیمکس تطبیقی برای یافتن یک راه‌حل مناسب برای بدترین سناریوها در الگوریتم اضافه شده است. مینیمکس تطبیقی نوسان موقعیت‌ها را در تقاضا مشتریان در نظر می‌گیرد. در انتها نیز شاخص‌های هزینه‌های اضافی و نسبت تقاضای نادیده گرفته شده به‌منظور کمک به یافتن مسیریابی بهتر پیشنهاد شده است.

۴- یافته‌های تحقیق

در این بخش آزمایش‌های گسترده‌ای برای مقایسه و بررسی عملکرد الگوریتم‌های مختلف در حل مسئله VRPTW انجام شده است. الگوریتم‌های فراابتکاری مورد بررسی MPFIH (مانگواتنا و همکاران، ۲۰۱۶)، DA-HSO (مانگواتنا و همکاران، ۲۰۱۹) و HPSO (چن و شی، ۲۰۱۹) می‌باشند. در این تحقیق از دو معیار ارزیابی برای بررسی نتایج و مقایسه عملکرد روش‌های مختلف استفاده می‌شود. این دو معیار با توجه به تابع هدف تعریف شده برای هر روش محاسبه می‌شوند. این معیارها تعداد وسایل نقلیه بهینه (NV) و هزینه کل مسیر (TT) می‌باشند.

نقض برخی محدودیت‌ها در مسئله VRPTW باعث ایجاد راه‌حل‌هایی غیرقابل‌قبول و نقض برخی نیز باعث کاهش کیفیت آن‌ها می‌شود. بر این اساس دو نوع محدودیت سخت و نرم تعریف شده است. نوع سخت، محدودیت‌هایی را شامل می‌شود که نقض آن‌ها راه‌حل‌های غیرقابل‌قبول ایجاد می‌کند و نوع نرم، محدودیت‌هایی را شامل می‌شود که نقض آن‌ها باعث غیرقابل‌قبول شدن راه‌حل‌ها نمی‌شود اما به کاهش کیفیت آن‌ها منجر خواهد شد. در اینجا محدودیت‌ها برای همه روش‌های مورد مقایسه یکسان در نظر گرفته شده است. این محدودیت‌ها برای نوع سخت شامل ۱- نقض ظرفیت وسیله نقلیه، ۲- جریمه تأخیر، ۳- نقض حداکثر زمان مجاز مسیریابی و ۴- نقض حداکثر تعداد وسایل نقلیه و برای نوع نرم شامل ۱- حداقل‌سازی تعداد وسایل نقلیه، ۲- حداقل‌سازی زمان انتظار و ۳- حداقل‌سازی هزینه سفر می‌باشد. اغلب تابع هدف نهایی در این مسئله به‌صورت جمع وزنی محدودیت‌های نقض شده سخت و نرم می‌باشد.

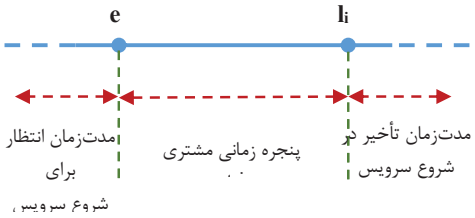
در ادامه این بخش ابتدا بستر شبیه‌سازی و روش‌های مورد ارزیابی معرفی می‌شود، سپس جزئیات مجموعه داده استفاده شده بیان شده و پس از آن نتایج و آزمایش‌های انجام‌شده ارائه خواهد شد.

۴-۱- بستر شبیه‌سازی

برای حصول اطمینان از نتایج، در همه مقایسه‌ها از پارامترهای یکسانی استفاده شده و نتایج در همه آزمایش‌ها به‌منظور ارائه دقیق‌تر به‌صورت میانگین ۱۵ اجرای متمایز الگوریتم گزارش می‌شود. برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار MATLAB ورژن 2017a استفاده شده است. شبیه‌سازی روی پایگاه داده Solomon از مخزن UCI و با استفاده از یک PC با پیکربندی پردازنده اینتل پنج هسته و فرکانس ۲,۲ گیگاهرتز، حافظه رم هشت گیگابایت و سیستم‌عامل ویندوز ۱۰ انجام شده است.

- مجموعه داده Solomon

پایگاه داده Solomon توسط سولومون (۱۹۸۲) تولید شد که یکی از مهم‌ترین مشتقات مسئله مسیریابی وسایل نقلی، یعنی معرفی پنجره زمانی (VRPTW) است که از مسئله CVRP تعمیم یافته است. این مجموعه داده از مرجع [۱] در دسترس می‌باشد. تفاوت CVRP و VRPTW اضافه شدن محدودیت زمانی $[e_i, l_i]$ در نمونه‌های مسئله است. جایی که برای مشتری i-ام e_i اولین زمان مجاز برای شروع سرویس-دهی و l_i آخرین زمان مجاز برای شروع سرویس‌دهی است. شروع سرویس‌دهی یک وسیله نقلیه قبل از محدوده زمانی e_i منجر به اضافه شدن زمان انتظار وسیله نقلیه در مسیر خواهد شد. همچنین شروع سرویس‌دهی یک وسیله نقلیه بعد از محدوده زمانی l_i منجر به ایجاد جواب غیرموجه و غیرقابل‌قبول شدن راه‌حل می‌شود. در مسئله VRPTW محدودیت زمانی $[e_i, l_i]$ یک پنجره زمانی برای مشتری است که در حالت نرم زمان تأخیر را به تابع هزینه (هزینه کل مسیر) اضافه می‌کند و در حالت سخت جواب مسئله را غیرموجه می‌کند. مفهوم پنجره زمانی در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. مفهوم پنجره زمانی برای مشتری

مجموعه داده Solomon درمجموع شامل ۱۶۸ نمونه در سه نوع C، R و RC می‌باشد. در هر نوع مسائلی با تعداد مشتریان مختلف ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ وجود دارد. تفاوت میان نمونه‌ها در پیچیدگی حل مسئله و گستردگی فضای جستجو می‌باشد. با توجه به تعداد زیاد نمونه‌ها، در این تحقیق تنها نمونه‌های C101، R101 و RC101 با اندازه مشتریان ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ بررسی می‌شوند؛ بنابراین درمجموع نتایج الگوریتم پیشنهادی روی ۹ نمونه گزارش می‌شود. جدول ۱ جزئیات نمونه‌های استفاده‌شده از مجموعه داده Solomon را نشان می‌دهد. برای هر نمونه بهترین نتایج ارائه‌شده توسط سولومون (۱۹۸۲) نیز ارائه شده است. این نتایج شامل بهینه‌ترین تعداد وسایل نقلیه و بهترین هزینه سفر است.

جدول ۱. مشخصات نمونه‌های مورداستفاده از پایگاه داده Solomon

نمونه‌ها	تعداد مشتری‌ها	حداکثر تعداد وسایل نقلیه مجاز	بهینه‌ترین تعداد وسایل نقلیه	بهترین هزینه سفر
C101	۲۵	۲۵	۳	۱۹۱/۳
	۵۰	۲۵	۵	۳۶۲/۴
	۱۰۰	۲۵	۱۰	۸۲۷/۳
R101	۲۵	۲۵	۸	۶۱۷/۱
	۵۰	۲۵	۱۲	۱۰۴۴/۰
	۱۰۰	۲۵	۲۰	۱۶۳۷/۷
RC101	۲۵	۲۵	۴	۴۶۱/۱
	۵۰	۲۵	۸	۹۴۴/۰
	۱۰۰	۲۵	۱۵	۱۶۱۹/۸

۴-۳- مقایسه و نتایج

در این بخش کارایی و عملکرد سه الگوریتم فرا ابتکاری MPFIH، DA-SHO و HPSO در حل مسئله VRPTW بر روی نمونه‌های C101، R101 و RC101 از پایگاه داده Solomon بررسی می‌شود. مقایسه‌های انجام‌شده بر مبنای معیارهای تعداد وسایل نقلیه بهینه (NV) و هزینه کل مسیر (TT) می‌باشد. آزمایش‌ها و نتایج ارائه‌شده در این بخش نشان خواهد داد که کدام الگوریتم برای حل مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با پنجره زمانی و ظرفیت محدود (VRPTW)، عملکرد

بهتری دارد و توانسته راه‌حل‌هایی بهینه و یا نزدیک به بهینه ارائه دهد.

همه مقایسه‌ها در شرایط یکسان و با پارامترهای مشابهی انجام شده است. در اولین مقایسه، نتایج برای سه الگوریتم فراابتکاری MPFIH، DA-SHO و HPSO با توجه به معیار NV در جدول ۲ و برای معیار TT در جدول ۳ گزارش شده است. نتایج محاسبه‌شده برای هر الگوریتم در هر نمونه با تعداد مشتری متفاوت برای حصول اطمینان، به‌صورت میانگین ۱۵ اجرای متمایز است.

جدول ۲. مقایسه الگوریتم‌های مختلف با توجه به معیار NV

نمونه‌ها	MPFIH	DA-HSO	HPSO
C101-25	۳/۳۳	۳/۱۳	۳/۸۰
C101-50	۵/۸۹	۵/۵۵	۵/۵۶
C101-100	۱۷/۳۳	۱۶/۰۶	۱۸/۰۰
R101-25	۱/۸۸	۳/۸۸	۱/۸۸
R101-50	۳/۱۳	۶/۳۱	۲/۹۵
R101-100	۱۲/۳۸	۱۳/۲۶	۱۰/۷۴
RC101-25	۳/۲۵	۳/۱۲	۲/۸۳
RC101-50	۶/۷۵	۶/۰۰	۶/۰۵
RC101-100	۱۳/۵۰	۱۳/۳۵	۱۱/۴۵

جدول ۳. مقایسه الگوریتم‌های مختلف با توجه به معیار TT

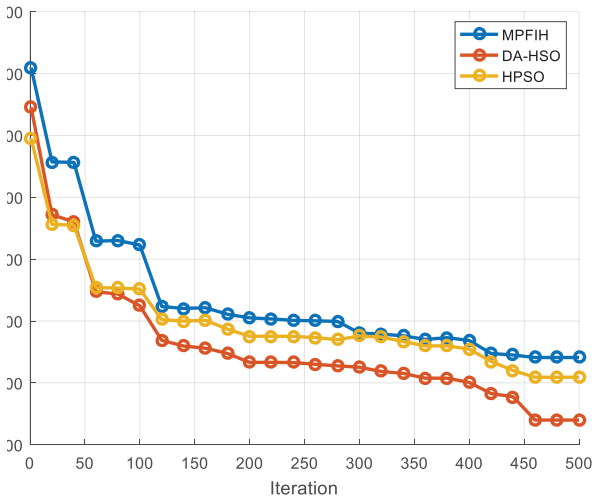
نمونه‌ها	MPFIH	DA-HSO	HPSO
C101-25	۲۵۲	۲۴۹	۱۹۲
C101-50	۴۸۲	۲۷۹	۴۱۹
C101-100	۱۵۶۴	۱۵۰۴	۹۶۰
R101-25	۴۳۳	۴۲۶	۶۱۸
R101-50	۷۲۱	۷۰۵	۱۰۵۳
R101-100	۱۳۲۷	۱۲۶۵	۱۹۱۷
RC101-25	۳۵۴	۳۵۱	۴۷۴
RC101-50	۷۱۱	۶۴۶	۹۶۶
RC101-100	۱۵۹۶	۱۵۰۱	۱۸۱۸

نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم DA-SHO در نمونه‌های نوع C101 از هر دو الگوریتم MPFIH و HPSO نتایج مناسب‌تری را از لحاظ تعداد وسایل نقلیه استفاده شده، ارائه می‌دهد؛ اما برای معیار هزینه کل مسیر این برتری همیشه وجود ندارد. برای نمونه‌های نوع R101 الگوریتم HPSO موفق به یافتن مسیرهایی با حداقل تعداد وسایل نقلیه شده است؛ اما هزینه کل مسیر بیشتری را نسبت به DA-SHO ارائه داده است. در نهایت برای نمونه RC101 در مجموع هر و معیار الگوریتم DA-SHO از عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم HPSO برخوردار است و نتایج مناسب‌تری را نشان می‌دهد. به‌طورکلی می‌توان گفت که الگوریتم DA-SHO در همه نمونه‌ها به‌جز C101-25 و C101-100 با توجه به معیار TT برتر است. در این معیار الگوریتم MPFIH در رتبه دوم قرار دارد. از طرفی در معیار NV الگوریتم‌های DA-SHO و HPSO رقابت بسیار نزدیکی دارند، هرچند HPSO برتری جزئی نسبت به DA-SHO دارد.

دو مشکل اصلی الگوریتم‌های تکاملی، گیر افتادن در نقاط بهینه محلی و همگرایی زودرس به این نقاط است. الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری برای حل این مشکلات ارائه شده و دارای راهکارهای برون‌رفت از نقاط بهینه محلی هستند. در هر سه الگوریتم موردبررسی از عملگرهای و جستجوهای ابتکاری و فراابتکاری مختلفی استفاده شده است. در این مسئله، فرایند بهینه‌سازی با هدف بهبود عملکرد در رسیدن به یک نقطه بهینه انجام می‌شود؛ بنابراین دو مفهوم جستجو و نقطه بهینه مطرح می‌شود. میان فرایند جستجوی برای بهبود مسئله و نقطه بهینه مسئله تفاوت وجود دارد. اغلب رویه‌های بهینه‌سازی بر همگرایی متمرکز هستند. همگرایی نشان می‌دهد که آیا الگوریتم به نقطه بهینه رسیده است یا خیر. به‌طورکلی در الگوریتم‌های بهینه-سازی، دو معیار همگرایی و عملکرد مطرح است. ممکن است یک الگوریتم همگرایی مناسبی داشته باشد اما عملکرد آن ضعیف باشد. به این مفهوم که فرایند بهبود در الگوریتم از کارایی و سرعت لازم برخوردار نیست. عکس این مورد نیز امکان‌پذیر است که الگوریتم همگرایی خوبی ندارد ولی از عملکرد مناسبی برخوردار است.

در ادامه الگوریتم‌های MPFIH، DA-SHO و HPSO از نظر پارامترهای همگرایی و عملکرد بررسی می‌شوند. با توجه به تشابه میان استدلال نمونه‌های مختلف، در اینجا تنها نمونه C101-50 از پایگاه داده Solomon برای مقایسه استفاده شده است. شکل ۴ نتایج این مقایسه را نشان می‌دهد. در این مقایسه، نتایج هزینه کل مسیر در طی ۵۰۰ تکرار برای الگوریتم‌های

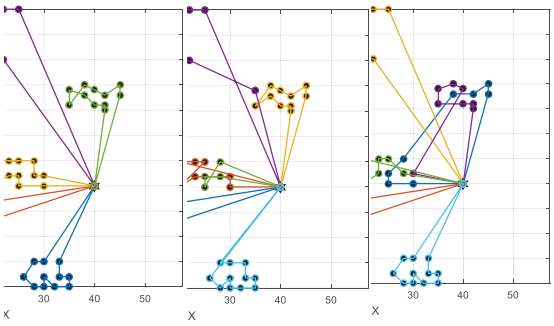
مختلف گزارش شده است. تابع هزینه کل مسیر، شامل مجموع هزینه سفر برای وسایل نقلیه اعم از مسافت و زمان انتظار است.



شکل ۴. مقایسه همگرایی الگوریتم‌های مختلف در نمونه C101-50

نتایج همگرایی نشان می‌دهد که الگوریتم DA-HSO در کاهش هزینه کل مسیر نسبت به دو الگوریتم دیگر عملکرد بهتری دارد. تابع هدف هزینه برای الگوریتم DA-HSO در تکرار ۴۶۰ با مقدار ۲۷۹ همگرا شده است. به‌طورکلی منظور از همگرایی زمانی است که تابع هدف موجود در مسئله در یک وضعیت ثبات قرار بگیرد و نقطه همگرایی، تکراری است که پس از آن نتایج تابع هدف تغییرات ناچیزی داشته باشد. برای الگوریتم‌های MPFIH و HPSO همگرایی به ترتیب در تکرارهای ۴۱۰ و ۴۶۰ با مقدارهای ۴۸۲ و ۴۱۸ حاصل شده است.

راه‌حل‌های ارائه‌شده توسط الگوریتم‌های مختلف به‌صورت یکسری مسیرهایی است که همه مشتریان را پوشش می‌دهد. این مسیرها به ازای هر وسیله نقلیه متفاوت است و هیچ اشتراکی (از لحاظ مشتری) بین مسیرها در یک نمونه وجود ندارد. شکل ۵ نتایج مسیرهای تخصیص داده شده به هر وسیله نقلیه را برای الگوریتم‌های MPFIH، DA-SHO و HPSO نشان می‌دهد. با توجه به گستردگی تعداد مشتریان و وضوح بهتر نتایج، در اینجا مسیرهای تخصیص داده شده برای وسایل نقلیه مختلف با رنگ-های متفاوتی در هر مسیر ارائه شده است. نتایج تنها برای نمونه C101-50 ارائه شده و استدلال آن برای سایر نمونه‌ها مشابه است.



شکل ۵. مسیرهای تخصیص داده‌شده توسط الگوریتم‌های مختلف به نمونه C101-50

نتایج مسیریابی نشان می‌دهد که الگوریتم‌های MPFIH و DA-HPSO با ۶ وسیله نقلیه و الگوریتم HPSO با تنها ۵ وسیله نقلیه موفق به حل مسئله شده است. هرچند مسیرهای تخصیص داده‌شده توسط الگوریتم HPSO از نظم بیشتری برخوردار است، اما درنهایت الگوریتم DA-HPSO هزینه کل مسیر کمتری را گزارش می‌دهد.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

مسئله مسیریابی وسایل نقلیه (VRP) یک مسئله بهینه‌سازی ترکیبی و برنامه‌ریزی گسسته است که هدف آن سرویس‌دهی مشتریان با استفاده از ناوگانی از وسایل نقلیه است. این مسئله اغلب شامل انتقال کالاهای واقع‌شده در یک انبار به سمت مشتریانی است که سفارش این کالاها را داده‌اند. هدف VRP کمینه کردن هزینه کل مسیر در انتقال کالا از انبار به سمت مشتریان است. تعیین راه‌حل بهینه، یک مسئله NP-Hard در بهینه‌سازی ترکیبی به شمار می‌رود و روش‌های عملی قطعی و ابتکاری زیادی جهت یافتن جواب‌های قابل‌قبول برای VRP توسعه یافته است. در این تحقیق یک مقایسه عملی میان الگوریتم‌های فرابتکاری MPFIH، DA-SHO و HPSO در حل مسئله VRPTW انجام شد. مقایسه‌ها بر روی نمونه‌های C101، R101 و RC101 از پایگاه داده Solomon و با توجه

به معیارهای تعداد وسایل نقلیه بهینه (NV) و هزینه کل مسیر (TT) انجام شده است. از نتایج مهم این مقاله می‌توان به مقایسه معتبر بودن و کارایی محاسباتی الگوریتم‌های مختلف در بررسی تعدادی از مسائل نمونه‌های تولیدشده از مسئله VRPTW اشاره نمود. جایی که با توجه به چندهدفه بودن مسئله، برخی روش‌ها در کمینه کردن بعضی اهداف موفق بوده اما انعطاف‌پذیری مناسبی در سایر اهداف نداشته بودند.

با توجه به نتایج جداول ۳ و ۴، برتری برای نمونه‌هایی با تعداد مشتری ۲۵ به‌طور میانگین توسط الگوریتم MPFIH در معیار NV و توسط الگوریتم DA-HPSO در معیار TT حاصل شده است. الگوریتم MPFIH در معیار NV نسبت به الگوریتم‌های DA-HPSO و HPSO به ترتیب حدود ۱۹ و ۱ درصد برتری دارد. به‌طور میانگین برتری الگوریتم DA-HPSO در معیار TT نسبت به الگوریتم‌های MPFIH و HPSO حدود ۲ و ۲۵ درصد گزارش شده است. همچنین در نمونه‌هایی با تعداد مشتری ۵۰، الگوریتم HPSO به‌طور میانگین ۸ و ۲۳ درصد در معیار NV و الگوریتم DA-HPSO حدود ۱۷ و ۴۹ درصد در معیار TT عملکرد بهتری ارائه داده است. درنهایت برای نمونه‌هایی با تعداد مشتری ۱۰۰، الگوریتم HPSO در معیار NV و الگوریتم DA-HPSO در معیار TT به‌طور میانگین نتایج بهتری را ارائه داده است. این برتری برای HPSO حدود ۸ و ۶ درصد و برای DA-HPSO حدود ۱ و ۲ درصد گزارش شده است.

در هر سه الگوریتم فرایند بهبود از کارایی و سرعت لازم برخوردار است، به‌طوری‌که با توجه به شکل ۴ در کمتر از ۱۵۰ تکرار نتایج تابع هدف به نقاط نزدیک هزینه ۶۰۰ رسیده است؛ اما به نظر می‌رسد که الگوریتم‌های MPFIH و HPSO در فرایند جستجو نقطه بهینه همگرایی را پیدا نکرده و به بهینه محلی همگرا شده‌اند. این استدلال با توجه به بهترین نتایج ارائه‌شده توسط سولومون در جدول ۱ است که برای نمونه مورد آزمایش (C101-50)، ۳۶۲ ارائه شده و الگوریتم DA-HSO نیز ۲۷۹ را گزارش می‌دهد؛ بنابراین DA-HSO از نظر نقطه همگرایی عملکرد بهتری نسبت به دو الگوریتم MPFIH و HPSO دارد، هرچند هر سه الگوریتم از نظر سرعت و کارایی در همگرایی عملکرد مشابهی دارند. علاوه بر این، همگرایی برای نمونه‌های R101 و RC101 با تعداد مشتری‌های متفاوت نیز نتایج مشابه است؛ اما نکته قابل‌توجه همگرایی سریع و مناسب الگوریتم MPFIH برای حل مسائل VRPTW در ابعاد کوچک (تعداد مشتری ۲۵) و پیچیدگی محاسباتی بالا برای نمونه‌های بزرگ (تعداد مشتری ۱۰۰) است. دلیل این امر استفاده از رویکرد دو مرحله است که ابتدا سعی در کاهش تعداد وسایل نقلیه دارد و پس از آن بر حداقل‌سازی کل زمان سفر متمرکز می‌شود. ازاین‌رو جستجو محلی نزولی λ-مبادله‌ای استفاده شده در این الگوریتم هرچند نتایج خوبی برای نمونه‌های ابعاد کوچک دارد اما به دلیل سربار محاسباتی نتایج قابل قبولی را در نمونه‌ها با ابعاد بالا ارائه نمی‌دهد.

با توجه به نتایج شکل ۵، هرچند الگوریتم HPSO با ۵ وسیله نقلیه نمونه C101-25 مسئله را حل کرده و نسبت به دو الگوریتم MPFIH و HPSO از تعداد وسایل نقلیه کمتری استفاده کرده است، اما مقدار هزینه کل مسیر در آن ۴۱۹ است که نسبت به الگوریتم HPSO با ۲۷۹ عملکرد ضعیف‌تری دارد. دلیل این امر خصوصیات پنجره زمانی در مسئله VRPTW است که بازه زمانی برخی از مشتریان در یک مسیر باعث ایجاد زمان انتظار برای وسیله نقلیه و در نتیجه افزایش هزینه کل مسیر شده است. اگرچه مسیرهای تخصیص داده شده به وسایل نقلیه، توسط الگوریتم HPSO نسبت به DA-HSO دارای نظم کمتری است اما درنهایت زمان انتظار کمتری را به وسایل نقلیه تحمیل کرده و هزینه کل مسیر کمتری را ارائه می‌دهد.

۶- مراجع

[1] AbdAllah, A. M. F., Essam, D. L., & Sarker, R. A. (2017). On solving periodic re-optimization dynamic vehicle routing problems. Applied Soft Computing, 55, 1-12.

[2] Bektaş, T., & Laporte, G. (2011). The pollution-routing problem. Transportation Research Part B: Methodological, 45(8), 1232-1250.

[3] Brandão, J. (2018). Metaheuristic for the Vehicle Routing Problem with Backhauls and Time Windows. In Operations Research Proceedings 2017 (pp. 413-418). Springer, Cham.

[4] Chen, J., & Shi, J. (2019). A multi-compartment vehicle routing problem with time windows for urban distribution–A

[14] Lia, K., Huixin, T. (2016), A two-level self-adaptive variable neighborhood search algorithm for the prize-collecting vehicle routing problem, Applied Soft Computing, 43, 469-479.

[15] Mancini, S. (2017). The Hybrid Vehicle Routing Problem. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 78, 1-12.

[16] Mirzaei, S., & Seifi, A. (2015). Considering lost sale in inventory routing problems for perishable goods. Computers & Industrial Engineering, 87, 213-227.

[17] Mungwattana, A., Manisri, T., Charoenpol, K., & Janssens, G. K. (2016). A solution for the bi-objective vehicle routing problem with the windows using local search and genetic algorithms, International Journal for Traffic and Transport Engineering , 6(2), 149-158.

[18] Mungwattana, A., Soonpracha, K., & Janssens, G. K. (2019). A real-world case study of a vehicle routing problem under uncertain demand. International Journal for Traffic & Transport Engineering, 9(1).

[19] Rodríguez-Martín, I., Salazar-González, J. J., & Yaman, H. (2019). The periodic vehicle routing problem with driver consistency. European Journal of Operational Research, 273(2), 575-584.

[20] Soysal, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., & Bektaş, T. (2015). The time-dependent two-echelon capacitated vehicle routing problem with environmental considerations. International Journal of Production Economics, 164, 366-378.

[21] Stavropoulou, F., Repoussis, P. P., & Tarantilis, C. D. (2019). The Vehicle Routing Problem with Profits and consistency constraints. European Journal of Operational Research, 274(1), 340-356.

[22] Szeto, W. Y., Wu, Y., & Ho, S. C. (2011). An artificial bee colony algorithm for the capacitated vehicle routing problem. European Journal of Operational Research, 215(1), 126-135.

comparison study on particle swarm optimization algorithms. Computers & Industrial Engineering, 133, 95-106.

[5] Clarke, G., & Wright, J. W. (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. Operations research, 12(4), 568-581.

[6] Dantzig, G. B. and Ramser J. M. (1959). The truck dispatching problem, Management Science, 6, 81–91.

[7] Eshtehadi, R., Fathian, M., & Demir, E. (2017). Robust solutions to the pollution-routing problem with demand and travel time uncertainty. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 51, 351-363.

[8] Golden, B. L., Raghavan, S., & Wasil, E. A. (Eds.). (2008). The vehicle routing problem: latest advances and new challenges (Vol. 43). Springer Science & Business Media.

[9] Hiassat, A., Diabat, A., & Rahwan, I. (2017). A genetic algorithm approach for location-inventory-routing problem with perishable products. Journal of Manufacturing Systems, 42, 93-103.

[10] Karakatič, S., & Podgorelec, V. (2015), A survey of genetic algorithms for solving multi depot vehicle routing problem, Applied Soft Computing, 27, 519-532.

[11] Koç, Ç., Bektaş, T., Jabali, O., & Laporte, G. (2016). The fleet size and mix location-routing problem with time windows: Formulations and a heuristic algorithm. European Journal of Operational Research, 248(1), 33-51.

[12] Li, J., Li, Y., & Pardalos, P. M. (2016). Multi-depot vehicle routing problem with time windows under shared depot resources. Journal of Combinatorial Optimization, 31(2), 515-532.

[13] Li, K., & Tian, H. (2016). A two-level self-adaptive variable neighborhood search algorithm for the prize-collecting vehicle routing problem. Applied Soft Computing, 43, 469-479.

[23] Tajik, N., Tavakkoli-Moghaddam, R., Vahdani, B., & Mousavi, S. M. (2014). A robust optimization approach for pollution routing problem with pickup and delivery under uncertainty. Journal of Manufacturing Systems, 33(2), 277-286.

[24] Vincent, F. Y., Redi, A. P., Hidayat, Y. A., & Wibowo, O. J. (2017). A simulated annealing heuristic for the hybrid vehicle routing problem. Applied Soft Computing, 53, 119-132.

[25] Wang, J., Jagannathan, A. K. R., Zuo, X., & Murray, C. C. (2017). Two-layer simulated annealing and tabu search heuristics for a vehicle routing problem with cross docks and split deliveries. Computers & Industrial Engineering, 11