فصلنامه پژوهشنامه بازرگانی، ویژه‌نامه شماره ۶۶، بهار ۱۳۹۲، ۴۸ - ۲۱

یک الگوریتم فراابتکاری جدید برای مسیریابی ناوگان وسایل حمل‌ونقل همراه با تقسیم تقاضا و محدودیت دسترسی به وسایل نقلیه

محسن فرقانی* دکتر عزیزاله جعفری**

دریافت: ۹۰/۱۲/۱۰ پذیرش: ۹۱/۷/۵

مسیریابی وسایل نقلیه / زنجیره عرضه / تقسیم تقاضا / الگوریتم کلونی مورچگان

چکیده

با توجه به اهمیت برنامه‌ریزی توزیع در میان حلقه‌های زنجیره عرضه یک بنگاه اقتصادی، در این مقاله مسئله مسیریابی ناوگان حمل‌ونقل کالا میان اجزای مختلف زنجیره تحت عنوان مسیریابی وسایل نقلیه (VRP)[1] مورد توجه قرار گرفته است. هدف این مقاله ضمن در نظرگرفتن محدودیت‌های عملیاتی دنیای واقعی در حوزه برنامه‌ریزی توزیع، ارائه یک روش حل فرا ابتکاری کارا نسبت به سایر روش‌های موجود می‌باشد، لذا در این نوشتار مسئله مسیریابی، شامل ناوگان ناهمگن از وسایل نقلیه است که در اختیار دپوی مرکزی قرار گرفته و امکان تقسیم تقاضا و محدودیت عدم دسترسی مشتریان به بعضی از وسایل نقلیه لحاظ شده است. ناوگان موردنظر از حیث نوع وسایل نقلیه موجود، محدود، ولی از لحاظ تعداد وسایل از هر نوع نامحدود است. با توجه به NP-hard بودن مسئله کلاسیک مسیریابی وسایل نقلیه، برای حل آن یک الگوریتم کلونی مورچه (ACO) دومرحله‌ای

*. کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران. forghani_mah@yahoo.com

**. عضو هیأت علمی دپارتمان مهندسی صنایع دانشگاه علم و فرهنگ، تهران. jafari@usc.ac.ir

■ محسن فرقانی، مسئول مکاتبات.

1. Vehicle Routing Problem.

Archive of SID
www.SID.ir

کارای جدید[1] پیشنهاد شده و نتایج آن با استفاده از مسائل آزمون طراحی شده مطابق با شبکه توزیع داخل ایران، با یک الگوریتم ابتکاری بهبود داده‌شده، مورد ارزیابی قرار گرفته است.

طبقه‌بندی JEL: L90, R41

Archive of SID

1. A New Multi-ant Colony System.

www.SID.ir

مقدمه

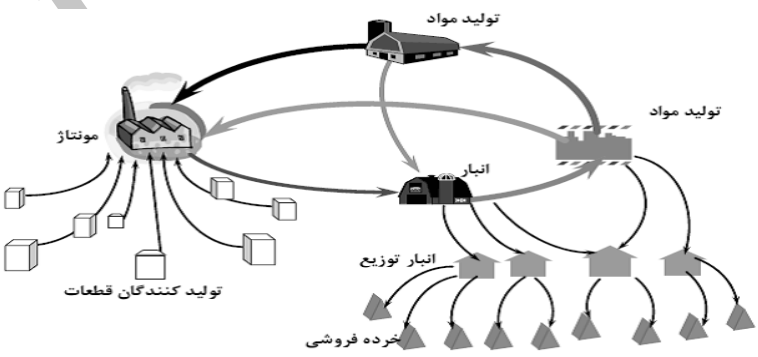
در دنیای رقابتی امروز، کاهش هزینه‌های تولید و بهبود بهره‌وری ازجمله مواردی هستند که در سرلوحه تفکرات و سیاست‌های تولیدی مدیران صنایع قرار گرفته و هر شرکتی با تمهیدات گوناگون سعی در ارائه راه‌حل‌های مطلوب برای رفع نیازهای فوق می‌باشد. موفقیت بسیاری از سازمان‌های خصوصی، دولتی و نظامی به توانایی آن‌ها در ارائه خروجی‌های مطلوب و محصولات بهتر در یک طیف وسیع و با هزینه‌ای پایین، وابسته است. ارائه مطلوب این خروجی‌ها (هزینه، کیفیت، عملکرد، تحویل به‌موقع، انعطاف و نوآوری) به توانایی سازمان در اداره جریان مواد، اطلاعات و پول در داخل و خارج سازمان وابسته است. این جریان به‌عنوان زنجیره تأمین و شبکه‌های توزیع شناخته شده است. مسئله کلیدی در زنجیره تأمین، بهره‌گیری از روش‌هایی است که علاوه بر مدیریت و کنترل هماهنگی تمامی فعالیت‌ها، باعث بهبود عملکرد و تعالی زنجیره می‌شود. هدف هر مدل شبکه توزیع، بهینه‌سازی جریان در میان اجزای شبکه است. به‌طوری‌که برمبنای خصوصیات مسئله همواره حداقل‌سازی تابع هدف که معمولاً از نوع هزینه است، مدنظر می‌باشد و این جریانات توسط تقاضای مشتریان نمود می‌یابد. در حالت ایده‌آل، یک طرح شبکه توزیع مناسب شامل عواملی نظیر کاهش هزینه، ارزش افزوده بالاتر و افزایش سطح خدمت به مشتری به کمک ایجاد ارتباطات بهینه میان هر گره و جریان ترافیکی مربوط به آن می‌باشد. ساده‌سازی و ایجاد این ارتباطات می‌تواند کل مسافت طی شده در شبکه را کاهش دهد و زمان‌بندی مربوط به نقاط مربوط به جایگاه‌های بارگذاری و تخلیه[1] را نیز بهبود بخشد. با مروری که در زمینه مفهوم مدیریت زنجیره تأمین توسط کروم و همکاران[2] انجام شد، زنجیره عرضه عبارت است از شبکه‌ای از سازمان‌ها با ارتباط بالادستی و پایین‌دستی که با یکدیگر شریک بوده و در انجام فرآیندها و فعالیت‌های مختلف برای رساندن محصولات و خدمات به دست مشتری نهایی، ایجاد ارزش می‌کنند.

در این میان موضوع حمل‌ونقل به‌عنوان عنصر اصلی شبکه‌های توزیع در میان اجزای مختلف زنجیره عرضه برای تحقق اهداف فوق، نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کند. هدف

1. Load and Unload.
2. Croom, S., Romano. P., Giannakis. M., 2000.

www.SID.ir

عمده برنامه‌ریزی حمل و نقل، کمینه‌سازی هزینه حمل‌ونقل کالا و مواد بین دو سطح تولیدکننده و مصرف‌کننده است، به‌طوری که تقاضای هر مصرف‌کننده توسط تولیدکنندگان مرتفع شود. با توجه به نوع مسئله مورد بررسی، عواملی نظیر طول مسیر، کیفیت مسیر از لحاظ ساختاری و محیطی، ترافیک مسیر، ظرفیت وسایل نقلیه، تقاضای مشتریان، سطح خدمت‌رسانی و غیره مدنظر قرار می‌گیرند. مسئله مسیریابی وسایل نقلیه (VRP) در قلب مدیریت توزیع واقع شده و هدف این مقاله، توسعه حالت خاصی از مسئله مسیریابی وسایل نقلیه در شبکه‌های توزیع و به‌کارگیری روش‌های پیشرفته بهینه‌سازی برای حل آن‌ها است. یک مسئله کلاسیک مسیریابی وسایل نقلیه شامل یک شبکه گراف به‌صورت $G\ (V,\ E)$ می‌باشد (ترجیحاً کامل) که V مبین نقاط تقاضا، $|V| = n$ و E نیز مجموعه یال‌ها یا مسیرهای شبکه است. در این حالت گره n=1 معرف مبدأ است و کلیه وسایل نقلیه موظف هستند سرویس خود را از مبدأ آغاز کرده و بعد از پیمایش مسیر تعیین شده مجدداً به آنجا بازگردند. هر مشتری یا نقطه تقاضا باید فقط از یک وسیله نقلیه سرویس بگیرد. در این حالت ظرفیت هر وسیله نقلیه و همچنین مقدار تقاضا در هر گره نیز معین است. مسیرها می‌توانند جهت‌دار یا ساده بوده و هزینه مسافرت برای خودروها نیز مشخص باشد. عمده‌ترین هدف در VRP کلاسیک، کمینه کردن هزینه سفر است. نمودار (۱) نمونه‌ای از شبکه تولید و توزیع را نشان می‌دهد که کالا در بین اجزای شبکه در جریان بوده و برای انتقال آن نیازمند برنامه‌ریزی مسیریابی صحیح با حداقل هزینه می‌باشیم.



نمودار ۱- نمونه‌ای از شبکه تولید و توزیع

Archive of SID
www.SID.ir

در این مقاله با توجه به شرایط و محدودیت‌هایی که در دنیای واقعی برای حمل‌ونقل کالا میان توزیع‌کننده و دریافت‌کننده وجود دارد، شکل خاصی از مسئله مسیریابی وسایل نقلیه را مورد بررسی قرار داده‌ایم که به شرح زیر می‌باشد. از آنجا که برای اکثر توزیع‌کنندگان امکان دسترسی به انواع وسایل نقلیه وجود دارد، در این تحقیق با ناوگان ناهمگنی از وسایل نقلیه با ظرفیت‌های مختلف که در اختیار انبار مرکزی است سروکار داشته، به طوری که تعداد در دسترس از هر نوع وسیله نقلیه نامحدود می‌باشد[1]. در این میان، برای هر نوع وسیله یک هزینه ثابت استفاده از ناوگان و یک هزینه متغیر مسیریابی که هر دو هزینه وابسته به نوع وسیله انتخابی است، در نظر گرفته می‌شود. به‌دلیل عدم قطعیت تقاضای مشتری‌ها، امکان اینکه تقاضای بعضی از مشتریان از ظرفیت بزرگ‌ترین وسیله نقلیه موجود بیشتر باشد، وجود دارد، لذا امکان تقسیم تقاضای[2] این مشتریان براساس قاعده خاصی بین وسایل نقلیه موجود لحاظ شده است. همچنین در مواردی امکان تخصیص بعضی از وسایل نقلیه به بعضی از مشتریان (گره‌ها) به‌دلیل وجود محدودیت‌های عملیاتی (از قبیل عدم وجود محل مناسب بارگیری یا باراندازی در محل مشتری مورد نظر و ...) امکان‌پذیر نیست. با توجه به موارد فوق‌الذکر ساختار مقاله به این شرح می‌باشد؛ در بخش دوم با ادبیات موضوع مسئله تعریف‌شده آشنا شده، در بخش سوم مدل ریاضی مسئله VFMPSS با محدودیت دسترسی به وسایل نقلیه[3]، تعریف می‌شود، در بخش چهارم یک الگوریتم فرا ابتکاری کلونی مورچه دومرحله‌ای جدید برای حل مسئله پیشنهاد می‌شود و در بخش پنجم به‌منظور اعتبارسنجی الگوریتم فرا ابتکاری پیشنهادی، نتایج به‌دست آمده از آن به‌کمک مسائل آزمون طراحی شده با روش ابتکاری کوتاه‌ترین مسیر اصلاح شده[4] مورد مقایسه و ارزیابی قرار می‌گیرد.

1. Fleet Size and Mixed Vehicle Routing Problem (FSMVRP).
2. Split Service.
3. The Split Service Vehicle Fleet Mix Problem with Access Availability.
4. Modified Shortest Path Algorithm.

www.SID.ir

۱. معرفی و پیشینه تحقیق

مسئله مسیریابی وسیله نقلیه برای نخستین بار توسط دانتزیگ و رامسر[1] در سال ۱۹۵۰، فرموله و براساس روش‌های ریاضی به حل آن پرداخته شد. دانتزیگ به همراه فالدرسون[2] (۱۹۵۴) برای حل VRP یک مدل صفرویک ارائه دادند. کلارک و رایت (۱۹۶۴) الگوریتم صرفه‌جویی[3] را برای حل VRP پیشنهاد کردند که مبنای بسیاری از تحقیقات بعدی قرار گرفت، به طوری‌که روش‌های بسیاری براساس روش کلارک و رایت و ایجاد تغییرات جزئی در آن ارائه شده است (گلدن و همکاران، ۱۹۹۷). ازجمله کارهایی که در سال‌های گذشته به‌صورت پیمایشی، مطالعاتی در حوزه VRP انجام شده، می‌توان به کارهای تات و ویگو (۲۰۰۲) و کوردِاو و همکارانش[4] (۲۰۰۷) اشاره کرد.

مسئله کلاسیک VRP به‌تنهایی چندان واقع‌بینانه نیست، چراکه اکثر کمپانی‌ها به ناوگانی از وسایل حمل‌ونقل دسترسی دارند. در این حالت برخلاف مسئله کلاسیک VRP، تابع هدف، حداقل‌سازی مجموع هزینه‌های ثابت وسایل نقلیه و هزینه‌های متغیر مسیریابی است و هزینه‌های مسیریابی، به کل مسافت طی شده وابسته می‌باشد. در این حالت مسئله ساختاری به شرح زیر دارد:

V نوع وسیله نقلیه در اختیار انبار مرکزی قرار گرفته است. هر وسیله نقلیه دارای پارامترهای Q_v (ظرفیت)، f_v (هزینه ثابت هر وسیله) و g_v (هزینه متغیر که به نوع وسیله نقلیه وابسته است) می‌باشد $v = \{1, \dots, V\}$. فرض بر آن است که $Q_1 < Q_2 < \cdots < Q_v$ و $f_1 < f_2 < \cdots < f_v$ و هزینه سفر روی هر یال $(i,j) \in E$ برای هر نوع وسیله نوع v؛ $C_{ijv} = d_{ij} \times g_v$؛

در مطالعات، دو نوع مختلف مسائل مسیریابی با ناوگان حمل‌ونقل ناهمگن مورد بررسی قرار گرفته است. در نخستین مدل به‌نام «FSMVRP یا VFMP»[5] که در سال ۱۹۸۴ توسط گلدن و همکارانش ارائه شد، فرض بر آن است که از هر نوع وسیله نقلیه به تعداد

1. Dantzig and Ramser.
2. Dantzig, G.B., Fulderson, R., Johnson, S. M., 1954.
3. Saving Method.
4. Cordeau, J.F., Laporte, G., Savelsbergh, M.W.P., Vigo, D., 2007.
5. Vehicle Fleet Mix Problem.

www.SID.ir

نامحدودی در دسترس بوده و هزینه‌های متغیر، به نوع وسیله نقلیه وابسته است. مدل دوم که تحت عنوان «HFVRP یا HVRP»[1] شناخته می‌شود، تعمیم‌یافته مدل اول است و در این حالت تعداد وسایل نقلیه موجود از هر نوع محدود می‌باشد. در این مقاله، از مدل اول مسئله ناوگان ناهمگن وسایل نقلیه، استفاده می‌شود.

تاکنون روش‌های چندانی برای حل دقیق مسئله VFMP توسعه داده نشده است. تنها سه مقاله وجود داشته که عبارت‌اند از کار گلدن و همکارانش[2] (۱۹۸۴)، یامان[3] (۲۰۰۶) و چوی و تی چا[4] (۲۰۰۷) که نتایج آن‌ها، به‌دست آوردن یک حد پایین برای جواب مسئله بوده است. گلدن و همکارانش چندین روش ابتکاری مبتنی بر روش صرفه‌جویی کلارک و رایت را که در سال ۱۹۶۴ پیشنهاد داده بودند، ارائه کردند. چوی و تی‌چا، یک روش ریاضی مبتنی بر روش تفکیک‌پذیری[5] برای مسئله VFMP را ارائه کردند. در این روش VFMP همانند مسئله پوشش کامل برای مسئله VRPTW فرموله می‌شود، سپس برنامه‌ریزی خطی آزاد شده آن با تکنیک تولید ستون[6] حل می‌شود. این روش به‌طور دقیق نمی‌تواند مثال‌های تست شده را حل کند، اما حدود بالا و پایین بسیار خوبی را ایجاد می‌کند و از طرفی می‌تواند به‌عنوان روش هیوریستیک خوبی مطرح باشد. الگوریتم‌های هیوریستیک به‌کاررفته در این حوزه عبارت‌اند از: کار گی‌سنز و همکارانش[7] (۱۹۸۴) که الگوریتم ابتکاری تخصیص عمومی فیشر و جایکومار[8] در سال ۱۹۸۱ را برای حل این مسئله تطبیق دادند. الگوریتم بهبود داده شده ۷ مرحله‌ای سالهی و رَند (۱۹۹۳) که توسعه‌یافته الگوریتم خودشان برای حل مسئله VRP بود. تایلارد[9] (۱۹۹۹) یک الگوریتم ابتکاری تولید ستون مبتنی بر فرآیند حافظه انطباقی را برای مسئله HVRP ارائه کرد و همین الگوریتم را برای مسئله VFMP به‌کار برد. الگوریتم‌های فراابتکاری که برای حل

1. Heterogeneous Fleet VRP.
2. Golden, B.L., Assad, A., Levy, L., Gheysens, F., 1984.
3. Yaman, H., 2006.
4. Choi, E., Tcha, D.-W., 2007.
5. Resolution.
6. Column Generation.
7. Gheysens, F., Golden, B., Assad, A., 1984.
8. Fisher and Jaikumar., 1981.
9. Taillard, ED, 1999.

www.SID.ir

مسائل VFMP به‌کار برده شده‌اند، عبارت‌اند از: الگوریتم OS توسط عثمان و سالهی (۱۹۹۶)، الگوریتم GLMT توسط گِندراو[1] و همکارانش (۱۹۹۹) و الگوریتم Wo توسط عثمان و واسمن (۲۰۰۲) که همه این الگوریتم‌ها مبتنی بر روش جستجوی ممنوع هستند. براندا‌و[2] (۲۰۰۹) یک الگوریتم جستجوی ممنوع قطعی[3] را برای مسئله FSMVRP ارائه داد. پاتریکا بل‌فیور[4] (۲۰۰۷) برای این مسئله یک الگوریتم جستجوی پراکنده در حالتی که محدودیت بازه زمانی[5] هم مدنظر است، مطرح کرد. از طرفی دو الگوریتم ژنتیکی که توسط اُچی[6] و همکارانش (۱۹۹۸) و لیما[7] و همکارانش در سال (۲۰۰۴) ارائه شدند، مؤثر نبودند، اما در سال ۲۰۰۸، شوگانگ[8] یک الگوریتم ژنتیک کارا برای این دست از مسائل ارائه کرد. کریستین پرینس[9] (۲۰۰۹) دو الگوریتم ممتیک برای مسئله VFMP ارائه و ری‌پوسیس و ترانتیلیس[10] (۲۰۱۰) برنامه‌ریزی حافظه انطباقی را مطرح نمودند. همچنین براندا‌و (۲۰۱۱) برای مسئله HVRP نیز یک الگوریتم جستجوی ممنوع پیشنهاد کرد.

مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با تقسیم تقاضا (تحویل)[11] برای نخستین بار در سال‌های ۱۹۸۹ و ۱۹۹۰ توسط دِرور و تراداِو[12] مطرح و مدل ریاضی آن ارائه شد که در آن به جنبه اقتصادی مسئله زمانی که یک مشتری با بیش از یک وسیله نقلیه سرویس‌دهی می‌شود، توجه داشت. دِرور و همکارانش (۱۹۹۴) یک برنامه عدد صحیح را برای مسئله فوق ارائه و برای حل آن از یک الگوریتم شاخه و کران با یک محدودیت آزادشده استفاده نمودند. مولاسریل[13] و همکاران (۱۹۹۷) این موضوع را برای شبکه توزیع مواد غذایی در یک مزرعه گاوداری در آریزونای آمریکا زمانی که تحویل کالا به مشتری با

1. Gendreau, M., Laporte, G., Musaraganyi, C., Taillard, E.D., 1999.
2. José Brandão., 2009.
3. Deterministic tabu search.
4. Patrica Belfior., 2007.
5. Time windows (TW).
6. Ochi.
7. Lima, C.M.R.R., Goldbarg, M.C., Goldbarg, E.F.G., 2004.
8. Shuguang.
9. Christian Prins.
10. Repoussis. P.P., Tarantilis.C.D., 2010.
11. Vehicle routing problem with Split Service (Delivery) (VRPSS).
12. Dror, M., Trudeau, P., 1989 & 1990.
13. Mullaseril, P.A., Dror, M., Leung, J., 1997.

Archive of SID
www.SID.ir

محدودیت زمانی[1] همراه است، مطرح کردند و از الگوریتم ابتکاری پیشنهادشده توسط دِرور و همکارانش (۱۹۹۰) که با این مسئله تطبیق داده شده بود، استفاده نمودند. برای همین مسئله (VRPTWSS) در سال ۲۰۰۴ یک الگوریتم جستجوی ممنوع توسط هو و هاگلند[2] مطرح و در یک مطالعه موردی در برزیل، برای شبکه توزیع متشکل از یک انبار مرکزی و ۵۱۹ مشتری در ۱۱ بخش، الگوریتم فرا ابتکاری جستجوی پراکنده[3] توسط پاتریکا بل‌فیور[4] (۲۰۰۹) ارائه شد. توکلی مقدم و همکارانش (۲۰۰۷) یک الگوریتم بازپخت شبیه‌سازی[5] شده را برای مسئله VRPSS در حالتی که ناوگان حمل‌ونقل از نوع HFVRP است، مطرح کردند. مینگ‌ژو جین[6] (۲۰۰۸) یک الگوریتم ابتکاری تولید ستون را برای این دست از مسائل معرفی نمود. از آنجا که در فرآیند تقسیم تقاضا ممکن است یک مشتری در یک ملاقات خواهان دریافت تمام تقاضای خود باشد، گلزینسکی[7] و همکارانش (۲۰۱۰) حالت خاصی از مسئله را برای زمانی که باید حداقل کسری از تقاضای مشتری توسط یک وسیله نقلیه برآورده شود، مطرح نمودند و برای حل آن از یک الگوریتم جستجوی ممنوع استفاده کردند. همچنین آن‌ها در سال ۲۰۱۱ مسئله تقسیم تقاضا را برای حالتی از مسئله *VRP* که با چند دپو سروکار داریم توسعه داده و برای آن یک روش ابتکاری مبتنی بر برنامه‌ریزی عدد صحیح ارائه و نشان دادند که روش پیشنهادی جواب‌های با کیفیت بالایی را برای مسائل آزمون موردنظر تولید کرده است. از نمونه‌های عملی این موضوع می‌توان به کار کورس‌ویک[8] و همکاران (۲۰۱۱) که یک الگوریتم ابتکاری جستجوی همسایگی[9] را برای مسئله مسیریابی در حمل‌ونقل دریایی، هنگامی که امکان فرآیند بارگیری محموله توسط چند کشتی وجود دارد و همچنین کار

1. Vehicle routing problem time windows.
2. Ho, S.C., Haugland, D., 2004.
3. Scatter Search.
4. Patrica Belfior.
5. Simulated Annealing (SA).
6. Mingzhou Jin., 2008.
7. Gulczynski. D., Golden. B., Wasil. E., 2010 & 2011.
8. Korsvik, J. E., K. Fagerholt, et al. 2011.
9. Neighbourhood Search Heuristic.

www.SID.ir

هنینگ و همکاران (۲۰۱۲)[1] برای مسئله مسیریابی در حالت برداشت و تحویل[2] در حمل‌ونقل دریایی نفت خام، اشاره کرد.

به‌تازگی برای حل مسئله VRP توجه بیشتری به استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان شده است. برای شناخت و معرفی الگوریتم مورچگان می‌توان به دوریگو و همکاران[3] (۱۹۹۶) مراجعه کرد. بولان‌هیمر و همکاران[4] (۱۹۹۹) برای نخستین بار یک سیستم مورچه را برای حل مسئله VRP طراحی کردند. این الگوریتم بعدها در سال ۲۰۰۲ توسط درنر و همکاران، با ترکیب آن با روش ابتکاری صرفه‌جویی، بهبود داده شد. همچنین رِیمان (۲۰۰۴) یک الگوریتم سیستم مورچه مبتنی بر تجزیه (D-Ants) را برای مسئله CVRP ارائه داد. در این الگوریتم، مسئله به چندین زیرمسئله تجزیه شده و هر زیرمسئله با استفاده از سیستم کلونی مورچه مبتنی بر صرفه‌جویی حل شده است. در سال‌های اخیر، از جمله کارهای انجام شده در زمینه کاربرد الگوریتم مورچگان می‌توان به کار مارک رِیمان و همکاران (۲۰۰۶) برای مسئله VRPBTW، کار ژِن[5] (۲۰۰۸) برای مسئله CVRP، کار گاژپال و همکاران[6] (۲۰۰۹) برای مسئله VRPB در حالت عمومی با تعداد محدودی وسیله‌نقلیه یکسان و کار ژانگ و وانگ[7] (۲۰۱۲) که یک الگوریتم ترکیبی شامل کلونی مورچه و نزدیک‌ترین همسایگی را برای مسئله VRP مطرح نمودند، اشاره کرد.

همچنین در یک مطالعه موردی در کشور تونس، اوچی و ماریاهی[8] (۲۰۱۲) برای مسئله مسیریابی اتوبوس مدرسه در یک فضای شهری که حالت خاصی از VRP است، از یک الگوریتم ترکیبی شامل کلونی مورچه و روش جستجوی محلی همسایگی[9] برای حل آن استفاده نموده‌اند.

1. Hennig, F., B. Nygreen, et al. 2012.
2. Pickup and delivery.
3. Dorigo.
4. Bullnheimer, B., R. Hartl, et al. 1999.
5. Tong Zhen; Yuhua Zhu; Qiuwen Zhang., 2008.
6. Gajpal, Y. and P. Abad., 2009.
7. Xiao, Zhang, Jiang-qing, Wang.,2012.
8. Euchi, J. and R. Mraihi., 2012.
9. neighborhood local search algorithm.

Archive of SID
www.SID.ir

۲. مدل ریاضی

در مقایسه با مطالعات پیشین، در این مقاله یک مسئله مسیریابی وسایل نقلیه همراه با ناوگان ناهمگن از وسایل نقلیه و در نظر گرفتن امکان تقسیم تقاضا و محدودیت عدم دسترسی به بعضی از وسایل نقلیه برای بعضی از مشتریان به‌طور هم‌زمان مورد بررسی قرار گرفته و مدل برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح آن به شرح زیر است:

۲-۱. پارامترهای ورودی

N: تعداد کل مشتریان $N = \{1, \dots, n\}$; گره 0 و $n+1$ به‌عنوان دپو شناخته می‌شوند.

$A = \{(i,j) | i,j \in N; i \neq j\}$ مجموعه یال‌ها (اتصالات مابین گره‌ها «نقاط تقاضا»).

d_{ij}: طول یال بین دو گره i و j به‌طوری‌که: $(i,j) \in A$ و $d_{ji} = d_{ij}$ (شبکه راه‌ها متقارن است).

V: مجموعه انواع وسایل نقلیه در دسترس $V = \{1, \dots, v\}$ و تعداد وسایل از هر نوع نامحدود است.

f_v: هزینه ثابت استفاده از هر وسیله نقلیه $(v \in V)$؛ $(\forall v \in V, f_1 < f_2 < \dots < f_v)$.

g_v: هزینه متغیر مسیریابی برای هر وسیله نقلیه (هزینه هر واحد مسافت طی شده برای هر نوع وسیله نقلیه).

C_{ijv}: هزینه حرکت خودروی vام $(v \in V)$ به‌ازای سفر در مسیر (i,j)؛ $C_{ijv} = d_{ij} \times g_v$.

Q_v: ظرفیت وسیله نقلیه vام $(v \in V)$ (از نظر وزنی)؛ $Q_1 < Q_2 < \dots < Q_v$.

R_i: تقاضای مشتریان (از نظر وزنی)؛ $(i \in N)$.

$C_{0,n+1,v} = 0$; $d_{0,n+1} = d_{n+1,0} = 0$

$\forall i > 1,\ d_{ii} \gg \infty$; $R_0 = R_{n+1} = 0$

M یک عدد دلخواه بزرگ

$L_{iv} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$

اگر وسیله نقلیه vام به مشتری iام قابل تخصیص باشد.

در غیر این صورت:

Archive of SID

www.SID.ir

۲-۲. متغیرهای تصمیم‌گیری

$X_{ijv} = \{^{1}_{0}$ اگر مشتری jام بعد از مشتری iام توسط ماشین vام سرویس‌دهی شود.
در غیر این صورت:

$y_{iv} =$ کسری از تقاضای مشتری iام که توسط وسیله نقلیه vام سرویس‌دهی می‌شود.

۲-۳. فرمولاسیون

$$Min\ Z = \sum_{v=1}^{V} f_v \sum_{j=1}^{n} x_{0jv} + \sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{n}\sum_{v=1}^{V} C_{ijv} \times x_{ijv} \quad (۱)$$

s.t.

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ijv} \le 1 \quad ;\ i = 1,2,\dots,n \ ,\quad v = 1,2,\dots,V \quad (۲)$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_{ipv} - \sum_{j=1}^{n} x_{pjv} = 0 \quad ;\ p = 1,\dots,n \ ,\quad v = 1,2,\dots,V \quad (۳)$$

$$\sum_{j=0}^{n+1} x_{0jv} = 1 \quad ;\ v = 1,2,\dots,V \quad (۴)$$

$$\sum_{i=0}^{n+1} x_{i(n+1)v} = 1 \quad ;\ v = 1,2,\dots,V \quad (۵)$$

$$\sum_{v=1}^{V} y_{iv} = 1 \quad ;\ i = 1,2,\dots,n \quad (۶)$$

$$y_{iv} \le \sum_{j=1}^{n} x_{jiv} \quad ; i = 1,2,\dots,n \ ;\ v = 1,2,\dots,V \quad (۷)$$

$$\sum_{j=1}^{n} x_{jiv} \le M.y_{iv} \quad ;\ i = 1,2,\dots,n \ ;\ v = 1,2,\dots,V \quad (۸)$$

$$\sum_{i=1}^{n} y_{iv}.R_i \le Q_v \quad ;\ v = 1,2,\dots,V \quad (۹)$$

$$\sum_{j=1}^{n} x_{jiv} \le L_{iv} \quad ;\ i = 1,2,\dots,n \ ;\ v = 1,2,\dots,V \quad (۱۰)$$

$$\sum_{i,j\in S} x_{ijv} \le |S| - 1 \quad ;\ S \subseteq \{1,2,\dots,n\} \ ;\ 2 \le |S| \le n-2 \quad (۱۱)$$

$$y_{iv} \ge 0 \quad i = 1,2,\dots,n \quad ;\ v = 1,2,\dots,V \quad (۱۲)$$

$$x_{ijv} \in \{0,1\} \quad ;\ v = 1,\dots,V \quad ;\ i,j = 0,1,2,\dots,n+1 \quad (۱۳)$$

تابع هدف بیانگر مینیمم‌سازی هزینه‌های مربوط به استفاده از ناوگان حمل‌ونقل و هزینه مسیریابی است. محدودیت (۲) تضمین می‌کند هر وسیله نقلیه هر مشتری را تنها یک‌بار

Archive of SID
www.SID.ir

ملاقات می‌کند. محدودیت (۳) بیانگر آن است که هر وسیله نقلیه که به هر گره وارد می‌شود، حتماً از آن خارج می‌گردد. محدودیت‌های (۴) و (۵) تمام وسایل نقلیه را ملزم می‌کند که مسیر توزیع خود را از دپوی مرکزی آغاز و به همانجا ختم کنند. محدودیت(۶) بیانگر آن است که تمام تقاضای مشتریان هم در خط رفت و هم در خط برگشت برآورده می‌شود. محدودیت‌های (۷) و (۸) تضمین می‌کنند که تقاضای گره i در صورتی تکمیل می‌شود که حداقل یک وسیله نقلیه از آنجا عبور کند. در واقع محدودیت اصلی به‌صورت زیر است:

$$\sum_{j=1}^{n}\sum_{v=1}^{V} x_{jiv} \times y_{iv} = 1 \;\; ; \;\; i = 1, \dots, n$$

که این محدودیت غیرخطی است و پس از فرآیند خطی‌سازی به‌صورت دو محدودیت (۷) و (۸) تعریف می‌شود. محدودیت (۹) بیانگر آن است که فرآیند بارگیری در هر مسیر نباید از ظرفیت وسیله نقلیه تجاوز کند. در صورتی که امکان تخصیص بعضی از وسایل نقلیه به بعضی از مشتریان وجود نداشته باشد، محدودیت (۱۰) این موضوع را تضمین می‌کند.

۳. سیستم کلونی مورچه چندگانه پیشنهادی

با توجه به ساختار مسئله VRP مطرح شده و اینکه مسئله از نوع چندجمله‌ای نامعین سخت (NP-Hard) است، برای حل آن باید از الگوریتم‌های ابتکاری یا فرا ابتکاری استفاده کرد. با رجوع به ادبیات موضوع و نتایج حاصل از بخش دوم این مقاله در خصوص روش‌های حل ارائه‌شده برای این دست از مسائل، الگوریتم کلونی مورچه در مقایسه با سایر روش‌ها، جواب‌های مناسبی را ارائه داده است- هم از لحاظ کیفیت جواب‌ها و هم از لحاظ زمان اجرای برنامه (CPU Time)-، به‌خصوص زمانی که بهبودی در الگوریتم موردنظر ایجاد شده و یا به‌صورت ترکیبی با سایر روش‌ها به‌کار برده شود. جدول (۱) مقایسه نتایج مطالعات پیشین در خصوص کاربرد روش‌های مختلف برای حل مسئله کلاسیک VRP را نشان می‌دهد.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۱- مقایسه نتایج روش‌های فرا ابتکاری برای مسئله VRP

Prob	n	m	Q	SA	TS	GA	AS [a]	SS-ACO [b]	IACO [c]
C_1	۵۰	۵	۱۶۰	۵۲۸	۵۲۴	۵۲۴/۸۱	۵۲۴/۶۱	۵۲۴/۶۱	۵۲۴/۶۱
C_2	۷۵	۱۰	۱۴۰	۸۳۸	۸۴۴	۸۴۹/۷۷	۸۴۴/۳۱	۸۳۵/۲۶	۸۳۵/۲۶
C_3	۱۰۰	۸	۲۰۰	۸۲۹	۸۳۵	۸۴۰/۷۲	۸۳۲/۳۲	۸۳۰/۱۴	۸۳۰/۰۰
C_4	۱۵۰	۱۲	۲۰۰	۱۰۵۸	۱۰۵۲	۱۰۵۵/۸۵	۱۰۶۱/۵۵	۱۰۳۸/۲۰	۱۰۲۸/۴۲
C_5	۱۹۹	۱۷	۲۰۰	۱۳۷۶	۱۳۵۴	۱۳۷۸/۷۳	۱۳۴۳/۴۶	۱۳۰۷/۱۸	۱۳۰۵/۵
C_6	۵۰	۶	۱۶۰	۵۵۵	۵۵۵	۵۶۰/۲۹	۵۶۰/۲۴	۵۵۹/۱۲	۵۵۵/۴۳
C_7	۷۵	۱۱	۱۴۰	۹۰۹	۹۱۳	۹۱۴/۱۳	۹۱۶/۲۱	۹۱۲/۶۸	۹۰۹/۶۸
C_8	۱۰۰	۹	۲۰۰	۸۶۶	۸۶۶	۸۷۲/۸۲	۸۶۶/۷۴	۸۶۹/۳۴	۸۶۵/۹۴
C_9	۱۵۰	۱۴	۲۰۰	۱۱۶۴	۱۱۸۸	۱۱۹۳/۰۵	۱۱۹۵/۹۹	۱۱۷۹/۰۴	۱۱۶۲/۵۵
C_{10}	۱۹۹	۱۸	۲۰۰	۱۴۱۸	۱۴۲۲	۱۴۸۳/۰۶	۱۴۵۱/۶۵	۱۴۱۰/۲۶	۱۳۹۵/۸۵
C_{11}	۱۲۰	۷	۲۰۰	۱۱۷۶	۱۰۴۲	۱۰۶۰/۲۴	۱۰۶۵/۲۱	۱۰۴۴/۱۲	۱۰۴۲/۱۱
C_{12}	۱۰۰	۱۰	۲۰۰	۸۲۶	۸۱۹	۸۷۷/۸	۸۱۹/۵۶	۸۲۴/۳۱	۸۱۹/۵۶
C_{13}	۱۰۰	۱۱	۲۰۰	۱۵۴۵	۱۵۴۷	۱۵۶۲/۲۵	۱۵۵۹/۹۲	۱۵۵۶/۵۲	۱۵۴۵/۹۳
C_{14}	۱۰۰	۱۱	۲۰۰	۸۹۰	۸۶۶	۸۷۲/۳۴	۸۶۷/۰۷	۸۷۰/۲۶	۸۶۶/۳۷

n: تعداد مشتریان، m: تعداد وسایل نقلیه، Q: ظرفیت وسایل نقلیه.

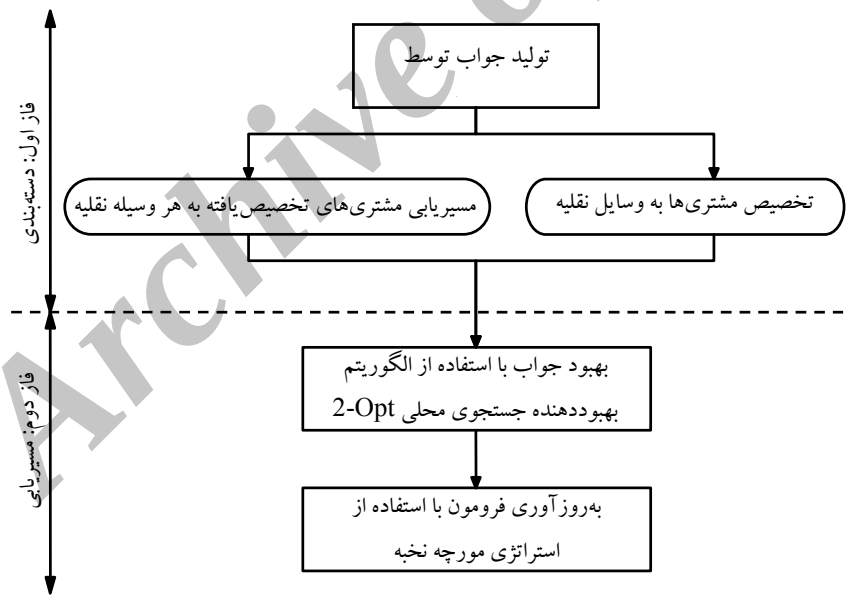
[a] Bullnheimer, B., Hartl, R.F., Strauss, C., 1999.
[b] Zhang, X. and L. Tang (2009).
[c] Yu, B., Z.-Z. Yang, et al. (2009).

با توجه به ساختار جدید مسئله و محدودیت‌های عملیاتی درنظرگرفته شده در آن، راه‌کار پیشنهادی برای حل مسئله، سیستم کلونی مورچه دومرحله‌ای[1] است. موضوع MACS برای نخستین بار در سال ۱۹۹۹ توسط گامبارلا و همکاران[2] که برای حل مسئله VRPTW به‌کار برده شد، مطرح گردید. آن‌ها از دو نوع مورچه برای حداقل کردن دو تابع هدف استفاده کردند؛ یکی حداقل کردن تعداد وسایل نقلیه مورد استفاده و دیگری حداقل کردن طول مسیر طی شده است.

1. Multi Ant Colony System.
2. Gambardella, L.M., Taillard, E., Agazzi, G., 1999.

Archive of SID
www.SID.ir

الگوریتم پیشنهادی ما شامل دو مرحله است؛ ابتدا دسته‌بندی و سپس مسیریابی[1] و در آن از دو نوع مورچه برای ساخت یک جواب استفاده می‌شود. نوع اول که به مورچه وسیله (Costumer-ants) معروف است، برای تخصیص مشتریان به وسایل نقلیه کاربرد دارد و دومی، مورچه مسیر (Route-ants) است که وظیفه ساخت مسیر برای وسایل نقلیه تخصیص داده‌شده به مشتریان را برعهده دارد. اثر فرومون مورچه مشتری (τ_{1vi}) بیانگر شدت گرفتن اثر خدمت مشتری iام از وسیله نقلیه vام است و اثر فرومون مورچه مسیر (τ_{2ij}) نشان‌دهنده شدت گرفتن اثر ملاقات مشتری jام بلافاصله بعد از مشتری iام است. در ابتدای حل مسئله، مقدار اولیه اثر فرومون در هر دو فاز تولید جواب را برابر با ۱ در نظر می‌گیریم ($\tau_{2ij}=\tau_{1vi}=1$). روند کلی به‌دست آوردن جواب در نمودار (۲) مشخص شده است.



نمودار ۲- مراحل کلی رسیدن به جواب بهینه توسط الگوریتم کلونی مورچه چندگانه

1. Cluster First and Route Second.

www.SID.ir

۱-۳. تولید جواب توسط مورچه

پارامترهای موردنیاز برای تولید جواب عبارت‌اند از:

N: تعداد کل مشتریان $N = \{1,2, \dots, n\}$؛

q_i: تقاضای مشتری iام؛

Q_v: ظرفیت وسیله نقلیه نوع vام $(v \in V)$؛

C_v: مجموعه مشتریانی که توسط وسیله نقلیه نوع vام سرویس‌دهی می‌شوند؛

AC_v: ظرفیت قابل استفاده وسیله نقلیه نوع vام برای تخصیص به یک مشتری؛

Ψ: مجموعه مشتریانی که هنوز سرویس‌دهی نشده‌اند؛

δ: درایه‌ای که در هر مرحله اندیس آخرین مشتری تخصیص‌یافته در آن ذخیره می‌شود؛

Z_r^l: درایه‌ای که مقدار تابع هدف حاصل از مورچه rام در دور lام را در خود ذخیره می‌کند؛

مجموعه $v \in V$: انواع وسایل نقلیه موجود.

۱-۱-۳. تخصیص مشتری‌ها به وسایل نقلیه

برای شروع کار ابتدا پارامترهای فوق را مقداردهی می‌کنیم:

$$N = 1,2, \dots, n$$
$$C_v = \emptyset \quad ; v \in V$$
$$AC_v = Q_v \quad ; v \in V$$
$$\Psi = 1,2, \dots, n \quad ; \delta = 0$$

ابتدا از مجموعه V یک وسیله نقلیه به‌صورت تصادفی انتخاب و وسیله نقلیه vام نامیده می‌شود. حال از مجموعه Ψ یک مشتری که باید توسط وسیله نقلیه vام خدمت‌دهی شود پس از برقراری شرط ۱۴، طبق قانون نسبت تصادفی[1] زیر انتخاب می‌شود.

$$\forall i \in \Psi \ ; \ if \ \ AC_v \geq q_i \qquad (۱۴)$$

$$P_{vi} = \begin{cases} \dfrac{(\tau_{1vi})^{\alpha 1}.\ (\eta_i)^{\beta 1}}{\sum_{i \in \Psi}(\tau_{1vi})^{\alpha 1}.\ (\eta_i)^{\beta 1}} & if \ \ i \in \Psi \\ 0 & Otherwise \end{cases} \qquad (۱۵)$$

1. Random-proportional rule.

www.SID.ir

$\eta_i = \frac{1}{d_{\delta i}} \times \frac{Q_v}{AC_v - q_i + 0.01}$، شاخص ابتکاری (قابلیت مرئی بودن) η_i بیانگر آن است مشتری که ظرفیت بیشتری را به خود اختصاص می‌دهد احتمال انتخاب بیشتری را دارد، چراکه زمان‌های بارگیری و باراندازی کمتری توسط وسیله نقلیه صرف شده و از طرفی شاخص ارائه خدمت به مشتریان در بهترین زمان ممکن محقق شده است. همچنین نزدیک بودن گره‌های بعدی نسبت به مشتری فعلی نیز از اهمیت خاصی برخوردار است که شاخص ابتکاری فوق در برگیرنده دو عامل ذکر شده است.

در صورتی که هیچ مشتری انتخاب نشد، فرآیند فوق از ابتدا شروع می‌شود و در غیر این صورت طبق قانون فوق مشتریان به‌صورت پی‌درپی انتخاب می‌شوند تا شرط توقف برقرار شود. نکته قابل ذکر آنکه پس از انتخاب هر مشتری مجموعه‌های Ψ، C_v، δ و AC_v بهنگام می‌شوند. دو پارامتر $\alpha 1$ و $\beta 1$ بیانگر شدت اثر فرومون و شاخص ابتکاری موردنظر هستند.

یکی از فرض‌های مسئله VRP مطرح شده، موضوع تقسیم تقاضا است. برای این منظور تقاضای این نوع مشتریان براساس ظرفیت وسایل نقلیه موجود، به چندین مشتری مجزا تقسیم‌بندی شده و یک مشتری با چنین تقاضایی به چندین مشتری مجزا با اندیس‌های متفاوت تفکیک خواهد شد. یکی دیگر از فرض‌های مسئله، موضوع عدم امکان استفاده از بعضی وسایل نقلیه برای بعضی از مشتریان است که این موضوع، در فاز اول، در هنگام انتخاب مشتریان برای وسایل نقلیه، با در نظر گرفتن یک شرط و استفاده از یک پارامتر صفر و یک، قابل اعمال است.

۲-۱-۳. مسیریابی مشتری‌های تخصیص‌یافته به هر وسیله نقلیه

پس از این مرحله برای همان وسیله نقلیه انتخاب شده در فاز اول مستقیماً فاز دوم یعنی ساخت مسیر، اجرا می‌گردد. این عمل با حل یک مسئله فروشنده دوره‌گرد انجام می‌شود؛ یعنی مشتریان تخصیص‌یافته به وسیله نقلیه vام، مسیریابی می‌شوند، به این ترتیب که مورچه از دپوی مرکزی شروع به حرکت کرده و طبق قانون نسبت تصادفی زیر از میان مشتریان تخصیص‌یافته به وسیله نقلیه vام یعنی مجموعه R که مقدارش را از مجموعه C_v گرفته است مشتری بعدی (یعنی مشتری jام) را به‌صورت پی‌درپی تعیین و جواب موردنظر را

Archive of SID
www.SID.ir

ایجاد می‌کند. ارزش تمایل به انتخاب مشتری jام بلافاصله بعد از مشتری iام به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\varepsilon_{ij} = (\tau_{2ij})^{\alpha 2}.\big(s(i,j)\big)^{\beta 2}$$

$\alpha 2$ تأثیر نسبی شدت فرومون و $\beta 2$ بیانگر تأثیر نسبی ارزش صرفه‌جویی[1] است. ارزش صرفه‌جویی $s(i,j) = d_{i0} + d_{0j} - d_{ij}$ بیانگر صرفه‌جویی ناشی از سرویس‌دهی به هر دو مشتری i و j توسط یک وسیله نقلیه نسبت به حالتی است که توسط دو وسیله نقلیه مجزا سرویس‌دهی صورت پذیرد. مفهوم صرفه‌جویی در سال ۱۹۶۴ توسط کِلارک و رایت مطرح شد و این شاخص ابتکاری جواب بهتری نسبت به سایر شاخص‌های ابتکاری برای حل مسئله CVRP توسط سیستم مورچگان به‌دست داده، به‌طوری که در مقالات رِیمان و همکارانش[2] (۲۰۰۲ - ۲۰۰۴)، الگوریتم مذکور با چندین الگوریتم جستجوی ممنوع در مورد مسئله مسیریابی وسایل نقلیه مقایسه شد و نتایج نشان داد که این الگوریتم بهتر از الگوریتم جستجوی ممنوع مورد بررسی، عمل می‌کند. قانون نسبت تصادفی برای انتخاب مشتری jام بلافاصله بعد از مشتری iام به‌صورت زیر است:

$$P_{vi} = \begin{cases} \dfrac{\varepsilon_{ij}}{\sum_{l\in R}\varepsilon_{il}} & if\ \ j \in R \\ 0 & Other\ wise \end{cases} \qquad (۱۶)$$

روند فوق ادامه پیدا می‌کند تا مجموعه Ψ تهی شود.

نکته قابل توجه آنکه در این الگوریتم از قانون تحول وضعیت روش ACS در حل TSP که دستور انتخاب مهاجمانه‌تر و فعال‌تری را نسبت به سایر الگوریتم‌های AS دارد، استفاده می‌شود.

$$j = \begin{cases} arc\ max_{l\in R}\ \varepsilon_{il} & if\ \ q \le q_0 \\ J & otherwise \end{cases} \qquad (۱۷)$$

در این معادله q یک مقدار تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه [0,1] بوده و q_0 یک پارامتر است که به‌صورت $0 \le q_0 \le 1$ تعریف می‌شود. همچنین J توسط توزیع احتمال

1. Saving Value.
2. Reimann, M., Doerner, K., Hartl, R.F., 2002 & 2004.

www.SID.ir
Archive of SID

فوق به‌دست می‌آید. زمانی که یک مورچه در شهر i قرار دارد، برای انتخاب شهر بعدی (j) ابتدا یک مقدار تصادفی q از بازه $[0,1]$ تولید می‌شود و چنانچه مقدار q از q_0 کمتر بود، آنگاه از میان شهرهای موجه برای انتخاب مستقیم، شهری انتخاب می‌شود که بیشترین مقدار عبارت ε_{ij} را داشته باشد؛ یعنی، از اطلاعات گذشته و مقدار فرومون بر جای مانده بهره‌برداری شده و در صورتی که q بزرگ‌تر از q_0 بود از تابع احتمالی بالا برای انتخاب شهر بعدی استفاده می‌شود.

۲-۳. بهبود جواب با استفاده از الگوریتم بهبوددهنده جستجوی محلی

پس از اینکه تمام مشتریان مسیریابی شدند و در واقع یک جواب کامل تشکیل گردید با استفاده از الگوریتم بهبوددهنده $2-Opt$ مسیرهای تولید شده فعلی را به سمت بهینه محلی ارتقا می‌دهیم.

۳-۳. به‌روزآوری فرومون با استفاده از راه‌کار مورچه نخبه

در این روش با استفاده از راه‌کار مورچه‌های نخبه، مسیرهای پیموده شده بهنگام می‌شوند. برای فاز (۱) خواهیم داشت:

$$\tau_{1vi}{}^{new} = \rho.\tau_{1vi}{}^{old} + \sum_{r=1}^{w-1}(w-r).\Delta\tau_{1vi}{}^{r} + w.\Delta\tau_{1vi}{}^{bs};\ v \in V;\ \ i \in N \qquad (۱۸)$$

$$\Delta\tau_{1vi}{}^{r} = \begin{cases} \frac{1}{L^r} & \text{اگر مشتری } i\text{ام توسط وسیله نقلیه } V\text{ام در جواب } r \text{ امین مورچه نخبه سرویس‌دهی شود.} \\ 0 & \text{در غیر این صورت:} \end{cases} \qquad (۱۹)$$

$$\Delta\tau_{1ki}{}^{bs} = \begin{cases} \frac{1}{L^{bs}} & \text{اگر مشتری } i\text{ام توسط وسیله نقلیه } V\text{ام در بهترین جواب پیدا شده تاکنون سرویس‌دهی شود.} \\ 0 & \text{در غیر این صورت:} \end{cases} \qquad (۲۰)$$

به طوری که L^r طول دور کامل تشکیل شده در جواب r امین مورچه نخبه و L^{bs} طول دور کامل بهترین جواب ایجاد شده تاکنون است.

Archive of SID

www.SID.ir

همچنین برای فاز دوم خواهیم داشت:

$$\tau_{2ij}{}^{new} = \rho.\tau_{2ij}{}^{old} + \sum_{r=1}^{w-1}(w-r).\ \Delta\tau_{2ij}{}^{r} + w.\Delta\tau_{2ij}{}^{bs} \quad ; v \in V\ ;\ i \in N \tag{۲۱}$$

$$\Delta\tau_{2ij}{}^{r} = \begin{cases} \frac{1}{L^r} \\ 0 \end{cases} \tag{۲۲}$$

اگر مشتری iام توسط وسیله نقلیه vام در جواب r امین مورچه نخبه سرویس‌دهی شود.
در غیر این صورت:

$$\Delta\tau_{2ij}{}^{bs} = \begin{cases} \frac{1}{L^{bs}} \\ 0 \end{cases} \tag{۲۳}$$

اگر مشتری iام توسط وسیله نقلیه Vام در بهترین جواب پیدا شده تاکنون سرویس‌دهی شود.
در غیر این صورت:

گرچه اهمیت بیشتر به جواب بهترین مورچه نخبه و اهمیت کمتر به جواب سایر مورچه‌های نخبه، می‌تواند عملیات جستجو را به سمت مینیمم کلی منحرف کند، اما ریسک قرار گرفتن در دام مینیمم محلی را افزایش می‌دهد، لذا ما در این الگوریتم فرآیند به‌روزآوری فرومون برای تمام مورچگان نخبه را با اهمیت یکسان در نظر گرفته‌ایم.

۴. مثال عددی

به‌منظور تست صحت عملکرد الگوریتم کلونی مورچه پیشنهادی و کارا بودن آن برای توسعه در شبکه حمل‌ونقل ایران، با توجه به محدودیت‌های جدیدی که هم‌زمان برای مسئله VRP موردنظر، ارائه شده، ابتدا لازم است تا مسائل آزمون مناسب با توجه به شبکه توزیع دنیای واقعی طراحی شده، پارامترهای اصلی مسئله در شرایط مختلف تست گردیده و بهترین مقدار ممکن برای حل مسئله در نظر گرفته شود و سپس برای اعتبارسنجی آن، جواب حاصل را با یک الگوریتم ابتکاری و یا فرا ابتکاری مقایسه کرد. در ادامه به تشریح موارد فوق پرداخته می‌شود.

۴-۱.تنظیم پارامترها

کیفیت جواب‌های به‌دست آمده از حل مسئله با الگوریتم پیشنهادی، به تعداد مورچگان مورداستفاده، حداقل تکرار و شرط توقف در نظر گرفته شده، بستگی دارد. درمورد شرط توقف، حداقل تکرار بین ۵۰-۱۰۰ (با توجه به ابعاد مسئله) برای برنامه درنظر گرفته شود و در صورتی‌که بعد از ۲۰ تکرار در بهترین جواب حاصل شده تغییری ایجاد

Archive of SID
www.SID.ir

نشود، مسئله متوقف گردد. تعداد مورچه برای مسائل کوچک ۲۵ و مسائل بزرگ‌تر ۵۰ و همچنین در مورد سایر پارامترها پس از تست، مقادیر زیر برای الگوریتم در نظر گرفته شد. مقادیر شدت اثر فرومون و قابلیت مرئی بودن (شاخص ابتکاری) در دو فاز الگوریتم به‌این صورت است: $\alpha 1 = \beta 1 = 3$ و $\alpha 2 = \beta 2 = 1$. مقدار W (تعداد مورچه‌های نخبه) برابر با ۶ و برای پارامتر ρ (ضریب تبخیر فرومون) مقدار ۰/۹۵ را در نظر گرفته شد و مقدار q_0 برابر با ۰/۹، جواب‌های مناسب‌تری را ارائه داد. فرآیند تقسیم تقاضا بر پایه دو نگرش کدنویسی شد، یکی بر اساس ماکزیمم ظرفیت وسیله نقلیه در دسترس و نگرش دوم براساس فرآیند نصف شدن تقاضا با توجه به ظرفیت بزرگ‌ترین وسیله نقلیه در دسترس که با تست کردن هر دو روش، روش اول جواب بهتری را ارائه داد.

۲-۴. مسائل آزمون و تحلیل نتایج

از آنجا که این مسئله و محدودیت‌های آن براساس نیازهایی که در دنیای واقعی امکان برخورد با آن‌ها وجود دارد، طراحی و مدل‌سازی شده است و همچنین کاربردهای بسیار مبحث حمل‌ونقل و تعدد و تنوع آن به‌عنوان یکی از جذابیت‌های شبکه توزیع، محقق برآن شد تا مسائل آزمون را با استفاده از داده‌های دنیای واقعی، طراحی کند، لذا از یک شرکت توزیع‌کننده کالا (وابسته به یک شرکت تولیدکننده انبوه در حوزه قطعات خودرو) که انبار مرکزی آن در شهر تهران قرار دارد به‌عنوان مطالعه موردی استفاده شد. نکته قابل ذکر آن است که اطلاعات مربوط به ۱- مشتریان (تعداد مشتریان و تقاضا) ۲- وسایل حمل‌ونقل (از لحاظ تنوع وسایل در دسترس) ۳- عدم امکان سرویس‌دهی بعضی وسایل نقلیه به بعضی از مشتریان مشخص و اطلاعات مربوطه باید به‌صورت روزانه بهنگام شود و همچنین امکان اجرای برنامه به دفعات و با زمان معقول در طول روز امکان‌پذیر باشد. با توجه به شرایط فوق، ۱۴ مسئله با ابعاد مختلف (تعداد مشتریان و تعداد وسایل موجود) براساس اطلاعات موجود در شرکت موردنظر طراحی شد. تعداد مشتریان بین ۶ تا ۵۰ مشتری، متغیر می‌باشد. حداکثر چهار نوع وسیله نقلیه (۱ تنی، ۳/۵ تنی، ۶/۵ تنی و ۱۰ تنی) و حداقل سه نوع (۱ تنی، ۳/۵ تنی و ۶/۵ تنی) به تعداد نامحدود در اختیار دپوی مرکزی است و تابع هدف کمینه‌سازی هزینه می‌باشد.

Archive of SID
www.SID.ir

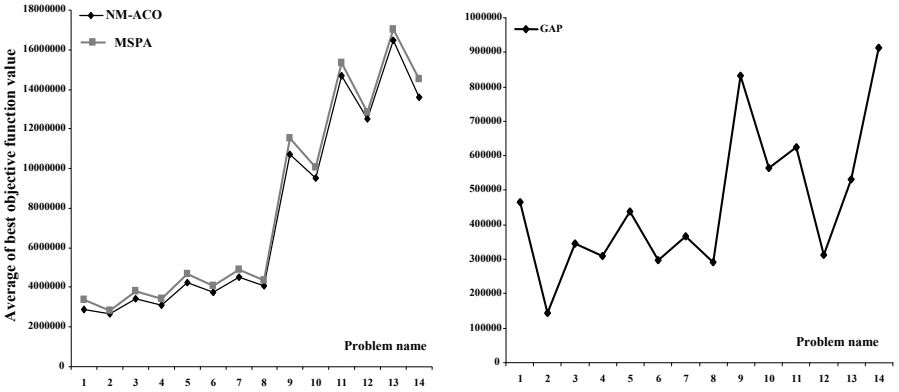
ابتدا برای تست عملکرد الگوریتم پیشنهادی، یک مسئله با ابعاد کوچک (*TP01*) را با روشی دقیق، حل و با جواب الگوریتم موردنظر مقایسه کرده که کاملاً باهم برابر بودند (جدول ۲). در حالتی که هم ترکیب مسئله و هم روش حل جدید می‌باشد، برای اعتبارسنجی روش حل پیشنهادی باید مدل را با یک الگوریتم ابتکاری یا فرا ابتکاری دیگر حل نموده و بسته به نوع تابع هدف از آن به‌عنوان حدبالایی یا حدپایینی نتایج مسئله استفاده نموده و الگوریتم حل مورد ارزیابی قرار گیرد، لذا محقق برای تحلیل کارایی نتایج حاصل از الگوریتم فرا ابتکاری پیشنهادی، یک الگوریتم ابتکاری کوتاه‌ترین مسیر اصلاح شده[1] با استفاده از جستجوی محلی $Opt-2$ را با توجه به شرایط خاص مسئله طراحی و کدنویسی نموده و به‌عنوان یک حد بالا برای مسائل آزمون در جهت موجه نشان دادن نتایج استفاده کرده است.

جدول ۲- مقایسه نتایج روش‌های MSPA و NM-ACO

ردیف	نام مسئله	k	n	W	m	Min Iteration	Average of best solution MSPA	Average of best solution Proposed ACO
۱	TP_{01}	۳	۶	۶	۲۵	۵۰	۳۳۴۸۰۶۰	۲۸۸۲۳۴۰
۲	TP_{02}	۴	۶	۶	۲۵	۵۰	۲۸۳۴۷۴۰	۲۶۹۰۸۰۰
۳	TP_{03}	۳	۱۰	۶	۴۰	۸۰	۳۷۸۴۹۶۰	۳۴۳۹۶۶۰
۴	TP_{04}	۴	۱۰	۶	۴۰	۸۰	۳۴۲۰۹۲۰	۳۱۱۰۷۴۰
۵	TP_{05}	۳	۱۵	۶	۴۰	۸۰	۴۷۰۱۴۴۰	۴۲۶۴۲۶۰
۶	TP_{06}	۳	۱۵	۶	۴۰	۸۰	۴۰۶۲۴۸۰	۳۷۶۵۱۶۰
۷	TP_{07}	۴	۲۰	۶	۵۰	۸۰	۴۸۹۷۲۱۰	۴۵۳۰۱۰۰
۸	TP_{08}	۳	۲۰	۶	۵۰	۸۰	۴۳۴۶۵۵۰	۴۰۵۴۳۰۰
۹	TP_{09}	۳	۳۰	۶	۵۰	۸۰	۱۱۵۱۹۲۹۰	۱۰۶۸۷۲۶۰
۱۰	TP_{10}	۴	۳۰	۶	۵۰	۸۰	۱۰۰۸۵۳۸۰	۹۵۱۹۳۶۰
۱۱	TP_{11}	۳	۴۰	۶	۵۰	۸۰	۱۵۳۱۰۰۵۰	۱۴۶۸۴۵۴۰
۱۲	TP_{12}	۴	۴۰	۶	۵۰	۸۰	۱۲۸۰۷۸۴۰	۱۲۴۹۴۳۰۰
۱۳	TP_{13}	۳	۵۰	۶	۵۰	۸۰	۱۷۰۳۳۰۴۰	۱۶۵۰۱۸۶۰
۱۴	TP_{14}	۴	۵۰	۶	۵۰	۸۰	۱۴۴۹۳۵۲۰	۱۳۵۸۱۸۰۰

1. Modified Shortest Path Algorithm.

Archive of SID
www.SID.ir



نمودار ۳- مقایسه نتایج دو الگوریتم MSPA و NM-ACO

با توجه به نتایج به‌دست آمده (نمودار ۳) می‌توان استنباط کرد که الگوریتم پیشنهادی، نتایج منطقی و خوبی را برای مسئله جدید طراحی‌شده به ما ارائه می‌دهد. از طرفی برای هر مسئله، مقادیر مختلف تعداد مورچه و حداقل تکرار برای الگوریتم را تست کرده و بهترین نتایج آن در جدول (۲) آورده شده است.

۳-۴.تحلیل آماری

به‌منظور تحلیل و بررسی وجود تفاوت معنادار بین جواب‌های حاصل از روش‌های MSPP و NM-ACO از روش Paired-Data Test (Paired t-test) با جزئیات زیر استفاده کرده‌ایم. ۱۴ مسئله با شرایط متفاوت را با استفاده از دو الگوریتم پیشنهاد شده مورد آزمون قرار دادیم، بنابراین دو جامعه آماری، از یکدیگر مستقل نیستند، از طرفی می‌خواهیم به این نکته پی ببریم که آیا اختلاف معناداری بین جواب‌های حاصل از این دو الگوریتم وجود دارد یا خیر؟ بنابر توضیحات فوق مناسب‌ترین تست برای این مسئله، آزمون مقایسات دوبه‌دو است.

$$\begin{cases} H_0: & \mu_d = 0 \\ H_1: & \mu_d > 0 \end{cases}$$

Archive of SID

www.SID.ir

در این تست نتایج را به‌صورت دوبه‌دو با هم مقایسه می‌کنیم، به این صورت‌که اختلاف بین دو نتیجه (d) را برای هر مسئله محاسبه می‌کنیم، سپس میانگین و پراش این پارامتر را به‌دست آورده که d دارای توزیع t با $n-1$ درجه آزادی با تابع احتمال زیر است:

$$s_d^2 = \frac{\sum(d-\bar{d})^2}{n-1}$$

این تست برای $P_{value} = 0.05$ انجام شد و چنانچه مقدار حاصل از این توزیع از مقدار موجود در جدول مربوط به توزیع t با درجه آزادی ۱۳ و $P_{value} = 0.05$ بزرگ‌تر باشد، فرض H_0 رد و معنادار بودن نتایج به اثبات می‌رسد. با توجه به نتایج، فرض H_0 رد و فرض معنادار بودن نتایج با احتمال ۹۵ درصد پذیرفته شد.

$$t = \frac{\bar{d}-\mu_d}{s_d/\sqrt{n}}$$

جدول ۳- خلاصه نتایج آزمون فرض مربوط به تحلیل نتایج الگوریتم پیشنهادی

MSPA	*MACO*	d	$d-\bar{d}$	$(d-\bar{d})^2$	
۳۳۴۸۰۶۰	۲۸۸۲۳۴۰	۴۶۵۷۲۰	۳۳۱۵۷۴	۱۰۹۹۴۱۴۲۸۰۰۱	
۲۶۹۰۸۰۰	۱۹۲۱۰۳۷	۱۴۳۹۴۰	۹۷۹۴.۲	۹۵۹۲۵۷۰۱	
۳۷۸۴۹۶۰	۳۴۳۹۶۶۰	۳۴۵۳۰۰	۲۱۱۱۵۴	۴۴۵۸۶۰۸۲۱۰۱	$S_d^2 = ۴۴۵۲۷۰۷۵۳۲۶$
۳۱۱۰۷۴۰	۲۹۶۷۶۲۰	۳۱۰۱۸۰	۱۷۶۰۳۴	۳۰۹۸۸۰۲۷۸۳۴	$S_d = ۲۶۲۱۳۷/۲۳$
۴۷۰۱۴۴۰	۴۲۶۴۲۶۰	۴۳۷۱۸۰	۳۰۳۰۳۴	۹۱۸۲۹۷۰۶۱۶۷	
۴۰۶۲۴۸۰	۳۷۶۵۱۶۰	۲۹۷۳۲۰	۱۶۳۱۷۴	۲۶۶۲۵۸۰۸۶۶۷	
۴۵۳۰۱۰۰	۷۶۳۷۹۷۳	۳۶۷۱۱۰	۲۳۲۹۶۴	۵۴۲۷۲۳۰۲۹۵۱	
۴۰۵۴۳۰۰	۷۶۳۵۶۳۶	۲۹۲۲۵۰	۱۵۸۱۰۴	۲۴۹۹۶۹۲۷۵۱۷	$t = 3.5464 > 1.833$
۱۱۵۱۹۲۹۰	۱۰۶۸۷۲۶۰	۸۳۲۰۳۰	۶۹۷۸۸۴	۴۸۷۰۴۲۳۱۰۰۸۴	$P_{value} = 0.05$
۱۰۰۸۵۳۸۰	۹۵۱۹۳۶۰	۵۶۶۰۲۰	۴۳۱۸۷۴	۱۸۶۵۱۵۲۹۵۸۳۴	
۱۵۳۱۰۰۵۰	۱۴۶۸۴۵۴۰	۶۲۵۵۱۰	۴۹۱۳۶۴	۲۴۱۴۳۸۷۴۴۲۸۴	
۱۲۸۰۷۸۴۰	۱۲۴۹۴۳۰۰	۳۱۳۵۴۰	۱۷۹۳۹۴	۳۲۱۸۲۲۶۷۰۳۴	
۱۷۰۳۳۰۴۰	۱۶۵۰۱۸۶۰	۵۳۱۱۸۰	۳۹۷۰۳۴	۱۵۷۶۳۶۱۲۹۵۰۱	
۱۴۴۹۳۵۲۰	۱۳۵۸۱۸۰۰	۹۱۱۷۲۰	۷۷۷۵۷۴	۶۰۴۶۲۱۵۸۴۶۶۷	
		$\bar{d} = ۱۳۴۱۴۵/۸$	$\sum (d-\bar{d})^2 = ۲۰۹۲۷۷۲۵۴۰۳۴۳$		

Archive of SID

www.SID.ir

نتیجه‌گیری

وجود رقابت در توزیع کالا سبب شده است تا تنها اتکا به پیدا کردن مسیرهای کوتاه و با هزینه کمتر نتواند انتظار مدیران در باب مسیریابی ناوگان توزیع را جواب‌گو باشد. بنابراین سیستم توزیع کالا به‌عنوان بخش مهمی از فرآیند بازاریابی داخلی و بین‌المللی، می‌تواند در کنار و در خدمت تجارت و صنعت حمل و نقل کالای دنیا قرار بگیرد و مسیریابی وسایل نقلیه در این میان نقش ارزنده‌ای را ایفا می‌کند. در این مقاله با رجوع به مطالعات انجام شده در این زمینه، مسئله مسیریابی ناوگان ناهمگن وسایل نقلیه، با امکان تقسیم تقاضای یک مشتری بین وسایل نقلیه مختلف (VFMPSS) و محدودیت عدم امکان استفاده بعضی از مشتریان از بعضی وسایل نقلیه، تعریف و مدل‌سازی شد. با مرور ادبیات در حوزه روش‌های حل مسئله VRP، الگوریتم کلونی مورچه با توجه به نتایج بهتری که نسبت به سایر روش‌ها به‌دست داده است، انتخاب گردید. الگوریتم پیشنهادی تحت عنوان کلونی مورچه چندگانه و متشکل از دو فاز تخصیص و مسیریابی برای مسئله طراحی شده است. از نکات حائز اهمیت آنکه تعداد پارامترهای ورودی مسئله نسبتاً زیاد بوده، لذا از پیچیدگی خاصی برخوردار بوده و نتایج، نشان از اجرای الگوریتم در زمان معقول و مناسب برای مسائل آزمون طراحی شده را دارد، لذا موارد زیر را می‌توان توصیه نمود:

۱- از نتایج این تحقیق می‌توان برای شرکت‌های توزیع (در صنایع مختلف) و همچنین شرکت‌های تولیدکننده انبوه که وظیفه توزیع کالای خود را در سطح کشور به‌عهده دارند، استفاده کرد. به‌کارگیری این الگو ضمن کاهش هزینه‌های سازمان از نظر ساماندهی سیستم سفارشات، باعث افزایش رضایتمندی مشتریان و تحویل به‌موقع کالا به آن‌ها خواهد شد.

۲- می‌توان محدودیت عملیاتی دیگری از قبیل عدم امکان حرکت بعضی از وسایل نقلیه در بعضی از مسیرها را نیز به مسئله اضافه کرد.

Archive of SID

www.SID.ir

منابع

Belfiore. P., Yoshizaki. H.T.Y., (2009); "Scattersearch for A Real-life Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem with Time Windows and Split Deliveries in Brazil", *European Journal of Operational Research.*, Volume 199, Issue 3, Pages 750–758.

Brandão, J. (2011). "A Tabu Search Algorithm for the Heterogeneous Fixed Fleet Vehicle Routing Problem", Computers & Operations Research 38(1): 140-151.

Choi, E., Tcha, D.-W., (2007); A Column Generation Approach to the Heterogeneous Fleet Vehicle Routing, Computers & Operations Research 34, 2080–2095.

Cordeau, J.F., Laporte, G., Savelsbergh, M.W.P., Vigo, D., (2007); Vehicle Routing. In: Barnhart, C., Laporte, G. (Eds.), Transportation (Handbooks in Operations Research and Management Science vol. 14). Elsevier, Amsterdam, pp. 367–428.

Dror, M., Trudeau, P., (1990); Split Delivery Routing, Naval Research Logistics 37, 383– 402.

Euchi, J. and R. Mraihi (2012). "The Urban Bus Routing Problem in the Tunisian Case by the Hybrid Artificial Ant Colony Algorithm", Swarm and Evolutionary Computation2(0): 15-24.

Gajpal, Y., Abad, P.L., (2009); "Multi-Ant Colony System (MACS) for a Vehicle Routing Problem with Backhauls", *European Journal of Operational Research*, Vol 196, Issue 1, Pages 102-117.

Gendreau, M., Laporte, G., Musaraganyi, C., Taillard, E.D., (1999); A Tabu Search Heuristic for the Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem, Computers & Operations Research 26, 1153–1173.

Gheysens, F., Golden, B., Assad, A., (1984); A Comparison of Techniques for Solving the Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem, Operations Research Spectrum 6, 207–216.

Golden, B., Magnanti,T., Neguyen, H. (1997); "Implementing Vehicle Routing Algorithms" Networks Vol.7 PP 113-148.

Golden, B.L., Assad, A., Levy, L., Gheysens, F., (1984); The Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem, Computers & Operations Research 11, 49–65.

Archive of SID

www.SID.ir

Gulczynski. D., Golden. B., Wasil. E., (2010); "The Split Delivery Vehicle Routing Problem with Minimum Delivery Amounts", Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Volume 46, Issue 5, September 2010, Pages 612–626.

Ho, S.C., Haugland, D., (2004); A Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem With Time Windows and Split Deliveries, Computers & Operations Research 31, 1947–1964.

Jin. M., Liu.K., Eksioglu.B., (2008); "A Column Generation Approach for the Split Delivery Vehicle Routing Problem", Operations Research Letters, Volume 36, Issue 2Pages 265–270.

Lima, C.M.R.R., Goldbarg, M.C., Goldbarg, E.F.G., (2004); A Memetic Algorithm for the Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem, Electronic Notes in Discrete Mathematics 18.

Mullaseril, P.A., Dror, M., Leung, J., (1997); Split-Delivery Routing Heuristics in Livestock Feed Distribution, *Journal of the Operational Research Society* 48, 107–116.

Osman, I.H., Salhi, S., (1996); Local Search Strategies for the Mix Fleet Routing Problem, In: Rayward-Smith, V.J., Osman, I.H., Reeves, C.R., Smith, G.D. (Eds.), Modern Heuristic Search Methods. Wiley, Chichester, pp. 131–153.

Prins, CH., (2009); "Two Memetic Algorithms for Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problems", Engineering Applications of Artificial Intelligence, Volume 22, Issue 6, Pages 916–928.

Reimann, M., Doerner, K., Hartl, R.F., Ants, D., (2004); Savings Based Ants Divide and Conquer the Vehicle Routing Problem, Computers and Operations Research 31, 563–591.

Repoussis, P. P. and C. D. Tarantilis (2010); "Solving the Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem with Time Windows via Adaptive Memory Programming." Transportation Research Part C: Emerging Technologies 18(5): 695-712.

Salhi, S., Rand, G.K., (1993); Incorporating Vehicle Routing into the Vehicle Fleet Composition Problem, *European Journal of Operational Research 66*, 313–330.

Taillard, ED, (1999); A Heuristic Column Generation Method for the Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem, Rairo 33, 1–14.

Archive of SID

www.SID.ir

Tavakkoli-Moghaddam.R., Safaei.N., (2007); "A New Capacitated Vehicle Routing Problem with Split Service for Minimizing Fleet Cost by Simulated Annealing" *Journal of the Franklin Institute* 344, 406–425.

Toth, P., Vigo, D., (2002); The Vehicle Routing Problem. SIAM, Philadelphia.

Xiao, Z. and W. Jiang-qing (2012); "Hybrid Ant Algorithm and Applications for Vehicle Routing Problem." Physics Procedia 25(0): 1892-1899.

Yaman, H., (2006); Formulations and Valid Inequalities for the Heterogeneous Vehicle Routing Problem, Math. Program. Series A 106, 365–390.

Yu, B., Z.-Z. Yang, et al. (2009); "An Improved Ant Colony Optimization for Vehicle Routing Problem", *European Journal of Operational Research* 196(1): 171-176.

Zhang, X. and L. Tang (2009); "A New Hybrid Ant Colony Optimization Algorithm for the Vehicle Routing Problem." Pattern Recognition Letters 30(9): 848-855.

Archive of SID

www.SID.ir