

الگوریتم مؤثر رقابتی فراگیر برای حل مسئله مسیریابی وسیله نقلیه باز

مجید یوسفی خوشبخت*، مربی، دانشکده ریاضی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد همدان، باشگاه پژوهشگران جوان، همدان، ایران
فرزاد دیده‌ور، استادیار، دانشکده ریاضی و علوم کامپیوتر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
فرهاد رحمتی، دانشیار، دانشکده ریاضی و علوم کامپیوتر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
محمد صدیق‌پور، مربی، دانشکده ریاضی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد همدان، همدان، ایران

E-mail: khoshbakht@iauh.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۰/۰۶/۱۵ - پذیرش: ۱۳۹۰/۱۲/۱۴

چکیده

مسئله مسیریابی وسیله نقلیه باز^۱ (OVRP) یکی از مهم‌ترین گسترش‌های مسئله مسیریابی وسیله نقلیه^۲ (VRP) است که امروزه به علت کاربردهای فراوان در مسایل صنعتی و خدماتی توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. هدف در این مسئله کمینه‌سازی هزینه برای مسیرهای یک ناوگان از وسایل نقلیه است که از انبار کالا شروع به حرکت کرده و تقاضاهای مشتری‌ها را برآورد می‌کنند. باید توجه کرد که در این مسئله وسایل نقلیه مجبور نیستند که به انبار بازگردند. این مقاله، یک روش مؤثر رقابتی فراگیر^۳ (ICA) به عنوان یک الگوریتم جدید فراابتکاری برای حل این مسئله ارائه می‌کند. الگوریتم پیشنهادی روی بیست و دو مثال OVRP شامل ۵۰ تا ۸۰ مشتری مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج محاسباتی نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی با دیگر نتایج روش‌های فراابتکاری برای حل OVRP قابل رقابت است. همچنین نه عدد از بهترین جواب‌هایی که تاکنون حاصل شده، با استفاده از الگوریتم پیشنهادی به دست آمده است.

واژه‌های کلیدی: مسئله مسیریابی وسیله نقلیه باز، الگوریتم رقابتی فراگیر، مسایل بهینه‌سازی ترکیباتی

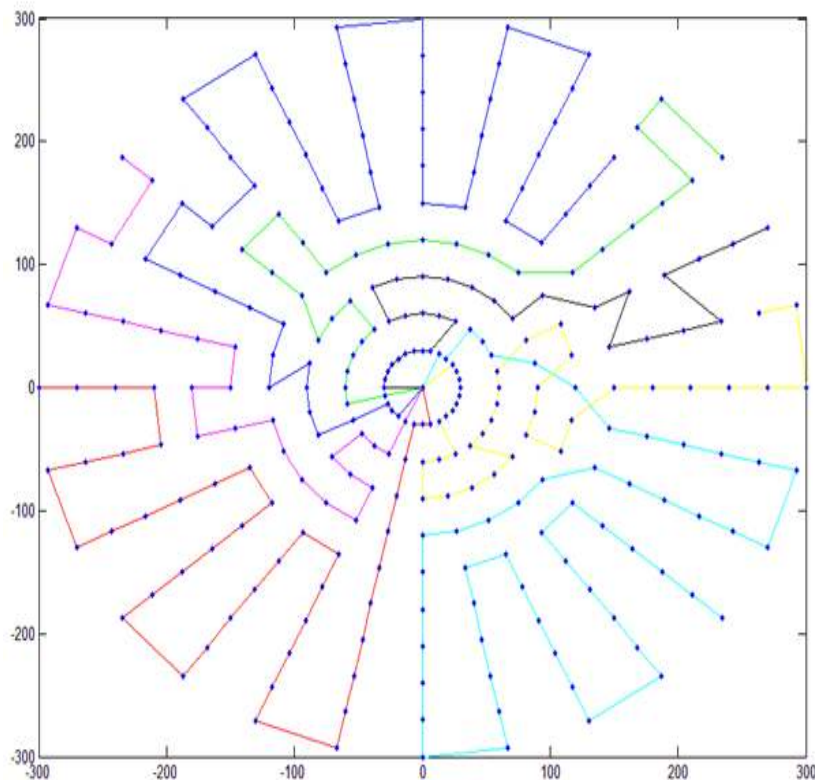
۱- مقدمه

محصولات تأثیر دارد. به‌علاوه، این مسئله که یکی از گسترش‌های مشهور مسئله مسیریابی وسیله نقلیه (VRP) است، در سال‌های اخیر به‌علت کاربردهای فراوانی که در مسایل روزمره دارد، بسیار مورد توجه دانشمندان و محققان قرار می‌گیرد (ربانی، سپهری، ذگردی، ۱۳۸۷). در مسئله OVRP ناوگانی از وسایل نقلیه از یک نقطه به نام انبار کالا شروع به حرکت کرده و به تعدادی از مشتری‌ها سرویس‌دهی می‌کنند، به شرط آن‌که هر مشتری فقط یک‌بار مورد ملاقات قرار گیرد و هر وسیله نقلیه در هیچ زمانی بیشتر از ظرفیت خود بارگذاری نکند. باید توجه کرد که همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، وسایل نقلیه در این مسئله برخلاف مسئله VRP لازم نیست که بعد از تحویل

به علت قابل توجه بودن مبلغ توزیع کالا نسبت به هزینه تولید، صرفه‌جویی در آن به‌طور مستقیم روی هزینه تمام شده کالا تأثیر دارد، بنابراین، توجه به مسایل توزیع کالا و به‌خصوص بهبود کارایی در حمل و نقل آن از اهمیت زیادی برخوردار است و باعث صرفه‌جویی در قیمت تمام شده کالا می‌شود و سبب می‌گردد شرکت‌های صنعتی و خدماتی قابلیت بیشتری برای رقابت در برابر رقبای خود داشته باشند و بتوانند با قیمت کمتری کالای خود را به دست خریداران برسانند و در نهایت با افزایش فروش کالاهای خود، سود بیشتری را کسب کنند. مسئله مسیریابی وسیله نقلیه باز (OVRP) یکی از مهم‌ترین مسایل توزیع کالا است که به‌طور مستقیم روی قیمت تمام شده

برخوردار است و حل کارای آن سبب کاهش هزینه تمام شده کالا در هنگام تحویل به مشتری می‌شود. به‌علاوه به علت ساختار پیچیده‌ای که این مسئله دارد، تعدادی از الگوریتم‌های فراابتکاری مناسب برای حل مسئله VRP، برای حل مسئله OVRP مناسب نیستند؛ علی‌رغم اینکه این مسئله دارای اختلاف بسیار کوچکی با مسئله VRP است. بنابراین، در این مقاله روش ICA، که یکی از جدیدترین الگوریتم‌های تکاملی نیز محسوب می‌شود، برای حل مسئله OVRP مورد استفاده قرار می‌گیرد که در بخش‌های آینده با جزئیات کافی مورد توجه قرار گرفته و به نتایج آن پرداخته می‌شود. در این مقاله ابتدا تاریخچه OVRP در بخش ۲ ارائه می‌گردد و سپس در بخش ۳ به توضیح روش پیشنهادی پرداخته می‌شود. در این بخش ابتدا الگوریتم رقابتی فراگیر توضیح و سپس روش پیشنهادی برای حل مسئله شرح داده می‌شود. در بخش ۴ نتایج محاسباتی که روی مثال‌های استاندارد اجرا شده است ارائه می‌گردد و در بخش ۵ نتیجه‌گیری و جهت‌گیری‌های آینده نشان داده می‌شود.

کالا به انبار بازگردند (ظفری، تشکری هاشمی، یوسفی خوشبخت، ۱۳۸۹). هدف در این مسئله یافتن مسیریابی برای ناوگان وسایل نقلیه با کمترین هزینه است. مسئله OVRP در مسایل واقعی زیادی اتفاق می‌افتد؛ به طور مثال فرض کنید که یک شرکت تولیدی برای پخش کالای خود با یک شرکت حمل و نقل، قراردادی بسته است که طبق آن یک ناوگان از وسایل نقلیه هر روز وظیفه دارند که کالای مشخصی را از انبار شرکت بارگذاری کرده و به مشتری‌ها تحویل دهند. در اینجا باید توجه داشت که به‌علت اجاره‌ای بودن ناوگان مربوطه، این ناوگان فقط وظیفه دارد که مأموریت محوله را انجام داده و دیگر احتیاج نیست که بعد از اتمام عملیات به انبار کالا بازگردد. الگوریتم ICA یکی از کاراترین الگوریتم‌های فراابتکاری است که تاکنون روی مسایل گوناگون تحقیق در عملیات که دارای فضای شدنی پیوسته هستند، مورد استفاده قرار گرفته و نتایج بسیار خوبی را به‌دست آورده است. از طرف دیگر همان‌طور که در این فصل به آن اشاره شد، امروزه مسئله OVRP از اهمیت بسیار زیادی



شکل ۱. نمونه‌ای از حل یک مسئله OVRP

۲- تاریخچه مسئله

کاربردهای گسترده و پیچیدگی زیاد مسئله OVRP سبب شده است که این مسئله در چند دهه اخیر بسیار مورد توجه قرار گیرد. اگر چه الگوریتم‌های حل این مسئله همانند مسایل دیگر بهینه‌سازی ترکیباتی به دو دسته دقیق و ابتکاری تقسیم‌بندی می‌شود، ولی سخت بودن این مسئله سبب شده است که الگوریتم‌های دقیق کارایی خود را در هنگام افزایش اندازه مسئله از دست بدهند، زیرا هر چه اندازه مسئله بزرگ شود، تعداد جواب‌های شدنی مسئله نیز به سرعت افزایش می‌یابد و الگوریتم برای یافتن جواب بهینه به زمان بیشتری نیاز دارد. بنابراین، دانشمندان برای حل این گونه مسایل از الگوریتم‌های ابتکاری استفاده می‌کنند تا به این ترتیب بتوانند علی‌رغم به‌دست نیاموردن جواب بهینه مسئله در یک زمان قابل قبول، جواب نزدیک به بهینه را به‌دست آورند. یکی از قدیمی‌ترین کارهایی که روی مسئله OVRP انجام شد و سعی کرد که این مسئله عملی را مورد بررسی قرار داده و طبقه‌بندی کند، به وسیله اسچراج^۴ در سال ۱۹۸۱ انجام شد (Schrage, 1981). او این مسئله را به صورت زیر تعریف می‌کند:

"یک مسئله مسیریابی وسیله نقلیه بر اساس سه مشخصه ظرفیت، هزینه و VRP یا OVRP بودن مورد شناسایی قرار می‌گیرد. در یک مسئله مسیریابی بسته وسایل نقلیه مجبور هستند که بعد از انجام خدمات به انبار برگردند. ولی این شرط برای مسایل مسیریابی باز برقرار نیست و وسایل نقلیه دیگر به انبار باز نمی‌گردند." بنابراین، شرط اینکه مسئله VRP یک مسئله باز یا بسته است، بسیار مهم تلقی می‌شود.

به‌علاوه بودین^۵ و همکارانش از اولین کسانی بودند (Bodin, Golden, and Assad, 1983) که مسئله OVRP را در زندگی روزمره تطبیق داده و آن را برای حل مسئله توزیع پستی هوایی با چندین محدودیت پنجره زمانی دریافت و تحویل کالا، طول کل مسیر پیموده شده توسط هر وسیله نقلیه و ظرفیت هر وسیله نقلیه مورد استفاده قرار دادند. آنها برای حل این مسئله از روش صرفه‌جو استفاده کرده و مسئله را چه در حالتی که هر مشتری فقط دریافت کننده و یا فقط تحویل دهنده کالا باشد، حل کردند. تاراتیلس^۶ و همکارانش روشی دیگر برای حل همین مسئله ارائه دادند (Tarantilis, Diakoulaki and Kiranoudis, 2004).

روش آنها یک روش ابتکاری جمعیت محور^۷ بود که در سال ۲۰۰۴ ارائه شد. در سال ۲۰۰۵ همین افراد مسئله را با جزییات بیشتری مورد بررسی قرار داده و روش نقطه شروع قابل قبول^۸ را برای مسئله پیشنهاد دادند (Tarantilis et al., 2005). روش جستجوی ممنوع^۹ (TS) که یکی از قدیمی‌ترین روش‌های فراابتکاری است و دارای راه‌کارهای بسیار خوبی برای فرار از نقاط بهینه محلی است در سال ۲۰۰۶ به وسیله فو^{۱۰} و همکارانش برای حل این مسئله، به همراه محدودیت طول مسیر برای هر وسیله نقلیه، ارائه شد (Fu, Eglese and Li, 2005). البته روش‌های دیگری نیز تا این زمان برای حل این مسئله وجود دارند که می‌توان برای اطلاع بیشتر از (Repoussis, Tarantilis and Ioannou, 2006) استفاده کرد.

همچنین پسینگر^{۱۱} و راپک^{۱۲} از یک روش جستجوی همسایه تطابقی^{۱۳} برای حل مسئله استفاده کردند (Pisinger and Ropke, 2007). از طرف دیگر لچفورد^{۱۴} و همکارانش در سال ۲۰۰۷ یک روش دقیق برای حل مسئله پیشنهاد کردند. روش شاخه و کران^{۱۵} آنها در مقایسه با روش‌های دیگر که در ادبیات موضوع برای مسئله مربوطه ارائه شده بودند، توانست که برای مثال‌های کوچک و متوسط جواب‌های بهتری را به‌دست آورده و به جواب‌های بهینه دست یابد (Letchford, Lysgaard and Eglese, 2007). لی^{۱۶} و همکارانش در همین سال الگوریتم ثبت به ثبت^{۱۷} را برای این مسئله پیاده‌سازی کردند. آنها برای تست کارایی الگوریتم، تعدادی از مسایل با ۲۰۰ تا ۴۸۰ مشتری را در نظر گرفتند و نتایج الگوریتم پیشنهادی خود را برای این مسایل گزارش دادند (Li, Golden and Wasil, 2007). همچنین در سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ به ترتیب روسل^{۱۸} و همکارانش (Russell, Chiang, and David, 2008) و همچنین چاینگ^{۱۹} و همکارانش (Chiang et al., 2009) مسئله تولید و توزیع روزنامه به خانه‌ها و مرکز کاری را به این مسئله تبدیل کرده و آن را به-وسیله روش TS مورد حل قرار دادند. به‌علاوه الگوریتم جستجوی همسایه متغیر^{۲۰} در سال ۲۰۰۹ توسط فلزار^{۲۱} و همکارانش برای حل مسئله OVRP ارائه شد. این الگوریتم بر اساس وارون کردن کمان‌ها و تغییر آنها کار می‌کرد و توانست که کارایی خوبی از خود نشان دهد و در چندین مثال استاندارد جواب‌های بسیار خوبی را به‌دست آورد (Fleszar, Osman

دست پیدا می‌کنند. در این بخش ابتدا الگوریتم رقابتی فراگیر (ICA) شرح داده می‌شود و سپس این الگوریتم برای حل OVRP مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۳-۱- روش رقابت رقابتی فراگیر

الگوریتم‌های تکاملی دسته‌ای بسیار مهم از الگوریتم‌های فراابتکاری هستند که تاکنون برای حل بسیاری از مسایل بهینه‌سازی ترکیباتی ارایه شده‌اند. این الگوریتم‌ها با استفاده از فرایند تکامل طبیعی با یک جمعیت اولیه شروع می‌شوند و نسل به نسل با ارتقای جواب‌ها سعی می‌کنند که مناطق مهم ناحیه شدنی را مورد بررسی قرار داده و به جواب‌های خوب دست یابند. الگوریتم‌های تکاملی زیادی تاکنون برای حل مسایل بهینه‌سازی ارایه شده‌اند که می‌توان به طور مثال به روش‌های ژنتیک، بهینه‌سازی گروهی ذرات و تکامل فرهنگی^{۲۵} اشاره کرد. الگوریتم ICA یکی از جدیدترین الگوریتم‌های این دسته است که بر مبنای روند تکامل اجتماعی انسانی بنا نهاده شده است و به وسیله آتش‌پز گرگری و لوکاس در سال ۲۰۰۷ بیان شد (Atashpaz-Gargari, and Lucas, 2007). این الگوریتم برخلاف بسیاری از روش‌های تکاملی که از طبیعت الهام گرفته‌اند، بر مبنای یک فرایند اجتماعی-سیاسی به نام پدیده استعمار و بهره‌جویی می‌باشد. به همین علت، به عنوان نخستین الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر یک فرایند اجتماعی-سیاسی محسوب شده و از این جهت در نوع خود یک الگوریتم تکاملی جدید محسوب می‌شود.

از نظر کارایی نیز این الگوریتم تاکنون به‌طور موفقیت‌آمیز در تعدادی از مسایل بهینه‌سازی استفاده شده است که به‌طور مثال می‌توان به مسایل خوشه‌بندی داده‌ها (Niknam et al., 2011)، موتور القایی خطی (Lucas, Nasiri-Gheidari and Tootoonchian, 2010)، تعادل نش (Lucas, 2008) (Atashpaz-Gargari, Rajabioun) اشاره کرد. باید توجه کرد که استقبال بالا از این الگوریتم بیشتر به جنبه نوآوری و جذابیت آن برای متخصصان حوزه بهینه‌سازی در کنار کارایی بالا و سرعت همگرایی مناسب آن می‌باشد. روند اجرایی این الگوریتم که در شکل ۲ نیز نشان داده شده است در ادامه بیان می‌شود.

(and Hindi, 2009). از طرف دیگر سالاری و همکارانش یک روش بهبوددهنده ابتکاری برای مسئله OVRP ارایه دادند. روش آنها بر اساس روش برنامه‌ریزی خطی-صحیح استوار بود (Salari, Toth and Tramontani, 2010). همچنین میرحسینی و ابوالقاسمی در سال ۲۰۱۱ یک نسخه حقیقی مقدار از روش بهینه‌سازی تجمعی ذرات^{۲۲} برای این مسئله ارایه دادند. در روش ارایه شده توسط آنها یک روش کدبرداری^{۲۳} جدید برای مسئله مورد استفاده قرار گرفته شده بود که در آن یک بردار از موقعیت مشتری‌ها در یک ترتیب کاهشی ایجاد شده و سپس هر مشتری بر اساس محدودیت‌های مسئله به مسیری تخصیص می‌یافت. در نهایت روش مربوطه از حرکت یک نقطه‌ای^{۲۴} برای بهبود جواب‌ها استفاده می‌کرد (MirHassani, and Abolghasemi, 2011).

۳- روش پیشنهادی

امروزه مسایل بهینه‌سازی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار هستند. این گونه از مسایل در زندگی روزمره وجود دارند و حل آنها سبب حل مشکلات اجتماعی-اقتصادی می‌شود. از طرف دیگر این مسایل در اندازه‌های کاربردی و عملی توسط روش‌های بهینه‌سازی دقیق قابل حل نیستند و نمی‌توان در یک زمان قابل قبول به جواب بهینه آنها دست یافت. به‌علاوه از الگوریتم‌های ابتکاری نیز نمی‌توان برای تولید جواب‌های با کیفیت برای این مسایل استفاده کرد. زیرا این گونه مسایل به علت پیچیدگی دارای تعداد زیادی بهینه‌های محلی هستند و الگوریتم‌های ابتکاری نمی‌توانند از این بهینه‌های محلی دور شوند و به بهینه‌های سراسری دست یابند. بنابراین، محققان به دنبال الگوریتم‌هایی هستند که دارای راه‌کاری مناسب برای دور شدن از نقاط بهینه محلی باشند و بتوانند در یک زمان قابل قبول به جوابی باکیفیت دست یابند. روش‌های فراابتکاری نسبت به دو دسته الگوریتم‌های نام برده، می‌توانند به این نیاز پاسخ داده و در یک زمان قابل قبول به جوابی با کیفیت دست یابند. این الگوریتم‌ها هنگامی که در یک بهینه محلی گیر می‌افتند، می‌توانند تا حد امکان از آنها فرار کرده به سایر جواب‌های فضای شدنی دست پیدا کرده و مناطق بیشتری را مورد بررسی قرار دهند. بنابراین، این الگوریتم‌ها با جستجوی بیشتر و استفاده از روالی کارا تر به جواب‌های بهتری

الگوریتم مؤثر رقابتی فراگیر برای حل مسئله مسیریابی وسایل نقلیه باز

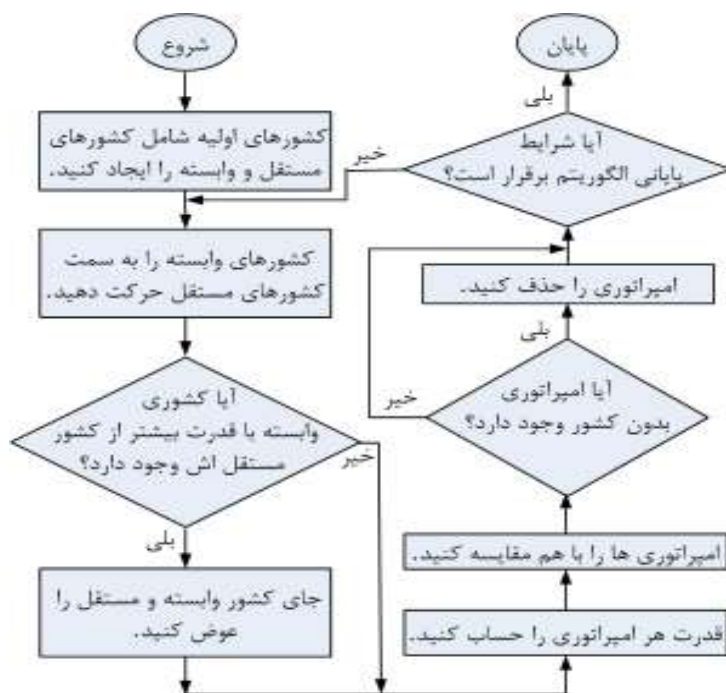
الگوریتم انتخاب کروموزوم‌ها برای ترکیب را به صورت تصادفی انجام نمی‌دهد. به عبارت دیگر در این روش کشورهای وابسته به کشوری ترکیب می‌شوند که دارای قدرت بیشتری است و نقش بهینه محلی برای مسئله مورد نظر را بازی می‌کند. در نتیجه احتمال بیشتری وجود دارد که این عمل سبب گردد که جواب‌های بهتری تولید شود.

اگر چه حرکت کشورهای وابسته به سمت کشور مستقل در یک امپراتوری سبب می‌گردد که کیفیت کشورهای وابسته افزایش یابد اما این عمل همچنین باعث می‌شود که بعد از مدتی، کشورهای هر امپراتوری شباهت زیادی به یکدیگر پیدا کنند و با سرعت کمتری ارتقا یابند. بنابراین، لازم است که در این مرحله راه‌کاری ارایه شود که تنوع جواب‌های به دست آمده افزایش یابد. به همین علت درصدی از کشورهای وابسته در هر امپراتوری دچار تحول^{۲۷} می‌شوند.

این عمل می‌تواند به وسیله یک الگوریتم محلی دلخواه صورت پذیرد. بعد از اینکه این دو عمل یعنی تابع جذب و تحول برای هر امپراتوری انجام شد امکان دارد که در هر امپراتوری کشوری وابسته به موقعیت بهتری نسبت به کشور مستقل مربوطه برسد. بنابراین، در این صورت جای آن کشور وابسته و کشور مستقل متناظر با هم عوض می‌شوند.

این الگوریتم با تعدادی جمعیت اولیه که در اینجا کشور نامیده می‌شوند، شروع می‌شود. در مرحله بعدی این کشورها که جواب‌های شدنی برای مسئله مورد نظر می‌باشند مقادیر قدرت (تابع هدف) خود را می‌یابند. با مقایسه این مقادیر برای کشورها می‌توان تعدادی از آنها که دارای قدرت بیشتری می‌باشند را انتخاب و به عنوان کشورهای مستقل در نظر گرفت و سایر کشورها را کشورهای وابسته معرفی کرد. حال هر کشور مستقل، بسته به توان خود، تعدادی از کشورهای وابسته را زیر پوشش خود در آورده و حوزه نفوذ خود (امپراتوری) را تشکیل می‌دهد. باید توجه داشت که هر چه قدرت یک کشور مستقل بیشتر باشد می‌تواند کشورهای بیشتری را مورد پوشش قرار دهد.

به‌علاوه در هر امپراتوری کشورهای مستقل سعی در تضعیف کشور وابسته با دگرگونی فرهنگ و رسوم آن می‌کنند که سبب می‌گردد که کشور وابسته در جهت همسان شدن فرهنگی با کشور مستقل حرکت کند. باید توجه کرد که در ارایه الگوریتم، این سیاست با حرکت دادن کشورهای وابسته یک امپراتوری به سمت کشور مستقل مربوطه مطابق یک رابطه خاص که تابع جذب^{۲۶} نامیده می‌شود، صورت می‌پذیرد که سبب می‌شود که در صورت امکان مقدار قدرت کشور وابسته افزایش یابد. توجه به این نکته ضروری است که در مقایسه با الگوریتم ژنتیک، این

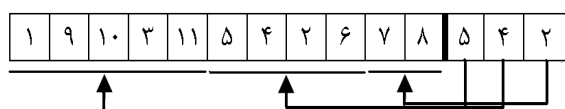


شکل ۲. فلوچارت الگوریتم ICA

۳-۲- الگوریتم آرایه شده

برای اینکه بتوان الگوریتم پیشنهادی را روی OVRP که یکی از کاربردی‌ترین مسایل حمل و نقل است، اجرا کرد از شش گام اساسی استفاده می‌شود که به شرح زیر می‌باشد:

در گام ۱ جواب‌های شدنی یا همان کشورهای اولیه تعریف می‌شوند. باید توجه کرد که این گام از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است؛ زیرا باید این کشورها را طوری معرفی کرد که با ساختار مسئله هماهنگی لازم را داشته باشند. بنابراین، در این گام از یک آرایه دویخشی که در شکل ۳ نشان داده شده است، استفاده می‌شود. این آرایه به طوری است که مشتری‌های مورد ملاقات به ترتیب از سمت چپ به راست در قسمت اولیه آرایه مرتب شده‌اند و سپس در قسمت دوم آرایه، تعداد مشتری‌های ملاقات شده توسط هر وسیله نقلیه نشان داده شده است. باید توجه کرد که مجموع درایه‌های قسمت دوم آرایه برابر تعداد کل وسایل نقلیه است. به‌علاوه در این شکل پنج مشتری با وسیله نقلیه اول، چهار مشتری با وسیله نقلیه دوم و در نهایت دو مشتری با وسیله نقلیه سوم مورد ملاقات قرار می‌گیرند. توجه به این نکته ضروری است که ظرفیت مشتری‌های اختصاص یافته به هر وسیله نقلیه باید از ظرفیت وسیله نقلیه کمتر باشد.



شکل ۳. یک کشور در الگوریتم ICA

در الگوریتم پیشنهادی به تعداد معین و قابل تغییر P ، جواب اولیه تصادفی ایجاد می‌شود و مقادیر تابع هدف f_m برای هر $m = 1, \dots, P$ محاسبه گردد. سپس این جواب‌ها به همراه مقادیر آن‌ها در ماتریس D قرار می‌گیرند که در آن هر سطر یک جواب اولیه شدنی به همراه مقدار تابع هدف مربوطه را نشان می‌دهد. استفاده از یک ساختار تصادفی در این گام سبب می‌گردد که جواب‌هایی به‌دست آیند که دارای ساختار متنوع در فضای شدنی باشند.

در گام ۲ با مقایسه مقادیر تابع هدف برای هر کدام از کشورها، I کشور که دارای مقادیر تابع هدف کمتر هستند به عنوان

بنابراین، با استفاده از تابع جذب و تحول روند جستجوی سراسری الگوریتم انجام شده و سعی می‌شود الگوریتم حرکت بهتری را در فضای شدنی انجام دهد و بتواند مناطق وسیع‌تری را با دقت بیشتری مورد بررسی قرار دهد. روند منطقی که در سایر روش‌های فراابتکاری نیز وجود دارد این است که الگوریتم باید با گذشت زمان به سمت مناطق مناسب و با کیفیت حرکت کرده تا از حالت جستجوی سراسری به جستجوی محلی تغییر وضعیت دهد. اکنون سؤالی که در اینجا مطرح می‌شود این است که چگونه مناطق با اهمیت تعیین شوند تا الگوریتم بتواند به سمت آنها حرکت کند و به جستجوی محلی پردازد؟

برای این منظور در این مرحله از الگوریتم قدرت هر امپراتوری (استعداد هر منطقه از فضای شدنی) سنجیده می‌شود تا امپراتوری با قدرت بیشتر (مناطق مهم) شناسایی شوند. در این الگوریتم قدرت کل یک امپراتوری به‌صورت مجموع قدرت کشور مستقل به اضافه درصدی از میانگین قدرت کشورهای وابسته آن تعریف می‌شود. بنابراین، با این عمل مناطق با اهمیت بیشتر شناسایی می‌شوند تا کشورهایی که از شانس کمتری برای ارتقای بیشتر در امپراتوری‌های خود هستند به یکی از امپراتوری‌های با قدرت بیشتر بروند. این عمل سبب می‌گردد که این جواب‌ها در زمان باقیمانده برای اجرای الگوریتم با احتمال بیشتری رشد کنند. به این ترتیب ضعیف‌ترین کشور در ضعیف‌ترین امپراتوری انتخاب شده و به یک امپراتوری دیگر ملحق می‌شود. بنابراین، امپراتوری‌های ضعیف به تدریج قدرت خود را با از دست دادن کشورهای خود از دست داده و به مرور زمان از بین می‌روند. در نتیجه حالتی به‌دست می‌آید که در آن تنها یک امپراتوری وجود دارد که همه کشورها را اداره می‌کند و این حالت همان شرط خاتمه الگوریتم ICA است.

توجه به این نکته ضروری است که عمل حذف ضعیف‌ترین کشور از ضعیف‌ترین امپراتوری و الحاق آن به یکی از امپراتوری‌های دیگر در روال الگوریتم به این معنی است که الگوریتم سعی می‌کند که از جستجوی سراسری فضای شدنی به سمت جستجوی محلی متمایل شود. بنابراین، الگوریتم با این عمل و طی مراحل متوالی، کشورهای کمتر ارتقا یافته را به سمت مناطقی که قدرت بیشتری دارند انتقال می‌دهد تا در مراحل بعدی این مناطق با دقت بیشتری جستجو شوند.

۴، ۵ و ۶ را که تاکنون ملاقات نشده‌اند را در نظر گرفته و آنها را در مجموعه S بریزید.

طبق روش نزدیک‌ترین همسایه اصلاحی احتمال ملاقات شدن مشتری‌های متعلق به S طبق رابطه (۲) به دست می‌آید. که در آن c_{ij} فاصله اقلیدسی مشتری i با مشتری j متعلق به S است. فرض کنید ۴ برگزیده شود پس در جمعیت اولیه تاکنون [۲ ۴ ۵] ----- [۲ ۴] وجود دارند. به علاوه برای ۴، سه مشتری ۲، ۳ و ۱۰ به عنوان همسایه دو کشور محسوب می‌شوند اما چون قبلاً ۲ مورد ملاقات قرار گرفته شده است. از بین ۳ و ۱۰ که مجموعه S جدید را تشکیل می‌دهند، نزدیک‌ترین همسایه احتمالی انتخاب می‌گردد. این عمل تا یافتن بقیه مشتری‌ها در [۲ ۴ ۵] ----- [۲ ۴] و برای همه کشورهای وابسته ادامه می‌یابد. باید توجه کرد که در این روش همه مشتری‌ها فقط یکبار انتخاب می‌شوند، لذا جواب به دست آمده از این جهت حتماً یک جواب شدنی است. فقط نکته‌ای که باید بررسی شود این است که آیا ظرفیت هر وسیله نقلیه از مجموع ظرفیت تعداد مشتری‌هایی که به آن اختصاص یافته است کمتر است یا خیر؟ که در صورت جواب مثبت، جواب جدید جایگزین می‌شود و در غیر این صورت جواب قبلی باقی می‌ماند و تغییر نمی‌کند.

$$\frac{1/c_{ij}}{\sum_{j \in S} 1/c_{ij}} \quad (2)$$

به علاوه در همین گام با تحول ρ درصد از کشورهای وابسته، امپراتوری‌ها دارای تنوع کافی می‌شوند. چون در مرحله قبل قسمت اول جواب‌ها مورد بررسی قرار گرفتند و طبق الگوریتم نزدیک‌ترین همسایه احتمالی ارتقا یافتند. بنابراین، در این مرحله قسمت دوم بردار جواب‌های شدنی مورد بررسی و اصلاح قرار می‌گیرد. برای این منظور یکی از درایه‌ها به تصادف انتخاب و یک واحد به آن اضافه می‌شود. برای مثال جواب شدنی [۲ ۴ ۵] ----- [۲ ۴ ۵] را در نظر بگیرید. فرض کنید ۴ از قسمت دوم انتخاب می‌شود و یک واحد به آن اضافه می‌شود. حال همسایه‌های ۴ که ۲ و ۵ هستند را در نظر بگیرید. چون یک واحد به ۴ اضافه شده است، بنابراین، یک واحد از یکی از همسایه‌ها به طور تصادفی کم می‌شود. به طور مثال از ۵ یک واحد کم و جواب جدید [۲ ۵ ۴] ----- [۲ ۵ ۴] به وجود می‌آید. در اینجا نیز شرط شدنی بودن جواب و صادق بودن در محدودیت‌های مسئله مورد بررسی قرار می‌گیرد.

کشورهای مستقل در نظر گرفته می‌شوند (چون OVRP یک مسئله کمینه‌سازی است). با جابه‌جایی کشورها در ماتریس مربوطه، سطرهای ۱ تا I جمعیت اولیه در ماتریس D به کشورهای مستقل تعلق می‌یابد. برای تعیین حوزه نفوذ هر کشور مستقل، تعداد کشورهای وابسته طبق رابطه (۱) به کشورهای مستقل j ام اختصاص می‌یابد تا به این طریق I امپراتوری ایجاد شود.

$$k_j = \text{int}\left(\frac{1/f_j}{\sum_{i=1}^I 1/f_i} \cdot (P-I)\right) \quad j = 1, \dots, I \quad (1)$$

رابطه (۱) تعداد کشورهای وابسته اختصاص یافته به کشور مستقل j ام را نشان می‌دهد. باید اضافه کرد که طبق این رابطه هر کدام از کشورهای مستقل که دارای تابع هدف کمتری باشد، تعداد بیشتری از کشورهای وابسته به آن اختصاص یافته و امپراتوری بزرگ‌تری تشکیل می‌شود. به علاوه تابع (int) در رابطه (۱) تابع جزء صحیح است که سبب می‌گردد به هر کدام از امپراتوری‌ها تعداد صحیحی از کشورهای وابسته اختصاص یابد. از طرف دیگر امکان دارد که در انتها به علت استفاده از تابع int کشورهای وجود داشته باشند که به هیچ کدام از امپراتوری‌ها اختصاص نیابند که در این صورت این کشورها به قوی‌ترین کشور مستقل (دارای کمترین مقدار تابع هدف) اختصاص می‌یابند. توجه به این نکته ضروری است که رابطه (۱) فقط تعداد کشورهای اختصاص داده شده به هر امپراتوری را تعیین می‌کند و اختصاص آنها به صورت تصادفی انجام می‌شود. در گام ۳، بعد از اینکه امپراتوری‌ها تشکیل شدند، کشورهای وابسته هر امپراتوری با استفاده از کشورهای مستقل که نقش بهینه‌های محلی را بر عهده دارند، کیفیت خود را افزایش می‌دهند. نکته قابل توجه این است که چون تعداد زیادی از کشورهای وابسته با یک کشور مستقل در هر امپراتوری ترکیب می‌شوند، پس باید از نوعی تابع جذب استفاده کرد که مفهوم تصادف در آن وجود داشته باشد تا جواب‌هایی مشابه تولید نشود. به این منظور از روش نزدیک‌ترین همسایه اصلاحی در این گام استفاده می‌شود. به طور مثال دو جواب شدنی [۵ ۳ ۳ ۵] ----- [۵ ۲ ۴ ۳ ۱ ۶ ۸ ۹ ۷ ۱۱ ۱۰] به عنوان کشور مستقل و کشور [۲ ۴ ۵] ----- [۲ ۴ ۵] به عنوان کشور وابسته را در نظر بگیرید. حال از ۲ که اولین مشتری کشور وابسته است شروع به حرکت کنید و در دو کشور همسایه‌های ۲ یعنی

همگرا شوند تا به این ترتیب مناطق مهم مورد بررسی بیشتری قرار گیرند و الگوریتم بتواند جواب‌های بهتری را به دست آورد. بنابراین، در گام ۵ قدرت امپراتوری‌ها به وسیله رابطه (۳) سنجیده می‌شود. در این رابطه h_j, f_j, s_j و λ به ترتیب نشان دهنده قدرت (مقدار تابع هدف) کل هر امپراتوری، قدرت هر کشور مستقل، میانگین قدرت کشورهای وابسته در امپراتوری λ و ضریب تأثیر بین صفر و یک که اهمیت میانگین قدرت کشورهای وابسته نسبت به قدرت کشور مستقل در یک امپراتوری را تعیین می‌کند. سپس در این هنگام امپراتوری ضعیف‌تر، ضعیف‌ترین کشور وابسته خود را به یکی از امپراتوری‌ها می‌دهد. باید توجه کرد که اگر امپراتوری ضعیف‌تر دارای کشوری وابسته نباشد از بین می‌رود و کشور مستقل آن به قوی‌ترین امپراتوری اختصاص می‌یابد.

$$h_j = f_j + \lambda(s_j) \quad j = 1, \dots, I \quad (3)$$

در گام ۶ شرط پایانی مورد بررسی قرار می‌گیرد که در صورت تحقق آن الگوریتم به پایان می‌رسد و در غیر این صورت الگوریتم با برگشت به گام ۳ دوباره تکرار می‌گردد. برای خاتمه الگوریتم از دو شرط تکرار الگوریتم به تعداد معین T بار یا باقی ماندن فقط یک امپراتوری استفاده می‌شود که به‌طور همزمان در پایان هر تکرار الگوریتم مورد بررسی قرار می‌گیرند. هر کدام از این دو شرط که زودتر اتفاق بیفتد الگوریتم به پایان می‌رسد و بهترین جواب و مقداری که تاکنون به دست آمده است به عنوان جواب نهایی مسئله معرفی می‌گردد. خلاصه گام‌های اساسی الگوریتم پیشنهادی در شکل ۴ نشان داده شده است.

بعد از این که جواب و مقدار جدید برای ρ درصد از کشورهای وابسته محاسبه شد، امکان دارد که این کشورها دارای قدرت بیشتری نسبت به کشور مستقل در امپراتوری خود شوند. بنابراین، کشوری وابسته با بهترین مقدار در هر امپراتوری انتخاب و جایگزین کشور مستقل می‌شود. باید توجه کرد در صورتی که چند کشور وابسته دارای تابع هدف یکسان باشند، یکی از آنها به تصادف انتخاب و با کشور مستقل امپراتوری خود مقایسه و در صورت لزوم معاوضه می‌شود.

در گام ۴ چون تا انتهای یک تکرار الگوریتم دیگر تغییری در توابع هدف صورت نمی‌گیرد، بنابراین، باید بهترین جواب و مقدار تابع هدف ذخیره شود. بنابراین، در هر تکرار بعد از این که عمل جایگزینی کشورهای مستقل انجام شد، بهترین جواب در بین کشورهای مستقل به عنوان بهترین جواب جاری انتخاب می‌شود و در صورتی که نسبت به جواب‌های قبلی بهتر باشد، جستجوی محلی روی آن اجرا می‌شود و جواب جدید جایگزین جواب و مقدار قبلی می‌شود. روند جستجوی محلی استفاده شده در این گام بر اساس حذف یک مشتری از مسئله و وارد کردن آن در جایگاه مناسب است. این تغییر زمانی پذیرفته می‌شود که جواب جدید علاوه بر این که در محدودیت‌های مسئله صدق می‌کند، دارای کیفیت بهتر از جواب قبلی باشد. باید توجه کرد که مشتری به تصادف انتخاب شده برای همه جایگاه‌های ورود، امتحان می‌شود و بهترین حالت انتخاب می‌شود. تا این گام از الگوریتم هدف جستجوی سراسری برای یافتن جواب‌های باکیفیت در مناطق مهم است. حال باید در گام بعدی این مناطق مهم مورد شناسایی قرار گیرند و کشورها به سمت این مناطق

گام ۱: تعدادی جواب تصادفی ایجاد کنید.

گام ۲: به وسیله فرمول (۱) امپراتورها و کشورهای وابسته هر امپراتوری را تشکیل دهید.

گام ۳: با استفاده از تابع جذب، هر کشور وابسته را به سمت کشور مستقل مربوط به آن حرکت دهید و سپس ρ درصد از کشورهای وابسته را متحول کنید. به علاوه اگر در هر امپراتوری، کشوری وابسته دارای تابع هدف بهتر از کشور مستقل‌اش بود آنگاه جای این دو را عوض کنید.

گام ۴: اگر بهترین جواب به دست آمده تاکنون در تکرار جاری ارتقا یافت آنگاه جستجوی محلی را روی بهترین جواب اجرا کنید.

گام ۵: به وسیله فرمول (۳) قدرت هر امپراتوری را به دست آورده و سپس ضعیف‌ترین کشور وابسته در ضعیف‌ترین امپراتوری را به قوی‌ترین امپراتوری بدهید.

گام ۶: اگر شرط پایانی برقرار شد توقف کنید و در غیر این صورت به گام ۳ بروید.

شکل ۴. مراحل الگوریتم پیشنهادی برای حل مسئله OVRP

۴- محاسبات عددی

برای آزمایش کارایی الگوریتم پیشنهادی روی OVRP و مقایسه آن با دیگر الگوریتم‌های فراابتکاری، الگوریتم پیشنهادی روی دو دسته از مثال‌های استاندارد مورد آزمایش قرار می‌گیرد. در دسته اول ۱۴ مثال استاندارد وجود دارند که اولین بار توسط کریستوفیدز مورد استفاده قرار گرفتند. این مسایل که در آدرس اینترنتی <http://www.branchandcut.org/> وجود دارند، در جدول ۱ خصوصیات آنها به‌طور کامل نشان داده شده است. به‌علاوه در دسته دوم مثال‌ها که اولین بار در مرجع [Li, Golden, and Wasil, 2007] ارایه شد، مثال‌هایی از ۲۰۰ تا ۴۸۰ گره وجود دارند. بنابراین، این دسته از مثال‌ها جزء مثال‌های با اندازه بزرگ طبق‌بندی می‌شوند که جزئیات آنها در جدول ۲ نشان داده شده است.

این مثال‌ها به این دلیل مورد بررسی قرار گرفتند که نخست دارای یک ترکیب مناسب از مسایل هستند که بازه‌ای بین ۵۰ تا ۴۸۰ گره را، بدون انبار کالا، در بر می‌گیرند و در مرحله دوم

الگوریتم‌های زیادی روی این مثال‌ها آزمایش شدند و به این جهت می‌توان مقایسه مناسبی بین الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم‌های دیگر انجام داد تا به این وسیله کارایی الگوریتم با دقت بیشتری مورد بررسی قرار گیرد. باید توجه کرد که در این دو جدول C تعداد مشتری، Q ظرفیت وسیله نقلیه، K تعداد وسیله نقلیه مورد استفاده، T زمان سرویس‌دهی به هر مشتری و L حداکثر مسیری است که یک وسیله نقلیه می‌تواند طی کند، است. همچنین باید اضافه کرد که در بین ۱۴ مثال مورد آزمایش کریستوفیدز، ۱۰ مثال ابتدایی شامل مشتری‌هایی هستند که به‌طور تصادفی در اطراف انبار توزیع شده‌اند، در حالی که در ۴ مثال باقیمانده، مشتری‌ها در کلاسترهایی که در آن انبار کالا در مرکز واقع نشده است، قرار گرفته شده‌اند. از طرف دیگر همه مثال‌های در نظر گرفته شده دارای محدودیت ظرفیت بوده ولی مثال‌های C14, C13, C10-C6 علاوه بر داشتن محدودیت ظرفیت، دارای محدودیت‌های طول مسیر و زمان سرویس‌دهی نیز هستند.

جدول ۱. مقایسه الگوریتم‌های فراابتکاری برای مثال‌های استاندارد

مثال	C	Q	K	T	L	MVNS	TSB	ALNS	ORTR	PA	BKS
C1	۵۰	۱۶۰	۵	-	-	۴۱۶/۰۶	۴۱۶/۰۶	۴۱۶/۰۶	۴۱۶/۰۶	۴۱۶/۰۶	۴۱۶/۰۶
C2	۷۵	۱۴۰	۱۰	-	-	۵۶۷/۱۴	۵۷۴/۵	۵۶۷/۱۴	۵۶۷/۱۴	۵۶۷/۱۴	۵۶۷/۱۴
C3	۱۰۰	۲۰۰	۸	-	-	۶۳۹/۷۴	۶۴۱/۶	۶۴۱/۷۶	۶۳۹/۷۴	۶۳۹/۷۴	۶۳۹/۷۴
C4	۱۵۰	۲۰۰	۱۲	-	-	۷۳۳/۱۳	۷۴۰/۸	۷۳۳/۱۳	۷۳۳/۱۳	۷۳۳/۱۳	۷۳۳/۱۳
C5	۱۹۹	۲۰۰	۱۶	-	-	۹۰۵/۹۶	۹۵۳/۴	۸۹۶/۰۸	۹۲۴/۹۶	۹۰۲/۴۵	۸۹۶/۰۸
C6	۵۰	۱۶۰	۶	۱۰	۱۸۰	۴۱۲/۹۶	۴۱۲/۹۶	۴۱۲/۹۶	۴۱۲/۹۶	۴۱۲/۹۶	۴۱۲/۹۶
C7	۷۰	۱۴۰	۱۱	۱۰	۱۴۴	۵۹۶/۴۷	۶۳۴/۵۴	۵۸۳/۱۹	۵۶۸/۴۹	۵۹۶/۴۰	۵۶۸/۴۹
C8	۱۰۰	۲۰۰	۹	۱۰	۲۰۷	۶۴۴/۶۳	۶۴۴/۶۳	۶۴۵/۴۶	۶۴۴/۶۳	۶۴۴/۶۳	۶۴۴/۶۳
C9	۱۵۰	۲۰۰	۱۴	۱۰	۱۸۰	۷۶۰/۰۶	۷۸۵/۲	۷۵۷/۸۴	۷۵۶/۳۸	۷۵۷/۸۴	۷۵۶/۳۸
C10	۱۹۹	۲۰۰	۱۸	۱۰	۱۸۰	۸۷۵/۶۷	۸۸۴/۶۳	۸۷۵/۶۷	۸۷۶/۰۲	۸۸۴/۶۳	۸۷۵/۶۷
C11	۱۲۰	۲۰۰	۷	-	-	۶۸۲/۱۲	۶۸۳/۴	۶۸۲/۱۲	۶۸۲/۵۴	۶۸۳/۴	۶۸۲/۱۲
C12	۱۰۰	۲۰۰	۱۰	-	-	۵۳۴/۲۴	۵۳۵/۱	۵۳۴/۲۴	۵۳۴/۲۴	۵۳۵/۱	۵۳۴/۲۴
C13	۱۲۰	۲۰۰	۱۰	۱۰	۶۴۸	۹۰۴/۰۴	۹۳۴/۶۶	۹۰۹/۸	۸۹۶/۵	۹۰۴/۴	۸۹۶/۵
C14	۱۰۰	۲۰۰	۱۱	۱۰	۹۳۶	۵۹۱/۸۷	۵۹۷/۳	۵۹۱/۸۷	۵۹۱/۸۷	۵۹۱/۸۷	۵۹۱/۸۷
میانگین	-	-	-	-	-	۶۶۱/۷۲	۶۷۴/۸۴	۶۶۰/۵۲	۶۶۰/۳۳	۶۶۰/۳۸	۶۵۸/۲۱

مثال باقیمانده به جواب‌های خوبی دست پیدا کند؛ به طوری که با میانگین ۶۶۱/۷۲ در رتبه چهارم الگوریتم‌های جدول ۱ قرار گرفته است. بنابراین، در مقایسه با الگوریتم پیشنهادی از نظر به‌دست آوردن تعداد بهترین جواب‌ها دارای کیفیت بالاتر و از لحاظ میانگین جواب‌ها دارای کیفیت پایین‌تر می‌باشد.

الگوریتم جستجوی همسایگی تطابقی (ALNS) الگوریتمی است که رقابت نزدیکی را با الگوریتم پیشنهادی دارد (Repoussis, Tarantilis and Ioannou, 2006). این الگوریتم توانسته است در ۹ مثال به بهترین جواب‌ها دست باید درحالی‌که با میانگین ۶۶۰/۵۲ رتبه سوم را در میان الگوریتم‌ها کسب کرده است. در نهایت آخرین الگوریتمی که در جدول وجود دارد و توانسته است که به بهترین میانگین الگوریتم‌ها دست پیدا کند الگوریتم ثبت به ثبت^{۲۸} (ORTR) است (Russell, Chiang and David, 2008). این الگوریتم توانسته است در ۱۱ مثال از ۱۴ مثال مربوطه به بهترین جواب‌ها دست پیدا کند و همچنین میانگین ۶۶۰/۳۳ را برای ۱۴ مثال به‌دست آورد. بنابراین، الگوریتم پیشنهادی دارای جواب‌های ضعیف‌تر نسبت به الگوریتم ORTR است. به‌علاوه، اگر معیار میانگین جواب‌ها به‌طور کلی در نظر گرفته شود، آنگاه الگوریتم‌های ORTR، ALNS و PA با اختلاف در حدود ۲ واحد از میانگین بهترین جواب‌های تاکنون به‌دست آمده BKS دارای بهترین نتیجه در بین الگوریتم‌ها هستند. به‌علاوه، الگوریتم MVNS با اختلاف ۳ واحد از میانگین بهترین جواب‌ها دارای رده دوم در بین الگوریتم‌ها می‌باشد. در نهایت الگوریتم TSB قرار دارد که با اختلاف ۱۶ واحد در رده آخر قرار دارد.

از طرف دیگر برای اینکه روند الگوریتم‌های ارایه شده در جدول ۱ برای مسایل OVRP به‌طور واضح‌تر نشان داده شود، در شکل ۵ میانگین درصد انحراف نسبت به بهترین جواب‌های به‌دست آمده، آورده شده است. درصد انحراف نسبت به بهترین جواب شناخته‌شده برابر با $\frac{c(s^*) - c(s^{**})}{c(s^{**})} \times 100$ است، به طوری که s^* بهترین جواب پیداشده به‌وسیله الگوریتم مورد نظر برای مثال داده شده و s^{**} جواب BKS برای همان مثال است. باید توجه کرد که در این شکل محور افقی نشان‌دهنده ۱۴ مثال مورد آزمایش است که به‌ترتیب از کمترین تا بیشترین مشتری ترتیب‌بندی شده است تا بتوان تحلیل مناسبی درباره رابطه کارایی الگوریتم با افزایش تعداد مشتری انجام داد در حالی

در این جدول الگوریتم پیشنهادی (PA) با الگوریتم‌های فراابتکاری مشهوری که تاکنون برای حل این مسئله استفاده شده، مورد مقایسه قرار گرفته است. در این جدول و در ستون‌های هفتم تا دهم نتایج چهار روش مهم فراابتکاری را نشان می‌دهد. به‌علاوه در ستون یازدهم نتایج الگوریتم پیشنهادی ارایه شده است. همچنین بهترین جواب‌هایی که تاکنون به‌وسیله سایر الگوریتم‌ها به‌دست آمده است (BKS) در ستون دوازدهم نشان داده شده است. از طرف دیگر برای اینکه بتوان مقایسه عمیق‌تری بین کارایی الگوریتم‌ها انجام داد، میانگین جواب‌های به‌دست آمده به وسیله هر الگوریتم در سطر پایانی جدول آورده شده است. نتایج بر این نکته اشاره دارد که روش پیشنهادی توانسته است که جواب‌های بسیار خوبی برای مسایل استاندارد OVRP به‌دست آورد. به‌خصوص آنکه الگوریتم توانسته است که در شش مثال از چهارده مثال مربوطه به بهترین جواب‌هایی که تاکنون به‌دست آمده است، دست یابد. به‌علاوه در هشت مثال دیگر نیز الگوریتم توانسته است که با خطای قابل قبولی به جواب‌هایی با کیفیت دست یابد. همچنین اگر الگوریتم پیشنهادی از نظر به‌دست آوردن میانگین جواب‌ها با میانگین بهترین جواب‌ها مورد مقایسه قرار گیرد، می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم PA دارای خطای مطلق تقریباً ۲ و خطای نسبی صفر تا دو رقم اعشار است. از طرف دیگر و با مقایسه الگوریتم پیشنهادی با دیگر الگوریتم‌های فراابتکاری می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم دارای جواب‌های بهتر نسبت به الگوریتم جستجوی ممنوع (TSB) می‌باشد (Brandão, 2004)؛ زیرا الگوریتم TSB فقط در سه مثال توانسته است که به بهترین جواب‌ها دست پیدا کند و با میانگین ۶۷۴/۸۴ بی‌کیفیت‌ترین الگوریتم ارایه شده در جدول مربوطه است. در حالی که الگوریتم PA علاوه بر این‌که از نظر تعداد بهترین جواب‌های به‌دست آمده از این الگوریتم برتر است، با میانگین مقدار ۶۶۰/۳۸ دومین الگوریتم کارا در جدول مربوطه است.

الگوریتم دیگری که در این جدول توانسته است که به جواب‌های بسیار خوبی دست پیدا کند الگوریتم همسایگی متغیر (MVNS) است (Repoussis et al., 2010). این الگوریتم علی‌رغم این‌که در ۱۰ مثال توانسته است که به بهترین جواب‌های تاکنون به‌دست آمده است برسد، در رتبه دوم الگوریتم‌ها قرار گرفته است. اما نتوانسته است این کیفیت را در همه جواب‌ها حفظ کند و در ۴

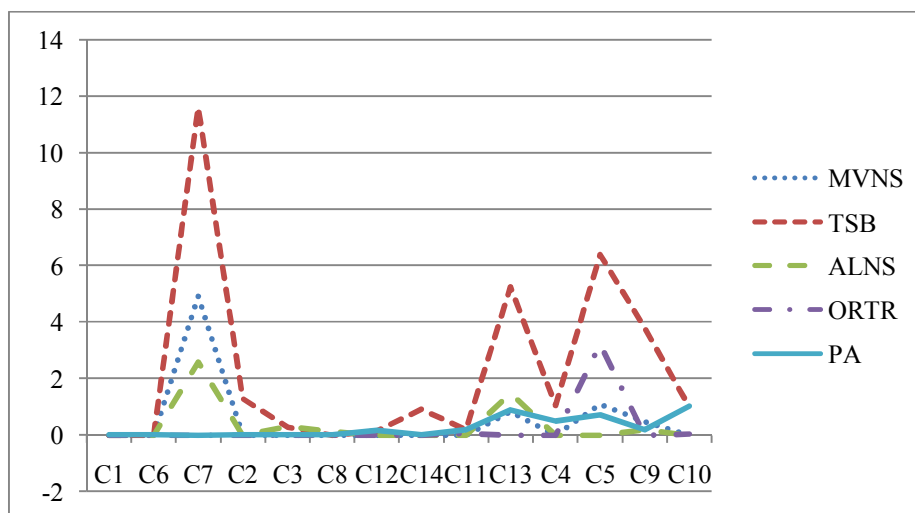
الگوریتم مؤثر رقابتی فراگیر برای حل مسئله مسیریابی وسایل نقلیه باز

الگوریتم در این دسته از مثال‌ها نسبت به دسته اول و دوم نتوانسته است که به بهترین جواب‌ها دست پیدا کند اما همان‌طور که گفته شد، نتوانسته است که این جواب‌ها را فقط با ۲ درصد انحراف تخمین بزند. از طرف دیگر در جدول ۲ مقایسه بین الگوریتم پیشنهادی با دو الگوریتم MVNS و ORTR روی دسته دوم از مثال‌ها که دارای اندازه خیلی بزرگ هستند، نشان داده شده است. در این جدول BKS از مقاله (Zachariadis, and Kiranoudis, 2010) گرفته شده است.

با توجه به نتایج به دست آمده روی مثال‌های بزرگ که دارای مثال‌هایی با تعداد زیادی گره هستند می‌توان مشاهده کرد که الگوریتم در این مثال‌ها نیز جواب‌های بسیار خوبی به دست آورده است و در سه مثال از هشت مثال مربوطه به جواب‌های BKS دست پیدا کرده است. همچنین در مقایسه با دیگر الگوریتم‌ها، الگوریتم پیشنهادی رقابت خوبی با دو الگوریتم ORTR و MVNS دارد. بنابراین، با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت هنگامی که تعداد مشتری‌ها افزایش می‌یابد و تعداد جواب‌های شدنی برای این مسئله به طور نمایی رشد می‌کند و سختی مسئله به مقدار قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند، مقدار کارایی الگوریتم نیز به مقدار بسیار کمی کاهش می‌یابد. بنابراین، به طور کلی می‌توان به این نکته اشاره کرد که الگوریتم از کارایی خوبی برای همه مثال‌ها برخوردار است، اگر چه که برای مثال‌های کوچک و متوسط این کارایی از مقدار بیشتری برخوردار است.

که محور عمودی نشان‌دهنده درصد انحراف الگوریتم‌های فراابتکاری جدول ۱ نسبت به بهترین جواب تاکنون به دست آمده است. این شکل نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی (خط ممتد در شکل) نتوانسته است جواب‌های بسیار خوبی را به دست آورد و جواب‌های نزدیکی را با دو الگوریتم ORTR و ALNS به دست آورد. به علاوه این الگوریتم نسبت به دو الگوریتم MVNS و TSB به جواب‌های بهتری دست پیدا کرده است.

باید توجه کرد که مثال‌های نشان داده شده در شکل ۵ را می‌توان از نظر تعداد مشتری به سه دسته کمتر از ۱۰۰ (کوچک)، مابین ۱۰۰ تا ۱۵۰ (متوسط) و بالاتر از ۱۵۰ مشتری (بزرگ) تقسیم‌بندی کرد. بنابراین، می‌توان نتایج الگوریتم را روی این سه دسته به طور مجزا مورد بررسی قرار داد. در دسته اول الگوریتم دارای موفقیت به نسبت کامل بوده و نتوانسته است که در سه مثال از چهار مثال موجود به بهترین جواب‌های تاکنون یافته شده، دست پیدا کند. این نشان می‌دهد که الگوریتم در مثال‌های کوچک از کارایی بسیار خوبی برخوردار است. در دسته دوم و در هفت مثال موجود، در سه مثال الگوریتم نتوانسته است به بهترین جواب‌ها دست پیدا کند. بنابراین، می‌توان گفت الگوریتم کارایی خوبی برای حل مثال‌های متوسط دارد. در نهایت در دسته سوم الگوریتم از کارایی نسبتاً خوبی برخوردار است، علی‌رغم آن‌که نسبت به دو دسته قبلی کیفیت کمتری دارد و در سه مثال موجود نتوانسته است که در هیچ کدام از مثال‌ها به بهترین جواب‌هایی تاکنون به دست آمده، دست یابد. باید توجه کرد که اگر چه



شکل ۵. مقایسه الگوریتم پیشنهادی با سایر روش‌های فراابتکاری

جدول ۲. مقایسه الگوریتم پیشنهادی با دو الگوریتم مشهور فراابتکاری برای مثال‌های بزرگ

مثال	C	Q	K	MVNS	ORTR	PA	BKS
O1	۲۰۰	۹۰۰	۵	۶۰۱۸/۵۲	۶۰۱۸/۵۲	۶۰۱۸/۵۲	۶۰۱۸/۵۲
O2	۲۴۰	۵۵۰	۹	۴۵۸۳/۷۰	۴۵۸۴/۵۵	۴۵۸۳/۷۰	۴۵۸۳/۷۰
O3	۲۸۰	۹۰۰	۷	۷۷۳۳/۷۷	۷۷۳۲/۸۵	۷۷۶۱/۴۳	۷۷۳۱/۴۶
O4	۳۲۰	۷۰۰	۱۰	۷۲۷۱/۲۴	۷۲۹۱/۸۹	۷۲۶۰/۶۰	۷۲۶۰/۶۰
O5	۳۶۰	۹۰۰	۸	۹۲۵۴/۱۵	۹۱۹۷/۶۱	۹۲۴۹/۴۲	۹۱۹۷/۶۱
O6	۴۰۰	۹۰۰	۹	۹۸۲۱/۰۹	۹۸۰۳/۸۰	۹۸۷۳/۶۵	۹۸۰۳/۸۰
O7	۴۴۰	۹۰۰	۱۰	۱۰۳۶۳/۴۰	۱۰۳۷۴/۹۷	۱۰۴۱۱/۰۵	۱۰۳۴۸/۵۷
O8	۴۸۰	۱۰۰۰	۱۰	۱۲۴۲۸/۲۰	۱۲۴۲۹/۵۶	۱۲۵۶۵/۶۲	۱۲۴۲۰/۱۶

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله روش جستجوی رقابتی فراگیر برای حل OVRP به کار برده شد. این الگوریتم دارای ساختار رقابت‌پذیری نسبت به سایر الگوریتم‌های فراابتکاری بوده و توانسته جواب‌های خوبی برای مثال‌های استاندارد این مسئله به دست آورد. به نظر می‌رسد استفاده از روش‌های فراابتکاری دیگر برای ترکیب با این روش مانند جستجوی ممنوع یا روش مورچگان می‌تواند سبب به دست آوردن جواب‌های بهتری برای این مسئله به خصوص در مثال‌های با اندازه بزرگ و خیلی بزرگ شود. از طرف دیگر می‌توان این الگوریتم را برای گسترش‌های دیگر VRP مانند مسئله مسیریابی وسیله نقلیه همراه با دریافت و تحویل کالا به کار برد. استفاده از این الگوریتم‌ها و کاربردی کردن این پیشنهادها به مقاله‌های بعدی موکول می‌شود.

۶- پی‌نوشت‌ها

1. Open Vehicle Routing Problem (OVRP)
2. Vehicle Routing Problem (VRP)
3. Imperialist Competitive Algorithm (ICA)
4. Scharge
5. Bodin
6. Tarantilis
7. Population-Based
8. Threshold-Accepting
9. Tabu Search (TS)
10. Fu
11. Pisinger
12. Ropke

13. Adaptive Neighborhood Search
14. Letchford
15. Branch and Bound
16. Li
17. Record to Record
18. Russell
19. Chiang
20. Variable Neighborhood Search Algorithm
21. Fleszar
22. Particle Swarm Optimization
23. Decoding
24. One-point
25. Cultural Algorithm
26. Absorption Function
27. Revolution
28. Record to Record Travel

۷- مراجع

- ربانی، ی.، سپهری، م. م. و ذگردی، ح. (۱۳۸۷) "مسئله مسیریابی وسیله نقلیه متصل به حمل و نقل چندوجهی رویکرد یکپارچه"، پژوهشنامه حمل و نقل، سال پنجم، شماره چهارم، زمستان ۱۳۸۷، ص ۳۰۱-۳۱۹.
- ظفری، ع.، تشکری هاشمی، م. و یوسفی خوشبخت، م. (۱۳۸۹) "الگوریتم ترکیبی مؤثر ژنتیک برای حل مسئله مسیریابی وسیله نقلیه"، مهندسی صنایع و مدیریت تولید، جلد ۲۱، شماره ۲، ص ۶۳-۷۶.
- Atashpaz-Gargari, E. and Lucas, C. (2007) "Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition", In: Proceedings of the IEEE

- Pisinger, D. and Ropke, S. (2007) "A general heuristic for vehicle routing problems", *Computers & Operations Research*, Vol. 34, No. 8, pp. 2403-2435.
- Rajabioun, R., Atashpaz-Gargari, E. and Lucas, C. (2008) "Colonial Competitive Algorithm as a Tool for Nash Equilibrium Point Achievement", *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 5073, pp. 680-695.
- Repoussis, P.P., Tarantilis, C.D., Bräysy, O. and Ioannou, G. (2010) "A hybrid evolution strategy for the open vehicle routing problem", *Computers & Operations Research*, Vol. 37, No. 3, pp. 443-455.
- Repoussis, P. P., Tarantilis, C. D. and Ioannou, G. (2006) "The open vehicle routing problem with time windows", *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 58, pp. 355-367.
- Russell, R., Chiang, W. C. and David, Z. (2008) "Integrating multi-product production and distribution in newspaper logistics", *Computers & Operations Research*, Vol. 35, No. 5, pp. 1576-1588.
- Salari, M., Toth, P. and Tramontani, A. (2010) "An ILP improvement procedure for the Open Vehicle Routing Problem", *Computers & Operations Research*, Vol. 37, No. 12, pp. 2106-2120.
- Schrage, L. (1981) "Formulation and structure of more complex/realistic routing and scheduling problems", *Networks*, Vol. 11, pp. 229-232.
- Tarantilis, C. D., Diakoulaki, D. and Kiranoudis, C. T. (2004) "Combination of geographical information system and efficient routing algorithms for real life distribution operations", *European Journal of Operational Research*, Vol. 152, pp. 437-453.
- Tarantilis, C. D., Ioannou, G., Kiranoudis, C. T. and Prastacos, G. P. (2005) "Solving the open vehicle routing problem via a single parameter metaheuristic algorithm", *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 56, pp. 588-596.
- Zachariadis, E. E. and Kiranoudis, C. T. (2010) "An open vehicle routing problem metaheuristic for examining wide solution neighborhoods", *Computers & Operations Research*, Vol. 37, pp. 712-723.
- Congress on Evolutionary Computation, Singapore, pp. 4661-4667.
- Bodin, L., Golden, B. and Assad, A. (1983) "Ball M. Routing and scheduling of vehicles and crews: the state of the art", *Computers & Operations Research*, Vol. 10, No. 2, pp. 63-211.
- Brandão, J. (2004) "A taboo search algorithm for the open vehicle routing problem", *European Journal of Operational Research*, Vol. 157, No. 6, pp. 552-564.
- Chiang, W. C., Russell, R., Xu, X. and Zepeda, D. (2009) "A simulation/metaheuristic approach to newspaper production and distribution supply chain problems", *International Journal of Production Economics*, Vol. 121, No. 2, pp. 752-767.
- Fleszar, K., Osman, I. H. and Hindi, K. S. (2009) "A variable neighborhood search algorithm for the open vehicle routing problem", *European Journal of Operational Research*, Vol. 195, No. 3, pp. 803-809.
- Fu, Z., Eglese, R. and Li, L. Y. O. (2005) Corrigendum: "A new taboo search heuristic for the open vehicle routing problem", *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 56, No. 3, pp. 267-274.
- Letchford, A. N., Lysgaard, J. and Eglese, R. W. (2007) "A branch-and-cut algorithm for the capacitated open vehicle routing problem", *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 58, pp. 1642-1651.
- Li, F., Golden, B. and Wasil, E. (2007) "The open vehicle routing problem: Algorithms, large-scale test problems, and computational results", *Computers & Operations Research*, Vol. 34, No. 10, pp. 2918-2930.
- Lucas, C., Nasiri-Gheidari, Z. and Tootoonchian, F. (2010) "Application of an imperialist competitive algorithm to the design of a linear induction motor", *Energy Conversion and Management*, Vol. 51, No. 7, pp. 1407-1411.
- MirHassani, S. A. and Abolghasemi, N. (2011) "A particle swarm optimization algorithm for open vehicle routing problem", *Expert Systems with Applications*, Vo. 38, No. 9, pp. 11547-11551.
- Niknam, T., Taherian Fard, E., Pourjafarian, N. and Rousta, A. (2011) "An efficient hybrid algorithm based on modified imperialist competitive algorithm and K-means for data clustering", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. Vol. 24, No. 2, pp. 306-317.