Archive of SID

مدلسازی مسیریابی وسایل نقلیه در شرایط وابستگی وسایل به نقاط تقاضا و با وجود محدودیت زمانی طول مسیر و حل آن با یک الگوریتم اجتماع مورچگان

عصمت زارع رئیس‌آبادی، دانش‌آموختهٔ کارشناسی‌ارشد، دانشکدهٔ مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
سیدحمید میرمحمدی*، استادیار، دانشکدهٔ مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
سیدرضا حجازی، دانشیار، دانشکدهٔ مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
پست الکترونیکی نویسندهٔ مسئول: h_mirmohammadi@cc.iut.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۳/۰۹/۱۵- پذیرش: ۱۳۹٤/۰۳/۰۸

چکیده

یکی از سیاست‌هایی که در مواجهه با مشکلات ناشی از حجم زیاد ترافیک در شهرهای پرجمعیت اتخاذ می‌شود، سیاست بازدارندگی مانند طرح ترافیک یا طرح زوج و فرد است که براساس آنها عبور و مرور آزاد وسایل به حوزه‌ای از مناطق پررفت‌وآمد ممنوع می‌شود. در نظرگیری فرض طرح ترافیک وسایل نقلیه در مسئله، آن را به مسیریابی وسایل نقلیه با وابستگی وسایل به نقاط تقاضا تبدیل می‌کند. در این مقاله ابتدا مدل مسئله مطرح می‌شود که فرض وابستگی وسایل نقلیه به نقاط تقاضا را درنظر می‌گیرد و برای هر تور از وسیلهٔ نقلیه، محدودیت زمانی طول مسیر را اعمال می‌کند، سپس الگوریتمی کارا برای حل این مسئله، طراحی می‌شود. حل مسئله در دو مرحله صورت می‌گیرد. در مرحلهٔ نخست، به حل دقیق مسائل با ابعاد کوچک پرداخته می‌شود و در مرحلهٔ دوم، روش حل مبتنی بر الگوریتم فراابتکاری اجتماع مورچگان ارایه شده است که برای حل مسائل بزرگ‌مقیاس به‌کار می‌رود. قدرت جست‌وجوی الگوریتم پیشنهادی با ارائهٔ روش‌های جست‌وجوی محلی در همسایگی نقاط موجه افزایش می‌یابد و از عملگرهای الگوریتم ژنتیک به‌منظور بهبود حل استفاده می‌شود. در پایان، دسته‌ای از مسائل آزمایشی طراحی شده و الگوریتم پیشنهادی، بر روی این دسته مسائل اجرا می‌شود. نتایج عددی حاصل از حل مسائل نمونه، کارایی چشمگیر الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با جواب بهینه را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: مسیریابی وسایل نقلیه، طرح ترافیک، وابستگی وسایل به نقاط تقاضا، محدودیت زمانی طول مسیر، الگوریتم اجتماع مورچگان

۱- مقدمه

مسئلهٔ مسیریابی وسایل نقلیه (VRP[1])، در پی جست‌وجوی برنامه‌ای کارا برای ناوگان وسایل نقلیه است. در این برنامه هر وسیلهٔ نقلیه، محموله‌ها را از انبار مرکزی بارگیری می‌کند و به مشتریانی در مکان‌های جغرافیایی مختلف تحویل می‌دهد؛ به‌طوری که محدودیت‌های مختلف نظیر بازگشت هر وسیلهٔ نقلیه به انبار مرکزی، برآورده کردن تقاضای مشخص هر مشتری و حداکثر ظرفیت حمل بار هر وسیلهٔ نقلیه رعایت شود. هدف در مسئلهٔ مسیریابی وسایل نقلیه آن است که با مدل‌های ریاضی، مسافت طی‌شده، زمان کل سفر، تعداد وسایل نقلیه، جریمه‌های دیرکرد و در نهایت تابع هزینهٔ حمل‌ونقل بهینه و رضایت مشتریان حداکثر شود (Dantzig et al., 1954).

* - نویسنده مسئول

www.SID.ir

Archive of SID

رشد شهری، سبب افزایش فزایندهٔ تقاضا در صنعت حمل‌ونقل شده که به‌تبع آن، شهرها و صنایع بزرگ را دست به گریبان مشکلات زیادی در زمینه‌های تراکم ترافیکی، آلودگی هوا، اتلاف وقت طولانی در مسیر سفرهای روزانهٔ افراد، افزایش مصرف سوخت، استهلاک وسایل نقلیه و... کرده است؛ این موارد به سیاستگذاری‌های جدید دولت‌ها می‌انجامد؛ یکی از این سیاست‌ها، طرح ترافیک و طرح زوج‌وفرد وسایل نقلیه است. براساس طرح ترافیک، عبور و مرور وسایل نقلیه به منطقهٔ پرترافیک شهر آزاد نیست، مگر آنکه دارای مجوز باشند. این محدودیت در عبور و مرور که به آن محدودیت طرح ترافیک گفته می‌شود، مسئله را به مسیریابی وسایل نقلیهٔ ناهمگن (HFVRP[2]) تبدیل می‌کند که به‌علت تمایز وسایل ناوگان از لحاظ محدودیت‌های سازگاری، جزو مسائل مسیریابی وسایل نقلیه با وابستگی وسایل به نقاط تقاضا (SDVRP[3])، قرار می‌گیرد (Hoff et al.,2010). زمانی که همهٔ انواع وسایل نقلیه، مجاز به سرویس‌دهی به هر مشتری (i) باشند و ناوگان وسایل نقلیه همگن باشد، SDVRP به VRP تبدیل می‌شود. بنابراین می‌توان گفت SDVRP حداقل به سختی‌VRP است و ازآنجا که مسئلهٔ VRP از دستهٔ مسائل Np-hard است (Toth and Vigo, 2002)، مسئلهٔ SDVRP نیز از دستهٔ مسائل Np-hard است.

مسئلهٔ مسیریابی وسایل نقلیه با وابستگی وسایل به نقاط تقاضا، زمانی مطرح می‌شود که وابستگی کاملی بین مشتریان (sites) و نوع وسایل نقلیه وجود داشته باشد؛ مانند برخی از سیستم‌های توزیع که هر وسیله مجاز به ملاقات هر مشتری نیست. به‌عبارت دیگر، در این‌گونه موارد رابطهٔ سازگاری بین مشتریان و وسایل نقلیه وجود دارد. به‌همین علت در چنین مسائلی، علاوه‌بر محدودیت‌های کلاسیک برای VRP، محدودیت‌های سازگاری (دسترسی) مشتری و وسیلهٔ نقلیه نیز باید اعمال شود. یک VSD [4] روی یک خیابان، محدودیتی است که از عبور یا سرویس‌دهی یک وسیلهٔ نقلیه از یک دسته وسیلهٔ خاص به یک خیابان، به‌علت برخی محدودیت‌ها (مانند نیاز برخی مشتریان به وسایل نقلیه‌ای با تجهیزات خاص برای سرویس‌دهی، عدم عبور وسایل نقلیه‌ای از دستهٔ بزرگ‌تر از خیابان‌های باریک یا پل‌هایی با قابلیت تحمل وزن مشخص)، مانع می‌شود (Sniezek and Bodin, 2006). در مسئلهٔ ما نیز به‌علت وجود طرح ترافیک، هر وسیلهٔ مجاز به سرویس‌دهی به هر مشتری نیست؛ به این معنا که تنها وسایلی که دارای مجوز طرح ترافیک باشند، می‌توانند به مشتریانی که در محدودهٔ طرح ترافیکی واقع شده‌اند، سرویس‌دهی کنند.

۱-۱- مروری بر ادبیات تحقیق

مسئلهٔ مسیریابی وسایل نقلیه، یکی از قدیمی‌ترین و در عین‌حال پرکاربردترین مسائل در زمینهٔ تحقیق در عملیات است که از ابتدای پیدایش آن در دههٔ ۵۰ میلادی تا کنون، موضوع بیش از هزار مقاله بوده و توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. توجه به تأثیر حیاتی حمل‌ونقل در زنجیرهٔ تأمین و لجستیک و همچنین تأثیر هزینه‌ای آن، دلیل چنین تمرکزی بر آن را روشن می‌کند.

نگ و همکاران، نخستین بار مدل SDVRP را معرفی کردند و آن را با استفاده از چهار روش ابتکاری ساده حل کردند. نتایج محاسباتی این مطالعه، برای مسائلی با ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ مشتری و با تعداد متفاوتی از انواع وسایل نقلیه ارایه شد (Nag et al., 1988). پس از آن، کوردیو و لاپورته، مسئلهٔ SDVRP را به مسیریابی وسایل نقلیهٔ دوره‌ای (PVRP[5]) تبدیل کردند و نشان دادند که SDVRP می‌تواند یک نوع خاص از PVRP باشد. در این مطالعه، ابتدا یک حل اولیه با تخصیص تصادفی یک نوع وسیلهٔ نقلیه مجاز به هر مشتری به‌دست آمد و پس از آن چندین مسئلهٔ VRP پایه حل شد. نویسندگان یک روش جست‌وجوی ممنوعه را برای حل مسئلهٔ SDVRP و SDVRPTW[6] ارایه دادند و چند مسئلهٔ آزمایشی را تولید کردند. نتایج محاسباتی نشان داد که الگوریتم ارائه‌شده می‌تواند برای مثال‌های تولیدشده در مقیاس بزرگ با زمان محاسباتی معقولی به نتایج خوبی دست پیدا کند و در تمامی مثال‌های SDVRP نیز قادر به دستیابی به بهترین حل‌های شناخته‌شده است (Cordeau and Laporte, 2001). در مطالعه‌ای دیگر، کوردیو و همکاران یک الگوریتم جست‌وجوی ممنوعهٔ بهبودیافته را معرفی کردند و آن را برای حل سه نوع مسئلهٔ مسیریابی وسایل نقلیه با پنجرهٔ زمانی(PVRPTW[7]، MDVRPTW[8] و SDVRPTW) به‌کار بردند (Cordeau, et al., 2004). پس از آن چائو و لیو، یک مدل ریاضی جدید را برای SDVRP معرفی کردند؛ به‌گونه‌ای که مدلسازی و حل مسئله، شامل سه مرحله بود. مراحل اول و دوم، مربوط به مدلسازی و حل اولیه و مرحلهٔ سوم مربوط به بهبود حل بود و

www.SID.ir

Archive of SID

در این راستا از رویکرد جست‌وجوی ممنوعه بهره گرفته شد. در مرحلهٔ نخست با حل مجموعه‌ای از مسائل تخصیص، مشخص می‌شود که به‌طور قطع هر نوع وسیلهٔ نقلیه به کدام مشتریان باید سرویس‌دهی‌کند (اختصاص مشتریان به انواع وسیلهٔ نقلیه) و در مرحلهٔ دوم، با توجه به نتیجهٔ حل حاصل از مرحلهٔ نخست، برای هر نوع وسیلهٔ نقلیه با مشتریان معلوم، با به‌کارگیری الگوریتم صرفه‌جو[9]، یک VRP مدلسازی و حل می‌شود. سپس حل اولیهٔ حاصل‌شده، با الگوریتم جست‌وجوی ممنوعه و با به‌کارگیری دو نوع حرکت و جابه‌جایی با توجه به محدودیت وابستگی وسایل به نقاط تقاضا بهبود می‌یابد (Chao and Liou, 2005).

در برخی مطالعات، چندین دسته از مسائل مسیریابی بررسی شده است که شامل SDVRP نیز می‌شود. در این مطالعات به‌طور معمول تمامی دسته مسائل مورد بررسی به نوع خاصی از مسائل مسیریابی تبدیل می‌شود و سپس به حل آن می‌پردازند. پیسینجر و روپکه، یک الگوریتم ابتکاری به‌نام ALNS[10] را معرفی کردند و از آن برای حل پنج نوع مختلف از مسائل مسیریابی: CVRP[11]، VRPTW، MDVRP، SDVRP و OVRP[12] به‌کار گرفتند. در این مطالعه، هر پنج دسته مسئله به PDVRP تبدیل شده و سپس الگوریتم ابتکاری ارائه‌شده برای حل آن به‌کار گرفته شده است (Pisinger and Ropke, 2007). همچنین آلونسو وهمکاران، مسئلهٔ PVRP با محدودیت دسترسی را بررسی کردند و یک الگوریتم جست‌وجوی ممنوعه را برای حل مسئله ارایه دادند. در مدل این مسئله، محدودیت‌های دسترسی که مربوط به مسئلهٔ SDVRP است به‌عنوان نوع خاصی از PVRP درنظر گرفته شده و مسئله روی دسته‌ای از مثال‌های تولیدی حل‌شده است (Alonso et al., 2008).

رویکردهای حل که تاکنون در مقالات برای مسئلهٔ SDVRP ارایه شده است، مسئله را به‌طور مستقیم حل نمی‌کند؛ به این معنا که ابتدا آن را به یکی از انواع مسائل مسیریابی تبدیل می‌کند و سپس به حل آن می‌پردازد یا دومرحله‌ای است؛ به این معنا که ابتدا مسئله را به چندین مسئلهٔ VRP پایه تبدیل می‌کنند و سپس به حل مسئله‌های ساده‌شده می‌پردازند؛ به این‌صورت که ابتدا با حل مجموعه‌ای از مسائل تخصیص، مشخص می‌شود که به‌طور قطع، هر نوع از وسیلهٔ نقلیه به کدام مشتریان سرویس‌دهی می‌کند (تخصیص مشتریان به هر نوع وسیلهٔ نقلیه) و سپس برای هر نوع وسیلهٔ نقلیه یک مسئلهٔ VRP پایه که همگن نیز است، حل می‌شود. اگرچه با این کار، ادامهٔ حل مسئله به‌راحتی انجام می‌گیرد؛ اما برخی از متغیرها در مرحلهٔ دوم و پس از حل مسئلهٔ ساده‌شده مقادیر یکسانی با مقدار حاصل‌شدهٔ آنها در مرحلهٔ نخست نخواهند داشت؛ درصورتی که تخصیص مشتریان به وسایل نقلیه در مرحلهٔ نخست با فرض ثابت بودن این متغیرها در مسئلهٔ ساده‌شده، صورت گرفته است. به‌همین علت اجرای این فرایند به دور شدن از بهینگی منجر می‌شود. به‌این منظور و برای به‌دست آوردن جواب‌های نزدیک‌تر به بهینه، در مدل پیشنهادی برای مسئلهٔ مسیریابی وسایل با وابستگی به نقاط تقاضا، تخصیص وسایل به مشتریان و تعیین مسیر حرکت آنها همزمان انجام می‌گیرد. علاوه‌بر این محدودیت ماکزیمم زمان سفر برای هر وسیلهٔ نقلیه (تور)، در مدل اعمال شده است؛ چراکه این محدودیت از مستهلک شدن ناهمگن وسایل جلو گیری می‌کند و این نحوهٔ استهلاک وسایل در عمل مطلوبیت زیادی از نظر هزینه‌های تعمیر و نگهداری دارد.

۲- فرضیه‌ها و مدل ریاضی مسئلهٔ *SDVRPTT*

۲-۱- فرضیات

تمامی فرضیه‌های مسئلهٔ VRP پایه، در مدل مسئله وجود دارد؛ با این تفاوت که ناوگان وسایل نقلیه ناهمگن است، تعداد وسایل نقلیه نامشخص است و از جمع تورهای حاصل برای وسایل نقلیه پس از حل مسئله مشخص می‌شود. از هر نوع وسیلهٔ نقلیه، به تعداد کافی (نامحدود) برای تخصیص به مشتریان وجود دارد. میزان بارگیری هر وسیلهٔ نقلیه نمی‌تواند بیشتر از ظرفیت آن وسیله باشد و هر وسیلهٔ نقلیه مجاز به سرویس‌دهی به هر مشتری نیست؛ به این معنا که تنها وسایل نقلیهٔ دارای مجوز طرح ترافیک، مجاز به سرویس‌دهی به مشتریان واقع در محدودهٔ طرح ترافیک هستند و برای هر توری که تشکیل می‌شود، یک محدودیت ماکزیمم طول زمان تور وجود دارد که زمان سفر هر وسیلهٔ نقلیه راه‌اندازی‌شده از آن حد نمی‌تواند فراتر برود. شایان ذکر است که اعمال محدودیت ماکزیمم زمان سفر وسایل نقلیه، به مستهلک شدن هماهنگ ناوگان منجر می‌شود و این امر هزینه‌های تعمیر و

www.SID.ir

Archive of SID

نگهداری یا گاه به‌روزرسانی ناوگان را کاهش می‌دهد. در این مدل، هدف آن است که نخست، زمان کل طی مسیر توسط سایر وسایل نقلیه کمینه شود و دوم، در انتخاب نوع وسایل نقلیه، هزینهٔ تهیهٔ آنها (هزینهٔ خرید) نیز لحاظ شود. ازاین‌رو تابع هدف از دو جزء تشکیل شده است: زمان کل طی مسیر و هزینهٔ خرید وسایل نقلیه که ضمن همگن‌سازی آنها سعی بر کمینه‌سازی توأم آن دارد. به این منظور بخش اول تابع هدف که بر حسب زمان است در ضریب γ_k که مربوط به تبدیل زمان به هزینه برای هر نوع وسیله (k) است، ضرب می‌شود. ضریب γ_k براساس پارامترهای مختلفی که در صنایع مختلف، متفاوت است تعیین می‌شود. برخی از این پارامترها عبارتند از: مصرف سوخت وسایل نقلیه در زمان، نرخ استهلاک وسایل نقلیه، نفرساعت هزینهٔ نیروی انسانی، نرخ فاسد شدن و قیمت مواد حمل‌شده و ... ؛ به این ترتیب تابع هدف مسئله به کمینه‌سازی کل هزینهٔ مسیریابی تبدیل می‌شود.

انواع وسیلهٔ موجود برحسب ظرفیت وسیلهٔ نقلیه شامل دو نوع بزرگ (کامیون) و کوچک (وانت) فرض شده است که هر کدام برحسب داشتن یا نداشتن مجوز طرح ترافیک، خود به دو زیردسته تقسیم می‌شوند؛ بنابراین ناوگان وسایل حمل‌ونقل، به چهار نوع وسیله تقسیم می‌شود.

۲-۲- پارامترها و متغیرهای مسئله

مدل پیشنهادی یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط (MIP[13]) است که پارامترهای تعریف‌شده در مدل، در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. پارامترهای تعریف‌شده در مدل MIP

پارامتر	تعریف
$N = \{0,1,\dots,n\}$	مجموعه گره‌های گراف (مشتریان و انبار)
$A \subseteq N * N$	مجموعه کمان‌های سفر بین گره‌ها
$m = \{1,\dots,4\}$	مجموعه انواع وسایل نقلیه در دسترس
$K = \{1,\dots,k\}$	مجموعه وسایل نقلیه در دسترس
A_j	مجموعه انواع وسایل نقلیهٔ مجاز برای سرویس‌دهی به گره(j) و ($j \in N$)
f_K	هزینهٔ ثابت خرید وسیلهٔ نقلیه (K)
γ_K	ضریب تبدیل برای وسیلهٔ نقلیه (K)
C_K	ظرفیت کل یک وسیلهٔ نقلیه (K)
q_j	میزان تقاضای مشتری (j) و ($j \in N$)
t_{ij}^K	زمان سفر از مشتری (i) به مشتری (j) توسط وسیلهٔ نقلیه (K) $\forall (i,j) \in A, t_{ii} = 0$
S_j	مدت زمان مورد نیاز مشتری (j) به سرویس‌دهی و ($j \in N$) و $S_0=0$
T_K	ماکزیمم زمان مجاز طی مسیر برای وسیلهٔ نقلیه (K)
$Tabu_K$	مجموعه مشتریان غیرمجاز برای وسیلهٔ نقلیه (K)

متغیرهای تعریف‌شده در مدل پیشنهادی به‌صورت جدول ۲ است.

جدول ۲. متغیرهای تعریف‌شده در مدل **MIP**

متغیر	تعریف
X_{ij}^K	اگر وسیلهٔ نقلیه K از گره (i) به گره (j) سفرکند برابر ۱ و در غیر این‌صورت برابر ۰ است. $(\forall (i,j) \in A, \forall K = \{1,\dots,k\})$
u_i^K	میزان کل تقاضای پاسخ داده‌شده توسط وسیلهٔ نقلیه K از ملاقات مشتری i (متغیر کمکی جهت حذف زیرتور) $(\forall K = \{1,\dots,k\}),\ \forall i \in N\backslash\{0\}$

۲-۳- مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مسئله

مدل مسئله به‌صورت زیر ارایه می‌شود:

$$min \sum_{K=1}^{k} \gamma_K \sum_{i=0, i\neq j}^{n} \sum_{j=0}^{n} t_{ij}^K X_{ij}^K + \sum_{K=1}^{k} \sum_{j=1}^{n} f_K X_{0j}^K \quad (۱)$$

$$\sum_{K\in(A_j)} \sum_{i=0, i\neq j}^{n} X_{ij}^K = 1 \qquad \forall j = 1,2,\dots,n \quad (۲)$$

$$\sum_{i=0}^{n} X_{ip}^K - \sum_{j=0}^{n} X_{pj}^K = 0 \quad \forall K = 1,2,\dots,k, \forall p = 1,\dots,n, \qquad \forall i \neq j = 0,1,\dots,n \quad (۳)$$

$$u_i^K - u_j^K + c_K X_{ij}^K \leq c_K - d_j \quad \forall K = 1,\dots,k, \forall i,j \in N\backslash\{0\}, i \neq j, \quad (۴)$$

Such that: $d_i + d_j \leq c_K$

$$d_i \leq u_i^K \leq c_K \quad \forall i \in N\backslash\{0\}, K = 1,\dots,k \quad (۵)$$

$$\sum_{i=0}^{n} X_{ij}^K = 0 \qquad \forall j = 1,\dots,n, \quad \forall K \notin A_j \quad (۶)$$

$$\sum_{j=0, j\neq i}^{n} \sum_{i=0}^{n} X_{ij}^K \left(t_{ij}^K + S_j\right) \leq T_K \quad \forall K = 1,\dots,k \quad (۷)$$

$$X_{ii}^K = 0 \qquad \forall i = 0,1,\dots,n \quad (۸)$$

www.SID.ir

Archive of SID

$$X_{ij}^{K}=\{0,1\} \quad \forall i=j=0,1,\dots,n\,,\forall K=1,\dots,k \qquad (۹)$$

معادلهٔ ۱ مربوط به تابع هدف است که مجموع هزینه‌های مسیریابی (کل زمان پیموده‌شده) و هزینهٔ ثابت راه‌اندازی وسایل نقلیه را مینیمم می‌کند. معادلهٔ ۲ نشان می‌دهد که هر گره (هر مشتری)، دقیقاً یک بار و تنها توسط یک وسیلهٔ نقلیه سرویس‌دهی می‌شود. معادلهٔ ۳ رابطهٔ تعادل ورودی و خروجی است و تضمین می‌کند که اگر وسیله‌ای به یک گره (مشتریp) وارد شود، حتماً آن را ترک خواهد کرد. معادله‌های ٤ و ٥ به‌ترتیب مربوط به حذف زیرتور و ظرفیت وسیلهٔ نقلیه‌اند. اگر X_{ij}^{k} =1 باشد، محدودیت (٤) سبب حذف زیرتور می‌شود و در غیر این صورت این محدودیت تحت‌الشعاع محدودیت (٥) درمی‌آید و همیشه برقرار خواهد بود. معادلهٔ ٦ مربوط به وابستگی وسایل نقلیه به نقاط تقاضا (طرح ترافیک) است که نشان می‌دهد هر وسیلهٔ نقلیه، تنها می‌تواند به مشتریانی که در مجموعهٔ مجاز آن قرار دارند، سرویس بدهد. معادلهٔ ۷ نشان می‌دهد که طول هر تور ایجادشده توسط هر وسیلهٔ نقلیه از ماکزیمم زمان اختصاص داده‌شده به آن وسیلهٔ نقلیه نمی‌تواند تجاوز کند. معادلهٔ ۸ تضمین می‌کند که هیچ کمانی وجود ندارد که به گره خود برگردد و حلقه تشکیل دهد. معادلهٔ ۹ نشان می‌دهد که X_{ij}^{k} یک متغیر باینری است.

با وجود ساختار به‌ظاهر سادهٔ مدل ارائه‌شده، به‌علت مشخصه‌هایی نظیر محدودیت زمانی طی مسیر، ناهمگن بودن مسئله، تعداد وسیلهٔ نقلیهٔ متغیر و به‌ویژه محدودیت وابستگی وسایل به نقاط تقاضا به‌طور همزمان، از پیچیدگی‌های زیادی در حل برخوردار است و به‌منظور ارائهٔ یک جواب مطلوب در حل مسائل، نیازمند به‌کارگیری الگوریتمی کاراست. مسئلهٔ مسیریابی وسایل نقلیه تعمیمی از مسئلهٔ فروشندهٔ دوره‌گرد است. معروف‌ترین روشی که در ادبیات برای حل مسئلهٔ فروشندهٔ دوره‌گرد استفاده شده است الگوریتم اجتماع مورچگان است که به جواب‌های نزدیک بهینه دست پیدا می‌کند؛ به‌طوری که انواع الگوریتم مورچگان برای حل این مسئله تهیه شده است. این روش نسبت به سایر روش‌ها نظیر شبیه‌سازی آنیلینگ و الگوریتم ژنتیک، یک مزیت دارد و آن اینکه الگوریتمی با قابلیت تکرار است. الگوریتم مورچگان می‌تواند به‌طور مداوم اجرا شود و در زمانی که گراف به صورت پویا ممکن است تغییر کند، با تغییرات در زمان واقعی سازگار می‌شود که این خاصیت در مسیریابی شبکه‌های کامپیوتری و سامانهٔ حمل‌ونقل شهری مهم است؛ بنابراین یک الگوریتم اجتماع مورچگان ترکیبی با جست‌وجوهای همسایگی کارا به‌منظور حل مسئله انتخاب شد.

۳- معرفی الگوریتم مورچگان پیشنهادی برای حل مسئلهٔ SDVRPTT

دوریگو و گامباردلا، برای نخستین بار سیستم جمعیت مورچگان (ACS[14]) را معرفی‌کردند که تا حد زیادی از سیستم مورچه (AS[15]) الهام گرفته بود. این الگوریتم به‌دلیل معرفی سازوکارهای جدید، از لحاظ کارایی نسبت به AS به بهبودهایی دست یافته است *Doringo and* Ganbardella, (1997)

الگوریتم ACS روشی است که براساس مشارکت مجموعه‌ای از مورچه‌های مصنوعی و با توجه به فرومون برجای‌مانده به‌روی مسیر، راه حل مسائل را می‌یابد. چند مورچه در یک گراف که متناظر با مسئلهٔ بهینه‌یابی است، قرار می‌گیرند. هر مورچه به‌صورت احتمالی در این گراف حرکت کرده و بر اساس مقدار فرومون و اطلاعات ابتکاری اقدام به تولید جواب می‌کند. سپس مقدار فرومون مسیر را براساس کیفیت جواب تولیدشده بهنگام می‌کند و به این وسیله بین مورچه‌ها ارتباط برقرار می‌شود. هر مورچهٔ مصنوعی علاوه‌بر ویژگی‌های مورچه‌های طبیعی، از اطلاعات ابتکاری و حافظه‌ای برای ثبت حرکت‌های قبلی خود بهره می‌برد. اطلاعات ابتکاری براساس تابع هدف مسئله تعریف می‌شود، به این صورت که معرف میزان بهبود در مقدار این تابع، در اثر حرکت یک مورچه از یک گره به گره دیگری است. همچنین هر حرکتی که یک مورچهٔ مصنوعی انجام می‌دهد در حافظه‌ای ذخیره می‌شود، تا برگشت به عقب و اصلاح مقادیر فرومون به‌سادگی انجام‌پذیر باشد. بنابراین به‌طور کلی ویژگی اجتماع مورچه‌های مصنوعی عبارت است از:

۱. بازخورد مثبت براساس فرومون برجای‌مانده و رفتار پیگیرانهٔ مسیر برای کشف راه حل‌های خوب؛

۲. بازخورد منفی که از تبخیر فرومون استفاده می‌کند تا از همگرایی نابهنگام الگوریتم جلوگیری کند؛

www.SID.ir

Archive of SID

۳. ساختارهای ابتکاری که به یافتن راه حل‌های قابل قبول در فرایند جست‌وجو کمک می‌کند.

الگوریتم مورچگان شامل اجتماعی از مورچه‌های مصنوعی است که در مسئلهٔ مورد بررسی، هر مورچه یک جواب را می‌سازد؛ به این صورت که با شروع از انبار مرکزی و هر بار با انتخاب یک نوع وسیلهٔ نقلیه (براساس معیار انتخاب[۱۶])، مسیر حرکت خود را آغاز می‌کند و در طی مسیر، هر بار با انتخاب گره بعدی که با توجه به قانون عبور و محدودیت‌هایی نظیر سازگاری با نوع وسیلهٔ نقلیه انتخاب‌شده، ظرفیت وسیله و محدودیت زمانی طول تور تعیین می‌شود، به حرکت خود ادامه می‌دهد. مسیر حرکت هر مورچه، نمایانگر یک جواب برای مسئله است. رویکرد کلی الگوریتم مورچگان پیشنهادی برای حل مسئله، به‌صورت زیر خواهد بود:

نخست ماتریس فرومون اولیهٔ مسیر، قوانین حرکت و ماتریس اطلاعات ابتکاری تعیین می‌شود. هر مورچه براساس قانون احتمالی حرکت، جوابی را تولید می‌کند و سپس براساس قانون به‌روزرسانی محلی و سراسری، فرومون یال‌ها به‌روز می‌شود. بهترین راه حل موجه در خلال هر تکرار ثبت می‌شود و مراحل یادشده تا دستیابی به معیارهای پایانی تکرار می‌شود. همچنین در الگوریتم ارائه‌شده، از جست‌وجوی محلی همسایگی‌های موجه با الهام از عملگرهای تقاطعی و جهشی ژنتیک در جهت بهبود تابع هدف، به نحو مؤثر استفاده می‌شود. در ادامه بخش‌های مختلف طراحی الگوریتم مورچگان پیشنهادی ارایه شده است.

۳-۱- معیار انتخاب وسیلهٔ نقلیه

برای ایجاد هر تور از وسیلهٔ نقلیه در آغاز حرکت، ابتدا یک مشتری (i) از میان مشتری‌های ملاقات‌نشده انتخاب می‌شود، سپس برای سرویس‌دهی به مشتری (i)، باید یک نوع وسیلهٔ نقلیه انتخاب شود تا به این مشتری و سایر مشتریان مجاز به سرویس‌گیری از آن وسیله پاسخ‌دهی کند. ازآنجا که برای هر مشتری ممکن است چندین نوع وسیلهٔ نقلیه، مجاز به سرویس‌دهی باشند، یک حالت گزینش ایجاد می‌شود که معیاری برمبنای بهترین حالت و براساس رابطهٔ ۱۰ تعریف شده است:

$$K = \left\{ arg \quad max \quad _{K \in A_i} \left({}^{n_K}/_{f_K} \right) \right\} \qquad (۱۰)$$

در رابطهٔ ۱۰، A_i مجموعهٔ انواع وسایل نقلیهٔ مجاز برای سرویس‌دهی به گره (i) است. f_K هزینهٔ راه‌اندازی مربوط به وسایل نقلیه است و n_K تعداد مشتریان ملاقات‌نشده‌ای است که وسیلهٔ نقلیهٔ نوع K مجاز به سرویس‌دهی به آنهاست. شایان ذکر است که n_K در طی فرایند حل مسئله و با توجه به فهرست $Tabu_k$ در هر لحظه با ملاقات مشتریان دیدارنشده، به‌روزرسانی می‌شود.

۳- ۲- فرومون مسیر

فرومون اولیه، یکی از پارامترهای مؤثر در محاسبهٔ احتمال انتخاب گره بعدی (j) است که به‌طور معمول بدون درنظر گرفتن هیچ‌گونه اطلاعات ابتکاری تعریف می‌شود که در مسئلهٔ مورد بررسی نیز با تنظیم پارامترها بهترین مقدار آن حاصل شده است. ماتریس فرومون‌هایی که در الگوریتم مورچگان تعریف می‌شود، دوبعدی است که هر درایه (i-j) از ماتریس، میزان فرومون کمان (i-j) از مسیر حرکت را نشان می‌دهد. در مسئلهٔ مورد بررسی، به‌علت ناهمگن بودن مسئله و متغیر بودن تعداد وسیلهٔ نقلیه، ماتریس فرومون به‌صورت سه‌بعدی (τ_{ij}^k) تعریف شده است که هر درایه (i-j-k) از ماتریس، نمایانگر میزان فرومون کمان (i-j) از مسیر، در مواقعی است که وسیلهٔ نقلیه نوع k، انتخاب شود.

۳-۳- اطلاعات ابتکاری مسئله

اطلاعات ابتکاری براساس تابع هدف مسئله تعریف می‌شود؛ به این صورت که معرف میزان بهبود در مقدار این تابع، در اثر حرکت یک مورچه از یک گره به گره دیگری است. بنابراین باید اطلاعات ابتکاری، طوری تعریف شود که به بهبود تابع هدف مسئله بینجامد. تابع هدف مسئله، شامل حداقل‌سازی زمان طی‌شده در کل مسیر با کمترین تعداد وسیلهٔ نقلیه است که حداقل کردن تعداد وسیلهٔ نقلیه در حل اولیه و با توجه به ظرفیت وسایل نقلیهٔ اعمال‌شده است. دراینجا با توجه به هدف مینیمم‌سازی زمان طی‌شده در کل مسیر، اطلاعات ابتکاری مسئله (η_{ij}^k) مرتبط با انتخاب کمان (i-j) از وسیلهٔ نقلیهٔ k را براساس رابطهٔ ۱۱ محاسبه خواهیم کرد:

$$\eta_{ij}^k = \frac{1}{t_{ij}^k} \qquad (۱۱)$$

www.SID.ir

Archive of SID

۳-٤- قانون حالت حرکت

فرض می‌کنیم وسیلهٔ نقلیه k در مکان مشتری (i) باشد؛ شهر بعدی را که توسط این وسیله ملاقات می‌شود با J_i^k نشان می‌دهیم که مطابق با یکی از دو قانون اکتشاف یا استخراج محاسبه می‌شود. از این دو قانون به‌منظور اهمیت دادن به ماکزیمم مقدار فرومون استفاده می‌شود؛ به این معنا که هر چه میزان فرومون یک کمان بیشتر باشد، تمایل انتخاب آن کمان از طریق قوانین اکتشاف و استخراج بیشتر خواهد بود. در قانون اکتشاف، مکان مشتری بعدی به‌طور مستقیم و براساس ماکزیمم مقدار حاصل‌ضرب فرومون و اطلاعات ابتکاری، مطابق با رابطهٔ ۱۲ محاسبه می‌شود.

$$J_i^k = \left\{ arg\,max_{z \notin \in Tabu_k} \left(\tau_{iz}^k\right)^{\alpha} \left(\eta_{iz}^K\right)^{\beta} \;\; if: q \le q_0 \right\} \quad (۱۲)$$

در قانون استخراج با توجه به میزان فرومون و اطلاعات ابتکاری، احتمال انتخاب مشتری‌هایی که در لیست $Tabu_k$ قرار ندارند، محاسبه می‌شود و سپس J_i^k براساس چرخ رولت که در آن احتمال انتخاب شهر بعدی j مطابق با رابطهٔ ۱۳ محاسبه می‌شود، به‌دست می‌آید.

$$P_{ij}^k = \left\{ \frac{\left(\tau_{ij}^k\right)^{\alpha}\left(\eta_{ij}^k\right)^{\beta}}{\sum_{z \notin \in Tabu_k} \left(\tau_{iz}^k\right)^{\alpha}\left(\eta_{iz}^k\right)^{\beta}} j \notin Tabu_k \;\; if: q > q_0 \right\} \quad (۱۳)$$

علائم آورده‌شده در روابط ۱۲ و ۱۳ به‌شرح زیر تعریف می‌شوند:

τ_{ij}^k: مقدار فرومون روی کمان (i-j) برای وسیلهٔ نقلیهٔ نوع k؛

η_{ij}^k: اطلاعات ابتکاری کمان (i-j) با وسیلهٔ نقلیهٔ نوع k؛

α و β: پارامترهای کنترلی تعیین‌کنندهٔ اهمیت اطلاعات ابتکاری در برابر فرومون در قانون‌های انتخاب؛

N_i^k : مجموعهٔ مشتری‌های قابل ملاقات، مانند j ، برای وسیلهٔ نوع k وقتی نزد مشتری i است.

مشتری j دارای شرایط زیر است:

۱) مشتری j تاکنون توسط هیچ وسیله‌ای ملاقات نشده باشد.

۲) $q_j + \sum_{t \in M_i^k} q_t \le C_k$ که در آن M_i^k مجموعهٔ مشتریانی است که توسط وسیلهٔ نقلیه k ، وقتی که نزد i است، ملاقات شده است.

۳) $S_j + t_{ij} + \sum_{(l-s) \in E_i^k} t_{ls} + \sum_{t \in M_i^k} S_t \le T_k$ که در آن E_i^k مجموعهٔ کمان‌هایی است که توسط وسیلهٔ نقلیهٔ k ، وقتی که نزد i است، طی شده است.

٤) $k \in A_j$

q_0: پارامتر تعیین‌کنندهٔ اهمیت انتخاب براساس اکتشاف به انتخاب مبنی بر استخراج؛ $q_0 \in [0,1]$ (q_0 بزرگ‌تر ترجیح بیشتر اکتشاف را نتیجه می‌دهد).

۳-۵- جست‌وجوی همسایگی (L-S)

پس از دستیابی به هر حل موجه برای مسئلهٔ مسیریابی، تعدادی تور حاصل می‌شود که هر کدام مربوط به یک وسیلهٔ نقلیه است که به تعدادی از مشتریان از مجموعهٔ کل، سرویس‌دهی می‌کند. به‌منظور بهبود حل و جست‌وجوی جامع‌تر از فضای حل، از عملگرهای جست‌وجوی همسایگی متنوعی بهره گرفته شده است که در ادامه به آن می‌پردازیم.

الگوریتم جست‌وجوهای همسایگی مورد استفاده که برای پیمایش در فضای شدنی و به‌دست آوردن حل همسایه طراحی شده است عبارتند از:

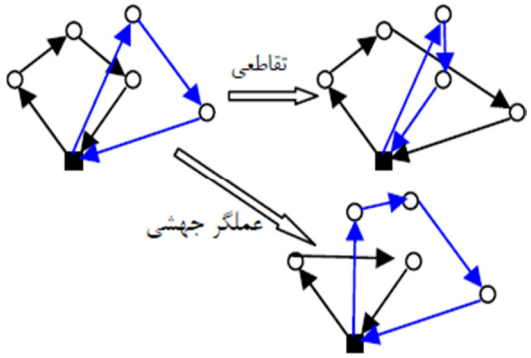
L-S1: دو مسیر مربوط به دو وسیلهٔ نقلیه (همگن یا ناهمگن) از جواب شدنی فعلی به‌طور تصادفی انتخاب شده وسپس دو گره از این دو مسیر مختلف، با رعایت محدودیت‌های ظرفیت وسایل نقلیه، وابستگی وسایل به نقاط تقاضا و ماکزیمم زمان طی مسیر با یکدیگر تعویض می‌شوند. این جست‌وجوگر مانند عملگر تقاطعی الگوریتم ژنتیک عمل می‌کند و این کار به یافتن سایر جواب‌های اطراف جواب ایجادشده منجر می‌شود که ممکن است بهتر از جواب فعلی باشند.

L-S2: دو مسیر مربوط به دو وسیلهٔ نقلیه از جواب شدنی فعلی به‌طور تصادفی انتخاب شده و سپس یک گره از یک مسیر حذف و به مسیر دیگر با رعایت محدودیت‌های ظرفیت وسایل نقلیه، وابستگی وسایل به نقاط تقاضا و ماکزیمم زمان طی مسیر، اضافه می‌شود. این جست‌وجوگر مانند عملگر جهشی الگوریتم ژنتیک عمل می‌کند و این کار به ایجاد تنوع در جواب‌های تولیدشده و یافتن سایر جواب‌های اطراف جواب ایجادشده منجر می‌شود که ممکن است بهتر از جواب فعلی باشند.

www.SID.ir

Archive of SID

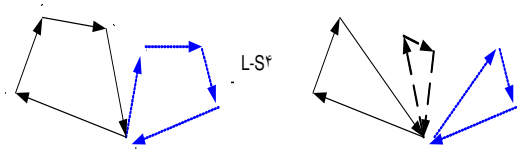
شکل ۱ نمایی از جست‌وجوهای همسایگی مورد استفاده (L-S1-L-S2) را نشان می‌دهد که مانند عملگرهای تقاطعی و جهشی ژنتیک عمل می‌کند.



شکل ۱. عملگرهای تقاطعی و جهشی

L-S3: تعدادی تور به‌طور تصادفی انتخاب می‌شود و در هر تور، از الگوریتم 2-opt به‌منظور جابه‌جایی گره‌ها در داخل همان تور استفاده می‌شود.

L-S4: دو تور از دو وسیلهٔ نقلیه (همگن یا ناهمگن) به‌طور تصادفی انتخاب می‌شود، در هر کدام از دو تور یک نقطهٔ تقاطع به‌طور تصادفی مشخص می‌شود، یک نوع وسیلهٔ نقلیهٔ دیگر (به‌منظور ایجاد تور جدید) به‌طور تصادفی انتخاب می‌شود. مشتریانی از داخل هر دو تور قبلی و از نقطهٔ تقاطع به بعد (تا انتهای تور) که با توجه به محدودیت ظرفیت، وابستگی وسایل نقلیه به نقاط تقاضا و ماکزیمم زمان طی مسیر، قادر به سرویس‌گیری از تور جدید باشند، از تورهای فعلی حذف شده و با توجه به قانون مینیمم مسافت بین گره‌ها به تور جدید، اضافه می‌شوند. شکل ۲، نمایی از جست‌وجوی همسایگی L-S4 مورد استفاده در الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد.



شکل۲. عملگرجست‌وجوی محلی L-S4

۳-۶- به‌روزرسانی محلی فرومون مسیر

همان‌طور که مورچه‌ها بین گره (i) و (j) حرکت می‌کنند، مقدار فرومون روی کمان پیموده‌شده را با استفاده از رابطهٔ ۱٤ به‌روز می‌کنند.

$$\tau_{ij}^{k}(t) = (1-\rho) * \tau_{ij}^{k}(t-1) + \rho * (\tau_0) \qquad (١٤)$$

در این رابطه، τ_0 مقدار اولیهٔ فرومون است، ρ نرخ تبخیر فرومون و پارامتری در بازهٔ [0,1] است که کاهش فرومون روی کمان‌ها را تنظیم می‌کند و $\tau_{ij}^{k}(t-1)$ میزان فرومون قبلی کمان (i-j) را در زمانی که توسط وسیلهٔ نقلیهٔ (k) سرویس‌دهی شده است، نشان می‌دهد. نتیجهٔ به‌روزرسانی محلی این است که اگر در هر زمان، یک مورچه کمان (i-j) را پیمود، آن‌گاه ردپای فرومون کاهش یابد تا کمان‌ها برای مورچه‌های بعدی در تکرارهای بعدی کمتر مطلوب باشد. این موضوع به تشویق بیشتر عبور از کمان‌هایی که هنوز ملاقات نشده‌اند منجر می‌شود. بنابراین به‌روزرسانی محلی به اجتناب از موقعیت‌های رکود ضعیف[۱۷] منجر می‌شود.

۳-۷- به‌روزرسانی سراسری فرومون مسیر

زمانی که کل مورچه‌ها، تورشان را ایجاد کردند، فرومون کمان‌های متعلق به بهترین تور به‌صورت رابطهٔ ۱۵ به‌روز می‌شود:

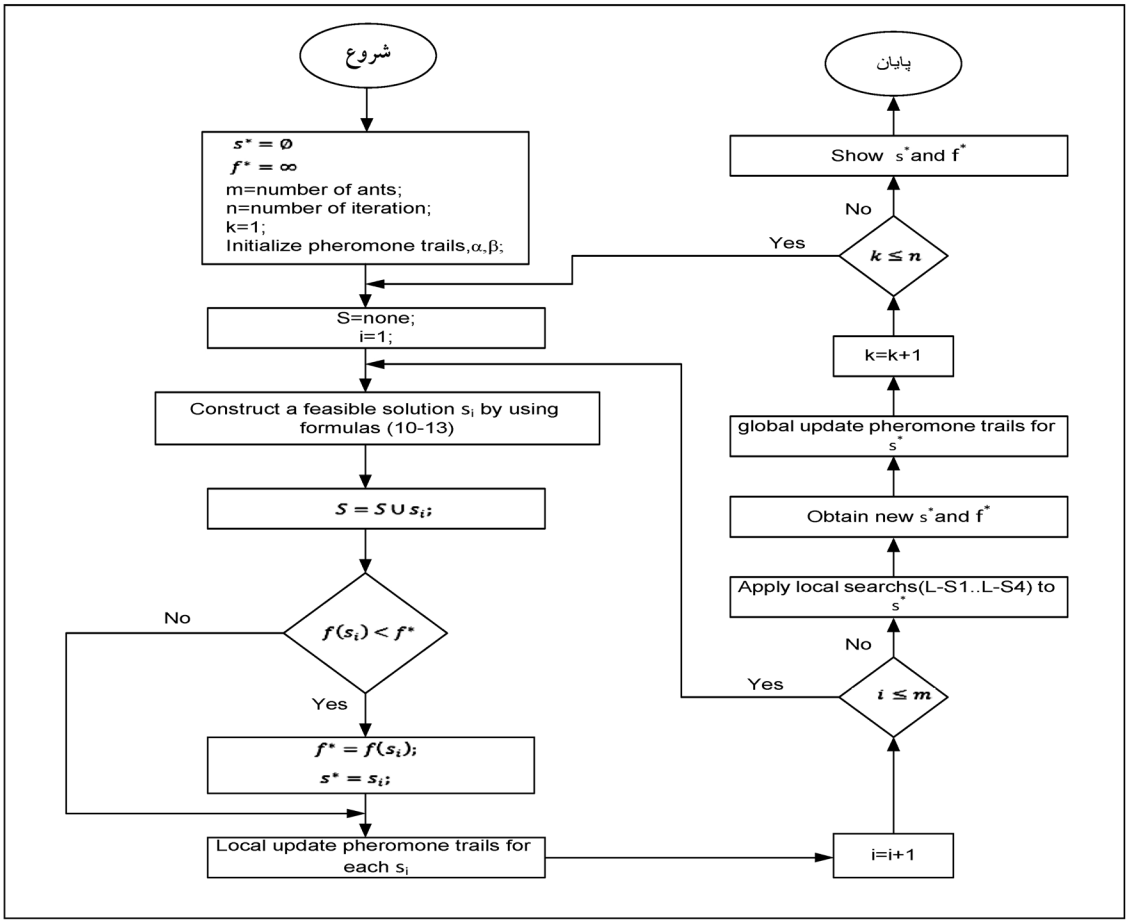
$$\tau_{ij}^{k}(t) = (1-\varphi) * \tau_{ij}^{k}(t-1) + \varphi * \left(\frac{1}{T_b}\right) \qquad (١٥)$$

در این رابطه، T_b تابع هدف بهترین تور به‌دست‌آمده در کل الگوریتم تا آن لحظه؛ و φ نرخ تقویت فرومون و پارامتری در بازهٔ [0,1] است که افزایش فرومون روی کمان‌ها را تنظیم می‌کند. به‌روزرسانی سراسری، تنها فرومون روی کمان‌های متعلق به بهترین تور را تنظیم می‌کند و این موضوع، به تشویق مورچه‌ها برای جست‌وجوی همسایگی‌های بهترین تور در تکرارهای بعدی منجر می‌شود.

روند کلی الگوریتم مورچگان پیشنهادی در فلوچارت شکل ۳ نمایش داده شده است.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۳. روند کلی الگوریتم مورچگان پیشنهادی

٤- نتایج محاسباتی

به‌منظور نشان دادن کارایی الگوریتم و حل مسائل نمونه، از داده‌های سولامون (Solomon, 1987) استفاده شد؛ اما این داده‌ها برای مسائل همگن طراحی شده است و به‌همین منظور با استفاده از روابط موجود در مقالهٔ پایهٔ Chao and Liou (2005) مربوط به مسئلهٔ SDVRP، ظرفیت‌های متفاوت انواع وسایل نقلیه تولید شد و به‌طور تقریبی ۱۵ درصد از ناحیه در محدودهٔ طرح ترافیک قرار گرفت که براساس آن، پارامترهای مربوط به محدودیت وابستگی وسایل نقلیه به نقاط تقاضا طراحی شده است. داده‌های سولامون برای مسائلی تا ابعاد ۱۰۰ گره (مشتری) طراحی شده است که به‌منظور حل مسئله در ابعاد بزرگ‌تر، با تشخیص توزیع پارامترها در دستهٔ مسائل سولامون، دستهٔ مسائل تولیدی تا ابعاد ۲۰۰ گره طراحی و حل شده است.

برنامهٔ الگوریتم با استفاده از نرم‌افزار Visual C#.net ۲۰۱۰ کد شده است و بر روی کامپیوتری با مدل E5300 با Cpu2 ،۲٦۰ GHZ، Ram 4 G اجرا شده است. در نمایش خروجی نرم‌افزار تعداد و نوع وسیلهٔ نقلیهٔ تخصیص‌داده‌شده به آنها مشخص شده است و برای هر وسیلهٔ نقلیه، هزینه‌های مرتبط با آن اعم از هزینه‌های سفر و هزینه‌های ناوگان محاسبه شده است.

٤-١- تنظیم پارامترها

با تنظیم پارامترهای الگوریتم پیشنهادی، بهترین مقادیر پارامترهای کنترلی الگوریتم که منجر به بهینه‌سازی مسئله و عملکرد خوب الگوریتم می‌شود، حاصل شده که در جدول ۳ آمده است.

٤-٢- نتایج آزمایش‌های الگوریتم پیشنهادی

در جدول ٤، نتایج به‌دست‌آمده از مقایسهٔ حل بهینهٔ ۸ مسئلهٔ نمونه در ابعاد کوچک با نتایج حاصل از ACO ارایه شده است. مسائل مذکور در ابعاد کوچک توسط نرم‌افزار

www.SID.ir

Archive of SID

Gams23.4 کدنویسی شد و برای دسته مسائل تولیدشده تا ۱۲ گره، حل بهینه حاصل شد. از مقایسهٔ نتایج ACO با جواب بهینهٔ Gams، می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم ACO پیشنهادی در تمامی مسائل کوچک‌مقیاس، به‌جز دو مورد (در مسائل SDVRPTT 6 و SDVRPTT8) قادر به دستیابی به جواب بهینه است.

جدول ۳. پارامترهای کنترلی مسائل

پارامترهای کنترلی مسئله	مقادیر پارامتر
α (اهمیت مقدار فرومون کمان)	۱/۵
β (اهمیت مقدار میدان دید مورچه)	۲
τ_0(میزان فرومون اولیه)	۰/۲
q_0(پارامتر آستانهٔ ثابت در نسبت اهمیت اکتشاف به استخراج)	
ρ(ضریب تبخیر فرومون)	۰/۵
φ(ضریب تقویت فرومون)	۱

جدول٤. مقایسهٔ نتایج برای مسائل کوچک‌مقیاس

درصد خطا	الگوریتم *ACO*		حل بهینه (*Gams*)		تعداد و نوع وسیله				تعداد مشتری	شمارهٔ مسئله
	زمان‌حل (ثانیه)	تابع هدف	زمان حل (ثانیه)	تابع هدف	٤	۳	۲	۱		
۰	۰/۲۳	٤٤۰	۰/۲۹۵	٤٤۰	۱	۰	۰	۰	۵	SDVRPTT1
۰	٤/٦۳	۳٤۲	۱/۷٤۱	۳٤۲	۱	۰	۰	۱	٦	SDVRPTT2
۰	۰/۳۵	٤۸۰	۰/۸۷	٤۸۰	۰	۱	۱	۱	۷	SDVRPTT3
۰	٤/٦۹	۵٦٤	۵/۲۲۹	۵٦٤	۱	۱	۱	۰	۸	SDVRPTT4
۰	۷/۳۲	٦٤۵	۲۳/٤۷۸	٦٤۵	۲	۰	۰	۲	۹	SDVRPTT5
۱/۲	۵۰/۹٦	۷۹٦	۱۵٦/۰۵۲	۷۸٦	۱	۱	۰	۱	۱۰	SDVRPTT6
۰	۱۷/٤۰	۵۵۳	۲۳٦٤/۸۲	۵۵۳	۰	۱	۱	۱	۱۱	SDVRPTT7
۰/۱	۱۹/٤۱	۵۵٦	۳٦۰۰	۵۵۵	۰	۱	۱	۱	۱۲	SDVRPTT8

حل ۸ مسئلهٔ نمونه نیز در ابعاد بزرگ تا ۲۰۰ گره توسط ACO بررسی شد. با توجه به اینکه در این مقاله، مسئله برای اولین بار حل شده است، مبنای مقایسه‌ای برای حل در ابعاد بزرگ وجود ندارد و بنابراین الگوریتم پیشنهادی تا ابعاد ۲۰۰ گره که در زمان معقولی به جواب منجر می‌شود، حل شده که نتایج حل در جدول ۵ آمده است. باتوجه به نتایج عددی ارائه-شده در جدول ۵، مشاهده می‌شود که زمان لازم برای حل مسائل بزرگ‌مقیاس به‌وسیلهٔ الگوریتم پیشنهادیACO، با افزایش معقولی همراه است.

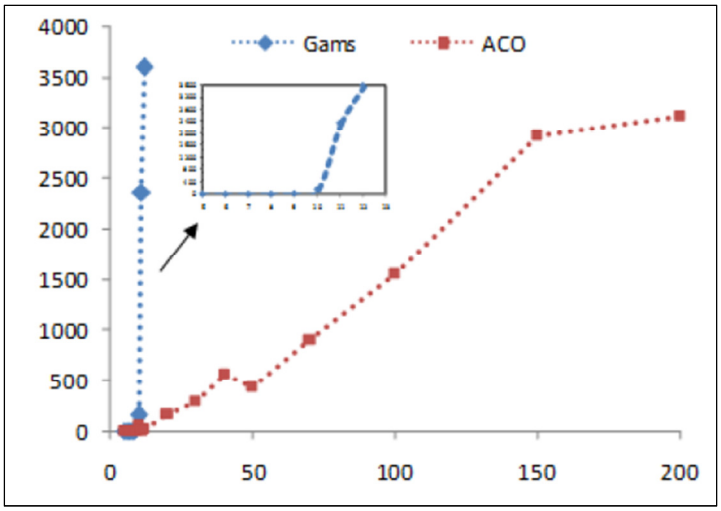
نمودار مربوط به مقایسهٔ زمان‌های حل توسط نرم‌افزار Gams و ACO در شکل ٤ آمده است. بررسی زمان حل مسائل در دو بخش ACO و Gams نمایانگر افزایش نمایی زمان حل با استفاده از Gams است، به‌طوری که در ابعاد بزرگ‌تر از ۱۲ گره، نرم‌افزار Gams قادر به دستیابی به حل در زمان معقول نیست؛ درحالی که زمان‌های حل توسط الگوریتم پیشنهادی ACO در ابعاد کوچک، بسیار کم است و بر روی نمودار، تقریباً روی خط افقی قرار دارد و در حل مسائل بزرگ‌مقیاس، با افزایش معقولی از زمان همراه است

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۵. نتایج محاسباتی برای مسائل بزرگ‌مقیاس

شمارهٔ مسئله	تعداد مشتری	تعداد و نوع وسیله				الگوریتم ACO	
		۱	۲	۳	٤	تابع هدف	زمان حل
SDVRPTT9	۲۰	۲	۱	۰	۲	۹۸۲	۱۷۳/۳٤
SDVRPTT10	۳۰	۱	۲	۰	۳	۱۲۹۰	۲۹۹/۹۰
SDVRPTT11	٤۰	۱	۳	۱	۲	۱٤۱٤	۵۷۰/۰٤
SDVRPTT12	۵۰	۱	۲	۱	٤	۱۸۸۰	٤۳۹/۵۱
SDVRPTT13	۷۰	۲	٤	۱	۵	۲۳۹۰	۹۰۳/۱۹
SDVRPTT14	۱۰۰	۲	۷	۰	٦	۲۹٤۳	۱۵٦۰/۱٦
SDVRPTT15	۱۵۰	۵	۰	۱	۱۲	٤۱۲۱	۲۹۲٤/٤۰
SDVRPTT16	۲۰۰	٦	٤	۰	۱٦	۵۵۲٤	۳۱۲۳/۸۷



شکل ٤. مقایسهٔ زمان حل مدل در نرم‌افزار Gams و ACO

٤-۳- بررسی تأثیر عملگرهای جست‌وجوی محلی

به‌منظور بررسی نحوهٔ تأثیر عملگرهای جست‌وجوی محلی مورد استفاده در الگوریتم پیشنهادی، نتایج محاسباتی با درنظر گرفتن الگوریتم بدون هر یک از این عملگرها (L-S1، L-S2، L-S3 و L-S4) بر روی مسائل تولیدی اجرا شد که نتایج آن در ادامه آمده است. به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد با افزودن عملگرهای جست‌وجوی محلی، زمان حل افزایش و میزان تابع هدف کاهش می‌یابد که با توجه به هدف مسئله، این میزان کاهش (بهبود در حل) نسبت به افزایش زمان به‌صرفه است. جدول ٦ مقادیر تابع هدف را برای هر یک از الگوریتم‌ها نمایش می‌دهد. نتایج محاسباتی نشان می‌دهد مقادیر تابع هدف حاصل از الگوریتم پیشنهادی در تمامی دسته مسائل مختلف، بهتر از سایر الگوریتم‌ها است. با توجه به مقادیر تابع هدف الگوریتم پیشنهادی، متوسط افزایش تابع هدف در سایر روش‌ها از الگوریتم پیشنهادی محاسبه شده است. درصد افزایش تابع هدف در الگوریتم پیشنهادی با حذف یک جست‌وجوگر مشخص، نمایانگر درصد بهبود بیشتر تابع هدف در الگوریتم پیشنهادی توسط آن جست‌وجوگر است. به‌این‌ترتیب و با توجه به جدول ٦، می‌توان عملگرهای جست‌وجوی محلی مورد استفاده در الگوریتم را از لحاظ تأثیرگذاری و بهبود در حل، به‌صورت زیر رتبه‌بندی کرد:

L-S3 <L-S2 <L-S4 <L-S1

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ٦. مقایسهٔ مقادیر تابع هدف در حالت‌های مختلف

شمارهٔ مسئله	تعداد مشتری	الگوریتم پیشنهادی	الگوریتم پیشنهادی بدون *L-S1*	الگوریتم پیشنهادی بدون *L-S2*	الگوریتم پیشنهادی بدون*L-S3*	الگوریتم پیشنهادی بدون*L-S4*
SDVRPTT1	٥	٤٤٠	٤٤٠	٤٤٠	٤٤٠	٤٤٠
SDVRPTT2	٦	٣٤٢	٣٦٠	٣٤٢	٣٤٢	٣٤٢
SDVRPTT3	٧	٤٨٠	٥٠٢	٤٨٠	٤٨٠	٤٨٠
SDVRPTT4	٨	٥٦٤	٥٦٤	٥٦٤	٥٧٤	٦٠٣
SDVRPTT5	٩	٦٤٥	٦٤٥	٧١٩	٦٤٥	٧٥٢
SDVRPTT6	١٠	٧٩٦	٨٢٠	٨١٦	٨٥٠	٨٠٦
SDVRPTT7	١١	٥٥٣	٥٦١	٥٥٣	٥٥٣	٥٥٣
SDVRPTT8	١٢	٥٥٦	٥٦٩	٥٦٥	٥٧٥	٥٥٦
SDVRPTT9	٢٠	٩٨٢	١٠٤٥	١٠١٦	١٠٣٧	٩٨٦
SDVRPTT10	٣٠	١٢٩٠	١٣٣٧	١٣٩٥	١٤١٩	١٣٦٠
SDVRPTT11	٤٠	١٤١٤	١٤٨٢	١٤٤٤	١٤١٤	١٤٦٢
SDVRPTT12	٥٠	١٨٨٠	١٩٢٦	١٩١٣	١٨٨٠	١٩٣٧
SDVRPTT13	٧٠	٢٣٩٠	٢٥٤٤	٢٤٢٣	٢٣٩٠	٢٥٦٢
SDVRPTT14	١٠٠	٢٩٤٣	٣٠٠٨	٢٩٥٧	٢٩٤٣	٢٩٤٣
SDVRPTT15	١٥٠	٤١٢١	٤٢١٠	٤١٥١	٤١٤١	٤١٤٣
SDVRPTT16	٢٠٠	٥٥٢٤	٥٦٠٠	٥٥٧٥	٥٥٥٩	٥٥٦٠
متوسط		١٥٥٧/٥	١٦٠٠/٨١٣	١٥٨٤/٥٦٢	١٥٧٧/٦٢٥	١٥٩٢/٨٧٥
درصد افزایش تابع هدف(٪)			٢/٧٨	١/٧٣٨	١/٢٩٢	٢/٢٧١

جدول ۷ زمان‌های محاسباتی را برای بررسی هر یک از عملگرهای جست‌وجوی محلی نمایش می‌دهد. با توجه به متوسط زمان حل حاصل در دسته مسائل مختلف، می‌توان عملگرهای جست‌وجوی محلی مورد استفاده در الگوریتم را از لحاظ زمان‌های حل، به‌صورت زیر رتبه‌بندی کرد:

L-S4 <L-S3 <L-S1 <L-S2

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک مدل مسیریابی وسایل نقلیه با فرض وابستگی وسایل نقلیه به نقاط تقاضا و محدودیت زمانی طول مسیر (SDVRPTT)، به‌منظور کمینه‌سازی هزینهٔ ناوگان و طول زمان مسیریابی ارایه شد که این مسئله، در کشور ما نیز با محدودیت طرح ترافیک ماشین‌آلات نمود عملی پیدا می‌کند. سپس روشی مبتنی بر الگوریتم فراابتکاری اجتماع مورچگان برای حل مسئله ارایه شد و در راستای بهبود حل، عملگرهای الگوریتم ژنتیک و جست‌وجوهای محلی مؤثری به‌کار گرفته شد. براساس آزمایش‌ها، درصد خطای تابع هدف ACO نسبت به مقدار تابع هدف در حالت بهینه، در تمامی مسائل حل‌شده در ابعاد کوچک به‌جز دو مورد، صفر است که بر کارایی زیاد الگوریتم پیشنهادی در ابعاد آزمایش‌شده دلالت دارد. برای ابعاد بزرگ‌تر از ۱۲ گره (مشتری)، امکان حل مدل پیشنهادی در زمان قابل قبول با استفاده از نرم‌افزار Gams، ممکن نیست که همین امر، استفاده از رویکرد فراابتکاری را توجیه می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی قادر است مسائل با ۲۰۰ گره را در زمان معقول حل کند. همچنین مقادیر تابع هدف الگوریتم پیشنهادی در دستهٔ مسائل مختلف، با به‌کارگیری عملگرهای جست‌وجوی محلی به‌مراتب بهبود می‌یابد و از لحاظ رتبه‌بندی، جست‌وجوگر L-S1 با بیشترین درصد بهبود در تابع هدف، در رتبهٔ بالاتری نسبت به سایر عملگرها قرار می‌گیرد. از زمینه‌های مناسب برای ادامهٔ این تحقیق، درنظر گرفتن طرح زوج و فرد است که با وابسته کردن وسایل نقلیه به برنامهٔ حرکت آنها در روز، می‌توان مدل مسئله را ارایه کرد.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول۷. مقایسهٔ زمان‌های محاسباتی الگوریتم در حالت‌های مختلف

شمارهٔ مسئله	تعداد مشتری	الگوریتم پیشنهادی	الگوریتم پیشنهادی بدون *L-S1*	الگوریتم پیشنهادی بدون *L-S2*	الگوریتم پیشنهادی بدون *L-S3*	الگوریتم پیشنهادی بدون *L-S4*
SDVRPTT1	۵	۰/۲۳	۰/۱۹	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۲۳
SDVRPTT2	٦	٤/٦۳	٤/۳٥	٤/٦۳	٤/٦۳	٤/٦۳
SDVRPTT3	۷	۰/۳٥	۰/۲۲	۰/۳٥	۰/۳٥	۰/۳٥
SDVRPTT4	۸	٤/٦۹	۳/۸۲	٤/٦۹	۰/۸٦	۳/٤۱
SDVRPTT5	۹	۷/۳۲	٥/۱٦	٤/۹۲	۷/۳۲	۳/۷۲
SDVRPTT6	۱۰	٥۰/۹٦	۲٤/۷٤	۲٥/٦۹	۱۷/۸٥	۱۸/۸۹
SDVRPTT7	۱۱	۱۷/٤۰	۱٦/٦۲	۱٦/٥۳	۹/٥۰	۹/۹٥
SDVRPTT8	۱۲	۱۹/٤۱	۲۰/٥۱	۱۹/۸۰	۱۱/۱۹	۱۲/۷۰
SDVRPTT9	۲۰	۱۷۳/۳٤	۱۷۳	۱۷۰/٦٤	۱٤۸/۰٦	۱۲۱
SDVRPTT10	۳۰	۲۹۹/۹۰	۲۲۹/۹٤	۲۷٥/٥۱	۲۰۳/٦۹	۲۱۰/۸۲
SDVRPTT11	٤۰	٥۷۰/۰٤	٥٤٥/٥۹	٥٤۷/۷۱	٤۷۳/۸۹	٥٦۰/۰۳
SDVRPTT12	٥۰	٤۳۹/٥۱	۳۹٥/٥۸	٤۱۹/۳۳	٤۳۹/٥۱	۳۸۹/۸۸
SDVRPTT13	۷۰	۹۰۳/۱۹	۸٥۲/۷۷	۸۹۳/۹۹	۹۰۳/۱۹	۸۱٦/۷۷
SDVRPTT14	۱۰۰	۱٥٦۰/۱٦	۱٦۲۰/٦٦	۱٥٤۸	۱٥٦۰/۱٦	۱٥۰۲/۷۳
SDVRPTT15	۱٥۰	۲۹۲٤/٤۰	۲۸٥۳	۲۹۰٤	۲۸۸۰	۲۸۸۰/۹
SDVRPTT16	۲۰۰	۳۱۲۳/۸۷	۳۱۰۱/۲۱	۳۰۹۳/۰۷	۳۰٥۰/۷۳	۲۹٦۸/۳٥
متوسط		٦۳۱/۲۱۲	٦۱٥/٤٦	٦۲۰/٥٦۸	٦۰٦/۹٤۷	٥۹٤/۰۲۲
درصد کاهش زمان حل(٪)			۲/٥٦	۱/۷۱٥	٤	٦/۲٦

٦- پی‌نوشت‌ها

1. Vehicle Routing Problem
2. Heterogenous Fleet VRP
3. Site-Dependent Vehicle Routing Problem
4. Vehicle-Site Dependency
5. Periodic VRP
6. SDVRP with Time Window
7. Periodic VRPTW
8. Multi-Depot VRPTW
9. Saving
10. Adaptive Large Neighborhood Search
11. Capacitate VRP
12. Open VRP
13. Mixed Integer Programming
14. Ant Colony System
15. Ant System
16. Selection criteria
17. Stagnation
18. Ant Colony Optimization

۷- منابع

- Dantzig, G.B., Fulkerson, R., Johnson, S.M. (1954) "Solution of a large scale traveling salesman problem", Management Science, Vol. 6, pp. 80-91.
- Hoff, A., Anderson, H., Christiansen, M., Hasle, G., Løkketangen, A. (2010) "Industrial aspects and literature survey: Fleet composition and routing", Computers & Operations Research, Vol. 37, pp. 2041–2061.
- Toth, P., Vigo, D. (2002) "The Vehicle Routing Problem", Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Sniezek, J., Bodin, L. (2006) "Using mixed integer programming for solving the capacitated arc routing problem with vehicle/site dependencies with an application to the routing of residential sanitation collection vehicles", Annals of

www.SID.ir

Archive of SID

Research/Computer Science Interfaces Series, Vol. 29, pp. 107-119.

- Pisinger, D., Ropke, S. (2007) "A general heuristic for vehicle routing problems ", Computers & Operations Research, Vol. 34, pp. 2403 – 2435.

- Alonso, F., Alvarez1, M-J., Beasley, JE. (2008) "A tabu search algorithm for the periodic vehicle routing problem with multiple vehicle trips and accessibility restrictions", Journal of the Operational Research Society Vol. 59, pp. 963 –976.

- Dorigo, M., Ganbardella L. (1997) "Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem", IEEE trans, Evolutionary Computing, pp. 53-66.

- Solomon, M. (1987) "Algorithm for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraint", Operations Research, Vol. 35, No. 2, pp. 254-265.

Operations Research, Vol. 144, No. 1, pp. 33–58.

- Nag, B., Golden, B., Assad, A. (1988) "Vehicle Routing with Site Dependencies", Management Science and Systems, Vol. 16, pp. 149-159.

- Cordeau, J-F., Laporte, G. (2001) "A Tabu Search Algorithm for The Site Dependent Vehicle Routing Problem with Time Windows", INFOR: Information Systems and Operational Research, Vol. 39, No. 3, pp. 292-298.

- Cordeau, J-F., Laporte, G., Mercier, A. (2004) " Improved tabu search algorithm for the handling of route duration constraints in vehicle routing problems with time windows ", Journal of the Operational Research Society, Vol. 55, pp. 542-546.

- Chao, M., Liou, T-S. (2005) "A new tabu search heuristic for the site-dependent vehicle routing problem", Operations

www.SID.ir