حل مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با پنجره‌های زمانی نرم با استفاده از یک الگوریتم فرا ابتکاری تلفیقی

رضا توکلی مقدم
دانشیار گروه مهندسی صنایع – پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران
مسعود ربانی
دانشیار گروه مهندسی صنایع – پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران
محمد علی شریعت
فارغ التحصیل کارشناس ارشد صنایع- دانشکده تحصیلات تکمیلی تهران جنوب - دانشگاه آزاد اسلامی
نیما صفایی
دانشجوی دکتری مهندسی صنایع - دانشگاه علم و صنعت ایران
(تاریخ دریافت ۸۳/۸/۲۳ ، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۴/۱۰/۱۱ ، تاریخ تصویب ۸۴/۱۰/۲۴)

چکیده

یکی از مباحث مهم که در چند دهه اخیر کاربرد بسیار بالایی در عمل داشته و برای افزایش کارایی و بهره‌وری سیستم‌های حمل و نقل مطرح شده است بحث مسئله مسیریابی وسایل نقلیه[۱] (VRP) است. مسئله مسیر یابی وسایل نقلیه به مجموعه‌ای از مسایل اطلاق می‌گردد که در آن تعدادی خودرو متمرکز در یک یا چند قرار گاه بایستی به مجموعه‌ای از مشتریان مراجعه نموده و خدمتی را ارایه دهند که هر یک دارای تقاضای معینی می‌باشند. این مسئله درصدد است تا با مدل‌های ریاضی و بهینه‌سازی به گونه‌ای عمل کند که مسافت طی شده، زمان کل سفر، تعداد وسایل حمل و نقل، جریمه‌های دیرکرد و در نهایت تابع هزینه حمل و نقل حداقل گردد و در نهایت رضایت مشتریان به حداکثر برسد. وجود محدودیت‌های مختلف در اینگونه مسایل انواع مختلفی از مسایل کلاسیکی تشکیل می‌دهد که یکی از آنها بحث وجود پنجره‌های زمانی نرم در سرویس به مشتریان می‌باشد. در اینگونه مسایل اجازه سرویس به مشتریان در خارج از بازه زمانی سخت نیز داده شده و برای هر واحد عدم سرویس به موقع جریمه‌ای در نظر گرفته می‌شود که در نهایت در تابع هدف تعریف شده در مدل پیشنهادی به همراه مابقی اجزای تابع هدف به حداقل کردن آن می‌پردازیم. این گونه مسایل نیز جزء مسایل NP-hard بوده و حل آن از طریق برنامه‌ریزی خطی و نرم‌افزارهای موجود مدت زمان بالایی را به خود اختصاص می‌دهد. لذا برای حل از روش فرا ابتکاری تلفیقی[۲] از آنیلینگ شبیه‌سازی شده[۳] (SA) با اپراتورهای ژنتیک[۴] استفاده شده است. تعدادی مسئله برای نشان دادن کارایی الگوریتم پیشنهادی حل شده است و نتایج محاسباتی با حل‌های بدست آمده با نرم‌افزار Lingo 6 مقایسه شده است.

واژه‌های کلیدی: مسئله مسیریابی وسیله نقلیه، پنجره زمانی نرم، الگوریتم فرا ابتکاری تلفیقی

مقدمه

مسئله مسیریابی وسایل حمل و نقل با پنجره زمانی[۵] (VRPTW) مسئله تعمیم یافته‌ای از مسئله مسیریابی وسایل حمل و نقل با محدودیت ظرفیت[۶] (CVRP) است که در آن سرویس به هر مشتری باید در یک بازه زمانی معین (این بازه زمانی به پنجره زمانی معروف است) صورت گیرد. این مسئله با توجه به اهمیت بالایی که به بحث زمان در حل مسایل می‌دهد در عمل از کاربرد بیشتری برخوردار بوده و لذا توجه بیشتری را در محافل علمی به خود اختصاص داده است. مسیریابی وسایل نقلیه با پنجره زمانی با توجه به صورت گرفتن سرویس در یک بازه زمانی خاص پیچیدگی‌های زیادی داشته که در صورت اضافه شدن محدودیت طول مسیر و هزینه پنجره زمانی در عین پیچیدگی بسیار بالا به یک مبحث کاربردی در عمل بسیار نزدیک می‌گردد. از مثال‌های مشخص از VRPTW می‌توان به تقسیم پول نقد به شعب بانک‌ها، جمع‌آوری زباله‌ها و ضایعات صنعتی، تقسیم سوخت به جایگاهای پخش و سرویس مدارس و غیره در عمل اشاره کرد. در هر VRPTW با دو فاز مسیریابی و برنامه

Archive of SID
www.SID.ir

ریزی وسایل نقلیه مواجه هستیم.

مسیریابی مربوط به پیداکردن یک مسیر ایده‌آلی است که اهداف مدل را تامین کرده و از مشتری تبعیت کند در حالی که برنامه‌ریزی وسایل نقلیه، زمانی که باید به هر مشتری خدمت داده شود را معین می‌کند. لذا در مبحث زمان هزینه کلی مسیر نه تنها شامل هزینه مسافت کل و زمان‌های خدمت و سایر هزینه‌های وابسته می‌شود بلکه هزینه کلی توقفات و انتظارها نیز محاسبه می‌گردد که مرور بسیار خوبی نیز در تحقیقات افرادی نظیر سالسبرگ، سولامون، پوتوین و روس‌او و همچنین لائو و همکاران صورت گرفته است [۴-۱]. جدول (۱) نیز به بررسی کاملی از توابع هدف مسایل VRPTW که تحقیقات و مقالات اخیر صورت گرفته است می‌پردازد.

جدول ۱: بررسی توابع هدف مدل VRPTW.

تابع هدف	مرجع
حداقل‌سازی: تعداد وسایل نقلیه/ زمان برنامه‌ریزی / مسافت طی شده / زمان انتظار	Solomon, 1987
حداقل‌سازی: مسافت طی شده	Desrochersetal, 1992
حداقل‌سازی: مسافت طی شده	Halse, 1992
حداقل‌سازی: مسافت طی شده	Fisher, et al. 1994
حداقل‌سازی: تعدادوسایل نقلیه / زمان سفر	Fisher &Rousseau, 1993
حداقل‌سازی: تعداد وسایل نقلیه/ مسافت طی شده	Thangiah, et al., 1994
حداقل‌سازی: تعدادوسایل نقلیه / زمان سفر	Russell, 1995
حداقل‌سازی: مسافت طی شده	Kohl, 1995
حداقل‌سازی: مسافت طی شده	Badeau, et al., 1995
حداقل‌سازی: تعداد وسایل نقلیه / مسافت طی شده	Rochar & Taillard, 1995
حداقل‌سازی: تعداد وسایل نقلیه / زمان سفر	Potvin, et al. 1996
حداقل‌سازی: تعداد وسایل نقلیه / زمان سفر	Potvin & Bengio, 1996
حداقل‌سازی: تعداد وسایل نقلیه / زمان سفر / مسافت طی شده	Chiang & Russell, 1996
حداقل‌سازی: مسافت طی شده	Kohl & Madsen, 1997
حداقل‌سازی : مسافت طی شده	Kilby, et al. 1999
حداقل‌سازی: تعداد وسایل نقلیه / مسافت طی شده	Homberyer & Gehrihy, 1999
حداقل‌سازی: تعداد وسایل نقلیه/ زمان سفر	Potvin & Robillarad, 1999
حداقل‌سازی: زمان سفر	Braysy, et al. 2000
حداقل‌سازی: زمان سفر	Tan, et al. 2001
حداقل‌سازی: تعداد وسایل نقلیه / مسافت طی شده	Li & Lim 2003

سرویس به هر مشتری در اینگونه مسایل باید در یک بازه زمانی خاص صورت گیرد. در تحقیقات اشاره شده در جدول (۱)، هدف عمده حضور به موقع و سر وقت وسایل نقلیه در ایستگاهای تعیین شده می‌باشد. در این مدل‌ها علاوه بر کاهش تعداد وسایل نقلیه مورد نیاز و هزینه‌های مرتبط با آن، زمان انجام سرویس‌ها و سطح رضایت مشتریان بالا رفته و زیان از دست دادن مشتریان به اندازه قابل توجه‌ای کاهش می‌یابد. مدل‌های TW به سه دسته کلی بصورت زیر قابل تقسیم می‌باشند [۳-۱] و [۷-۵] :

الف) مدل‌های سخت (VRPHTW)

ب) مدل‌های نرم (VRPSTW)

ج) مدل‌های سخت و نرم[۷] (VRPHSTW)

الف) مدل‌های سخت : در این نوع مدل‌های TW، وسایل نقلیه ملزم به انجام سرویس به یک مشتری در بازه زمانی معین می‌باشند. به عبارت دیگر هر ایستگاه (ایستگاه i) یک بازه زمانی سرویس به صورت $[a_i, b_i]$ خواهد داشت که زمان سرویس حتما باید در این بازه صورت گیرد.

ب) مدل‌های نرم : در حالت TW نرم، سرویس‌دهی تا حد معینی خارج از بازه تعیین شده نیز مجاز می‌باشند. به این صورت که برای هر گره (مشتری) علاوه بر یک پنجره زمانی معیین $[a_i, b_i]$ یک بازه زمانی سرویس دیگر نیز به نام $[LB_i, UB_i]$ تعریف می‌شود که بازه $[a_i, b_i]$ در داخل آن قرار می‌گیرد و به سرویس‌هایی که خارج از بازه $[a_i, b_i]$ انجام می‌گیرد جریمه تعلق خواهدگرفت.

ج) مدل‌های سخت و نرم : حالت TW سخت و نرم، ترکیبی از دو حالت فوق می‌باشد. بدین صورت هر پنجره زمانی شامل یک محدوده نرم و یک محدوده سخت می‌باشد. به‌طوری‌که محدوده نرم مشابه حالت (ب) قابل نقض بوده ولی محدودیت سخت نباید نقض گردد.

مدل ریاضی مسئله (VRPSTW)

برای طرح بهتر مدل ریاضی، ابتدا به تعریف علائم، پارامتر ها و متغیرها پرداخته و سپس توابع هدف و محدودیت‌های آن ارایه می‌شوند. توضیحات ضروری در مورد جزئیات مدل ریاضی نیز به دنبال ارایه می‌گردد.

Archive of SID

www.SID.ir

الف) تعریف علائم و پارامترها : علائم و پارامترهای متعددی در مدل ریاضی مورد استفاده قرار گرفته است که تعریف هر یک از آنها به شرح زیر است :

N : مجموعه نقاط (گره) تقاضا یا تعداد ایستگاه‌ها بطوریکه $N=\{1,...,n\}$ بطوریکه n برابر تعداد گره‌ها در شبکه می‌باشد. قرارگاه مرکزی در گره $i=1$ قرار دارد.

NV : مجموعه خودروهای در دسترس $NV=\{1,...,v\}$. به‌طوری‌که v برابر تعداد کل خودروهای در دسترس میباشد.

K_v : ظرفیت وسیله نقلیه v ام

q_i : تقاضای گره i ام $(q_1=0)$ به‌طوری‌که $\sum_{V=1}^{NV} K_v \geq \sum_{i=1}^{n} q_i$ برقرار می‌باشد.

W_v: هزینه استفاده (اجاره) وسیله نقلیه v ام.

a_v : میانگین سرعت حرکت هر وسیله نقلیه

d_{ij} : فاصله بین دو گره i , j.

t^v_{ij} : زمان سرویس‌دهی به گره i بعلاوه زمان طی مسیر گره i به j با وسیله نقلیه v ام (این پارامتر در مدل به صورت تابعی از مسافت و سرعت ظاهر گشته است).

g^v_{ij}: هزینه یک واحد سفر از گره i به j با وسیله نقلیه v ام

S^v_i : زمان شروع سرویس برای گره i ام با وسیله نقلیه v ام.

ye_{vi} : مقدار زمان زود کرد شروع سرویس وسیله نقلیهv ام به گره i ام.

yl_{vi} : مقدار زمان دیر کرد شروع سرویس وسیله نقلیه v ام به گره i ام.

P_e : جریمه یک واحد زود کرد سرویس.

P_l : جریمه یک واحد دیر کرد سرویس.

e_i : حد پایین پنجره زمانی سخت برای گره i ام.

l_i : حد بالای پنجره زمانی سخت برای گره i ام.

LB_i : حد پایین پنجره زمانی نرم برای گره i ام.

UB_i : حد بالای پنجره زمانی نرم برای گره i ام.

λ_1 : وزن هزینه‌های مرتبط با مسافت طی شده در تابع هدف.

λ_2 : وزن هزینه‌های استفاده (اجاره) وسایل نقلیه در تابع هدف.

λ_3 : وزن هزینه‌های مرتبط با جریمه‌های زود کرد یا دیر کرد سرویس به ایستگاه‌ها در تابع هدف. بطوریکه

$\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$.

M : یک عدد بسیار بزرگ.

ب) تعریف متغیرها : متغیرهای مورد استفاده x^v_{ij} و B_v هستند که تعریف هر یک از آنها به شرح زیر است :

$$= x^v_{ij} \begin{cases} ۱ & \text{نقلیه } v \text{ ام گره (ایستگاه) } i \text{ به } j \text{ را طی کند،} \\ ۰ & \text{در غیر اینصورت.} \end{cases}$$

$$= B_v \begin{cases} ۱ & \text{اگر وسیله نقلیه } v \text{ ام یک مسیر را طی کند،} \\ ۰ & \text{در غیر اینصورت.} \end{cases}$$

مدل ریاضی پیشنهادی

هدف مدل پیشنهادی کمینه‌سازی همزمان هزینه‌های متعارف VRP یعنی هزینه طی مسیر و هزینه ناوگان علاوه بر هزینه نقض محدودیت‌های زمانی نرم می‌باشد. همچنین علاوه بر محدودیت‌های سنتی، مدل شامل محدودیت‌های مرتبط با پنجره‌های زمانی نرم و سخت می‌باشد.

با توجه به علائم، پارامترها و متغیرهای تعریف شده، مدل ریاضی پیشنهادی متشکل از یک تابع هدف سه بخشی و ۱۵ دسته محدودیت می‌باشد که پس از معرفی مدل ریاضی توضیحات بیشتری در مورد تابع هدف و محدودیت‌ها ارایه خواهد شد.

$$\text{Min } Z = \lambda_1 \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\sum_{v=1}^{NV} g^v_{ij} d_{ij} X^v_{ij} + \lambda_2 \sum_{v=1}^{NV} W_v B_v + \lambda_3 \sum_{i=1}^{n}\sum_{v=1}^{NV} (Pe \times Ye_{vi} + P_l \times Yl_{vi}) \quad (۱)$$

s.t.

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{V=1}^{NV} X^v_{ij} = 1 \qquad \forall j > 0 \quad (۲)$$

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{V=1}^{NV} X^v_{ij} = 1 \qquad \forall i > 0 \quad (۳)$$

$$\sum_{i=1}^{n} X^v_{ip} - \sum_{j=1}^{n} X^v_{pj} = 0 \qquad p:\{1,...,n\}, \forall v \quad (۴)$$

$$\sum_{i=1}^{n} q_i \left[\sum_{j=1}^{n} X^v_{ij}\right] \leq K_v \qquad \forall v \quad (۵)$$

$$\sum_{j=1}^{n} X^v_{1j} = 1 \qquad \forall v \quad (۶)$$

Archive of SID
www.SID.ir

$$\sum_{i=1}^{n} X_{i1}^{v} = 1 \qquad \forall v \tag{۷}$$

$$B_v \geq X_{ij}^{v} \qquad \forall v, i, j \tag{۸}$$

$$S_j^v + M(1 - X_{ij}^v) - S_i^v - d_{ij}^v / a_v \geq 0 \qquad \forall v, i, j \tag{۹}$$

$$S_i^v \geq LB_i \qquad \forall v, i \tag{۱۰}$$

$$S_i^v \leq UB_i \qquad \forall v, i \tag{۱۱}$$

$$Ye_{vi} \geq e_i - S_i^v \qquad \forall v, i \tag{۱۲}$$

$$YL_{vi} \geq S_i^v - L_i \qquad \forall v, i \tag{۱۳}$$

$$\sum_{v=1}^{V} \sum_{i \in S} \sum_{j \notin S} x_{ij}^{v} \leq |S| - r(S) \;\; \forall S \subseteq A - \{1\}, S \neq \varnothing \tag{۱۴}$$

$$X_{ij}^{V}, B_v \in \{0,1\} \qquad \forall v, i, j \tag{۱۵}$$

تابع هدف مدل فوق از ۳ جزء تشکیل می‌گردد: جزء اول تابع هدف که در راستای کاهش مسیرهای (مسافت) طی شده می‌باشد مربوط به هزینه‌های سفر می‌گردد. جزء دوم تابع هدف نیز که سعی در کم کردن وسایل نقلیه مورد نیاز می‌باشد مربوط به هزینه‌های استفاده از وسایل نقلیه می‌باشد. جزء سوم تابع هدف نیز که با توجه به شرایط مسئله (پنجره زمانی نرم) به مدل اضافه گردیده است سعی در انجام سرویس در پنجره زمانی سخت داشته و مربوط به هزینه‌های عدم سرویس به موقع (زودکرد یا دیر کرد) می‌باشد.

محدودیت‌ها

محدودیت‌های دوم، سوم و چهارم که در واقع جزء محدودیت‌های عمومی مسایل VRP نیز می‌باشند به ترتیب شرایطی را در مدل حاکم کرده که هر گره تنها و تنها یکبار توسط یک وسیله نقلیه ملاقات شوند و محدودیت چهارم نیز شرط اینکه هر وسیله نقلیه باید به همان گره‌ای که وارد شود از آن نیز خارج گردد را برآورده می‌سازد.

محدودیت پنجم مدل شرط ظرفیت برای هر وسیله نقلیه را برآورده می‌سازد. محدودیت ششم و هفتم نیز که باز جز محدودیت‌های عمومی مسایل VRP هستند نیز باعث می‌شوند که مبدا اولیه و مقصد نهایی هر تور مسافرتی (سرویس) دقیقاً گره اول باشد. محدودیت هشتم که استفاده یا عدم استفاده از وسایل نقلیه را در مسیر تعیین می‌کند و بطور مستقیم در جزء دوم تابع هدف تاثیر می‌گذارد.

مجموعه محدودیت‌های ۹ الی ۱۳ جزء محدودیت‌های مدل‌های نرم TW می‌باشند. بدین صورت که محدودیت نهم زمان شروع سرویس برای هر گره را مشخص می کند و محدودیت‌های ۱۰و ۱۱ شرط پنجره زمانی نرم را درمدل بر آورده می سازد و محدودیت‌های ۱۲و ۱۳ نیز تعداد واحد زمانی عدم سرویس را دربازه زمانی سخت تعیین می کند.

محدودیت ۱۴ نیز به محدودیت زیر تورها معروف است. یعنی حذف تور یا حلقه‌های احتمالی که فاقد نقطه مبدأ می‌باشند. همانطور که در مسئله عمومی VRP توضیح داده شد از جمله مشکلات مسایل VRP وجود زیر تورها است که یکی از راه حل‌های آن استفاده از زیر مجموعه‌ها برای گره‌ها است بدین صورت که برای مسئله‌ای با N گره باید تمام ترکیبات دوتایی، سه تایی، تا N تایی آنرا تشکیل داده و محدودیت‌های مربوط به آنها را نوشت به دلیل تعداد بسیار بالای ترکیبات فوق معمولا ابتدا بدون در نظر گرفتن محدودیت‌های فوق مسئله حل می‌شود و در صورتی که زیر گردشی تشکیل نشده باشد، جواب حاصل جواب بهینه مسئله نیز می‌باشد. اما اگر یک یا چند زیر گردش تشکیل شود باید با اضافه نمودن محدودیت‌های شکننده زیر گردش‌های تشکیل شده مجدداً مسئله حل شود. فرآیند فوق ممکن است چندین بار تکرار شود که معمولاً بسیار زمان بر بوده و به همین لحاظ در مسایلی که تعداد گره‌ها زیاد باشد اعمال نمی‌شود.

روش حل پیشنهادی SA

همانطورکه پیشتر نیز بیان شد؛ مسأله VRP جزء مسایل NP-hard [۳] می‌باشد که حل آن در ابعاد بزرگ نیازمند استفاده از رویکردهای ابتکاری می‌باشد. آنیلینگ شبیه‌سازی شده (SA) رویکردی است بر مبنای مدل مونت‌کارلو که برای مطالعه رابطه بین ساختار اتمی، آنتروپی و دما درطول فرآیند سرمایش

Archive of SID

www.SID.ir

یک ماده استفاده می‌شود. فرآیند فیزیکی سرمایش که هدف از آن کاهش دمای ماده به پایین‌ترین سطح انرژی می باشد، تعادل گرمایی نامیده می‌شود. فرآیند سرمایش با ماده‌ای در وضعیت گداخته آغاز شده و سپس بتدریج دمای آن کاهش می‌یابد. درهر دما جسم مجاز به رسیدن به تعادل گرمایی می‌باشد. دما نباید خیلی به سرعت کاهش یابد، بویژه درمراحل اولیه، در غیر اینصورت برخی کاستی‌ها در ماده پیدا شده و ماده به وضعیت انرژی کمینه نخواهد رسید. کاهش دما شبیه به کاهش مقدار هدف (در مسایل کمینه‌سازی) می‌باشدکه توسط یک سری تغییرات بهبوددهنده انجام می‌گیرد. برای اینکه اجازه دهیم دما به آهستگی کاهش یابد، باید تغییرات غیر بهبود دهنده تابع هدف نیز با احتمال معینی انتخاب شوند بطوریکه وقتی مقدار هدف کاهش می‌یابد این احتمال نیز تقلیل یابد. این امر موجب می‌گردد که الگوریتم در دام بهینه‌های موضعی گرفتار نگردد. بنابراین در مسایل بهینه‌سازی، دما به عنوان یک پارامتر کنترلی عمل خواهد کرد [۱۲-۸].

گام‌های اساسی الگوریتم SA پیشنهادی در شکل (۱) آورده شده است. قبل از ذکر گام‌های الگوریتم SA ابتدا پارامترهای ورودی مسأله را تعریف می‌کنیم:

EL^{8}= طول زنجیره مارکف (تعداد جواب‌های پذیرفته شده در هر دما یا معیار خروج از حلقه داخلی).

MTT = حداکثر انتقالات دما (توقف الگوریتم یا معیار خروج از حلقه خارجی).

T_0 = دمای اولیه.

α = ضریب کاهش دما.

X = جواب شدنی.

C(X) = مقدار تابع هدف به ازای حل شدنی X.

N = شمارنده تعداد جواب پذیرفته شده در هر دما.

r = شمارنده تعداد انتقالات دما.

الگوریتم تولید حل اولیه

اولین گام در هر رویکرد فراابتکاری تولید جواب اولیه می‌باشد. برای تولید حل اولیه رویکرد ابتکاری زیر مورد استفاده قرار گرفته است:

۱- تشکیل مسیر جدید: یک گره (مانند r) که تاکنون سرویس داده نشده است را به تصادف انتخاب کرده و از مبدأ به گره r یک خودرو جدید مانند v با حداکثر ظرفیت بفرستید.

۲- تعیین گره‌های همسایه : نزدیک‌ترین گره به گره r (مانند گره k) را بگونه‌ای بیابید که اگرخودرو v از r به k برود (k را سرویس دهد)، محدودیت‌های نرم پنجره زمانی گره k و همچنین ظرفیت خودرو نقض نگردد. اگر چنین گره‌ای یافت شد، خودرو v را از r به سمت k فرستاده ($x_{vrk} = 1$) و گرنه آن را به مبدأ باز گردانید ($x_{vr1} = 1$).

۳- تکمیل مسیر : گام ۲ را آنقدر تکرار کنید تا خودرو v به مبدأ باز گردد.

- تکمیل سرویس : گام‌های فوق را آنقدر تکرار کنید تا به کلیه گره‌ها سرویس داده شود.
- تعیین نوع بهینه خودرو از لحاظ ظرفیت : بعد از اتمام الگوریتم فوق تعداد خودرو مورد نیاز تعیین می‌شود. بصورت مجازی کلیه خودروها با حداکثر ظرفیت در دسترس در نظر گرفته شده‌اند. لذا با توجه به ظرفیت استفاده شده هر خودرو، می‌توان نوع بهینه آن را تعیین نمود. مثلاً اگر فقط ظرفیت‌های ۲۵، ۳۵ و ۴۰ در دسترس باشند. در ابتدا ظرفیت کلیه خودروها ۴۰ در نظر گرفته خواهد شد. حال اگر بعد از اجرای الگوریتم فوق ظرفیت استفاده شده یک خودرو نمونه برابر ۲۷ باشد، ظرفیت آن ۳۵ در نظر گرفته می‌شود.

$r = 0$, $T = T_0$,$X^{best} = \varnothing$
Generate X^0
$X^{best} = X^0$
Do (Out Side loop)
  $n = 0$
  Do (In Side loop)
    Select a operator (1-Opt or 2-Opt)
randomly and run over X^n as : $X^n \overset{Operator}{\mapsto} X^{new}$
    $\Delta C = C(X^{new}) - C(X^{best})$
    If $\Delta C < 0$ Then
      $X^{best} = X^{new}$ and $n = n + 1$ and $X^n = X^{new}$
    Else
      Generate $y \rightarrow U(0,1)$ Randomly
      Set $z = e^{\frac{-\Delta C}{T_r}}$
      If $y < z$ Then $n = n + 1$ and $X^n = X^{new}$
    End if
  Loop While($n < EL$)
  $r = r + 1$
  $T_r = T_{r-1} - \alpha \times T_{r-1}$
Loop While ($r <$ MTT and $T_r > 0$)
Print X^{best}

شکل ۱ : گام‌های اساسی SA.

Archive of SID

www.SID.ir

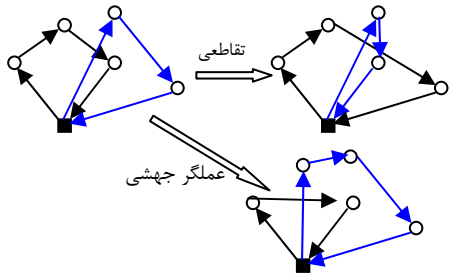
در رویه فوق فرض بر این است که حداکثر تقاضا در هر گره از حداکثر ظرفیت خودرو در دسترس تجاوز نمی‌کند. همچنین اگر به هر گره مستقیماً یک خودرو از مبدأ فرستاده شود محدودیت نرم پنجره زمانی گره نیز نقض نمی‌شود.

پیمایش فضای شدنی

دو عملگر کارا از جنس عملگرهای ژنتیکی جهت پیمایش در فضای شدنی و بدست آوردن حل همسایه طراحی شده است که عبارتند از :

۱- عملگر تقاطعی: در این عملگر دو مسیر مربوط به دو وسیله نقلیه از جواب شدنی فعلی به تصادف انتخاب شده و سپس دو گره از دو مسیر با رعایت محدودیت‌های ظرفیت خودرو و زمان سرویس با یکدیگر تعویض می‌گردند.

۲- عملگر جهشی: در این عملگر دو مسیر مربوط به دو وسیله نقلیه از جواب شدنی فعلی به تصادف انتخاب شده و سپس یگ گره از یک مسیر حذف و به مسیر دیگر با رعایت محدودیت‌های ظرفیت خودرو و زمان سرویس اضافه می‌گردد. شکل (۲) نمایی از دو عملگر ژنتیکی مورد استفاده در حل مسئله را نشان می‌دهد.



شکل ۲ : عملگر تقاطعی و جهشی.

نتایج محاسباتی

با در نظر گرفتن موارد طراحی شده درمدل و توسعه روش حل SA با استفاده از Visual Basic برنامه‌ای نوشته شده است که برای هر وسیله نقلیه تعریف شده در مسئله؛ مسیر طی شونده مشخص شده و کلیه هزینه‌های مرتبط با آن اهم از هزینه‌های سفر، هزینه‌های ناوگان و جریمه‌های زود کرد و دیر کرد آن محاسبه می‌گردد. همچنین زمان شروع سرویس برای هر گره و کل زمان سفر نیز برای هر وسیله نقلیه مشخص می‌گردد. لذا بر اساس مدل ارایه شده و روش حل آن را با استفاده از الگوریتم فراابتکاری SA در این بخش مسایلی به صورت تصادفی و توسط نرم افزار تولید شده و مبادرت به حل آن شده است. جهت تولید مسایل نمونه از توزیع یکنواخت گسسته استفاده شده است. جهت تولید تصادفی پنجره‌های زمانی از یک تحلیل بدترین حالت با استفاده از رویکرد TSP استفاده شده است. به عبارت دیگر فرض می‌کنیم که ناوگان تنها شامل یک خودرو می‌باشدکه باید به کلیه نقاط تقاضا سرویس دهد. برای اینکار؛ مسأله TSP متناظر را برای هر نمونه حل کرده و زمان رسیدن خودرو منفرد به هر ایستگاه را مبنایی جهت تولید پنجره زمانی قرار می‌دهیم.

مطابق جدول (۲)، برای حل مسایل نمونه برخی از پارامترهای عمومی و کنترلی ثابت در نظر گرفته شده‌اند. در جدول (۳)، نتایج بدست آمده از مقایسه حل ۵ مسئله نمونه در ابعاد کوچک با نتایج حاصل از SA ارایه شده است. مقایسه نتایج SA با جواب بهینه Lingo 6 می‌توان نتیجه گرفت که نرم‌افزار بکارگرفته شده بر اساس الگوریتم SA قابلیت رسیدن به جواب بهینه را در حل مسایل دارا می‌باشد. از طرفی بررسی زمان حل مسایل نیز در دو بخش SA و Lingo 6 نشان از افزایش نمایی زمان حل با استفاده از Lingo 6 داشته و در مقابل زمان لازم برای حل مسئله بوسیله نرم افزار SAبا افزایش بسیار کمی در ابعاد بالا حاصل خواهد شد با بررسی افزایش زمان‌های حل نیز می‌توان به تأثیر بسیار بالای افزایش وسایل نقلیه در زمان حل مسایل پی برد. مطابق جدول (۴)، جهت نشان دادن کارایی الگوریتم پیشنهادی، حل ۱۰ مسئله نمونه در ابعاد بزرگ توسط SA مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۲ : پارامترهای عمومی و کنترلی مسایل.

جریمه یک واحد زودکرد و دیرکرد سرویس	۱۰ و ۲۰
هزینه یک واحد سفر	۲
هزینه هر واحد ظرفیت وسیله نقلیه	۱۰۰
ضرایب جزء اول، دوم و سوم تابع هدف	۰/۲۵ ، ۰/۳۵ و ۰/۴
حد بالای پنجره زمانی نرم برای کلیه گره‌ها	۱۰۰
طول زنجیره مارکوف	۱۰۰
حداکثر انتقالات دما	۱۰۰
دمای اولیه و دمای نهایی	۵ و ۰
نرخ کاهش دما	۰/۹۹

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۳ : مقایسه نتایج برای مسایل با ابعاد کوچک.

شماره مسئله	تعداد ایستگاه	تعداد وسائل نقلیه موجود	الگوریتم SA		Lingo		درصد خطای تابع هدف (شکاف)
			هزینه	زمان (ثانیه)	هزینه	زمان (ثانیه)	
VRP1	۶	۲	۲۹۸۴/۲۳	۰/۰۱	۲۹۳۱/۷۵	۲	۱/۷
VRP2	۷	۲	۲۵۸۰/۸۳	۰/۱۲	۲۵۷۸/۳۲	۲۵	۰/۱
VRP3	۹	۳	۲۸۳۲/۲۵	۰/۲۱	۲۷۹۰	۱۰۲۵	۱/۵
VRP4	۹	۴	۴۱۹۷/۲	۰/۱۲	۴۱۷۵	۲۳۰۹	۰/۵
VRP5	۱۰	۳	۳۸۸۸/۱	۰/۲۶	۳۸۵۸/۷۷	۳۶۰۰۰	۰/۷

جدول ۴ : نتایج محاسباتی برای مسایل با ابعاد بزرگ.

شماره مسئله	تعداد ایستگاه	تعداد وسائل نقلیه موجود	الگوریتم SA	
			هزینه	زمان (ثانیه)
VRP6	۱۵	۳	۳۸۶۸/۹۵	۰/۷۶
VRP7	۱۲	۴	۵۲۷۷/۳۲	۸۵/۴
VRP8	۱۵	۳	۶۶۰۶/۵۱	۰/۱
VRP9	۱۸	۴	۶۸۷۹/۴۵	۳۴/۸۴
VRP10	۲۰	۷	۱۰۰۱۲/۸	۱۲/۴
VRP11	۵۰	۸	۱۹۷۳۶/۱۳	۱۰۶۵
VRP12	۸۰	۱۲	۳۱۹۹۲/۶	۸۸۶/۹
VRP13	۱۰۰	۱۵	۴۰۸۳۷/۷۷	۲۷۳۷/۸
VRP14	۱۵۰	۲۷	۵۹۷۴۳/۸۹	۲۷۶۲/۲۷
VRP15	۲۰۰	۵۴	۷۹۷۰۹/۶	۳۶۵۲/۷

نتیجه‌گیری

در این مقاله؛ یک مدل سه معیاره مسیریابی وسایل حمل و نقل با فرض پنجره‌های زمانی (VRPTW) نرم و سخت؛ جهت کمینه سازی هزینه ناوگان؛ هزینه مسافت طی شده و جریمه نقض محدودیت‌های پنجره زمانی نرم ارایه شده است. مدل ارایه شده توسط یک الگوریتم SA ترکیبی کارآمد جهت ابعاد بزرگ حل شده است. همانطور که در جدول (۳) نیز مشخص شد درصد خطای تابع هدف SA نسبت به نرم‌افزار Lingo 6 در تمامی مسایل حل شده کمتر از ۲ درصد می‌باشد که دلالت بر کارایی الگوریتم پیشنهادی دارد. برای ابعاد بزرگتر از ۱۰ ایستگاه؛ امکان حل مدل پیشنهادی در زمان قابل قبول با امکانات پردازشی در دسترس امکان پذیر نمی‌باشد؛ که همین امر استفاده از رویکرد فرا ابتکاری را توجیه می‌نماید.

با توجه به نتایج بدست آمده، روند نمایی زمان حل بهینه و روند خطی زمان حل SA محسوس می‌باشد. به عبارت دیگر، همانطور که در جدول (۳) نشان داده شده است، زمان لازم برای حل مسایل با استفاده از نرم‌افزار Lingo 6 بسیار زیاد بوده و در مقایسه نرم‌افزار SA با توجه به جواب‌های حاصله و زمان بسیار کم برای حل از قابلیت بالایی برخوردار است.

مراجع

1 - Savelsbergh, M. W. P. (1984). "Local search for routing problem with time windows." *Annals of Operations Research,* Vol. 4, PP. 285- 305.

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

3 - Potvin, J. Y. and Rousseau, J. M. (1995). "An exchange heuristic for routing problems with time windows." *Journal of Operational Research Society,* Vol. 46, No. 12, PP. 1433-1446.

4 - Lau, H., Sim, M. and Teo, K. (2003). "Vehicle routing problem with time windws and limited number of vehicles." *European Journal of Operational Research,* Vol. 148, PP. 559-569.

5 - Toth, P. and Rigo, D. (2002). *The vehicle routing problem.* First edition, Italy, PP. 1-25.

6 - Ball, M. O. and Magnanti, T. L. (1995). *Hand books in operations research and management science.* Vol. 8, Network Routing.

7 - Cano, F. and Simon, C. (2003). *Vehicle routing problem with time windows and intermediate facilities*. 27 Congreso Nacional, Madrid, Spania.

Archive of SID
www.SID.ir

8 - Koskosidis, Y., Powell, W. and Solomon, M. (1992). "An optimization - based heuristic for vehicle routing and scheduling with soft time window constraints." *Transportation Science,* Vol. 26, PP. 69-85.

9 - Kirkputrick, F., Gelatt, C. and Vecci, M. (1983). "Optimization by simulated annealing." *Science,* Vol. 2, PP. 117-133.

10 - Hajek, B. (1985). *Cooling schedules for optimal annealing.* Department of Electrical Engineering, University of Illions Champaign-Urbana.

11 - Gidas, B. (1985). "*Non – stationary markov chains and convergence the annealing algorithm*." *Journal of Statistical Physics,* Vol. 39, PP. 73-131.

12 - Davis, L. and Ritter, F. (1987). "Schedule optimization with probabilistic search." *Proceedings of the 3rd IEEE Conterence on Artificial Intelligence Application.*

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1 - Vehicle Routing Problem
2 - Hybrid Metaheuristic Method
3 - Simulated Annealing
4 - Genetic Operators
5 - VRP Time Windows
6 - Capacitated VRP
7 - VRP Hard and Soft Time Windows
8 - Epoch Length

Archive of SID

www.SID.ir