



مسیریابی چند ساختی چند هدفه با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک چند هدفه با مرتب‌سازی غیر مغلوب نسخه‌ی ۲ و تاپسیس

برهام پهلوانی^{۱*}، فاضل قادری^۲

۱- استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۲- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد سیستم‌های اطلاعات مکانی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۱/۱۷ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۸/۰۳

چکیده

در یک مسأله‌ی مسیریابی چند ساختی چند هدفه، هدف پیدا کردن مسیری بهینه، متشکل از چند ساخت حمل و نقلی، با در نظر گرفتن چند تابع هدف بین نقاط مبدا و مقصد می‌باشد. اکثر مسائل بهینه‌سازی چند هدفه با اختصاص دادن یک وزن به هر تابع هدف و استفاده از مجموع وزن‌دار توابع به عنوان یک تابع هدف جدا حل می‌شوند. این روش حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه دارای نقاط ضعفی می‌باشد که از جمله‌ی آنها می‌توان به عدم توانایی در جست و جوی فضای مسأله و نیاز به نرمال سازی توابع هدف اشاره نمود. بنابراین، در این تحقیق از الگوریتم ژنتیک چند هدفه با مرتب‌سازی غیر مغلوب نسخه ۲ (NSGA-II) برای حل مسأله‌ی بهینه‌سازی بهینه‌ی چند ساختی چند هدفه استفاده شده است. این الگوریتم به جای یک مسیر، مجموعه‌ای از مسیرها را پیشنهاد می‌دهد که این مسیرها هیچ برتری مطلق بر هم ندارند. در نهایت مسیر بهینه از بین این مجموعه از مسیرها با استفاده از روش تاپسیس تعیین می‌گردد. توابع هدف در نظر گرفته شده در این تحقیق شامل کمترین تعداد تغییر ساخت‌های حمل و نقلی، کرایه‌ی مسیر و زمان طی شدن مسیر می‌باشند. همچنین در این تحقیق، ساخت‌های حمل و نقلی اتوبوس، اتوبوس‌های تندرو، تاکسی، مترو و پیاده روی برای جایجایی در سطح شبکه‌ی حمل و نقلی در نظر گرفته شده‌اند. نتایج نشان داد مسیر پیشنهادی الگوریتم NSGA-II به ترتیب در ۸۹ و ۸۷ درصد مسیریابی‌های صورت گرفته برتر از مسیرهای پیشنهادی الگوریتم‌های ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید بوده است.

کلیدواژه‌ها: مسیریابی بهینه چند ساختی چند هدفه، روش تاپسیس، الگوریتم NSGA-II

*نویسنده مکاتبه کننده: دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران.

۱- مقدمه

یکی از مسائل مهمی که جوامع مدرن با آن روبرو هستند، افزایش جمعیت و مشکلاتی که متعاقب آن پیش می‌آید، می‌باشد. یکی از چالش‌هایی که با افزایش جمعیت (به خصوص در شهرهای با جمعیت بالا) به وجود می‌آید، مشکلات حمل و نقلی و آلودگی‌های هوایی و صوتی ناشی از آن می‌باشد. بنا به این ضرورت، در شهرهای بزرگ تلاش‌های فراوانی برای تشویق مردم به استفاده از سیستم‌های حمل و نقل عمومی، به جای استفاده از خودروهای شخصی صورت می‌گیرد. از جمله کارهایی که در این زمینه می‌تواند صورت گیرد، ایجاد سیستم‌های مسیریابی در سطح شبکه‌ی حمل و نقلی می‌باشد. در شهرهای بزرگ، به دلیل وجود مسافت‌های طولانی و تنوع ساختهای حمل و نقلی، مسیر بهینه ممکن است شامل چندین ساخت حمل و نقلی باشد. امروزه سرویس‌های آنلاینی در این زمینه به وجود آمده‌اند که از جمله شناخته‌ترین آنها می‌توان به گوگل ترانزیت اشاره کرد. از جمله مشکلاتی که در فرایند مسیریابی اکثر این سیستم‌ها وجود دارد، عدم توانایی در ترکیب صحیح ساختهای حمل و نقلی و عدم در نظر گرفتن اهمیت توابع هدف مورد نیاز کاربر برای ارائه‌ی مسیری بهینه، با توجه به این توابع هدف و اهمیت‌شان می‌باشد. بنابراین، ایجاد سیستم‌های مسیریابی‌ای که توانایی ترکیب ساختهای حمل و نقلی را به طور صحیح داشته و مسیر بهینه را در زمان مناسبی به کاربر ارائه دهند، ضرورت بالایی دارد. از جمله مزیت‌هایی که تشویق مردم به استفاده از سیستم حمل و نقل عمومی می‌تواند داشته باشد، کاهش آلودگی‌های هوا و آلودگی‌های صوتی در سطح شهر، صرفه‌جویی در هزینه و زمان مسافران، کاهش حجم ترافیکی و جریان ترافیکی بهتر در سطح شبکه‌ی حمل و نقلی می‌باشد.

با توجه به ضرورت بالایی که مساله‌ی مسیریابی در جوامع مدرن دارد، در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی در

این زمینه صورت گرفته‌اند. از جمله، تحقیقاتی در زمینه‌ی پیدا کردن مسیر چند ساختی بهینه با در نظر گرفتن تنها یک معیار در سطح یک شبکه‌ی حمل و نقلی چند ساختی استاتیک (۱، ۲) و [۳] و دینامیک [۴] صورت پذیرفته است. در سال ۲۰۰۱، عبدالغنی و ممسنی [۵] یک الگوریتم جدید بر اساس الگوریتم‌های مسیریابی غیر غالب، برای به دست آوردن یک دسته از مسیرهای غیر غالب بهینه پیشنهاد دادند. نهایتاً مسیر بهینه با توجه به تابع هزینه‌ی کلی تعیین شده به دست می‌آید. هوانگ و همکاران [۶] یک الگوریتم جدید برای ارزیابی ریسک مسیریابی کامیون‌های حامل مواد خطرناک با استفاده از الگوریتم ژنتیک پیشنهاد دادند. کشتی آراست و همکاران [۷] به مسیریابی بهینه چند ساختی با در نظر گرفتن هزینه مسیر و کمینه نمودن تعداد تغییرات ساختهای حمل و نقلی پرداختند. کیو و چن [۸] از ترکیب شبکه‌ی عصبی مصنوعی و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی برای انجام یک مسیریابی چند ساختی چند معیاره استفاده کردند. در [۹] از الگوریتم ژنتیک با کروموزوم‌هایی با طول متغیر برای یافتن کوتاهترین مسیر چند ساختی از نظر زمانی در یک شبکه حمل و نقلی واقعی با اندازه بزرگ و پیچیدگی بالا استفاده شد. قوامی و همکاران [۱۰] از استاندارد کنسرسيوم داده‌های مکانی باز^۱ (OGC) جهت حل مشکل توزیع یافتگی و ناهمگونی داده‌های حمل و نقلی استفاده کردند و نهایتاً k کوتاه‌ترین مسیر زمانی را به کاربر در قالب یک وب سرویس مکانی ارائه دادند. قوامی و همکاران در ادامه تحقیقاتشان سعی کردند از یک دیدگاه متفاوت به مبحث سرویس‌های پیشنهاد سفر بنگرند. آنها در [۱۱] دو هدف را دنبال کردند: الف) حل مشکل توزیع یافتگی و ناهمگونی داده‌های حمل و نقلی با استفاده از استاندارد OGC (که در [۱۰] نیز به آن پرداخته بودند)؛ ب) ایجاد یک سرویس

¹ Open Geospatial Consortium

میانگین‌گیری وزن‌دار مرتب شده^۳ (OWA) برای مدل کردن استراتژی‌های تصمیم‌گیری مختلف در مسیریابی چند معیاره، با در نظر گرفتن یک ساخت حمل و نقلی طراحی کردند. بیلی و همکاران [۱۸] یک نسخه اصلاح شده از الگوریتم k کوتاهترین مسیر برای تعیین برترین مسیر بهینه چند ساختی با در نظر گرفتن قیود زمانی در سطح شبکه ارائه دادند. قادری و پهلوانی [۱۹] اقدام به یافتن پایدارترین مسیر چند ساختی چند معیاره با استفاده از تلفیق عملگرهای OWA با کمیت‌سنج‌های مفهومی و روش وزن‌دهی AHP فازی کردند. تابع هدفی که آنها در تحقیقشان استفاده کردند، یک تابع تجمیعی از حاصل ضرب مقادیر وزن‌های ترتیبی در مقادیر نرمالیزه شده معیارها بود. قادری و پهلوانی [۲۰] اقدام به مسیریابی بهینه چند ساختی چند هدفه با ترکیب روش وزن‌دهی AHP فازی و الگوریتم شبیه‌سازی تبرید تدریجی کردند. دیپلت و همکاران [۲۱] اقدام به حل مساله مسیریابی بهینه چند ساختی مقید کردند. در تحقیق آنها نحوه ترکیب ساختهای حمل و نقلی با توجه به خواسته کاربر به او ارائه می‌شد. به عنوان نمونه کاربر می‌توانست ساختهای حمل و نقلی پیاده‌روی یا تاکسی را به عنوان ساختهای پایانی مسیر به سیستم پیشنهادی آنها معرفی کرده و سیستم نیز با در نظر گرفتن این قید در ترتیب ساختها مسیر بهینه را به کاربر پیشنهاد می‌داد.

در این تحقیق با ترکیب الگوریتم ژنتیک چند هدفه با مرتب‌سازی غیر مغلوب نسخه ۲^۴ (NSGA-II) و روش تاپسیس به حل مساله‌ی مسیریابی چند ساختی چند هدفه پرداخته شده است. بدین ترتیب که ابتدا یک مسیریابی چند هدفه با استفاده از الگوریتم NSGA-II پیشنهادی صورت گرفته و سپس، مسیر بهینه با استفاده از روش تاپسیس از بین

پردازش مکانی برای مسیریابی چند ساختی چند معیاره با در نظر گرفتن عدم قطعیت و معیارهای "زمان سفر" و "راحتی سفر". بورل و همکاران [۱۲] اقدام به مسیریابی در سطح یک شبکه‌ی حمل و نقلی دینامیک که اطلاعات آن در طول اجرای سیستم به روز می‌شد، کردند. آنها برای تعیین موقعیت لحظه‌ای خودروها، آنها را به دستگاه تعیین موقعیت جهانی (GPS) مجهز کردند. آنتسفلد و والش [۱۳] یک الگوریتم جدید برای پیدا کردن مسیر بهینه چند ساختی در یک سیستم حمل و نقلی عمومی چند ساختی ارائه دادند. مدل پیشنهادی آنها بسیاری از ویژگی‌های دنیای واقعی مانند، پیاده‌روی بین ایستگاه‌های ساختهای حمل و نقلی، معیارهای مختلف، روز و حتی زمان سفر را در نظر می‌گرفت. کنستانتینس و همکاران [۱۴] یک رابطه‌ی جدید برای برنامه‌ریزی سفر شخصی در یک شبکه‌ی حمل و نقل عمومی، که اطلاعات آن به صورت دینامیک بود، ارائه دادند. مدل پیشنهادی آنها مسیر بهینه بین مبدا و مقصد و نقاط میانی اجباری که مسیر می‌بایست از آنها نیز عبور می‌کرد را با کمینه نمودن معیارهای زمان سفر، زمان تاخیر، تعداد تغییر حالات حمل و نقلی و میزان پیاده‌روی به کاربر ارائه می‌داد. لیو و همکاران [۱۵] از الگوریتم تصحیح برچسب^۱ برای یافتن بهترین مسیر چند ساختی با در نظر گرفتن پنجره‌ی زمانی رسیدن به مقصد و تاخیرهای طول سفر استفاده کردند. در [۱۶]

یک روش جدید بر پایه‌ی ترکیب الگوریتم‌های فازی و شبکه‌های عصبی مصنوعی به منظور مدل‌سازی ترجیحات راننده در سطح شبکه راه‌های یک شهر ارائه شد. نادای و دلاور [۱۷] یک سیستم مسیریاب تحت وب با استفاده از ترکیب روش فرآیند ترکیب سلسله‌مراتبی^۲ (AHP) و عملگرهای تجمیعی

³ Ordered Weighting Average

⁴ Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II

¹ Label correcting algorithm

² Analytical Hierarchy Process

هر یال به صورت یک زوج $e=(i, j)$ ، که در واقع یالی است از گره i به گره j نشان داده می‌شود. وزن هر یال e ، به صورت $W(e)$ نشان داده می‌شود. یک مسیر بین دو گره s و t ، $R(s, t)$ ، به صورت یک رشته از یال‌ها و گره‌ها $R(s, t)=\{s=i_1, (i_1, i_2), i_2, \dots, i_{j-1}, (i_{j-1}, i_j), i_j=t\}$ تعریف می‌گردد. طول مسیر از گره s به گره t با جمع کردن وزن تمامی یال‌های موجود بر روی مسیر $R(s, t)$ به دست می‌آید. در این حالت مساله‌ی کوتاهترین مسیر، یافتن مسیری با کمترین مقدار $\sum w(e_{i,j})$ ، $e_{i,j} \in R(s, t)$ می‌باشد.

در موارد چندساخته، G را می‌توان به صورت ترکیبی از چند زیرگراف G_1 که هر کدام مربوط به یک ساخت حمل‌ونقلی هستند، در نظر گرفت. در این حالت، گراف دیگر گرافی ساده نبوده و ممکن است بیش از یک یال بین دو گره $n_1, n_2 \in V$ وجود داشته باشد. به‌عنوان مثال، برای یک شبکه‌ی حمل و نقل با n ساخت مختلف حمل و نقلی، $G=(G_1, G_2, \dots, G_n)$ که در آن، $G_1=(V_1, E_1)$ ، $G_2=(V_2, E_2)$ ، و $G_n=(V_n, E_n)$ زیرگراف‌های تشکیل‌دهنده‌ی شبکه‌ی حمل و نقلی چندساخته را نشان می‌دهند. جهت حفظ پیوستگی در شبکه، بر اساس رابطه (۱) باید شرایط زیر بین گره‌های زیرگراف‌ها برقرار باشد (با فرض اینکه $G_k=(V_k, E_k)$ زیرگراف مربوط به ساخت پیاده‌روی را نشان دهد):

$$\begin{aligned} V_1 \cap V_k &\neq \emptyset \\ V_2 \cap V_k &\neq \emptyset \\ &\vdots \\ V_n \cap V_k &\neq \emptyset \end{aligned} \quad \text{رابطه (۱)}$$

با استفاده از رابطه‌ی فوق، تمامی زیرگراف‌ها به زیرگراف مربوط به ساخت حمل‌ونقلی پیاده‌روی متصل شده و پیوستگی در شبکه‌ی حمل‌ونقلی حفظ می‌شود.

مسیرهای واقع در جبهه‌ی بهینه‌ی پارَتوی الگوریتم NSGA-II پیشنهادی، تعیین می‌گردد. برای ارزیابی کارایی الگوریتم پیشنهادی، نتایج این الگوریتم با نتایج الگوریتم ژنتیک پیشنهادی که در پیوست آورده شده است، با استفاده از روش Lp -norm مقایسه شده‌اند.

مطالب باقی‌مانده از این مقاله شامل ۵ بخش می‌باشد. در بخش ۲، به تعریف مساله پرداخته می‌شود. در بخش ۳، مفاهیم پایه‌ای الگوریتم NSGA-II و روش تاپسیس در قالب مبانی تئوری و نظری این تحقیق توضیح داده شده‌اند. روش پیشنهادی در بخش ۴ توضیح داده می‌شود. نتایج تحقیق در بخش ۵ آورده شده است. نهایتاً، در بخش ۶، نتیجه‌گیری و تحقیقاتی که در آینده در این زمینه می‌توانند انجام شوند، آورده شده است.

۲- تعریف مساله

مساله مسیریابی بهینه بر روی شبکه به‌عنوان یکی از توابع اصلی تجزیه و تحلیل شبکه در سیستم‌های اطلاعات مکانی شناخته شده و در دو نوع مسائل کوتاهترین مسیر تک معیاره (SSPP) و کوتاهترین مسیر چند معیاره (MSPP) طبقه‌بندی شده است (۲۲ و ۲۳). سیستم‌های اطلاعات مکانی موجود، علی‌رغم داشتن قابلیت‌های فراوان در مدیریت، تحلیل، تلفیق و مدل‌سازی داده‌های مکانی، معمولاً در مواجهه با "مساله کوتاهترین مسیر با در نظرگیری چند معیار" نیازمند بکارگیری ابزار قدرتمند تجزیه و تحلیل مکانی می‌باشند (۲۴ و ۲۵).

یک شبکه‌ی حمل و نقلی تک ساخته، می‌تواند به صورت یک گراف جهت‌دار $G=(V, E)$ به طوریکه $V=\{1,2,\dots,n\}$ و E به ترتیب مجموعه گره‌ها و یال‌های شبکه هستند، نمایش داده شود.

³ Sub-graph

¹ Single criterion Shortest Path Problems

² Multi criteria Shortest Path Problems

حفظ می‌کند که در ادامه به شرح مختصری از این الگوریتم می‌پردازیم.

۳-۱-۱- مفهوم غلبه‌ی پارِ تو

در الگوریتم‌های بهینه‌سازی چند هدفه، برخی از راه‌حل‌ها بر برخی دیگر از راه‌حل‌ها غلبه دارند؛ بدین معنی که مقادیر تمامی توابع هدف به ازای برخی از راه‌حل‌ها، مطلوب‌تر از مقادیر همان توابع هدف برای برخی دیگر از راه‌حل‌ها می‌باشند. اما در مقابل ممکن است تنها برخی از مقادیر توابع هدف برای یک راه‌حل مطلوب‌تر از مقادیر همان توابع هدف برای یک راه‌حل دیگر باشند و این وضعیت برای تمامی توابع هدف وجود نداشته باشد. بنابراین، راه‌حل X_1 بر راه‌حل X_2 غالب است (که به صورت $X_1 < X_2$ نشان داده می‌شود)، اگر و تنها اگر: راه‌حل X_1 در هیچ تابع هدفی، مقادیری بدتر از راه‌حل X_2 نداشته باشد و حداقل در یک تابع هدف مطلوب‌تر از راه‌حل X_2 باشد [۲۷].

به عبارت دیگر، اگر هدف بهینه‌سازی کمینه کردن باشد، مفهوم غلبه‌ی پارِ تو را می‌توان به صورت رابطه (۳) بیان کرد [۲۷]:

$$\alpha < \beta \Leftrightarrow f_i(\alpha) \leq f_i(\beta) \\ \forall i = 1, \dots, N \wedge \exists i : f_i(\alpha) < f_i(\beta) \quad \text{رابطه (۳)}$$

رابطه‌ی غلبه‌ی پارِ تو یک رابطه‌ی غیر بازتابی، نامتقارن و متعددی است [۲۵]. با توجه به این تعریف می‌توان ادعا نمود راه‌حل‌هایی که بر دیگر راه‌حل‌ها غالب هستند، راه‌حل‌های بهتری برای مساله‌اند. همچنین به وسیله‌ی این تعریف می‌توان راه‌حل‌ها را به گونه‌ای رتبه‌بندی کرد که راه‌حل‌های هر رتبه بر یک‌دیگر غلبه نداشته اما، توسط راه‌حل‌های موجود در رتبه‌های بالاتر مغلوب می‌شوند [۲۷].

۳-۱-۲- رتبه‌بندی غیر مغلوب

در این الگوریتم، برای حفظ بهترین افراد در نسل‌های بعدی، از رتبه‌بندی افراد استفاده می‌شود.

در یک شبکه‌ی چند هدفه، وزن هر یال به صورت یک بردار p بعدی از مقادیر توابع هدف مختلف نشان داده می‌شود $C(e) = [C1(e), C2(e), \dots, Cp(e)]$. مقدار هر تابع هدف $q \in (1, 2, \dots, p)$ برای مسیر $R(s, t)$ با استفاده از رابطه (۲) تعیین می‌گردد [۲۶]:

$$C_q^{R(s,t)} = \sum_{e \in R(s,t)} C_q^e \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این حالت، هدف پیدا نمودن کمترین مقدار برای هر تابع هدف می‌باشد.

از آنجا که مسائل MSPP از جمله مسائل NP-hard می‌باشند [۱۵]، مسائل کوتاهترین مسیر چندساخته‌ی چند معیاره (MMSPP) نیز از دسته مسائل NP-hard می‌باشند و ناچار به پذیرش تقریبی از بهینه کلی خواهیم بود. یکی از روش‌هایی که برای حل این دسته از مسائل به کار می‌رود، استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری می‌باشد. در این تحقیق، الگوریتم NSGA-II برای حل این مساله به کار گرفته شده و نتایج به دست آمده‌ی آن با نتایج الگوریتم ژنتیک (پیوست) مقایسه می‌شود.

۳- مبانی تئوری و نظری

۳-۱- الگوریتم NSGA-II

این الگوریتم توسط دب و همکارانش در سال ۲۰۰۲ [۲۷] پیشنهاد داده شد. این الگوریتم بر مبنای مفاهیم پارِ تو بوده و با اضافه شدن دو عملگر ضروری به الگوریتم ژنتیک تک‌هدفی معمولی، به یک الگوریتم چندهدفه تبدیل شده است که به جای یافتن بهترین جواب، دسته‌ای از بهترین جواب‌ها را نتیجه می‌دهد. این دو عملگر عبارتند از: (۱) عملگری که یک معیار برتری (رتبه) بر اساس مرتب‌سازی نامغلوب به اعضای جمعیت اختصاص می‌دهد و (۲) عملگری که تنوع راه‌حل را در میان راه‌حل‌های با رتبه‌ی برابر

¹ multi-criteria multi-modal shortest path problems

در الگوریتم NSGA-II از روش ترکیب جمعیت موجود با افراد به وجود آمده و انتخاب برترین افراد از بین آنها استفاده می‌شود. برای این منظور ابتدا افراد جمعیت بر اساس رتبه‌ای که دارند مرتب می‌شوند اما این روند به تنهایی برای تعیین افراد برتر کافی نمی‌باشد. در اینصورت افراد واقع در جبهه‌های اول و دوم پارتو به نسل بعد انتقال یافته و افراد واقع در جبهه‌های چهارم و پنجم نیز کنار گذاشته می‌شوند. اما در مورد افراد واقع در جبهه‌ی سوم، نه می‌توان تمام افراد آن را کنار گذاشت و نه می‌توان همه‌ی آنها به نسل بعد منتقل کرد. برای حل این مشکل، باید افراد واقع در این جبهه بر اساس میزان فاصله‌ی ازدحامی که دارند مرتب شده و سپس برترین افراد از بین آنها به نسل بعد منتقل شود.

۳-۲- روش تاپسیس (TOPSIS)

این روش ابتدا توسط هوانگ و یون در سال ۱۹۸۱ [۲۸] معرفی شد. این روش برای اولویت‌بندی بین گزینه‌های مختلف با توجه به فاصله از گزینه ایده‌آل مورد استفاده قرار می‌گیرد. جوابی که این روش ارائه می‌دهد، گزینه‌ای است که بیشترین فاصله از گزینه ایده‌آل منفی و کمترین فاصله از گزینه ایده‌آل را دارا می‌باشد. یک مزیت اصلی این روش سرعت بالای آن در تعیین جواب بهینه می‌باشد که در ادامه به شرح مختصری از گام‌های انجام این روش می‌پردازیم.

گام اول) تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری: اگر مساله‌ی تصمیم‌گیری چند هدفه‌ای که به دنبال حل آن هستیم دارای m گزینه و n تابع هدف باشد، ماتریس تصمیم‌گیری آن به صورت نشان داده شده در جدول (۱) تشکیل می‌شود:

در این رتبه‌بندی، رتبه‌ی یک فرد، بر اساس تعداد افرادی که بر آن فرد غالب می‌شوند، اختصاص داده می‌شود. این رتبه‌بندی بدین صورت است که در ابتدا افرادی که توسط هیچ‌کدام از افراد دیگر مغلوب نشده‌اند در جبهه‌ی اول قرار می‌گیرند. در مرحله‌ی بعد، افرادی که در جبهه‌ی اول قرار گرفته‌اند از جمعیت کنار گذاشته و یک رتبه‌بندی جدید بین افراد باقی‌مانده صورت می‌گیرد. افرادی که در این مرحله توسط هیچ‌کدام از افراد غلبه نشوند در جبهه‌ی دوم قرار می‌گیرند. این روند تا زمانی ادامه می‌یابد که به همه‌ی افراد جمعیت یک رتبه اختصاص یابد.

۳-۱-۳- فاصله ازدحامی

این فاصله برای افراد واقع در یک جبهه اندازه‌گیری می‌شود و برای افراد واقع در جبهه‌های مختلف معنی ندارد. برای این منظور، ابتدا برای هر تابع هدف Z ، نتایج مرتب می‌شوند. پس از مرتب‌سازی، به افرادی که بیشترین و کمترین مقادیر برای آن معیار خاص را دارا می‌باشند فاصله‌ی ازدحامی بی‌نهایت اختصاص داده شده و مقدار آن برای سایر افراد با استفاده از روابط زیر به دست می‌آید [۲۷]:

$$cd_k(x) = \frac{|Z_k^{i+1} - Z_k^{i-1}|}{Z_k^{\max} - Z_k^{\min}} \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در آن، Z_k^{i+1} و Z_k^{i-1} مقادیر همسایه‌های فرد x برای تابع هدف k ام می‌باشند. به همین ترتیب، این روند برای سایر توابع هدف نیز انجام می‌گردد. نهایتاً فاصله‌ی ازدحامی برای هر فرد با استفاده از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید [۲۷]:

$$cd(x) = \sum_{k=1}^m cd_k(x) \quad \text{رابطه (۵)}$$

که در آن $cd(x)$ فاصله‌ی ازدحامی برای فرد x می‌باشد.

۳-۱-۴- نخبه‌گرایی در الگوریتم NSGA-II

¹ Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution

جدول ۱: ماتریس تصمیم‌گیری ایجاد شده برای مساله‌ای با n تابع هدف و m گزینه

| | C_1 | C_2 | ... | C_n |
|-------|----------|----------|-----|----------|
| A_1 | r_{11} | r_{12} | ... | r_{1n} |
| A_2 | r_{21} | r_{22} | ... | r_{2n} |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| A_m | r_{m1} | r_{m2} | ... | r_{mn} |

مواقع وجود نداشته و کمترین مقدار موجود در بین تمامی گزینه‌ها برای توابع هدف دارد. به همین ترتیب، گزینه ایده‌آل منفی (A^-)، گزینه‌ای است فرضی که در اکثر مواقع وجود نداشته و بیشترین مقدار موجود در بین تمامی گزینه‌ها برای توابع هدف دارد. این دو گزینه به ترتیب به صورت رابطه (۹) تعریف می‌شوند [۲۹]:

رابطه (۹)

$$A^+ = \left\{ (\max_i V_{ij} \mid j \in J^+), (\min_i V_{ij} \mid j \in J^-) \mid i = 1, \dots, m \right\} = \{V_1^+, V_2^+, \dots, V_n^+\}$$

$$A^- = \left\{ (\min_i V_{ij} \mid j \in J^+), (\max_i V_{ij} \mid j \in J^-) \mid i = 1, \dots, m \right\} = \{V_1^-, V_2^-, \dots, V_n^-\}$$

در رابطه‌ی فوق، $+$ و $-$ به ترتیب برای حالتی که توابع هدف ما به صورت "تابع هدف سود" و "تابع هدف هزینه" باشند. منظور از تابع هدف هزینه، تابع هدفی است که مقادیر کمتر آن برای ما مطلوب‌ترند و بالعکس. منظور از تابع هدف سود، تابع هدفی است که مقادیر بیشتر آن برای ما مطلوب‌ترند. به همین ترتیب V_j^+ و V_j^- به ترتیب مقادیر گزینه ایده‌آل و گزینه ایده‌آل منفی به ازای تابع هدف z می‌باشند.

که در آن، A_i ، i امین گزینه، C_j ، j امین تابع هدف و r_{ij} مقدار گزینه i ام به ازای تابع هدف z ام می‌باشد.

گام دوم) نرمال کردن ماتریس تصمیم‌گیری: برای این منظور با توجه به رابطه (۶) مقدار درایه‌های ماتریس تصمیم‌گیری نرمال می‌شوند [۲۹]:

رابطه (۶)

$$n_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m r_{ij}^2}}$$

$, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$

به‌طوری‌که n_{ij} نرمال شده مقدار r_{ij} در ماتریس تصمیم‌گیری است. و ماتریس N که ماتریس تصمیم‌گیری نرمالیزه شده نامیده می‌شود از جایگزین کردن این مقادیر با مقادیر متناظر در ماتریس تصمیم‌گیری بدست می‌آید ($N = [n_{ij}]$).

گام سوم) تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری نرمالیزه شده وزن‌دار: این ماتریس با استفاده از رابطه (۷) به‌دست می‌آید [۲۹]:

رابطه (۷)

$$V_{m \times n} = N_{m \times n} \times W_{n \times n}$$

که در آن W ماتریس وزن‌های توابع هدف بوده که به صورت رابطه (۸) می‌باشد [۲۹]:

$$W = \begin{bmatrix} w_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & w_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & w_n \end{bmatrix}_{m \times n}$$

رابطه (۸)

گام چهارم) تعیین گزینه ایده‌آل و گزینه ایده‌آل منفی: گزینه ایده‌آل (A^+)، گزینه‌ای است فرضی که در اکثر

¹ Benefit fitness function

² Cost fitness function

پس از تعیین این ضریب برای هر گزینه، گزینه‌ها بر اساس این ضریب به طور نزولی مرتب می‌شوند. نهایتاً گزینه‌ای که بیشترین مقدار را داشته باشد به‌عنوان جواب بهینه انتخاب می‌گردد.

۴- روش پیشنهادی

اولین گام در حل یک مساله با الگوریتم ژنتیک چند هدفه، ایجاد جمعیت اولیه می‌باشد. در الگوریتم پیشنهادی NSGA-II، برای نمایش یک مسیر چند ساختی از کروموزوم‌هایی به شکل زیر استفاده می‌شود.



شکل ۱: نحوه‌ی کد گذاری یک مسیر چند ساختی

که در آن، c_i^j مقدار تابع هدف j ام برای مسیر i ام می‌باشد. پس از تعیین میزان هزینه‌ی هر مسیر، مسیرها باید رتبه‌بندی شده و فاصله‌ی ازدحامی برای آنها محاسبه شود. در این تحقیق، از انتخاب رقابتی^۱ به تعداد ۲ در الگوریتم NSGA-II جهت انتخاب والدین استفاده شده است. این روش بدین‌گونه اعمال می‌شود که در ابتدا به تعداد ۲ مسیر از بین مجموعه مسیرها به‌طور تصادفی انتخاب می‌شوند. حال از بین این مجموعه مسیرها، یک مسیر باید انتخاب گردد. نحوه‌ی انتخاب مسیر بدین ترتیب است که مسیرهای با رتبه برتر ترجیح دارند. در صورتی که رتبه‌ی دو مسیر با هم برابر باشند، آنگاه اولویت با مسیری است که دارای فاصله‌ی ازدحامی بیشتر می‌باشد. به همین ترتیب، والد دوم نیز انتخاب می‌شود و عملگر تقاطع^۲ بر روی آنها صورت می‌گیرد.

در گام بعدی، می‌باید فرزندان با اعمال عملگر تقاطع پیشنهادی ایجاد شوند. به عنوان نمونه فرض شود

گام پنجم) محاسبه‌ی فاصله‌ی هر گزینه از گزینه ایده‌آل و گزینه ایده‌آل منفی: این دو فاصله به ترتیب با استفاده از رابطه‌های (۱۰ و ۱۱) به‌دست می‌آیند [۲۹]:

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^+)^2}, \quad i=1,2,\dots,n \quad (10)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^-)^2}, \quad i=1,2,\dots,n \quad (11)$$

گام ششم) محاسبه‌ی ضریب نزدیکی نسبی: این مقدار با استفاده از رابطه (۱۲) به‌دست می‌آید [۲۹]:

$$CC_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+}, \quad i=1,2,\dots,m \quad (12)$$

همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است، در روش کد گذاری استفاده شده در الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، مقادیر برخی از ژن‌ها دارای علامت منفی می‌باشند و بقیه دارای علامت مثبت می‌باشند. در مسیریابی چند ساختی، ساختهای حمل و نقلی مختلفی جهت جابجایی در سطح شبکه در نظر گرفته می‌شوند و لذا، ممکن است بین دو گره بیش از یک یال وجود داشته باشد. بنابراین، جهت ایجاد جلوگیری از به اشتباه افتادن الگوریتم، از ژن‌هایی با علامت منفی استفاده شده است که نشان‌دهنده‌ی ساخته‌های حمل و نقلی مختلف می‌باشند. مقادیر سایر ژن‌ها که با علامت مثبت در نظر گرفته شده‌اند، گره‌هایی که مسیر از آنها عبور می‌کند را نشان می‌دهند. بنابراین در گام اول باید تعدادی مسیر تصادفی بین نقاط مبدا و مقصد ایجاد شود. تعداد اعضای جمعیت اولیه، می‌باید تنظیم شود. در گام بعدی، هزینه‌ی این مسیرها باید تعیین گردد. هزینه‌ی هر مسیر با استفاده از رابطه (۱۳) مشخص می‌شود:

$$cost_i = [c_i^1, c_i^2, c_i^3]^T \quad (13)$$

¹ Tournament selection

² Crossover

از این دو مسیر والد می‌باشد.

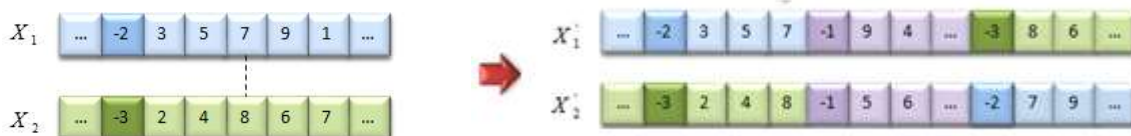


شکل ۲: مسیرهای والد انتخاب شده برای ایجاد فرزندان با استفاده از عملگر تقاطع

با عوض کردن جای والد X_1 و X_2 حاصل می‌شود که در شکل (۳) به صورت کروموزوم (X_2') آورده شده است. توجه به این نکته لازم است که برای جلوگیری از ایجاد دور در مسیر فرزند ایجاد شده با استفاده از عملگر تقاطع، مسیر تصادفی ایجاد شده بین دو ژن انتخاب شده نباید شامل ژن‌هایی از بخش اول (از گره شروع تا گره انتخاب شده) از والد اول و بخش دوم (از گره انتخاب شده تا گره پایانی) از والد دوم مسیر باشد.

دو مسیر به صورت نشان داده شده در شکل (۲) داشته و هدف ایجاد دو مسیر جدید با استفاده از عملگر تقاطع

برای اجرای این عملگر، ابتدا از هر کدام از این مسیرها یک گره به صورت تصادفی انتخاب می‌شود (به‌عنوان مثال گره ۷ از مسیر X_1 و گره ۸ از مسیر X_2). کروموزوم فرزند اول از سه بخش تولید می‌شود. بخش اول آن از گروه شروع تا گره انتخاب شده از والد X_1 (گره ۷) حاصل می‌شود. بخش دوم آن از ایجاد یک مسیر تصادفی از گره انتخاب شده از والد X_1 (گره ۷) تا گره انتخاب شده از والد X_2 (گره ۸) حاصل می‌شود. بخش آخر آن نیز از گره انتخاب شده از والد X_2 (گره ۸) تا انتهای مسیر می‌باشد (شکل (۸)). فرزند دوم نیز با روندی مشابه و تنها



شکل ۳: فرزندهای ایجاد شده پس از اعمال عملگر تقاطع

شبه‌کد عملگر تقاطع پیشنهادی به‌صورت نشان داده شده در شکل (۴) می‌باشد.

| |
|--|
| <p>function crossover inputs : a population of routes, s, t, C_{rate} outputs : a set of offspring routes</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. pop // population 2. s, t // start node and end node, respectively 3. N // population size 4. C_{rate} // crossover rate 5. for $i=1$ to $N/2$ 6. If $rand < C_{rate}$ 7. Select two parents using tournament selection 8. Select a node from each parent; // n_1 from parent 1 (P_1) and n_2 from parent 2 (P_2) 9. Generate a route from n_1 to n_2; // X'_1 10. Generate a route from n_2 to n_1; // X'_2 11. $Ch_1 = P_1$ from s to $n_1 + X'_1 + P_2$ from n_2 to t; // offspring 1 12. $Ch_2 = P_2$ from s to $n_2 + X'_2 + P_1$ from n_1 to t; // offspring 2 13. If Ch_1 or Ch_2 have a loop 14. Delete their loop; 15. end; 16. end; 17. end; |
|--|

شکل ۴: شبه‌کد عملگر تقاطع در نظر گرفته برای الگوریتم NSGA-II پیشنهادی

مقدار بهینه واقعی نیازمند یک متریک کیفیت می باشیم که در این تحقیق از روش Lp -norm که برای ارزیابی کیفیت مدل پیشنهادی توسط جن و چن [۳۰] پیشنهاد گردیده است استفاده شده است که در ادامه به توضیح این روش می پردازیم:

فرض کنید مسیر r^* یک مسیر فرضی بین نقاط مبدا و مقصد بر اساس رابطه (۱۴) می باشد:

$$r^* = [l_1^*, l_3^*, l_3^*] \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

که در آن l_1^* ، l_2^* و l_3^* به ترتیب کمترین مقادیر تعداد تغییر ساختهای حمل و نقلی، زمان و کرایه‌ی مسیر بین نقاط مبدا و مقصد می باشند که این مقادیر با استفاده از الگوریتم شناخته شده‌ی دایحسترا اندازه گیری می شوند. فرض کنید مسیر پیشنهادی الگوریتم نیز r^c باشد (رابطه (۱۵)):

$$r^c = [l_1^c, l_3^c, l_3^c] \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

که در آن l_1^c ، l_2^c و l_3^c به ترتیب مقادیر تعداد تغییر ساختهای حمل و نقلی، زمان و کرایه برای مسیر پیشنهادی الگوریتم می باشند. با توجه به این مقادیر، مقصدار روش Lp -norm، از رابطه (۱۶) به دست می آید [۳۰]:

$$r = \left(\sum_{i=1}^3 w_i^p \left[\frac{|l_i^* - l_i^c|}{l_i^*} \right]^p \right)^{1/p} \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

که در آن، w_i وزن تابع هدف i ام می باشد. با توجه به اینکه در این تحقیق، فاصله‌ی مقادیر تابع هدف مسیر r^c از r^* مهم می باشد، بنابراین مقدار p برابر ۱ در نظر گرفته می شود. هر چقدر مقدار r کمتر باشد، نشان دهنده‌ی کیفیت بالاتر جواب‌های الگوریتم می باشد.

حال نوبت به اعمال عملگر جهش^۱ بر روی جمعیت می باشد. به عنوان نمونه برای اعمال عملگر جهش بر روی مسیر X_1 نشان داده شده در شکل (۲)، ابتدا باید دو گره از آن به صورت کاملاً تصادفی در نظر گرفته شوند (به عنوان مثال گره‌های ۵ و ۱). مسیر فرزندی که با استفاده از این عملگر ایجاد می شود از سه بخش ایجاد می شود: بخش اول از گره شروع تا گره انتخاب شده اول (گره ۵)، بخش دوم از ایجاد یک مسیر تصادفی از گره اول (گره ۵) به گره دوم (گره ۱) و بخش پایانی آن نیز از گره دوم انتخاب شده تا گره پایانی مسیر می باشد (شکل (۵)). لازم است توجه شود که در این حالت نیز برای جلوگیری از ایجاد دور در مسیر ایجاد شده، مسیر تصادفی که بین دو ژن انتخاب شده زده می شود نباید شامل گره‌های واقع در بخش‌های ابتدایی و پایانی مسیر باشد.

شبه‌کد روش استفاده شده جهت انتخاب والدین به صورت نشان داده شده در شکل (۶) می باشد.

در مرحله بعد، اعضای جمعیت موجود با فرزندان ایجاد شده با عملگرهای تقاطع و جهش در یک مجموعه‌ی جدید قرار گرفته و بهترین اعضا از بین آنها (به تعداد اعضای جمعیت) انتخاب شده و به نسل بعد منتقل می شود. این مراحل به تعدادی مشخص تکرار شده و در نهایت، مسیرهایی که در جبهه‌ی اول پارتوی جمعیت آخر قرار می گیرند به عنوان مجموعه جواب‌های بهینه بین نقاط مبدا و مقصد پیشنهاد می شوند.

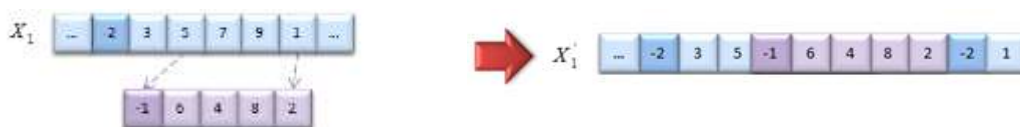
جهت تعیین مسیر بهینه‌ی از میان مسیرهای جبهه‌ی اول پارتوی بدست آمده از الگوریتم NSGA-II پیشنهادی، ابتدا وزن مربوط به هر تابع هدف تعیین گردیده و سپس از روش تاپسیس استفاده می گردد.

به منظور ارزیابی میزان نزدیکی جواب تخمینی (بدست آمده) از روش پیشنهادی ارائه شده در فوق به

¹ Mutation

مسیریابی چند ساختی چند هدفه با استفاده از ...

پرهام پهلوانی، فاضل قادری



شکل ۵: فرزند ایجاد شده پس از اعمال عملگر جهش

function mutation
inputs: population, s , t , M_{rate}
outputs: a set of muted routes

```

pop // population
s, t // start and end nodes
N // population size
Mrate // mutation rate
1. for  $i=1$  to  $N$ 
2.   If  $rand < M_{rate}$ 
3.     Select a parent randomly; //  $p \in pop$ 
4.     Select two node from the parent; //  $n_1$  and  $n_2$ 
5.     Generate a route from  $n_1$  to  $n_2$ ; //  $X'$ 
6.      $Ch = p$  from  $s$  to  $n_1 + X' + p$  from  $n_2$  to  $t$ ; // child
7.     If  $Ch$  has a loop
8.       Delete loop;
9.     end;
10.  end;
11. end;

```

شکل ۶: شبه‌کد عملگر جهش در نظر گرفته برای الگوریتم NSGA-II پیشنهادی

۵- نتایج

در این مجموعه داده‌ها، میانگین زمان عبور از هر یال در بازه‌های ۱۵ دقیقه‌ای زمانی مختلف در پایگاه داده ما موجود می‌باشد.

الگوریتم NSGA-II و تاپسیس پیشنهادی در محیط برنامه‌نویسی MATLAB پیاده شد. در گام اول پارامترهای این الگوریتم باید تنظیم گردند. در این تحقیق مقادیر پارامترهای الگوریتم NSGA-II پیشنهادی برابر با مقادیر پارامترهای متناظر تنظیم شده برای الگوریتم ژنتیک معرفی شده در پیوست، قرار داده شده‌اند. مقادیر این پارامترها در جدول (۲) نشان داده شده‌اند.

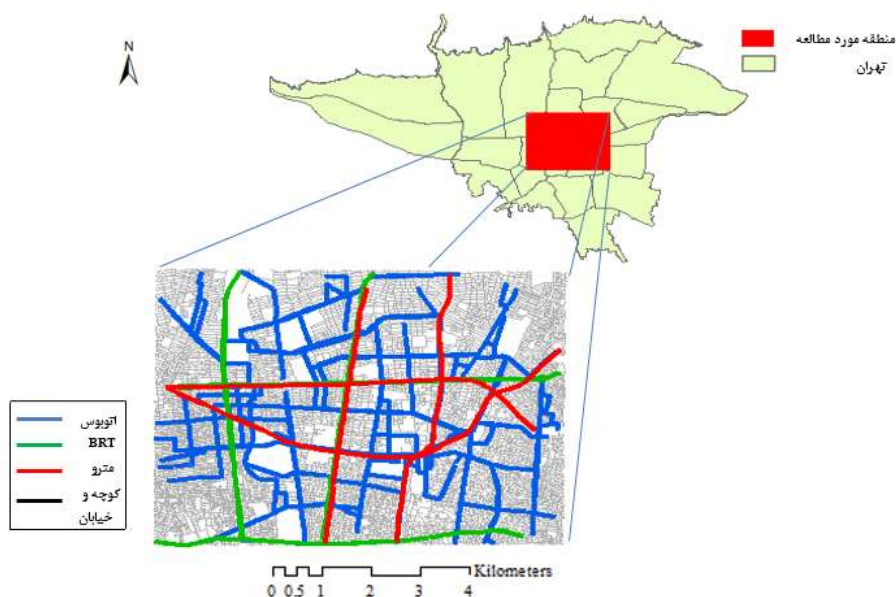
جهت بررسی کارایی الگوریتم NSGA-II و تاپسیس پیشنهادی، این الگوریتم بر روی بخشی از سیستم حمل و نقل عمومی مرکز شهر تهران با ۱۶۹۴ گره و ۲۹۳۹ یال که در شکل (۷) نشان داده شده است پیاده شد. مساحت این منطقه، حدود ۵۲.۹ کیلومتر مربع بوده و دارای بخش‌هایی از ۴ خط رفت و برگشت BRT، ۴ خط رفت و برگشت مترو، ۳۴ خط رفت و برگشت اتوبوس و مجموعاً بیش از ۱۰۰۰ کیلومتر جاده می‌باشد. در این تحقیق از میانگین داده‌های ترافیکی بین ساعات ۵:۳۰ تا ۸:۳۰ صبح محدوده‌ی در نظر گرفته شده استفاده شده است.

جدول ۲: مقادیر اختصاص داده شده به پارامترهای الگوریتم NSGA-II پیشنهادی

| مقدار | پارامتر |
|-------|-----------------------|
| ۳۰ | جمعیت اولیه |
| ۰/۶ | نرخ تقاطع |
| ۰/۳ | نرخ جهش |
| ۳۰۰ | بیشینه تکرار الگوریتم |

تمامی توابع هدف، در راستای حرکت به سوی تقریب مجموعه مسیره‌های بهینه‌ی کلی پارتو می‌باشد.

همانطور که در شکل (۸) دیده می‌شود، ۲۹ مسیر در جبهه‌ی اول پارتوی الگوریتم NSGA-II پیشنهادی قرار گرفته‌اند. جهت تعیین مسیر بهینه‌ی بین این نقاط، ابتدا می‌باید وزن مربوط به هر تابع هدف تعیین گردد.



شکل ۷: محدوده‌ی در نظر گرفته شده جهت پیاده‌سازی الگوریتم

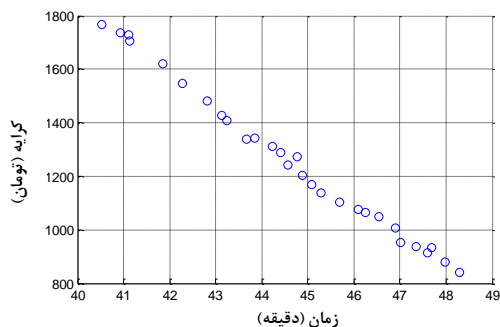
چند هدفه به وسیله‌ی الگوریتم NSGA-II صورت می‌گرفت. در گام بعدی، به تعداد مسیره‌های موجود در جبهه‌ی اول پارتو الگوریتم NSGA-II پیشنهادی، مجموعه مسیره‌های پارتو تعیین گردیدند. پس از مشخص کردن مقادیر وزن توابع هدف، مسیر بهینه از بین هر مجموعه با استفاده از روش تاپسیس استخراج گردید. بعد از تعیین مسیره‌های بهینه از هر الگوریتم، با استفاده از روش L_p -norm یک مقایسه بین این مسیره‌ها صورت پذیرفت.

به‌عنوان نمونه، نحوه‌ی تکامل مجموعه مسیره‌های بهینه‌ی پارتو در طول فرآیند تکامل NSGA-II

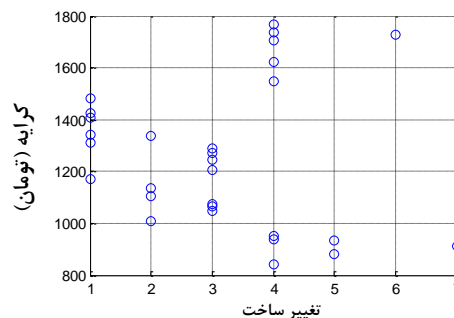
پیشنهادی برای مسیریابی بین نقاط مبدا و مقصد نشان داده شده در شکل (۹)، در شکل (۸) نشان داده شده است. همانطور که در این شکل نیز دیده می‌شود، فشار جست و جو در الگوریتم NSGA-II پیشنهادی بر روی

سپس، با استفاده از روش تاپسیس، مسیر بهینه بین نقاط مبدا و مقصد مشخص می‌گردد. به‌عنوان نمونه، با در نظر گرفتن $w_1=0/1$ ، $w_2=0/6$ و $w_3=0/3$ و اعمال روش تاپسیس، نتایج بدست آمده به صورت نشان داده شده در جدول (۳) می‌باشند.

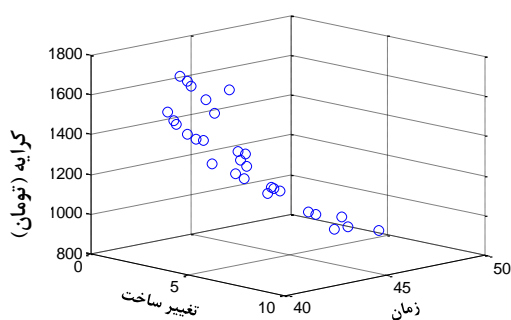
جهت ارزیابی کارایی الگوریتم NSGA-II و تاپسیس پیشنهادی، یک مقایسه بین نتایج این الگوریتم و الگوریتم‌های ژنتیک (که در پیوست آورده شده است) و شبیه‌سازی تبرید (۱۹) صورت گرفت. فرآیند مقایسه بدین ترتیب بود که ابتدا یک مسیریابی



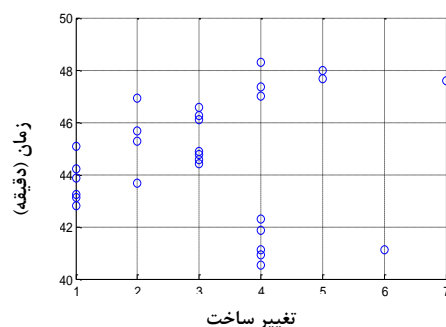
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۸: تغییرات تعداد تغییر ساختهای حمل و نقلی سفر-کرایه‌ی سفر (الف)، زمان سفر-کرایه‌ی سفر (ب)، تعداد تغییر ساختهای حمل و نقلی سفر-زمان سفر (ج) و تعداد تغییر ساختهای حمل و نقلی سفر-زمان سفر-کرایه‌ی سفر (د) مسیره‌ای بهینه‌ی پارتو در طول فرآیند الگوریتم NSGA-II پیشنهادی

، $w_1 = 0/14$ ، $w_2 = 0/3$ و $w_3 = 0/3$ و $w_1 = 0/45$ ، همچنین نزدیکی مقادیر r (رابطه (۱۶)) برای ترکیب الگوریتم NSGA-II و تاپسیس نشان‌دهنده‌ی کارایی بالای این الگوریتم می‌باشد.

نهایتاً ۹۰ مسیریابی مختلف مابین ۳۰ جفت نقطه‌ی مبدا و مقصد با ۳ دسته از وزن‌های توابع هدف صورت پذیرفت. نتایج نشان دادند که به ترتیب در ۸۹ و ۸۷ درصد از موارد (به ترتیب ۸۰ و ۷۸ مورد از ۹۰ مسیریابی‌های صورت گرفته)، الگوریتم NSGA-II و تاپسیس پیشنهادی مسیر برتری را نسبت به الگوریتم‌های ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید در ترکیب با روش تاپسیس پیشنهاد داده است. به‌عنوان نمونه، نتایج حاصل از مسیریابی بین یک جفت از نقاط مبدا و مقصد نشان داده شده در شکل (۹) و جدول (۴) آورده شده است. بگونه‌ای که در شکل (۹) مسیره‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب مسیره‌های بهینه به‌دست آمده از ترکیب الگوریتم NSGA-II و روش تاپسیس با در نظر گرفتن وزن‌های معیار $w_1 = 0/1$ ، $w_2 = 0/6$ و $w_3 = 0/3$ ،

جدول ۳: رتبه‌بندی مسیرهای واقع در جبهه‌ی اول پارتو با استفاده از روش تاپسیس با در نظر گرفتن مقادیر وزن‌های توابع هدف $w_1=0/1$ ،

$$w_2=0/6 \text{ و } w_3=0/3$$

| رتبه مسیر | ضریب نزدیکی نسبی | فاصله از گزینه ایده‌آل منفی | فاصله از گزینه ایده‌آل | کرایه (تومان) | زمان (دقیقه) | تعداد تغییر بین ساختها | شماره مسیر |
|--------------|---------------------|--------------------------------|---------------------------|------------------|-----------------|---------------------------|---------------|
| ۲۳ | ۰/۵۰۱۵ | ۰/۰۳۷۰ | ۰/۰۳۶۸ | ۹۱۲/۸ | ۴۷/۶ | ۷ | ۱ |
| ۲۸ | ۰/۳۶۸۳ | ۰/۰۲۵۲ | ۰/۰۴۳۱ | ۱۷۶۷/۴ | ۴۰/۵ | ۴ | ۲ |
| ۹ | ۰/۶۳۱۷ | ۰/۰۴۳۱ | ۰/۰۲۵۲ | ۸۴۱/۹ | ۴۸/۳ | ۴ | ۳ |
| ۸ | ۰/۶۳۷۱ | ۰/۰۳۹۱ | ۰/۰۲۲۳ | ۱۳۱۰/۴ | ۴۴/۲ | ۱ | ۴ |
| ۲۹ | ۰/۲۸۶۴ | ۰/۰۱۸۸ | ۰/۰۴۶۸ | ۱۷۲۷/۱ | ۴۱/۱ | ۶ | ۵ |
| ۲۴ | ۰/۴۰۸۱ | ۰/۰۲۴۰ | ۰/۰۳۴۷ | ۱۵۴۶/۸ | ۴۲/۳ | ۴ | ۶ |
| ۶ | ۰/۶۴۹۱ | ۰/۰۳۷۵ | ۰/۰۲۰۳ | ۱۰۶۵/۸ | ۴۶/۲ | ۳ | ۷ |
| ۲۵ | ۰/۳۸۶۳ | ۰/۰۲۳۶ | ۰/۰۳۷۵ | ۱۶۲۰/۸ | ۴۱/۸ | ۴ | ۸ |
| ۱۲ | ۰/۶۲۲۴ | ۰/۰۳۹۵ | ۰/۰۲۳۷ | ۹۳۶ | ۴۷/۳ | ۴ | ۹ |
| ۱۸ | ۰/۵۸۳۸ | ۰/۰۳۹۸ | ۰/۰۲۸۴ | ۸۸۰/۴ | ۴۸/۰ | ۵ | ۱۰ |
| ۱۳ | ۰/۶۰۵۰ | ۰/۰۳۳۵ | ۰/۰۲۱۹ | ۱۲۰۴/۸ | ۴۴/۹ | ۳ | ۱۱ |
| ۲۱ | ۰/۵۶۸۱ | ۰/۰۳۷۱ | ۰/۰۲۸۲ | ۱۴۸۰/۴ | ۴۲/۸ | ۱ | ۱۲ |
| ۲۰ | ۰/۵۶۸۸ | ۰/۰۳۱۶ | ۰/۰۲۳۹ | ۱۲۷۱/۹ | ۴۴/۸ | ۳ | ۱۳ |
| ۲۶ | ۰/۳۷۳۰ | ۰/۰۲۴۲ | ۰/۰۴۰۶ | ۱۷۰۴/۲ | ۴۱/۱ | ۴ | ۱۴ |
| ۳ | ۰/۶۸۹۲ | ۰/۰۳۹۸ | ۰/۰۱۷۹ | ۱۱۰۴/۲ | ۴۵/۷ | ۲ | ۱۵ |
| ۵ | ۰/۶۴۹۹ | ۰/۰۳۸۰ | ۰/۰۲۰۵ | ۱۰۴۸/۳ | ۴۶/۶ | ۳ | ۱۶ |
| ۱ | ۰/۷۰۰۰ | ۰/۰۴۲۵ | ۰/۰۱۸۲ | ۱۰۰۸ | ۴۶/۹ | ۲ | ۱۷ |
| ۱۷ | ۰/۵۸۸۵ | ۰/۰۳۲۶ | ۰/۰۲۲۸ | ۱۲۴۳/۳ | ۴۴/۶ | ۳ | ۱۸ |
| ۱۴ | ۰/۵۹۹۴ | ۰/۰۳۷۹ | ۰/۰۲۵۳ | ۱۴۰۶/۴ | ۴۲/۲ | ۱ | ۱۹ |
| ۴ | ۰/۶۸۱۲ | ۰/۰۳۹۰ | ۰/۰۱۸۲ | ۱۱۳۷ | ۴۵/۳ | ۲ | ۲۰ |
| ۱۱ | ۰/۶۲۴۹ | ۰/۰۳۸۷ | ۰/۰۲۳۲ | ۱۳۴۳/۲ | ۴۲/۸ | ۱ | ۲۱ |
| ۱۹ | ۰/۵۷۲۰ | ۰/۰۳۷۶ | ۰/۰۲۸۲ | ۹۳۴/۱ | ۴۷/۷ | ۵ | ۲۲ |
| ۱۰ | ۰/۶۲۵۰ | ۰/۰۳۸۸ | ۰/۰۲۳۳ | ۹۵۳/۵ | ۴۷/۰ | ۴ | ۲۳ |
| ۱۶ | ۰/۵۹۰۶ | ۰/۰۳۷۷ | ۰/۰۲۶۱ | ۱۴۲۶/۶ | ۴۲/۱ | ۱ | ۲۴ |
| ۲ | ۰/۶۹۷۹ | ۰/۰۴۲۰ | ۰/۰۱۸۲ | ۱۱۷۰/۵ | ۴۵/۱ | ۱ | ۲۵ |
| ۲۲ | ۰/۵۶۴۲ | ۰/۰۳۱۳ | ۰/۰۲۴۲ | ۱۲۹۰/۳ | ۴۴/۴ | ۳ | ۲۶ |
| ۷ | ۰/۶۴۸۰ | ۰/۰۳۷۲ | ۰/۰۲۰۲ | ۱۰۷۵/۴ | ۴۶/۱ | ۳ | ۲۷ |
| ۱۵ | ۰/۵۹۶۳ | ۰/۰۳۴۶ | ۰/۰۲۳۴ | ۱۳۳۷/۴ | ۴۲/۷ | ۲ | ۲۸ |
| ۲۷ | ۰/۳۶۸۹ | ۰/۰۲۴۵ | ۰/۰۴۱۸ | ۱۷۳۴/۶ | ۴۰/۹ | ۴ | ۲۹ |

جدول ۴: نتایج بدست آمده از اجرای ترکیب الگوریتم ژنتیک و تاپسیس؛ ترکیب الگوریتم شبیه‌سازی تبرید تدریجی (۱۹) و تاپسیس و ترکیب الگوریتم NSGA-II و تاپسیس برای مسیریابی بین نقاط مبدا و مقصد نشان داده شده در شکل (۱۴) با سه دسته وزن توابع هدف

| شماره مسیریابی | وزن معیار اول | وزن معیار دوم | وزن معیار سوم | مشخصات مسیر فرضی ایده‌آل | مشخصات مسیر پیشنهادی الگوریتم | مقدار r برای ارزیابی کیفیت الگوریتم پیشنهادی |
|----------------|---------------|---------------|---------------|--------------------------|-------------------------------|--|
| | | | | ژنتیک و تاپسیس | | |
| (۱) | ۰/۱ | ۰/۶ | ۰/۳ | [۱, ۳۸/۵, ۸۶۰/۴] | [۴, ۴۸/۳, ۱۰۵۵/۶] | ۰/۳۴۳۵ |
| (۲) | ۰/۴ | ۰/۳ | ۰/۳ | [۱, ۳۸/۵, ۸۶۰/۴] | [۲, ۴۹/۷, ۱۰۹۵/۵] | ۰/۴۱۷۵ |
| (۳) | ۰/۴۵ | ۰/۴۵ | ۰/۱ | [۱, ۳۸/۵, ۸۶۰/۴] | [۳, ۴۷/۳, ۱۰۹۸/۱] | ۰/۹۰۶۳ |
| | | | | شبیه‌سازی تبرید و تاپسیس | | |
| (۱) | ۰/۱ | ۰/۶ | ۰/۳ | [۱, ۳۸/۵, ۸۶۰/۴] | [۳, ۴۷/۹, ۱۰۶۹] | ۰/۲۶۷۲ |
| (۲) | ۰/۴ | ۰/۳ | ۰/۳ | [۱, ۳۸/۵, ۴] | [۲, ۴۷/۲, ۱۱۳۲/۵] | ۰/۳۹۴۵ |
| (۳) | ۰/۴۵ | ۰/۴۵ | ۰/۱ | [۱, ۳۸/۵, ۸۶۰/۴] | [۲, ۴۶/۴, ۱۲۶۳/۵] | ۰/۷۳۴۹ |
| | | | | NSGA-II و تاپسیس | | |
| (۱) | ۰/۱ | ۰/۶ | ۰/۳ | [۱, ۳۸/۵, ۸۶۰/۴] | [۲, ۴۶/۹, ۱۰۰۸] | ۰/۱۷۲۶ |
| (۲) | ۰/۴ | ۰/۳ | ۰/۳ | [۱, ۳۸/۵, ۸۶۰/۴] | [۱, ۴۵/۱, ۱۱۷۰/۵] | ۰/۱۱۹۷ |
| (۳) | ۰/۴۵ | ۰/۴۵ | ۰/۱ | [۱, ۳۸/۵, ۸۶۰/۴] | [۲, ۴۵/۳, ۱۱۳۷] | ۰/۴۵۸۱ |

جدول ۵: میانگین زمان اجرایی برای الگوریتم‌های پیشنهادی

| الگوریتم پیشنهادی | میانگین زمان اجرایی (ثانیه) |
|---|-----------------------------|
| ژنتیک و تاپسیس | ۱۳/۲ |
| شبیه‌سازی تبرید ^{۱۷۱} و تاپسیس | ۱۰/۴ |
| NSGA-II و تاپسیس | ۹/۸ |

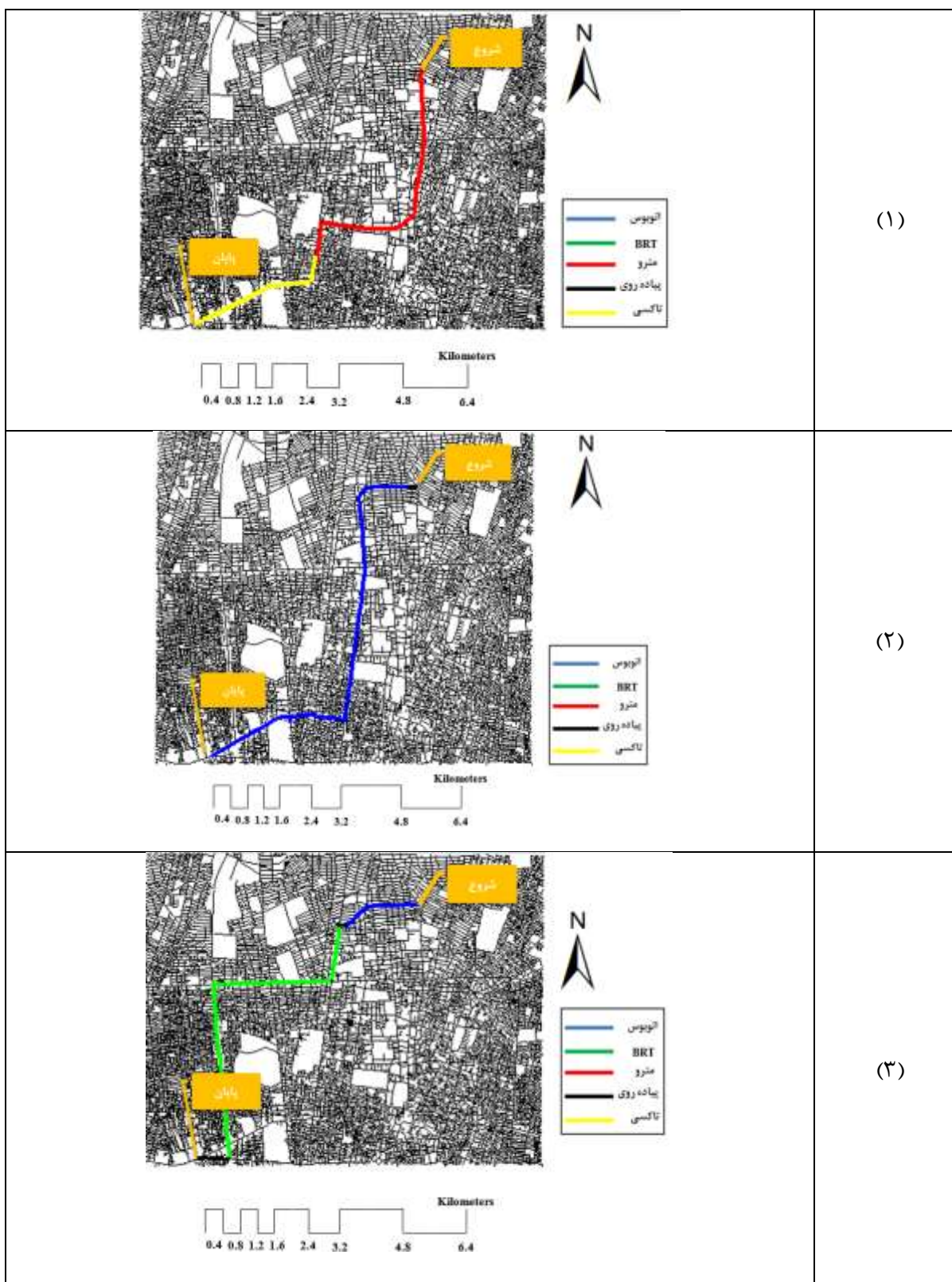
به توابع هدف اختصاص داده می‌شود، مسیر بهینه از بین این مجموعه از مسیرها با استفاده از روش تاپسیس تعیین می‌گردد. برای ارزیابی کارایی الگوریتم پیشنهادی، نتایج آن با نتایج حاصل از ترکیب الگوریتم ژنتیک و تاپسیس و شبیه‌سازی تبرید و تاپسیس با استفاده از روش Lp -norm مقایسه گردید. نتایج نشان دادند که در ۸۹ و ۸۷ درصد مسیریابی‌های صورت گرفته، مسیر پیشنهادی الگوریتم NSGA-II پیشنهادی برتر از مسیر پیشنهادی الگوریتم‌های ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید بوده است. از جمله مواردی که در تحقیقات آتی می‌توان به آن پرداخت، مسیریابی چند ساختی چند معیاره در شبکه‌ای پویا می‌باشد بگونه‌ای که در نتیجه ایجاد حوادث غیر مترقبه مانند تصادف یا انسداد مسیر پس از ارائه مسیر پیشنهادی نیازمند اصلاح آن است.

همچنین، جهت بررسی میزان کارایی الگوریتم NSGA-II و تاپسیس از نظر زمانی، میانگین زمان اجرایی این الگوریتم (بر روی یک سیستم Core™ i5 2.67 GHz، RAM:4GB) ویندوز ۶۴ بیتی) با چند الگوریتم شناخته شده دیگر در زمینه مسیریابی در ۹۰ مسیریابی صورت گرفته در جدول (۵) آورده شده است و همانطور که دیده می‌شود، از لحاظ زمان اجرایی نیز الگوریتم پیشنهادی دارای کارایی بالایی است.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک روش بر پایه‌ی ترکیب الگوریتم NSGA-II و روش تاپسیس برای حل مساله‌ی مسیریابی چند هدفه‌ی چند ساختی پیشنهاد شد. در این روش پیشنهادی، ابتدا یک مسیریابی چند هدفه با استفاده از الگوریتم NSGA-II صورت می‌گیرد. سپس، با استفاده از وزن‌هایی که

¹⁷¹ Simulated annealing



شکل ۹: نمونه ای از نتایج مسیریابی صورت گرفته بین دو نقطه از شبکه با سه دسته وزن‌های مختلف با استفاده از ترکیب الگوریتم NSGA-II و روش تاپسیس به گونه‌ای که شماره‌های (۱)، (۲) و (۳) به ترتیب به شماره‌های مسیریابی انجام شده در جدول ۴ اشاره دارند

هدف استفاده شده که به صورت رابطه (۱۸) اعمال می شود [۳۱]:

$$x'_{ik} = \frac{x_{ik} - x_{\min}}{x_{\max k} - x_{\min k}} \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

که در آن، x_k اندازه‌ی تابع هدف k ام برای مسیر i ام، همچنین $x_{\max k}$ و $x_{\min k}$ به ترتیب بیشینه و کمینه مقادیر مربوط به تابع هدف k ام می باشند. کمینه‌ی مقدار یک تابع هدف، برای مسیریابی بین دو نقطه‌ی دلخواه را می توان با استفاده از روش دایجسترا تعیین کرد. برای بدست آوردن مقدار بیشینه‌ی یک تابع هدف، ۳۰۰ مسیر تصادفی بین نقاط مبدا و مقصد ایجاد شده و سپس بیشترین مقدار بدست آمده برای آن تابع هدف مشخص می گردد. شبه کد الگوریتم ژنتیک پیشنهادی در شکل (۱۰) جهت تعیین k مسیر بهینه بین نقاط مبدا و مقصد در شکل زیر آورده شده است.

پیوست (الگوریتم ژنتیک)

در الگوریتم ژنتیک عمومی پیشنهادی، عملگرهای انتخاب، تقاطع و جهش استفاده شده عینا مشابه همان‌هایی بود که در الگوریتم NSGA-II پیشنهادی مطرح شد. همچنین در الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، میزان تابع هدف بر اساس رابطه (۱۷) تعیین می شود:

$$Cost_i = \sum_{j=1}^3 C'_{ij} w_j \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

که در آن، w_j ، C'_{ij} و $Cost_i$ به ترتیب مقادیر وزن تابع هدف j ام، مقدار نرمال شده‌ی تابع هدف j ام برای مسیر i ام و هزینه‌ی مسیر i ام می باشند. جهت حل یک مساله‌ی چند هدفه به روش تابع ترکیب شده، لازم است که مقادیر توابع هدف نرمال سازی شوند [۳۱]. در این تحقیق از روش SWGR پیشنهاد شده توسط بنتسفلد و ویکفلد برای نرمال سازی مقادیر توابع

function The proposed genetic algorithm

inputs: $s, t, N, n, C_{rate}, M_{rate}, k$

outputs: k optimal routes

s, t // start and end nodes

N // population size

n // number of iterations

C_{rate}, M_{rate} // crossover rate and mutation rate, respectively

k // number of optimal routes

1. pop = generate N route from s to t

2. for each route normalize values of its fitness function.

3. calculate cost of each route.

4. end

5. for $i=1$ to n

6. Applying the proposed crossover operator;

7. pop_1 ; // generated routes using crossover operator

8. Applying the proposed mutation operator

9. pop_2 ; // mutated routes

10. $pop = pop + pop_1 + pop_2$;

11. for each route in pop normalize values of its fitness function .

12. calculate cost of each route .

13. end;

14. sort pop based on their cost in ascending

15. $pop = pop\{1\}$ to $pop\{N\}$

16. end;

17. return $pop\{1\}$ to $pop\{k\}$;

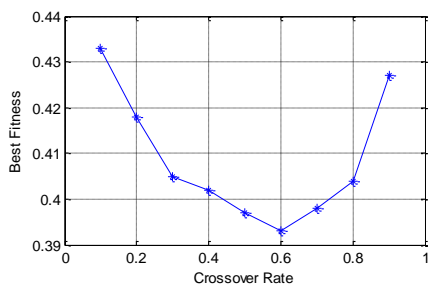
18. end;

شکل ۱۰: شبه کد الگوریتم ژنتیک پیشنهادی جهت یافتن k مسیر بهینه

مقدار یک پارامتر، مقادیر سایر پارامترها به گونه‌ای در نظر گرفته می شوند که تاثیری بر روی الگوریتم نداشته و پارامتری که در حال تنظیم شدن است، به عنوان

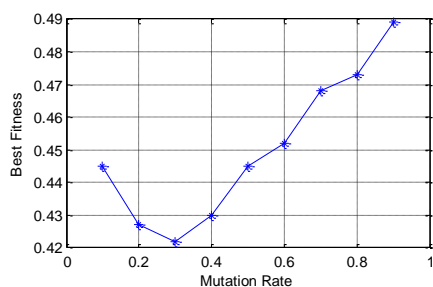
جهت تنظیم پارامترهای الگوریتم ژنتیک پیشنهادی از روش معرفی شده توسط جن و چنگ [۳۰] استفاده شده است. در این روش، برای تنظیم کردن

فواصل ۰/۱ افزایش داده می‌شوند. شکل (۱۲) نحوه‌ی تغییرات مقدار بهترین هزینه‌ی به‌دست آمده را برای مقادیر مختلف نرخ تقاطع نشان می‌دهد.



شکل ۱۲: مقادیر بهترین هزینه برای ۱۰۰ بار تکرار الگوریتم برای مقادیر مختلف نرخ تقاطع

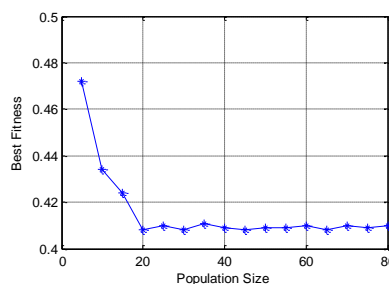
با توجه به دیاگرام فوق، مقدار نرخ تقاطع بر روی ۰.۶ تنظیم می‌شود. با روندی مشابه، مقدار نرخ جهش نیز بر روی ۰.۳ تنظیم گردید (شکل (۱۳)).



شکل ۱۳: مقادیر بهترین هزینه برای ۱۰۰ بار تکرار الگوریتم برای مقادیر مختلف نرخ تقاطع

عامل اصلی^۱ بر روی کارایی الگوریتم عمل کند. در ادامه نحوه‌ی تنظیم کردن مقادیر این پارامترها توضیح داده شده است.

- تنظیم مقدار تعداد مسیرهای اولیه: برای اینکه تعداد مسیرهای اولیه به عنوان عامل اصلی کارایی الگوریتم عمل کند مقادیر نرخ تقاطع و جهش هر دو برابر ۰/۱ در نظر گرفته شده و تعداد مسیرهای اولیه از ۵ تا ۸۰ تغییر داده شده و مقادیر بهترین هزینه برای ۱۰۰ بار تکرار سیستم اندازه‌گیری می‌شود که نتایج به صورت شکل (۱۱) می‌باشد:



شکل ۱۱: مقادیر بهترین هزینه برای ۱۰۰ بار تکرار الگوریتم برای مقادیر مختلف تعداد اعضای جمعیت

همانطور که در شکل (۱۱) دیده می‌شود، برای تعداد مسیرهای اولیه‌ی بیشتر از ۲۰، تعداد مسیرهای اولیه تاثیر زیادی بر روی کارایی الگوریتم نداشته و مقدار بهترین هزینه تغییر زیادی نمی‌کند. بنا بر ادعای جن و چن مقدار تنظیم شده‌ی این پارامتر به‌دلیل پیچیدگی‌هایی که مساله ممکن است داشته باشد، باید کمی بیشتر از این مقدار در نظر گرفته شود. بنابراین مقدار آن برابر با ۳۰ قرار داده شد.

- تنظیم مقدار نرخ تقاطع و نرخ جهش: برای تنظیم مقدار این پارامتر، مقادیر پارامترهای تعداد تکرارهای الگوریتم، تعداد مسیرهای اولیه و نرخ جهش به ترتیب برابر ۱۰۰، ۱۵ و ۰/۱ قرار گرفته و میزان نرخ تقاطع نیز از بازه‌ی ۰/۱ تا ۰/۹ با

^۱ Leading factor

مراجع

- [1] T.G. Crainic, and J.-M. Rousseau, "Multicommodity, multimode freight transportation: A general modeling and algorithmic framework for the service network design problem", *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 20(3), pp. 225-242, 1986.
- [2] S. Nguyen, E. Morello, and S. Pallottino, "Discrete time dynamic estimation model for passenger origin/destination matrices on transit networks", *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 22(4), pp. 251-260, 1988.
- [3] M. Delavar, F. Samadzadegan, and P. Pahlavani, "A GIS-Assisted optimal urban route finding approach based on genetic algorithms", *International archives of photogrammetry remote sensing and spatial information sciences*, Vol. 35(Part 2), pp. 305-308, 2004.
- [4] C. Davies, and P. Lingras, "Genetic algorithms for rerouting shortest paths in dynamic and stochastic networks", *European Journal of Operational Research*, Vol. 144(1), pp. 27-38, 2003.
- [5] K. Abdelghany, and H. Mahmassani, "Dynamic trip assignment-simulation model for intermodal transportation networks", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, pp. 52-60, 2001.
- [6] B. Huang, R.L. Cheu, and Y.S. Liew, "GIS and genetic algorithms for HAZMAT route planning with security considerations", *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 18(8), pp. 769-787, 2004.
- [7] A. Keshtiarast, A. Alesheikh, and A. Kheirabadi, "Best route finding based on cost in multimodal network with care of networks constraints", in *Map Asia Conference*. Bangkok, Thailand. 2006.
- [8] L. Qu, and Y. Chen, "A hybrid MCDM method for route selection of multimodal transportation network", in *Advances in Neural Networks*, Springer. pp. 374-383, 2008.
- [9] R.A. Abbaspour, and F. Samadzadegan, "Time-dependent personal tour planning and scheduling in metropolises", *Expert Systems with Applications*, Vol. 38(10), pp. 12439-12452, 2011.
- [10] S.M. Qavami, A. Mansourian, and M.S. Mesgari, "A web geo-processing service for integrating different modes of urban transportation (A case study of Tehran)", *Traffic Management Studies*, Vol. 1(6), pp. 1-28, 2011.
- [11] S.M. Qavami, A. Mansourian, and M.S. Mesgari, "Design and implementation of a web based distributed system for itinerary planning in uncertain urban multimodal network", *Journal of Transportation Research*, Vol. 8(1), pp. 21-36, 2011.
- [12] N. Borole, N. Goel, P. Vedagiri, and T.V. Mathew, "Multimodal Public Transit Trip Planner with Real-time Transit Data", *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, Vol. 104, pp. 775-784, 2013.
- [13] L. Antsfeld, and T. Walsh, "Finding multi-criteria optimal paths in multi-modal public transportation networks using the transit algorithm", in *Intelligent Transport Systems World Congress*, 10p., 2012.
- [14] K.G. Zografos, and K.N. Androutopoulos, "Algorithms for itinerary planning in multimodal transportation networks", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 9(1), pp. 175-184, 2008.
- [15] L. Liu, J. Yang, H. Mu, X. Li, and F. Wu, "Exact algorithms for multi-criteria multimodal shortest path with transfer delaying and arriving time-window in urban transit network", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 38(9), pp. 2613-2629, 2014.
- [16] P. Pahlavani, and M.R. Delavar, "Multi-

- criteria route planning based on a driver's preferences in multi-criteria route selection", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 40, pp. 14-35, 2014.
- [17] S. Nadi, and M.R. Delavar, "Multi-criteria, personalized route planning using quantifier-guided ordered weighted averaging operators", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 13(3), pp. 322-335, 2011.
- [18] M. Bielli, A. Boulmakoul, and H. Mouncif, "Object modeling and path computation for multimodal travel systems", *European Journal of Operational Research*, Vol. 175(3), pp. 1705-1730, 2006.
- [19] F. Ghaderi, and P. Pahlavani, "Finding the robust multi-modal route by integrating the fuzzy-AHP with the quantifier-guided OWA", *Journal of Geomatics Science and Technology*, Vol. 5(2), pp. 67-78, 2015.
- [20] Ghaderi, F., and P. Pahlavani, "A new multimodal multicriteria route planning model by integrating a fuzzy-AHP weighting method and a simulated annealing algorithm", *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 40(1), pp. 203-209, 2015.
- [21] J. Dibbelt, T. Pajor, and D. Wagner, "User-constrained multimodal route planning", *Journal of Experimental Algorithmics (JEA)*, Vol. 19: pp. 118-129, 2015.
- [22] M.J. Atallah, *Algorithms and theory of computation handbook*. CRC press, 1998.
- [23] K. Chen and J.C. Miles, *ITS handbook 2004: Recommendations from the world road association (PIARC)*, 2004.
- [24] S. Chakhar, and J.-M. Martel, "Enhancing geographical information systems capabilities with multi-criteria evaluation functions", *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, Vol. 7(2), pp. 47-71, 2003.
- [25] P. Pahlavani, F. Samadzadegan, and M.R. Delavar, "A GIS-based approach for urban multi-criteria quasi optimized route guidance by considering unspecified site satisfaction", *Lecture Notes in Computer Science (LNCS)*, Vol. 4197, Springer. pp. 287-303, 2006.
- [26] H. Yu, and F. Lu, "A multi-modal route planning approach with an improved genetic algorithm", *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 38, pp. 343-348, 2012.
- [27] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 6(2), pp. 182-197, 2002.
- [28] C. Hwang, and K. Yoon, *Multiple attribute decision making: methods and applications: a state-of-the-art survey*, Vol. 13, Springer-Verlag. New York, 1981.
- [29] G.R. Jahanshahloo, F.H. Lotfi, and M. Izadikhah, "An algorithmic method to extend TOPSIS for decision-making problems with interval data", *Applied mathematics and computation*, Vol. 175(2), pp. 1375-1384, 2006.
- [30] M. Gen, and R. Cheng, *Genetic algorithms and engineering optimization*. John Wiley & Son, 2000.
- [31] P.J. Bentley, and J.P. Wakefield, "An analysis of multiobjective optimization within genetic algorithms", *Technical Report, ENGPJB96*, University of Huddersfield, UK. 1996.



Multimodal multi-objective route planning using non-dominated sorting genetic algorithm-II and TOPSIS method

Parham Pahlavani^{1*}, Fazel Ghaderi²

1- Assistant Professor, School of Surveying and Geospatial, College of Eng., University of Tehran, Tehran, Iran

2- MSc. in GIS Eng., School of Surveying and Geospatial Eng., College of Eng., University of Tehran, Tehran, Iran,

Abstract

In a multi-modal multi-objective route planning problem, the main purpose is finding an optimal route between the origin and destination, which is a combination of multi-transportation modes, pairs by considering multi-fitness function. Most of multi-objective problems are solved by assigning a weight to each objective function and using a linear averaging of the objectives as a distinct objective function. These methods have some weaknesses such as inability in searching the problem space and a need to normalize the objective functions. Therefore, in this paper, a non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) has been used to solve the multi-modal multi-objective routing problem. This algorithm proposes a set of non-dominated routes that has no absolute superiority to each other. Finally, the optimal route was determined using TOPSIS method from this set. The intended objective functions in this research are the lowest number of changes in transportation means, fare and time during the path. Moreover, five transportation modes including subway, taxi, bus, BRT, and walking transportation modes have been considered as means of transportation inside the mentioned network. This algorithm was implemented in a part of Tehran transportation network and results showed that the proposed NSGA-II algorithm proposed a better route in 89% and 87% of the routing cases than those of the genetic and the simulated annealing algorithms respectively.

Key words: Multimodal multi-objectives route planning, NSGA-II, TOPSIS method, Lp-norm method

Correspondence Address : School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Tel : 021-61114524

Email : pahlavani @ut.ac.ir