

یافتن پایدارترین مسیر چند حالتی با استفاده از تلفیق روش fuzzy-AHP با کمیت سنج‌های مفهومی و عملگرهای OWA

فاضل قادری^۱، پرهام پهلوانی^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد سیستم‌های اطلاعات مکانی - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی

پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

fazel.ghaderi@ut.ac.ir

^۲ استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

pahlavani@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت اسفند ۱۳۹۳، تاریخ تصویب اردیبهشت ۱۳۹۴)

چکیده

هدف از مسیریابی چند حالتی چند معیاره، فراهم نمودن مسیری بهینه بین مبدا و مقصد با در نظر گرفتن معیارهای مورد نظر کاربر می‌باشد، که این مسیر ممکن است ترکیبی از حالت‌های حمل و نقلی عمومی و خصوصی باشد. در تحقیقات پیشین، با ایجاد یک ترکیب خطی از معیارها، از استراتژی‌های تصمیم‌گیری با میزان مصالحه^۱ بالا برای محاسبه‌ی میزان سازگاری مسیرها استفاده شده است و سایر استراتژی‌های تصمیم‌گیری نادیده گرفته شده‌اند. یک استراتژی تصمیم‌گیری مشخص می‌نماید که آیا کاربر اصرار دارد تمامی ترجیحاتش در انتخاب یک مسیر برآورده شوند یا برآورده شدن بخشی از معیارها او را راضی می‌نماید. در این تحقیق، از ترکیب روش وزن‌دهی fuzzy AHP و ترکیب کمیت‌سنج‌های مفهومی با عملگرهای OWA برای وزن‌دهی معیارها و محاسبه‌ی میزان سازگاری یال‌ها استفاده شده است. ویژگی مهم این روش، قابلیت پشتیبانی از استراتژی‌های تصمیم‌گیری مختلف می‌باشد. در این روش، ابتدا کاربر با استفاده از روش fuzzy AHP به وزن‌دهی معیارها می‌پردازد. سپس با در نظر گرفتن استراتژی تصمیم‌گیری اتخاذ شده توسط کاربر، به محاسبه میزان سازگاری هر یال پرداخته می‌شود. این روش همچنین قابلیت ارائه‌ی پایدارترین مسیر، تحت استراتژی‌های مختلف را نیز دارد. در این تحقیق، حالت‌های مختلف حمل و نقلی شامل مترو، اتوبوس، تاکسی و پیاده‌روی برای مسافرت بین نقاط در نظر گرفته شده‌اند. همچنین، طول، زمان، هزینه و میزان سختی کاربر به عنوان معیارهای مورد اهمیت کاربر در نظر گرفته شده‌اند. روش ارائه شده در این تحقیق، بر روی بخشی از شبکه‌ی حمل و نقل عمومی مرکز شهر تهران پیاده گشت و نتایج حاکی از آن بود که به طور میانگین، ۸۰/۶۶٪ کاربران با استراتژی‌های تصمیم‌گیری مختلف، مسیر پیشنهادی را بهترین مسیر بین نقاط مبدا و مقصد دانسته‌اند.

واژگان کلیدی: مسیریابی چند حالتی چند معیاره، استراتژی‌های تصمیم‌گیری، fuzzy AHP، عملگرهای OWA

* نویسنده‌ی رابط

^۱ Tradeoff

^۲ Robust

^۳ BRT

۱- مقدمه

تحرك^۱ یکی از ویژگی‌های مهم جوامع مدرن می‌باشد. مردم برای مسافرت‌هایشان در سطح یک شهر، تمایل به استفاده از مسیرهایی دارند که معیارهای مورد نظر آنها را برآورده نماید. بنابراین تقاضا برای سرویس‌هایی که برنامه‌ریزی سفر را در سطح یک شهر انجام می‌دهند به سرعت در حال افزایش می‌باشد [۱]. در ساده‌ترین حالت، برنامه‌ریزی سفر، پیدا کردن کوتاهترین مسیر بین دو گره با تنها یک حالت حمل و نقلی و یک معیار می‌باشد که با استفاده از الگوریتم‌های شناخته‌شده‌ای مانند Dijkstra یا A* می‌توان به این دسته از مسائل پاسخ داد. در حالت‌های واقعی‌تر، برنامه‌ریزی سفر می‌تواند پیدا نمودن یک مسیر بهینه بین مبدا و مقصد، با کمینه کردن همزمان یک دسته از معیارها (برنامه‌ریزی سفر شخصی چند معیاره) و یا یافتن یک مسیر بهینه بین مبدا و مقصد تنها با در نظر گرفتن یک معیار و چند حالت حمل و نقلی (برنامه‌ریزی سفر شخصی چند حالت) باشد. در حالت کلی‌تر، برنامه‌ریزی سفر می‌تواند ترکیبی از دو حالت قبل باشد که به این دسته از مسائل برنامه‌ریزی سفر شخصی چند حالتی چند معیاره می‌گویند. در این تحقیق بر روی این دسته از مسائل تمرکز شده است. در سال‌های اخیر سیستم‌های آبی متعددی که برنامه‌ریزی سفر چند حالت را در سطح یک شهر انجام می‌دهند به وجود آمده‌اند که از جمله‌ی آنها می‌توان به Google Transit اشاره نمود. این سرویس‌ها سبب تشویق مردم به استفاده از سیستم حمل و نقل عمومی به جای وسایل نقلیه‌ی شخصی گشته و در نتیجه کاهش آلودگی هوا، کاهش حجم ترافیک شهری و جریان ترافیکی بهتر را به دنبال داشته است.

هدف از برنامه‌ریزی سفر چند حالتی چند معیاره، فراهم کردن مسیری بهینه بین مبدا و مقصد با در نظر گرفتن معیارهای مورد نظر کاربر می‌باشد که این مسیر ممکن است ترکیبی از حالت‌های حمل و نقل عمومی و خصوصی باشد. در دهه‌های اخیر تحقیقات زیادی در زمینه‌ی مسیریابی صورت گرفته‌اند که می‌توان آنها را به سه دسته‌ی کلی تقسیم کرد:

- تحقیقاتی که در زمینه‌ی مسیریابی چند حالت صورت گرفته‌اند: بیشتر تحقیقات در این زمینه مربوط به پیدا نمودن کوتاهترین مسیر چند حالت در یک شبکه‌ی حمل و نقلی استاتیک بوده‌اند ([۲] و [۳] و [۴]). علاوه بر این تحقیقات، Lingras و Davis [۵] از الگوریتم ژنتیک جهت مسیریابی چند حالت در یک شبکه‌ی حمل و نقلی دینامیک استفاده کردند. در تحقیق آنها، اطلاعات شبکه در حین اجرای مدل به روز می‌شد. هدف این تحقیق نه تنها پیدا کردن کوتاهترین مسیر، بلکه پیدا کردن مسیری چند حالت با کمترین مقدار پیاده‌روی بود. Konstantinos و همکاران [۶] یک رابطه 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 بایستی از آنها نیز عبور می‌کرد را با کمینه نمودن معیارهای زمان سفر، زمان تاخیر، تعداد نقل و انتقالات و میزان پیاده‌روی به کاربر ارائه می‌داد. Lu و Yu [7] از الگوریتم ژنتیک برای مسیریابی چند حالت استفاده کردند. در تحقیق آنها از کروموزوم‌هایی با طول متغیر برای نمایش مسیرها استفاده شد به طوریکه هر بخش از آن نشان‌دهنده‌ی یک حالت حمل و نقلی بود. Abaspour و Samadzadegan [۸] از الگوریتم ژنتیک با کروموزوم‌های با طول متغیر برای مسیریابی چند حالت در شبکه‌ی حمل و نقل درون شهری با در نظر گرفتن معیار زمان سفر استفاده نمودند.
- تحقیقاتی که در زمینه‌ی مسیریابی چند معیاره صورت گرفته‌اند: در این زمینه، Huang و همکاران [۹] یک روش جدید برای ارزیابی خطر حمل و نقل مواد خطرناک با ترکیب سیستم‌های اطلاعات مکانی و الگوریتم‌های ژنتیک برای وزن‌دهی معیارهای موثر پیشنهاد نمودند. در نهایت این وزن‌ها در مقادیر معیارها ضرب شده و مقدار هزینه‌ی کلی هر مسیر بدست آمد. Pahlavani و همکاران [۱۰] با پیشنهاد یک روش جدید بر پایه‌ی اصول سیستم‌های راهنمای حمل و نقلی، تئوری ویروس و با استفاده از سیستم‌های اطلاعات مکانی و الگوریتم‌های ژنتیک، سعی در بهبود نرخ جست و جو در سیستم‌های

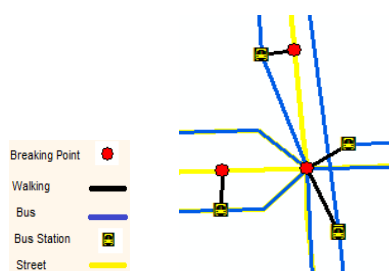
^۱ Mobility

مسیرهای مختلفی ارائه می‌شود. علاوه بر این، مدل پیشنهاد شده، می‌تواند پایدارترین مسیر، تحت استراتژی‌های تصمیم‌گیری مختلف را نیز به کاربر ارائه دهد.

این مقاله شامل ۷ بخش می‌باشد. در بخش ۲، مساله‌ی مسیریابی چند حالتی چند معیاره تعریف می‌گردد. در بخش ۳، روش وزن‌دهی fuzzy AHP-Q-OWA تشریح می‌گردد. نحوه‌ی مدل‌کردن معیارهای مختلف در بخش ۴ آورده شده است. در بخش ۵، الگوریتم استفاده شده جهت یافتن پایدارترین مسیر توضیح داده شده است. نحوه‌ی پیاده‌سازی الگوریتم با تعدادی مثال شماتیک، در بخش ۶ آورده شده است و در بخش ۷ نتیجه‌گیری و تحقیقات آتی آورده شده است.

۲- تعریف مساله

یک شبکه‌ی حمل و نقلی تک حالت، می‌تواند به صورت یک گراف جهت‌دار $G=(V,E)$ به طوریکه V و E به ترتیب مجموعه گره‌ها و یال‌های شبکه هستند، نمایش داده شود. در این تحقیق، ۵ حالت حمل و نقلی (مترو، اتوبوس، اتوبوس تندرو یا BRT، تاکسی و پیاده‌روی) برای جابجایی در سطح شبکه در نظر گرفته شده‌اند. لذا، گراف تشکیل شده، شامل ۵ زیر گراف می‌باشد. برای ایجاد شبکه‌ی کلی، این ۵ زیر گراف می‌باید به یکدیگر متصل گردند. نکته‌ی اصلی در متصل نمودن این زیر گراف‌ها با یکدیگر، حفظ پیوستگی در شبکه‌ی اصلی می‌باشد. در صورت عدم پیوستگی، تغییر حالت حمل و نقلی در شبکه‌ی حمل و نقلی و لذا انجام یک مسیریابی چند حالت ممکن نخواهد بود. برای این منظور، در این تحقیق، شبکه‌های حمل و نقلی مترو، اتوبوس و BRT از طریق یال‌های پیاده‌روی به شبکه‌ی خیابان‌ها متصل شدند (شکل ۱).



شکل ۱- نمونه‌ای از نحوه اتصال شبکه‌ی اتوبوسرانی به شبکه خیابان‌ها در ایستگاه‌های اتوبوس

راهنمای مسیر با در نظر گرفتن مکان‌های مشخص نمودند. Niaraki و Kim [۱۱] یک معماری کلی بر پایه‌ی هستی‌شناسی، با استفاده از روش وزن‌دهی AHP را جهت طراحی یک سیستم برنامه‌ریزی سفر شخصی بکار بردند. Pahlavani و Delavar [۱۲] اقدام به ارائه روشی بر مبنای ترکیب الگوریتم‌های فازی و شبکه‌های عصبی به منظور مدل‌سازی ترجیحات راننده در انتخاب مسیر چند معیاره به صورت تک حالت نمودند. همچنین Pahlavani و همکاران [۱۳] به ارائه روشی جدید بر پایه تهاجم گیاهان هرز برای مسیریابی بهینه چند معیاره شخصی سازی شده به صورت تک حالت پرداختند.

● تحقیقاتی که در زمینه‌ی مسیریابی چند حالتی چند معیاره صورت گرفته‌اند: Modesti و Sciomachen [۱۴] سعی در پیدا کردن کوتاه‌ترین مسیر چند حالت درون شهری با کمینه کردن معیارهای هزینه، زمان و سختی کاربر نمودند. Chen و Qu [۱۵] یک روش تصمیم‌گیری چند معیاره‌ی ترکیبی را جهت پیدا کردن کوتاه‌ترین مسیر چند حالتی چند معیاره بکار بردند. آنها از روش وزن‌دهی fuzzy AHP جهت تعیین وزن‌های اولیه مناسب برای بهبود کارایی شبکه‌ی عصبی مصنوعی استفاده نمودند. Liu و همکاران [۱۶] با استفاده از روش تصحیح برچسب، تلاش کردند به مساله‌ی مسیریابی چند حالتی چند معیاره، با در نظر گرفتن پنجره‌ی زمانی سفر و همچنین زمان‌های تاخیر در حین سفر، پاسخ دهند.

در تحقیقات پیشین که در زمینه‌ی مسیریابی چند حالتی چند معیاره صورت گرفته‌اند، استراتژی‌های تصمیم‌گیری با میزان مصالحه بالا، که در واقع ترکیب خطی معیارها بودند، استفاده شده‌اند. در این تحقیق، سعی شده است سایر استراتژی‌های تصمیم‌گیری، که می‌تواند مورد نظر کاربر باشد، نیز مدل شوند. برای این منظور در این مقاله، عملگرهای میانگین وزنی مرتب شده (OWA)^۱ مورد استفاده قرار گرفته‌اند. یک استراتژی تصمیم‌گیری، مشخص می‌کند که آیا یک کاربر اصرار دارد تمامی ترجیحاتش در انتخاب یک مسیر برآورده شوند یا برآورده شدن بخشی از معیارها او را راضی می‌کند. در این راستا، با در نظر گرفتن استراتژی‌های تصمیم‌گیری مختلف،

^۱ Ordered Weighting Average

۳-۱- تحلیل Fuzzy AHP

روش AHP در دهه‌ی ۱۹۷۰ توسط Saaty, T. معرفی شد. این روش شامل دو رده‌ی سلسله‌مراتبی می‌باشد که به‌ترتیب از پایین به بالا عبارتند از: (۱) مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها نسبت به هر کدام از معیارها؛ (۲) مقایسه‌ی زوجی معیارها نسبت به هدف اصلی. در این روش، رده‌های سلسله‌مراتبی با استفاده از اعداد قطعی صورت می‌گیرند. به‌رغم مقبولیت عمومی، روش AHP به دلیل عدم توانایی در وارد نمودن عدم قطعیت و ابهام کاربران در تصمیم‌گیری با اعداد دقیق، مورد انتقاد می‌باشد [۱۷]. جهت حل این مشکل، Buckley در سال ۱۹۸۵ [۱۸] روش fuzzy AHP را معرفی نمود. در این روش، هر کدام از رده‌های سلسله‌مراتبی می‌توانند با استفاده از اعداد فازی ارائه شوند. در این تحقیق، از اعداد فازی مثلثی جهت مقایسات زوجی استفاده شده است. بر اساس این اعداد، ترجیح معیار i نسبت به معیار j و بالعکس، به ترتیب در روابط ۲ و ۳ آورده شده‌اند:

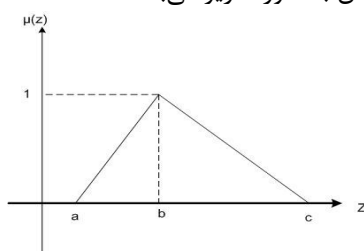
$$(\tilde{c}_{ij}, \tilde{c}_{ji}) \quad (2)$$

$$(\tilde{a}_{ij}, \tilde{b}_{ij}, 1/b_{ij}, 1/a_{ij}) \quad (3)$$

به عبارت دیگر، اگر ترجیح معیار i نسبت به معیار j را به صورت عدد فازی $\tilde{a}_{ij}$ در نظر بگیریم، آنگاه ترجیح معیار j نسبت به معیار i برابر عدد فازی $\tilde{a}_{ji}$ می‌شود. هر عدد فازی نمایشی خطی دارد به‌طوری‌که تابع عضویت آن را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$\mu(z) = \begin{cases} 0 & z < a \text{ or } z > c \\ \frac{z-a}{b-a} & a \leq z \leq b \\ \frac{z-b}{c-b} & b \leq z \leq c \end{cases} \quad (4)$$

که نمایش آن به صورت زیر می‌باشد:



شکل ۳- نمایش یک عدد فازی مثلثی

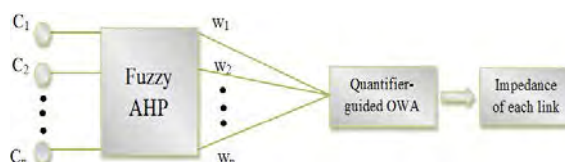
(i, j) را به عنوان یال جهت‌داری که دو گره i و j $\{i, j \in V\}$ را به یکدیگر متصل می‌کند و W_{ij} را به عنوان وزن آن یال نظر بگیرید. یک مسیر بین دو گره s و t ، $R(s, t)$ ، به صورت یک رشته از یال‌ها و گره‌ها $R(s, t) = \{s=i_1, (i_1, i_2), \dots, (i_{j-1}, i_j), i_j=t\}$ تعریف می‌گردد. هدف اصلی از مسیریابی پیدا کردن مسیری بین نقاط مبدا و مقصد با کمترین میزان هزینه (یا مقاومت) می‌باشد. در این تحقیق چون هدف مسیریابی چند حالتی چند معیاره می‌باشد، بنابراین به هر یال، یک مجموعه از وزن‌های $\{W_1, W_2, \dots, W_p\}$ که به ترتیب مربوط به معیارهای $\{C_1, C_2, \dots, C_p\}$ می‌باشند، اختصاص می‌یابد. بنابراین میزان مقاومت هر مسیر $R(s, t)$ که شامل m یال می‌شود، از رابطه‌ی (۱) بدست خواهد آمد:

$$\text{Im}(R(s, t)) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^p W_{ij} C_{ij} \quad (1)$$

در تحقیقات پیشین که در زمینه‌ی مسیریابی چندحالتی چند معیاره صورت گرفته‌اند، با ایجاد یک ترکیب خطی از معیارها، از استراتژی‌های تصمیم‌گیری با میزان مصالحه بالا برای محاسبه‌ی میزان مقاومت مسیرها استفاده شده است و سایر استراتژی‌های تصمیم‌گیری نادیده گرفته شده‌اند. برای حل این مشکل، در این تحقیق، روشی بر مبنای وزن‌دهی Fuzzy AHP Q-OWA پیشنهاد شده است که در ادامه تحقیق تشریح می‌گردد.

۳- روش وزن‌دهی Fuzzy AHP Q-OWA

در این روش وزن‌دهی، ابتدا وزن‌های معیار از طریق روش وزن‌دهی fuzzy AHP تعیین می‌شوند و سپس وزن‌های ترتیبی با توجه به استراتژی تصمیم‌گیری در نظر گرفته‌شده، با استفاده از ترکیب کمیت‌سنج‌های مفهومی فازی و عملگرهای OWA تعیین می‌گردند (شکل ۲).



شکل ۲- نحوه‌ی محاسبه‌ی مقاومت یال‌ها با استفاده از روش fuzzy AHP Q-OWA

صورت اختصاص اعداد فازی به صورت غیرمنطقی، ممکن است سبب آشفتگی و انحراف در محاسبات گردد. این روش نیز، همانند روش AHP، دارای مکانیزمی برای کنترل میزان سازگاری اعداد اختصاص داده شده در ماتریس مقایسه‌ی زوجی می‌باشد که به دلیل طولانی بودن محاسبات آن، خارج از حوصله‌ی این مقاله می‌باشد (برای مطالعه‌ی بیشتر [۲۰] را مطالعه کنید). پس از اینکه این وزن‌ها بدست آمدند، آن‌ها وارد روش Q-OWA شده و وزن‌های ترتیبی بدست می‌آید.

۲-۳- عملگرهای Ordered Weighting Average (OWA)

جهت مدل کردن یک دسته از استراتژی‌های تصمیم‌گیری مختلف، Yager در سال ۱۹۸۸ عملگرهای OWA را معرفی کرد. در یک مساله‌ی چند معیاره، یک تصمیم‌گیرنده‌ی ریسک‌گریز بر روی ویژگی‌های بد یک تصمیم‌گیرنده‌ی ریسک‌پذیر بر روی ویژگی‌های خوب یک گزینه و یک گزینه تاکید می‌کنند [۲۱ و ۲۲]. این روش قادر به محاسبه کردن میزان ریسک پذیری و ریسک‌گریزی کاربر و همچنین وارد کردن آن‌ها در انتخاب گزینه‌ی نهایی می‌باشد. یک عملگر OWA، در واقع یک عملگر ترکیبی F با بردار وزن متناظر $We[0,1]^n$ (که می‌باید یک بردار نرمال باشد) می‌باشد، به‌طوری‌که برای یک مجموعه از ورودی‌های $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ که می‌خواهند با همدیگر تجمیع شوند، داریم:

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n w_i x_{\sigma(i)} \quad (10)$$

که در آن بردار X_{σ} مرتب شده‌ی نزولی بردار X می‌باشد $(x_{\sigma(1)} \geq x_{\sigma(2)} \geq \dots \geq x_{\sigma(n)})$. عملگرهای OWA دو مشخصه‌ی اصلی و مهم دارند که رفتار آن‌ها را مشخص می‌کند: (الف) درجه‌ی ریسک‌پذیری $(ORness)$: این مشخصه در واقع میزان شباهت یا نزدیکی عملگر را به عملگر منطقی "or" نشان می‌دهد [۲۳]. مقدار این مشخصه را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی زیر تعیین کرد:

$$ORness = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (n-i)w_i \quad (11)$$

ماتریس مقایسه‌ی زوجی‌ای که در این روش با استفاده از اعداد مثلثی ایجاد می‌شود، به صورت زیر می‌باشد:

$$A = \begin{bmatrix} (a_{11}, b_{11}, c_{11}) & \dots & (a_{1n}, b_{1n}, c_{1n}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ (a_{n1}, b_{n2}, c_{n2}) & \dots & (a_{nn}, b_{nn}, c_{nn}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

استانداردهای مختلفی برای استفاده از اعداد فازی مثلثی در ماتریس مقایسه‌ی زوجی پیشنهاد شده‌اند. در این تحقیق، از اعداد فازی مثلثی استاندارد معرفی شده توسط Prakash [۱۹] که در جدول ۱ نشان داده شده‌اند، جهت تشکیل ماتریس مقایسه‌ی زوجی استفاده شده‌است.

جدول ۱- اعداد فازی مثلثی استاندارد

امتیاز متقابل	امتیاز عددی	مقیاس‌های اهمیت در ماتریس مقایسه‌ی زوجی
(1/11, 1/9, 1/7)	(7, 9, 11)	ترجیح مطلق
(1/9, 1/7, 1/5)	(5, 7, 9)	ترجیح خیلی بیشتر
(1/7, 1/5, 1/3)	(3, 5, 7)	ترجیح بیشتر
(1/5, 1/3, 1)	(1, 3, 5)	ترجیح متوسط
(1/4, 1/2, 1)	(1, 2, 4)	یکسان تا بیشتر
(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	ترجیح یکسان

جهت نرمال سازی اعداد فازی، در این تحقیق از روش میانگین هندسی استفاده شده است (روابط ۶ و ۷).

$$a_i = \left(\prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{1/n} \quad (6)$$

$$a = \sum_{i=1}^n a_i \quad (7)$$

با روندی مشابه مقادیر b_i ، c_i و b و c محاسبه می‌شوند. نهایتاً مقدار ارزش معیار $\mu_i(z)$ را می‌توان از رابطه‌ی زیر بدست آورد:

$$\mu_i(z) = \left(\frac{a_i}{c}, \frac{b_i}{b}, \frac{c_i}{a} \right) \quad (8)$$

حال نوبت به تبدیل این عدد فازی به یک عدد قطعی می‌رسد. برای این کار روش‌های زیادی پیشنهاد شده‌اند که در این مقاله از روش مرکز جرم استفاده شده است:

$$z_i = \frac{\int (\mu_i(z).z) dz}{\int (\mu_i(z)) dz} \quad (9)$$

در این رابطه، z_i وزن نهایی معیار i ام می‌باشد. همانند روش AHP، به دلیل وابستگی آن به آرای کاربران، در

در حالت کلی، با استفاده از این مشخصه می‌توان تصمیم‌گیرنده‌ها را به ۳ دسته‌ی کلی تقسیم کرد (جدول ۲).

جدول ۲- دسته بندی تصمیم گیرنده بر اساس مقدار ORness

ORness	$0.5 >$	$= 0.5$	$0.5 <$
تصمیم گیرنده	بد بین و ریسک گریز	خنثی	خوش بین و ریسک پذیر

(ب) مقدار مصالحه بین معیارها (Tradeoff): این معیار در واقع میزان جبران شوندگی یک معیار ناکارآمد را با استفاده از مقادیر سایر معیارها نشان می‌دهد و می‌توان آن را به عنوان شاخصی از میزان پراکندگی وزن‌های OWA تفسیر کرد. مقدار این مشخصه را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی (۱۲) تعیین نمود [۲۵]:

$$Tradeoff = 1 - \sqrt{\left(\frac{n}{n-1}\right) \sum_{i=1}^n \left(w_i - \frac{1}{n}\right)^2} \quad (12)$$

مقادیر این معیار در بازه‌ی [0,1] متغیر است. هر چه این مقدار بیشتر باشد، نشان‌دهنده‌ی جبران کنندگی بیشتر بین معیارهاست. به‌طوریکه ۱ نشان‌دهنده‌ی جبران‌شوندگی کامل و ۰ نشان‌دهنده‌ی عدم جبران‌شوندگی بین معیارهاست. در واقع، این معیار برای اندازه‌گیری میزان جبران‌کنندگی معیارها به کار می‌رود و نشان می‌دهد که آیا یک معیار ناکارآمد را می‌توان با استفاده از سایر معیارها جبران نمود و یا خیر.

۳-۲-۱- عملگرهای Q-Quantifier-guided OWA

این دسته از عملگرها با استفاده از ترکیب عملگرهای OWA و کمیت‌سنج‌های مفهومی بدست می‌آیند. کمیت‌سنج‌های مفهومی در حالت کلی به دو دسته تقسیم می‌شوند [۲۶]: (الف) کمیت‌سنج‌های مفهومی مطلق: مانند "تقریباً ۵" یا "حدود ۶". (ب) کمیت‌سنج‌های مفهومی نسبی (فازی): مانند "بیشتر"، "همه" یا "کمی"، که در این تحقیق از این دسته کمیت‌سنج‌های مفهومی نسبی استفاده شده‌است. جهت مدل کردن این کمیت‌سنج‌ها، یک کلاس از کمیت‌سنج‌های مفهومی نسبی به اسم "کمیت‌سنج‌های یک نواخت افزایشی منظم" (RIM)

مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این کلاس از کمیت‌سنج‌ها بر اساس رابطه‌ی زیر تعریف می‌شوند:

$$Q(p) = p^\alpha, \quad 0 \leq p \leq 1 \quad \text{و} \quad \alpha \geq 0 \quad (13)$$

با تغییر مقادیر α می‌توان استراتژی‌های تصمیم‌گیری مختلف را ایجاد نمود (جدول ۳).

جدول ۳- استراتژی‌های تصمیم‌گیری مختلف و مقادیر α مربوطه

α	استراتژی‌های تصمیم‌گیری
0.0001	حداقل یکی
0.2	کمی
0.5	برخی
1	نصف
2	بیشتر
5	بسیاری
1000	همه

مقادیر وزن‌های ترتیبی با استفاده از RIM به صورت زیر بدست می‌آیند [۲۷]:

$$v_j = Q\left(\frac{j}{n}\right) - Q\left(\frac{j-1}{n}\right) \quad (14)$$

مقادیر وزن‌های ترتیبی با استفاده از وزن‌های معیار با استفاده از رابطه‌ی زیر بدست آورد [۲۵]:

$$v_j = \left(\frac{\sum_{i=1}^j w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right)^\alpha - \left(\frac{\sum_{i=1}^{j-1} w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right)^\alpha \quad (15)$$

که در آن، مقادیر w مقادیر وزن‌های معیار می‌باشند. به دلیل اینکه بردار وزن‌های معیاری که از روش AHP بدست می‌آید برداری نرمال می‌باشد، بنابراین $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ می‌باشد و درنتیجه رابطه ۱۵ به رابطه زیر ساده می‌شود:

$$v_j = \left(\sum_{i=1}^j w_i \right)^\alpha - \left(\sum_{i=1}^{j-1} w_i \right)^\alpha \quad (16)$$

پس از تعیین میزان وزن‌های ترتیبی، با قرار دادن مقادیر آنها در رابطه‌ی ۱، مقدار مقاومت هر یال مشخص می‌شود.

۴- مدل کردن معیارها

یک مسأله‌ی مهم در مسیریابی چند حالتی چند معیاره، نحوه‌ی مدل کردن معیارها می‌باشد. در این تحقیق ۴ معیار در نظر گرفته شده‌اند: (الف) طول: برای مدل‌سازی طول، تنها کافی است فاصله‌ی بین نقاط بر روی شبکه اندازه‌گیری شوند. (ب) زمان: زمان حالت‌های حمل و نقلی مترو، اتوبوس و BRT بر اساس جدول زمان‌بندی که از پیش برای هر یک از این حالت‌ها تعریف شده است، تعیین شده است (جدول ۴). زمان سفر در حالت استفاده از پیاده‌روی و تاکسی نیز بر اساس متوسط سرعت آنها در سطح شبکه تعیین شده‌اند.

جدول ۴- بخشی از جدول زمان بندی خط ۴ مترو

توحید	میدان	ولیعصر	فردوسی	دروازه	انقلاب
۰۵:۵۵	۰۵:۵۲	۰۵:۵۰	۰۵:۴۷	۰۵:۴۵	۱
۰۶:۰۵	۰۶:۰۲	۰۶:۰۰	۰۵:۵۷	۰۵:۵۵	۲
۰۶:۱۳	۰۶:۱۰	۰۶:۰۸	۰۶:۰۵	۰۶:۰۳	۳

(ج) کرایه: برای حالت‌های حمل و نقلی مترو و تاکسی مقدار کرایه بر اساس طول مسیر تعیین شده است. خطوط اتوبوس و BRT کرایه‌ی جداگانه‌ی خاص خود دارند (جدول ۵). همانطور که مشخص است مقدار این معیار برای حالت پیاده‌روی صفر می‌باشد.

جدول ۵- نمونه‌ای از جدول کرایه‌ی خطوط اتوبوس

کرایه (ریال)	مقصد	مبدا	کد خط
۳۳۰۰	پ.تجربیش	پ.معین	۶۱۱۴
۳۶۰۰	پ.فیاض بخش	پ.۱۷.شهرپور	۶۱۱۶
۴۷۰۰	م.هفت تیر	پ.دستواره	۷۱۰۳

(د) سختی کاربر: کاربران معمولاً تمایل به استفاده از حالت‌های حمل و نقلی خلوت‌تر و آرام‌تر دارند. به همین دلیل در این تحقیق سعی شده است که این معیار نیز تا حد ممکن به درستی مدل شود. نکته‌ی مهم در مورد این معیار، وابستگی بالای آن به زمان سفر است، به طوریکه در یک زمان ممکن است مقدار آن برای یک حالت حمل و نقلی زیاد و در زمان دیگر مقدار آن پایین باشد. نحوه‌ی مدل‌سازی این معیار در جدول ۶ آورده شده است. جهت مقایسه‌ی گزینه‌های مختلف، مقادیر معیارهای مختلف

مربوط به این گزینه‌ها می‌بایست حتماً نرمالیزه شوند. برای نرمالیزه کردن معیارها روش‌های متفاوتی وجود دارد که در این تحقیق از روش بیشینه نمره به صورت زیر استفاده شده است [۲۸]:

$$x'_i = \frac{x_i}{x_{\max}} \quad (17)$$

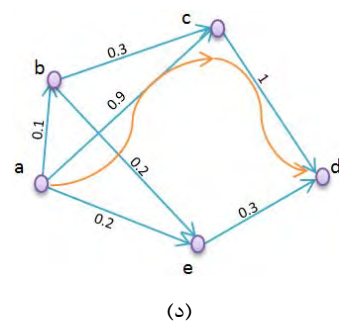
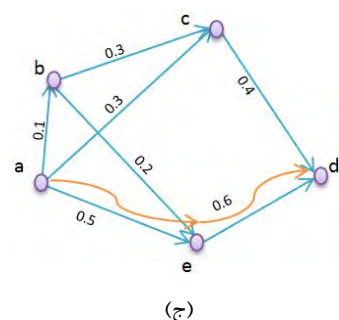
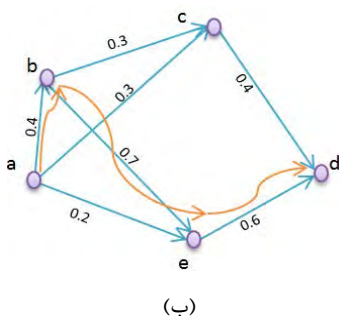
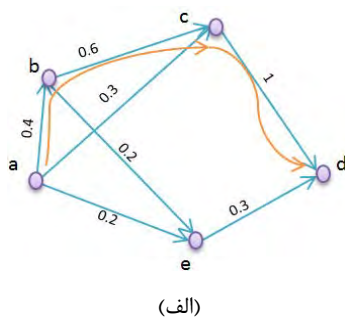
که در آن x_i مقدار i ام از معیار x بیشینه مقدار این معیار و x'_i مقدار نرمال شده‌ی آن می‌باشد. مقادیر ممکن برای هر معیار و تابع نرمال کردن این معیارها در جدول ۶ آورده شده‌اند.

جدول ۶- مقادیر قابل قبول و توابع نرمال سازی معیارها

مقدار نرمال شده	مقادیر قابل قبول	معیار
$F:[0 \infty) \rightarrow [DoD_{min}/DoD_{max} 1]$, $F(DoD) = DoD/DoD_{max}$	$[0 \infty)$	هزینه (DoD)
$F:[0 \infty) \rightarrow [T_{min}/T_{max} 1]$, $F(T) = T/T_{max}$	$[0 \infty)$	زمان (T)
$F:[0 \infty) \rightarrow [L_{min}/L_{max} 1]$, $F(L) = L/L_{max}$	$[0 \infty)$	طول (L)
$F:\{1,2,3,4,5\} \rightarrow \{1,1/2,1/3,1/4,1/5,2/3,2/5,3/4,3/5,4/5\}$ $F(UB) = UB/UB_{max}$	تاکسی، ۱ → اتوبوس، ۲ → BRT → 3, مترو، ۴ → پیاده‌روی، ۵ →	سختی کاربر (UB)

۵- الگوریتم یافتن پایدارترین مسیر

هنگامی که مقاومت یال‌ها به صورت بازه‌ای باشد (l_{ij}) u_{ij} به طوریکه l_{ij} و u_{ij} به ترتیب کمینه و بیشینه مقاومت یال (i,j) باشند، دیگر نمی‌توان از الگوریتم‌های شناخته شده‌ای مانند Dijkstra و A^* استفاده نمود و نیاز به استفاده از الگوریتم‌های پیدا کردن پایدارترین مسیر است [۲۹]. اگر تغییر در ورودی‌های آنالیز، به طور قابل توجهی سبب تغییر خروجی‌ها نشود، آنگاه می‌توان گفت که آنالیز، یک آنالیز پایدار است [۲۸]. با استفاده از الگوریتم پایدارترین مسیر برای مسیریابی، مسیری که نهایتاً انتخاب خواهد شد، کارایی بالایی تحت مقاومت‌های مختلفی که با استفاده از استراتژی‌های تصمیم‌گیری مختلف به هر یال داده می‌شود، خواهد داشت. به عبارت



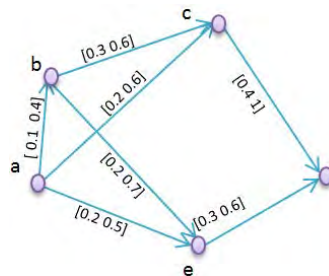
شکل ۶- مسیرهای مختلف از گره (a) به گره (d)

پس از انتخاب مسیرهای مختلف از گره (a) به گره (d) و تعیین مقاومت یال‌ها با توجه به مسیر انتخاب شده، حال نوبت به تعیین مسیری با کمینه مقدار RI می‌رسد (جدول ۷):

جدول ۷- تعیین پایدارترین مسیر با توجه به مقادیر RI

r	UBR	SPI	RI
{(a,b),(b,c),(c,d)}	2	0.5	1.5
{(a,b),(b,e),(c,d)}	1.7	0.7	1
{(a,e),(c,d)}	1.1	0.6	0.4
{(a,c),(c,d)}	1.9	0.5	1.4

دیگر، این مسیر، مسیری است که ثابت‌ترین رفتار را با تغییرات استراتژی‌های تصمیم‌گیری کاربر خواهد داشت.



شکل ۴- یک گراف جهت‌دار با مقاومت بازهای که این مقادیر به ترتیب کمینه و بیشینه مقاومت مربوط به هر یال می‌باشند.

در این تحقیق، از روش پیشنهادی Montemanni & Gambardella (2004) [۳۰] به صورت زیر برای پیدا کردن پایدارترین مسیر استفاده شده است:

۱- تعیین k مسیر بین نقاط مبدا و مقصد $R = \{r_1, r_2, \dots, r_k\}$

۲- برای هر $i = \{1, 2, \dots, k\}$ r_i

۳- اگر یال (i, j) که بر روی مسیر r_i قرار داشته باشد، مقاومت آن برابر u_{ij} خواهد بود.

۴- اگر یال (i, j) که بر روی مسیر r_i قرار نداشته باشد، مقاومت آن برابر l_{ij} خواهد بود.

۵- محاسبه‌ی مقاومت مسیر r_i با استفاده از مقادیر u_{ij} UBR

۶- پیدا کردن مقاومت کوتاه‌ترین مسیر بین مبدا و مقصد SPI

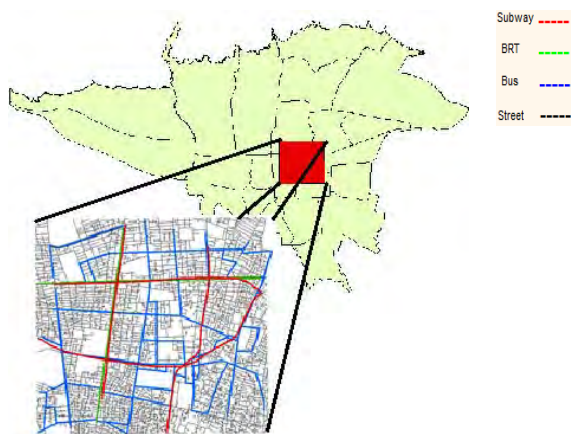
۷- محاسبه‌ی مقدار پایداری برای مسیر r_i $RI = UBR - SPI$

۸- تکرار مراحل ۳ تا ۷ برای مسیر بعدی

۹- انتخاب مسیری که کمترین مقدار RI را دارد.

شکل ۵- الگوریتم استفاده شده برای یافتن پایدارترین مسیر

به عنوان مثال، اگر یک شبکه‌ی حمل و نقلی مشابه با شکل ۴ داشته باشیم، الگوریتم به کار گرفته شده در این مقاله، پایدارترین مسیر از گره (a) به گره (d) را به طریق زیر پیدا می‌کند:



شکل ۸- منطقه‌ی مورد مطالعه

مساحت منطقه‌ی در نظر گرفته شده حدود 21 km^2 و شامل ۲ خط رفت و برگشت BRT، ۲۸ خط رفت و برگشت اتوبوس، ۴ خط اتوبوس رفت و برگشت و مجموعاً بیشتر از ۴۵۰ کیلومتر مسیر می‌باشد. داده‌های طول، زمان و کرایه‌ی مربوط به حالت‌های مختلف حمل و نقلی، از سازمان‌های مختلفی شامل شرکت واحد اتوبوسرانی تهران حومه، شرکت بهره‌برداری راه آهن شهری تهران و حومه و شهرداری تهران تهیه شده‌اند. همانطور که در مقدمه اشاره شد، در این تحقیق از میانگین داده‌های ترافیکی بین ساعات ۵:۳۰ تا ۸:۳۰ صبح استفاده شده است. در این بازه‌ی زمانی، بیشتر سفرها به طرف مرکز و شمال می‌باشد، بنابراین جمعیت بیشتری از این مسیرها استفاده کرده و شلوغ‌تر می‌باشند. بدین منظور، میزان سختی کاربر برای این مسیرها بیشتر از مقادیر مسیرهای بالعکس آنها در نظر گرفته شده‌اند. روش پیشنهادی، برای مسیر میدان هفت تیر به سمت میدان انقلاب که یکی از مسیرهای پر تردد در بازه‌ی زمانی در نظر گرفته شده می‌باشد، پیاده شد. در این تحقیق، از ۴۵ کاربر خواسته شد که ابتدا ماتریس مقایسه‌ی زوجی را با توجه به ترجیحات مورد نظرشان پر کنند و سپس استراتژی مورد نظر خود را مشخص نمایند. سپس به هر کدام ۴ مسیر بین نقاط مبدأ و مقصد که با استفاده از وزن‌های معیار کاربر و استراتژی‌های تصمیم‌گیری "حداقل یکی از معیارها برآورده شود"، "نصفی از معیارها برآورده شوند"، "بسیاری از معیارها برآورده شوند" و "همه‌ی معیارها برآورده شوند" بدست آمده بودند را به همراه میزان هزینه، طول، زمان و سختی مربوط به آن مسیرها پیشنهاد شد. در نهایت از آنها خواسته شد که یکی از این مسیرها را انتخاب کنند. ۸۷/۵۰ درصد از کاربران با استراتژی تصمیم‌گیری "حداقل یکی از معیارها بایستی

بنابراین مسیر $r = \{(a,e), (e,d)\}$ (مسیر نمایش داده شده در شکل ۶ ج) پایدارترین مسیر از گره (a) به گره (d) می‌باشد.

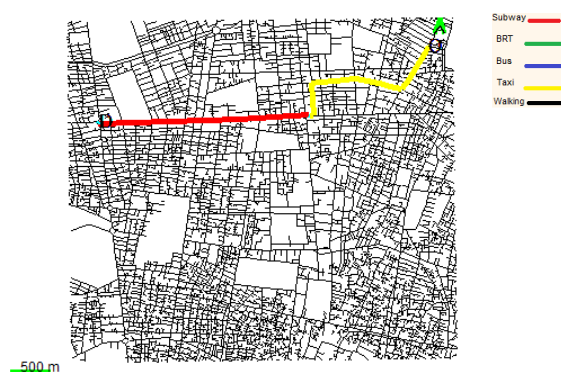
۶- پیاده‌سازی

روش پیشنهاد داده شده به صورت یک رابط گرافیکی کاربر (GUI) با استفاده از زبان برنامه نویسی Matlab پیاده شد. این سیستم، یک محیط برای کاربر جهت مقایسه‌ی زوجی معیارها و نمره دادن به معیارها در ماتریس مقایسه‌ی زوجی فراهم می‌کند (شکل ۷) و وزن معیارها بر اساس این اعداد اختصاص داده شده، تعیین می‌شود.

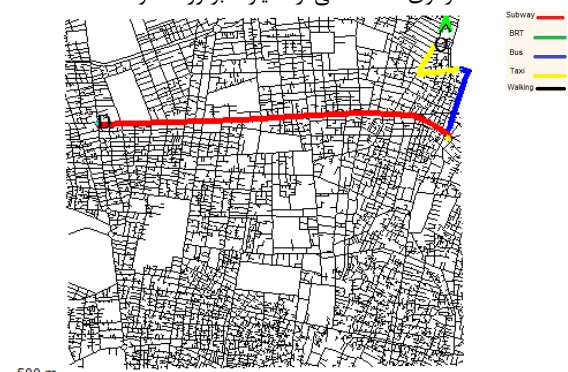


شکل ۷- محیط ایجاد شده جهت مقایسه‌ی زوجی معیارها

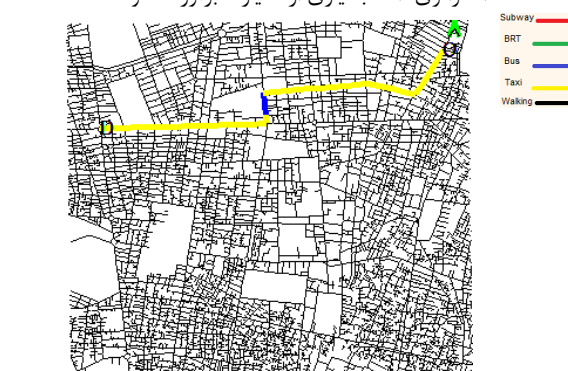
پس از تعیین وزن معیارها، با توجه به استراتژی تصمیم‌گیری مورد نظر کاربر، مسیر پیشنهادی بین نقاط مبدأ و مقصد انتخاب شده و نمایش داده می‌شود. روش پیشنهادی این تحقیق، پایدارترین مسیر تحت استراتژی‌های تصمیم‌گیری مختلف را نیز همچنان به کاربر ارائه می‌دهد. جهت بررسی میزان صحت مدل پیشنهاد شده و کاربرد آن در دنیای واقعی، از داده‌های حمل و نقلی بخشی از مرکز شهر تهران استفاده شده است (شکل ۸).



استراتژی ۲: "نصفی از معیارها برآورده شوند"



استراتژی ۳: "بسیاری از معیارها برآورده شوند"



استراتژی ۴: "همگی معیارها برآورده شوند"

شکل ۹- مسیرهای پیشنهادی توسط روش پیشنهادی با توجه به استراتژی‌های تصمیم‌گیری مختلف

همانطور که در بخش‌های قبلی نیز اشاره شد، روش پیشنهادی، پایدارترین مسیر بین نقاط مبدا و مقصد، تحت استراتژی‌های تصمیم‌گیری مختلف را نیز به کاربر پیشنهاد می‌کند (شکل ۱۰).

برآورده شود"، مسیر پیشنهادی مدل با در نظر گرفتن این استراتژی را به عنوان بهترین مسیر انتخاب نمودند. این مقدار برای سایر استراتژی‌های تصمیم‌گیری در جدول ۱۰ آورده شده است. با میانگین‌گیری از اعداد این جدول مشخص گشت که در ۸۰/۶۶٪ موارد، روش پیشنهادی در این تحقیق، قادر بوده است که مسیر مطلوب کاربر، با توجه به استراتژی تصمیم‌گیری مد نظرش را به او پیشنهاد دهد. این نتایج نشان‌دهنده کارایی بالای روش پیشنهادی در پیشنهاد مسیرهای مطلوب با توجه به وزن‌های معیار و استراتژی مورد نظر کاربر دارد.

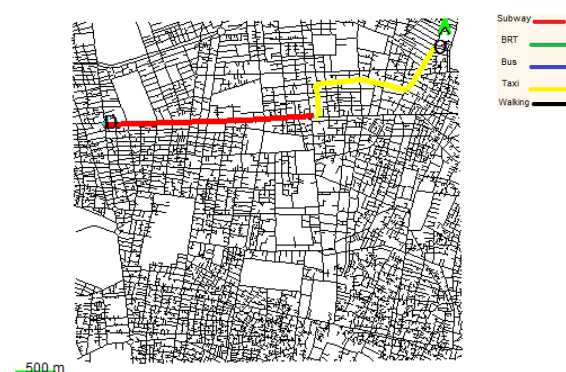
جدول ۱۰- درصد کاربران هر استراتژی که مسیر پیشنهادی ارائه شده در این تحقیق را بهترین مسیر دانسته‌اند

استراتژی تصمیم‌گیری	درصد کاربران
"حداقل یکی"	۸۷/۵۰
"نیمی"	۷۳/۳۳
"بسیاری"	۸۱/۸۱
"همه"	۸۰/۰۰

به عنوان مثال، مسیرهای پیشنهادی با توجه به ماتریس مقایسه‌ی زیر (جدول ۱۱)، که در واقع نشان‌دهنده ماتریس A حاصل از ترجیحات کاربر در شکل ۷، و استراتژی‌های تصمیم‌گیری می‌باشد، در شکل ۹ آورده شده‌اند.

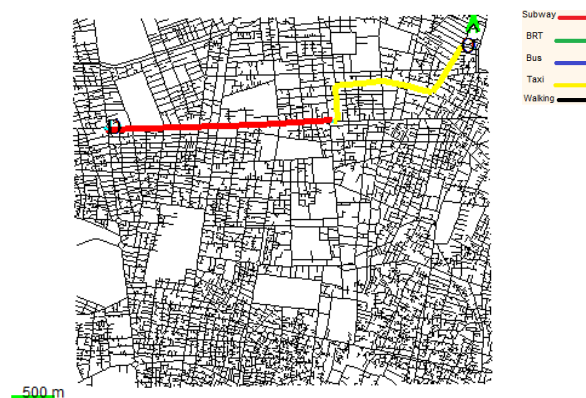
جدول ۱۱- ماتریس مقایسه‌ی زوجی استفاده شده در مسیریابی نمونه

معیار	هزینه	طول	زمان	سختی
هزینه	(1,1,1)	(1,2,4)	(1,3,5)	(3,5,7)
طول	(1/4,1/2,1)	(1,1,1)	(1,2,4)	(1,3,5)
زمان	(1/5,1/3,1)	(1/4,1/2,1)	(1,1,1)	(1,2,4)
سختی	(1/7,1/5,1/3)	(1/5,1/3,1)	(1/4,1/2,1)	(1,1,1)



استراتژی ۱: "حداقل یکی از معیارها برآورده شود"

همچنین پایدارترین مسیر بین نقاط مبدا و مقصد نیز به کاربر ارائه گشت. برای یافتن پایدارترین مسیر، چهار مرحله مد نظر قرار گرفت: (۱) تعیین معیارهای مد نظر کاربر در یک مسیریابی چند حالته. (۲) وزن دهی معیارها با استفاده از روش fuzzy AHP. (۳) تعیین کمینه و بیشینه مقاومت مربوط به هر یال با استفاده از عملگرهای Q-OWA. (۴) تعیین پایدارترین مسیر با استفاده از روش پیشنهادی (Montemanni & Gambardella (2004) با توجه به بیشینه و کمینه مقدار مقاومت هر یال که به ترتیب با استفاده از استراتژی‌های تصمیم‌گیری "حداقل یکی" و "همگی" بدست آمدند. این مسیر نزدیکترین مسیر به ایده‌آل ترین مسیر برای تمام استراتژی‌های تصمیم‌گیری می‌باشد و کمترین هزینه برای تغییر آن به سایر مسیرهایی که از استراتژی‌های تصمیم‌گیری مختلف بدست می‌آیند را دارد. پیاده‌سازی مدل در یک شبکه‌ی حمل و نقلی دینامیک، که اطلاعات آن در طول اجرای مدل به‌روز می‌شود برای کارهای آتی پیشنهاد می‌گردد.



شکل ۱۰- پایدارترین مسیر بین نقاط مبدا و مقصد تحت استراتژی‌های تصمیم‌گیری مختلف

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، از یک روش تصمیم‌گیری چند معیاره، بر اساس ترکیب روش fuzzy AHP و عملگرهای Q-OWA جهت یافتن مسیر بهینه‌ی چند حالته با توجه به استراتژی تصمیم‌گیری مد نظر کاربر استفاده شده است.

مراجع

- [1] Kirchler, D., Efficient routing on multi-modal transportation networks. 2013, Palaiseau, Ecole polytechnique.
- [2] Crainic, T.G. 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*, 1986. 20(3): p. 225-242.
- [3] Nguyen, S., E. Morello, and S. Pallottino, Discrete time dynamic estimation model for passenger origin/destination matrices on transit networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1988. 22(4): p. 251-260.
- [4] Delavar, M., 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*, 2004. 35(Part 2): p. 305-308.
- [5] Davies, C. and P. Lingras, Genetic algorithms for rerouting shortest paths in dynamic and stochastic networks. *European Journal of Operational Research*, 2003. 144(1): p. 27-38.
- [6] Zografos, K.G. and K.N. Androustopoulos, Algorithms for itinerary planning in multimodal transportation networks. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, 2008. 9(1): p. 175-184.
- [7] Yu, H. and F. Lu, A multi-modal route planning approach with an improved genetic algorithm. *Advances in Geo-Spatial Information Science*, 2012: p. 193.
- [8] Abbaspour, R.A. and F. Samadzadegan, Time-dependent personal tour planning and scheduling in metropolises. *Expert Systems with Applications*, 2011. 38(10): p. 12439-12452.
- [9] Huang, B., R.L. Cheu, and Y.S. Liew, GIS and genetic algorithms for HAZMAT route planning with security considerations. *International Journal of Geographical Information Science*, 2004. 18(8): p. 769-787.

- [10] Pahlavani, P., F. Samadzadegan, and M.R. Delavar, A GIS-based approach for urban multi-criteria quasi optimized route guidance by considering unspecified site satisfaction, in *Geographic Information Science*. 2006, Springer. p. 287-303.
- [11] Niaraki, A.S. and K. Kim, Ontology based personalized route planning system using a multi-criteria decision making approach. *Expert Systems with Applications*, 2009. 36(2): p. 2250-2259.
- [12] Pahlavani, P. 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*, 2014. 40: p. 14-35.
- [13] Pahlavani, P., M.R. Delavar, and A.U. Frank, Using a modified invasive weed optimization algorithm for a personalized urban multi-criteria path optimization problem. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012. 18: p. 313-328.
- [14] Modesti, P. and A. Sciomachen, A utility measure for finding multiobjective shortest paths in urban multimodal transportation networks. *European Journal of Operational Research*, 1998. 111(3): p. 495-508.
- [15] Qu, L. and Y. Chen, A hybrid MCDM method for route selection of multimodal transportation network, in *Advances in Neural Networks-ISNN 2008*. 2008, Springer. p. 374-383.
- [16] Liu, L., et al., Exact algorithms for multi-criteria multi-modal shortest path with transfer delaying and arriving time-window in urban transit network. *Applied Mathematical Modelling*, 2014. 38(9): p. 2613-2629.
- [17] Deng, H., Multicriteria analysis with fuzzy pairwise comparison. *International Journal of Approximate Reasoning*, 1999. 21(3): p. 215-231.
- [18] Buckley, J.J., Fuzzy hierarchical analysis. *Fuzzy sets and systems*, 1985. 17(3): p. 233-247.
- [19] Prakash, T., Land suitability analysis for agricultural crops: A fuzzy Multicriteria Decision Making Approach. MS Theses international institute for geo-information science and earth observation enschede, the netherland, 2003.
- [20] Leung, L. and D. Cao, On consistency and ranking of alternatives in fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, 2000. 124(1): p. 102-113.
- [21] Bodily, S.E. and S. Bodily, *Modern decision making: a guide to modeling with decision support systems*. 1985: McGraw-Hill New York.
- [22] Mellers, B.A. and S.-j. Chang, Representations of risk judgments. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 1994. 57(2): p. 167-184.
- [23] Fullér, R., OWA operators in decision making. Exploring the limits of support systems, TUCS General Publications, 1996. 3: p. 85-104.
- [24] Yager, R.R., On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decisionmaking. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, 1988. 18(1): p. 183-190.
- [25] Malczewski, J., Ordered weighted averaging with fuzzy quantifiers: GIS-based multicriteria evaluation for land-use suitability analysis. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2006. 8(4): p. 270-277.
- [26] Zadeh, L.A., A computational approach to fuzzy quantifiers in natural languages. *Computers & Mathematics with Applications*, 1983. 9(1): p. 149-184.
- [27] Yager, R.R., Quantifier guided aggregation using OWA operators. *International Journal of Intelligent Systems*, 1996. 11(1): p. 49-73.
- [28] Malczewski, J., *GIS and multicriteria decision analysis*. 1999: John Wiley & Sons.
- [29] Yu, G. and J. Yang, On the robust shortest path problem. *Computers & Operations Research*, 1998. 25(6): p. 457-468.
- [30] Montemanni, R. and L.M. Gambardella, An exact algorithm for the robust shortest path problem with interval data. *Computers & Operations Research*, 2004. 31(10): p. 1667-1680.