مدل طراحی شبکه خطوط مترو با استفاده از الگوریتم ژنتیک

شهریار افندی‌زاده*، دانشیار، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
محمود احمدی‌نژاد، استادیار، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
محسن هاشمی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

E-mail:zargari@iust.ac.ir
دریافت: ۱۳۸۹/۱۰/۲۰- پذیرش: ۱۳۹۰/۰٤/۱۹

چکیده

به دلیل نیاز به سرمایه‌گذاری زیاد در جهت ایجاد و توسعه سیستم مترو، طراحی صحیح و بهینه سیستم مترو به‌خصوص مسیریابی شبکه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. روش‌های رایج طراحی شبکه مترو برای حل این‌گونه مسایل، با ابعاد بزرگ و پیچیده، مشکل بوده است و نتایج آنها نیاز به اعتبارسنجی زیادی دارد. حل مسایل طراحی شبکه توسط این روش‌ها معمولاً بسیار زمان‌بر و پرهزینه می‌باشد، بنابراین، ضرورت و تمایل بیشتری برای استفاده از روش‌های ابتکاری وجود دارد. تاکنون چندین روش ابتکاری برای مسیریابی و حل این‌گونه مسایل ارایه شده است ولی اکثر این روش‌ها به طراحی یک مسیر مترو پرداخته‌اند و توجه کمتری به تحلیل و تولید شبکه‌ای از مسیرهای مترو شده است. همچنین پارامترها و محدودیت‌های مورد استفاده در این روش‌ها کافی و مناسب نیستند. روش پیشنهادی حاصل از این تحقیق، برای حل مسئله طراحی شبکه مترو یک روش ابتکاری بر مبنای استفاده از الگوریتم ژنتیک می‌باشد. ابتدا تعداد زیادی از مسیرهای ممکن توسط الگوریتم پیشنهادی، تولید شده است، سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک از طریق ترکیب این مسیرها شبکه‌های مختلفی ایجاد و در نهایت شبکه مناسب انتخاب می‌گردد. روش پیشنهادی در قالب یک مطالعه موردی ارزیابی شده است و نتایج نشان می‌دهد که می توان به خوبی از این روش برای طراحی شبکه خطوط مترو در شهرها استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: طراحی شبکه مترو، الگوریتم ژنتیک، مکان‌یابی ایستگاه‌ها، تولید مسیر، ایجاد شبکه

۱- مقدمه

افزایش روز افزون سفرهای درون شهری در پی توسعه نواحی شهری و افزایش جمعیت موجب شده است که بسیاری از شهرهای جهان با مشکلات ترافیکی از قبیل تراکم ترافیک، افزایش تأخیر در شبکه و یا مشکلات زیست‌محیطی مانند آلودگی صوتی، آلودگی هوا و سایر ناهنجاری‌های زیست‌محیطی همچنین افزایش مصرف سوخت، اتلاف وقت شهروندان و غیره که حاصل از تراکم وسایل نقلیه در سطح معابر شهری است، روبه‌رو شوند. به همین دلیل ایجاد و توسعه سیستم حمل و نقل همگانی و برنامه‌ریزی در جهت عملکرد بهینه آن از اولویت‌های مدیریت شهری می‌باشد. از میان سیستم‌های حمل و نقل همگانی، مترو به دلیل امتیازات عملکردی‌اش نسبت به سایر سیستم‌ها، در شهرهای بزرگ بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. از جمله امتیازات و ویژگی‌های مترو می‌توان به سرعت و ظرفیت بالا، نظم و قابلیت اطمینان سیستم، منفک بودن از ترافیک سطحی، ایمنی، حداقل عوارض زیست‌محیطی و غیره اشاره کرد. برای رسیدن به حداکثر قابلیت‌های یاد شده باید طراحی شبکه مسیرهای مترو همچنین برنامه‌ریزی و مدیریت آن به بهترین نحو صورت گیرد.

* نویسنده مسئول

Archive of SID
www.SID.ir

طراحی و برنامه‌ریزی سیستم حمل و نقل سریع انبوه[1] یک مسئله با روند پیچیده تصمیم‌گیری با اهداف و قیود چندگانه، توأم با عدم اطمینان، پارامترهای غیر کمی، سرمایه‌گذاری بالا و کاری طولانی مدت است [Laporte, Mesa and Ortega, 2000]. روش‌های حل دقیق نظیر: شاخه و کرانه، شاخه، هزینه و غیره برای حل این‌گونه مسایل بسیار مشکل، پیچیده و زمان‌بر می‌باشد. همچنین روش‌های رایج طراحی شبکه مترو، برای حل مسئله طراحی شبکه مترو، پرهزینه است و نتایج آنها نیاز به اعتبارسنجی زیادی دارد؛ به علاوه این روش‌ها در آنالیز شبکه‌های بزرگ نیز ناتوان هستند.

در طراحی شبکه مترو، مسئله اصلی مسیریابی خطوط و مکان‌یابی ایستگاه‌ها است. برای مسیریابی سیستم‌های حمل و نقل سریع انبوه (مترو) باید روش‌هایی به‌کار گرفته شود که توانایی تولید جواب‌های گوناگون را داشته باشند. در این زمینه، تمایل به استفاده از روش‌هایی است که یک خانواده از جواب‌های مناسب با توجه به معیارهای اصلی مسئله، تولید کند، سپس جواب‌های به‌دست آمده را با توجه به سایر معیارها مورد ارزیابی قرار داده و در نهایت جواب مناسب برگزیده شود. در حال حاضر، روشی تحلیلی که توانایی حل مسئله طراحی شبکه حمل و نقل سریع را با تمام ابعاد آن داشته باشد، وجود ندارد. بیشتر روش‌های شناخته شده موجود در حقیقت مکان‌یابی یک مسیر منفرد را انجام می‌دهند [Laporte, Mesa and Ortega, 2000].

استفاده از روش‌های تحقیق در عملیات[2] و روش‌های ابتکاری[3] در طراحی و بهینه‌سازی خطوط شبکه‌های حمل و نقل سریع با توجه به کمبودها و نقایص روش‌های رایج و سنتی رو به افزایش می‌باشد. استفاده از این روش‌ها در طراحی شبکه خطوط مترو، قدمت و گستردگی چندانی ندارد و این به دلیل پیچیدگی و مشکل بودن طراحی شبکه خطوط مترو به سبب وجود پارامترها و محدودیت، متعدد می‌باشد.

مطالعاتی که پژوهشگران در این زمینه انجام داده‌اند بیشتر به مسیریابی یک خط منفرد حمل و نقل سریع محدود می‌شود، در نتیجه در زمینه طراحی و مسیریابی شبکه‌ای از خطوط حمل و نقل سریع خلاء تحقیقاتی وجود دارد. زیرا در اکثر شهرهای ایران و جهان شبکه‌های مترو موجود، شبکه‌ای گسترده و دارای چندین خط می‌باشند و اصولاً در شهرهای بزرگ و با جمعیت زیاد متروی تک خطه نمی‌تواند ثمربخش باشد. به علاوه مطالعاتی که تاکنون صورت گرفته‌اند از لحاظ روش حل نیز کامل نیستند و معایبی دارند، بنابراین انجام مطالعاتی در جهت رسیدن به روش‌های کامل‌تر و دقیق‌تر از آنچه وجود دارد، ضروری است.

در این تحقیق با انتخاب روش و پارامترهای مناسب و با استفاده از الگوریتم ژنتیک، طراحی شبکه مترو به شیوه مناسب‌تری انجام شده است.

۲- روش‌های رایج طراحی شبکه مترو

معمولاً روند طراحی شبکه با آنالیز ساختار شهر آغاز می‌شود. ساختار شهر شامل فعالیت‌های عمده اقتصادی، مراکز خرید و تجاری مهم، مراکز صنعتی، مناطق تفریحی و توریستی، دانشگاه‌ها، بیمارستان‌ها، فرودگاه‌ها، ایستگاه‌های راه آهن، پایانه‌های اتوبوسی، شریان‌های اصلی و سیستم حمل و نقل موجود می‌باشد.

در مرحله بعد، برای مسیریابی خطوط شبکه با توجه به مطالعات سفرهای مبدأ ـ مقصد کریدورهایی مشخص هدف‌گذاری می‌شوند. پس از آن، سناریوهایی تولید می‌شوند و با توجه به سال هدف، مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. ارزیابی سناریو با توجه به معیارهایی چون هزینه، امکانات تکنیکی، سطح پوشش جمعیتی یا منطقه‌ای، بهره‌وری و کارآیی، میزان تأثیر بر کاربری زمین، تأثیر بر ترافیک، اثرات زیست‌محیطی، ایمنی و ... صورت می‌گیرد. به عنوان مثال طراحی شبکه متروی اصفهان، شیراز، شهر مقدس مشهد و شهرهای دیگر نیز به این گونه طراحی شده‌اند [پژوهشکده حمل و نقل دانشگاه شریف، ۱۳۸۰ و ۱۳۸۲] و [PPK Environment and Infrastructure Pty Ltd, 1999]. معمولاً این روند طراحی بسیار وقت‌گیر و طولانی است و کاری گروهی را می‌طلبد. در این روند بارها به تکرار و ارزیابی نیاز است، زیرا بعضی از سناریوها باید اصلاح شوند و یا حتی گاهی، گزینه جدیدی به مجموعه اضافه می‌شود. در نهایت مجموعه سناریوهای موجود غربال شده و تعداد محدودی از سناریوها برگزیده شده و به دقت مورد بررسی و ارزیابی نهایی قرار می‌گیرند و بهترین گزینه انتخاب می‌شود. شایان ذکر است، در روش طراحی سنتی شبکه مترو امکان قضاوت‌های شخصی، دخالت‌های سیاسی و مدیریتی نیز در تصمیم‌گیری‌ها وجود دارد.

Archive of SID

www.SID.ir

۳- مدل‌های ابتکاری مسیریابی و بهینه‌سازی خطوط شبکه مترو

یکی از اولین کارهایی که برای حل مسئله مکان‌یابی خطوط مترو انجام شد، رساله دکترای دیسزار[٤] در سال ۱۹۷۰ بود. دیسزار مسئله را به‌صورت یافتن مسیری با کمترین هزینه بین مبدأ ـ مقصد تحت قیود مختلف مطرح و آن را مدل کرد. حل این مسئله به‌صورت الگوریتم زیر پیشنهاد شد [Laporte, Mesa and Ortega, 2000].

۱. ناحیه مورد نظر شبکه‌بندی شود.
۲. به هر سلول از این شبکه با توجه به هر کدام از معیارهایی که در نظر گرفته می‌شود هزینه‌هایی نسبت داده شود.
۳. هزینه‌های هر سلول جمع زده شود تا در نهایت برای هر سلول، یک هزینه مشخص شود و به این ترتیب می‌توان هدف مسئله را کمینه کردن هزینه‌های مسیر تعریف کرد.
٤. و در نهایت مسئله با الگوریتم کوتاهترین مسیر حل می‌شود.

یکی از مهم‌ترین اشکالات این روش حل، وارد نشدن معیار مسافر جابه‌جا شده (پوشش سفر) در الگوریتم پیشنهادی است. روش ناقص قبلی با ارایه یک روش جدید توسط کورنت[٥] و همکارانش در سال ۱۹۸۵ بهبود بخشیده شد [Current, ReVelle and Cohon, 1985]. این روش پوشش جمعیتی مسیر و هزینه اتصال خط به نقاط پوشش داده نشده را، همزمان به عنوان معیارهای گسترش شبکه در نظر می‌گیرد. این دیدگاه به دو مدل کوتاهترین مسیر با حداکثر پوشش[٦] (MCSP) و مدل کوتاهترین مسیر میانه[٧] (MSP) ختم شد. هر دو مدل گزینه‌ها را با توجه به هزینه‌های ساخت و میزان منافع اجتماعی ارزیابی می‌کنند.

تابع هدف در الگوریتم کوتاهترین مسیر با حداکثر پوشش شامل کمینه کردن هزینه‌ها و بیشینه کردن پوشش یا همان برآورد تقاضای موجود است. تابع هدف در الگوریتم کوتاهترین مسیر میانه کمینه کردن هزینه با بیشینه کردن میزان دسترسی به مسیر است.

در سال ۱۹۹٦ دافورد[٨] و همکارانش در پژوهشی مکان‌یابی یک خط حمل و نقل سریع را توسط الگوریتم جستجوی ممنوع[٩] مورد توجه قرار دادند [Dufourd, Gendreau and Laporte, 1996]. تابع هدف در این الگوریتم، حداکثرسازی پوشش جمعیتی مسیر می‌باشد. محدودیت‌های اعمال شده شامل تعداد معلوم n ایستگاه در مسیر و حداقل و حداکثر فاصله بین ایستگاهی می‌باشد.

فواصل بین ایستگاهی، در این تحقیق به روش محاسبه فاصله پیاده‌روی در یک شبکه دسترسی شطرنجی چگال محاسبه می‌شوند. برای سایر محاسبات فاصله، هر کجا که لازم باشد فاصله اقلیدسی درنظر گرفته می‌شود. مدل ارایه شده، با حل یک مسئله تصادفی ارزیابی شده است و آنالیز حساسیت بر پارامترهای الگوریتم صورت گرفته است.

در سال ۱۹۹۸ برونو[۱۰] و همکاران در این مطالعه فرض را بر آن قرار دادند که استفاده‌کنندگان، سیستم‌های مختلف حمل و نقل را به گونه‌ای انتخاب می‌کنند که هزینه‌های آنها حداقل شود [Bruno, Ghiani and Improta, 1998]. هدف در این مدل کمینه کردن همزمان هزینه ساخت خط حمل و نقل سریع و کل هزینه سفر وزن‌دار شده‌ای است که بر استفاده‌کنندگان تحمیل می‌شود. هزینه سفر نماینده‌ای از ابعاد و اندازه فاکتورهای مختلف نظیر زمان سفر، هزینه‌های مالی و راحتی است. در مدل ارایه شده برای راحتی کار فرض شده است که تنها رقیب برای سیستم حمل و نقل ترکیبی پیاده‌ـ همگانی، سیستم سواری شخصی باشد. به این ترتیب مسیر هر مسافر یکی از دو حالت زیر خواهد بود:

- کوتاهترین مسیری که با سواری شخصی یا موتورسیکلت در شبکه پیموده می‌شود.
- کوتاهترین مسیری که در شبکه ترکیبی پیاده‌ـ همگانی پیموده می‌شود.

در مطالعه دیگری که توسط برونو و همکاران در سال ۲۰۰۲ انجام شده، هدف بیشینه کردن جمعیت پوشش داده شده توسط مسیر بوده است [Giuseppe Bruno, Michel Gendreau, Gilbert Laporte, 2002]. گرچه جذب مسافر توسط سیستم به عوامل دیگری چون سطح در آمد، مالکیت سواری شخصی و نظایر آن نیز بستگی دارد، اما در این تحقیق تنها از پوشش جمعیتی مسیر استفاده شده است؛ به این دلیل که احتیاج به آمارگیری و سرشماری کمتری نسبت به سایر پارامترها دارد.

در این مدل یک شبکه شطرنجی فرضی روی منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته می‌شود و روی هر یک از گره‌های آن (مراکز سلول‌ها) جمعیت P(x,y) قرار می‌گیرد. شبکه و مراکز در دستگاه مختصات دکارتی مفروض هستند. مبنای جذب مسافر به هر ایستگاه بر پایه مسافت پیاده‌روی آنهاست به نحوی که هر چه

Archive of SID

www.SID.ir

فاصله پیاده بیشتر شود احتمال جذب مسافر کمتر خواهد شد. در این تحقیق همچنین فاصله اقلیدسی سطحی حداکثر و حداقلی بین دو ایستگاه متوالی در نظر گرفته شده است.

مطالعات دیگری نیز در سال‌های اخیر توسط بعضی محققان صورت گرفته است [Laporte, Marin and Mesa, 2007] و [Marin and Rodenas, 2009] که به تکمیل و گسترش روش‌های پیشین پرداخته و روش جدیدی را ارایه نکرده‌اند.

٤- روش تحقیق

در این تحقیق سعی شده است روشی کامل‌تر و دقیق‌تر از روش‌های ابتکاری پیشین ارایه شود. این روش با داشتن پارامترها، محدودیت‌ها و معیارهایی مناسب، شبکه‌ای بهینه از خطوط را طراحی می‌کند. روش پیشنهادی در این پژوهش مشتمل بر سه مرحله می‌باشد. مرحله اول اختصاص به مکان‌یابی ایستگاه‌ها با توجه به ساختار شهر و کریدورهای سفر دارد. در مرحله دوم، با توجه به اهداف و محدودیت‌هایی خاص، در بین ایستگاه‌های کاندید شده در مرحله نخست، مسیرهایی تولید می‌شود. در نهایت، در مرحله سوم با استفاده از الگوریتم ژنتیک ترکیبی از مسیرهای تولید شده در مرحله دوم، شبکه مترو ایجاد می‌گردد و با در نظر گرفتن تابع هدف مناسب‌ترین آنها به عنوان جواب نهایی برگزیده می‌شود.

٥- مکان‌یابی ایستگاه‌ها

تعداد و مکان ایستگاه‌های خطوط حمل و نقل سریع، تأثیر زیادی بر مشخصات و عملکرد خطوط و شبکه آن دارد. طراحی و مکان‌یابی ایستگاه‌های حمل و نقل سریع بسیار مشکل و پیچیده است و شامل پارامترهای کمّی و کیفی بسیاری می‌باشد. به همین دلیل، روش کامل و دقیقی برای مکان‌یابی بهینه ایستگاه‌ها وجود ندارد [Vokan Vuchic , 2004]. طراحان سیستم‌های حمل و نقل همگانی معمولاً چندین هدف را برای مکان‌یابی ایستگاه‌ها در نظر می‌گیرند که شامل موارد زیر می‌شود:

- سرویس‌دهی به مراکز اصلی شهر و فعالیت‌های موجود
- دست‌یابی به حداقل زمان سفر
- فراهم آوردن بیشترین پوشش جمعیتی یا منطقه‌ای
- حداکثر امکان دسترسی به سیستم
- جذب حداکثری مسافران
- حداقل کردن هزینه‌های سیستم
- سایر ملزومات (اهداف برنامه‌ریزی، ارتباط با الگوی کاربری زمین، توسعه اقتصادی، نیازهای جمعیتی و غیره)

در روش پیشنهادی این تحقیق، گام اول در طراحی شبکه مترو، مکان‌یابی ایستگاه‌های لازم می‌باشد. به این منظور با تحلیل ساختار شهر و در نظر گرفتن اهداف بالا، تعدادی از گره‌های شبکه خیابانی به عنوان مکان احداث ایستگاه‌ها در نظر گرفته می‌شوند. ایستگاه‌های کاندید در سه دستهٔ ایستگاه‌های انتهایی، ایستگاه‌های اجباری و ایستگاه‌های میانی قرار می‌گیرند.

٥-١- ایستگاه‌های انتهایی

سفر قطارهای مترو از دپو تا دپو صورت می‌گیرد. بنابراین در نظر گرفتن ایستگاه‌هایی به عنوان ایستگاه‌های انتهایی لازم می‌باشد. با توجه به اینکه برای دپو فضای باز زیادی لازم است، این ایستگاه‌ها باید در نقاط حاشیه‌ای شهر قرار گیرند، زیرا هزینه تملک زمین برای فضاهای دپو و کارگاه‌های تعمیرات و نگهداری سیستم در اراضی حاشیه شهر پایین است [Jienky Synn, 2005].

٥-٢- ایستگاه‌های اجباری

انتخاب این گره‌ها به عنوان محل احداث ایستگاه‌های لازم‌الوجود در شبکه مترو برای سرویس‌دهی به محلی خاص می‌باشد. ممکن است، برای مدیران شهری یا برنامه‌ریزان، وجود ایستگاه مترو در نقطه‌ای از شهر مطلوب باشد، بنابراین می‌توان با در نظر گرفتن آن نقطه، به عنوان ایستگاه اجباری، در الگوریتم تولید مسیر پیشنهادی، امکان گذر شبکه از آن نقطه را فراهم کرد.

٥-٣- ایستگاه‌های میانی

این گره‌ها به عنوان محل احداث سایر ایستگاه‌های مسیرهای شبکه مترو در نظر گرفته می‌شوند و در انتخاب آنها باید اهداف یاد شده در بخش ٥ مورد توجه قرار گیرد. برای نیل به اهداف نام برده، باید شناخت و آنالیز کامل و صحیحی از ساختار شهر و فعالیت‌های موجود در آن کسب کرد. همچنین جمع‌آوری اطلاعات از سیستم‌های حمل و نقل همگانی موجود و مراکز حمل و نقل بین‌شهری مثل فرودگاه‌ها و ایستگاه‌های راه آهن و پایانه‌های اتوبوس، امکان مکان‌یابی ایستگاه‌های مترو هماهنگ و مرتبط با آنها را فراهم می‌کند.

Archive of SID

www.SID.ir

٦- الگوریتم تولید مسیر

گام دوم طراحی شبکه مترو در روش پیشنهادی، تولید مسیر یا به عبارت دیگر، مسیریابی بین ایستگاه‌هایی است که از گام اول به‌دست آمده‌اند. مسیرهایی که الگوریتم تولید مسیر می‌سازند، باید شرایط و محدودیت‌هایی را ارضا کنند. هدف از اعمال این شرایط و محدودیت‌ها تولید مسیرهایی مطلوب، با عملکرد و کارآیی خوب و در نهایت قابل اجرا می‌باشد.

با فرض رشته $r=(S_1,S_2,...,S_n)$ به عنوان توالی ایستگاه‌های مسیری مانند r، این مسیر باید دارای شرایط زیر مطابق با روابط (١) الی (٣) باشد.

$$S_i \in S \quad , \quad (i=1,2,...,n) \qquad (١)$$

$$S_i \in S_E \quad , \quad (i=1,n) \qquad (٢)$$

$$\exists S_i \in r \mid S_i \in S_c \quad , \quad (i=2\ or\ 3\ or\ ...\ or\ n-i) \qquad (٣)$$

S_i: ایستگاه واقع در گره i

S: مجموعه ایستگاه‌های به‌دست آمده از گام اول

S_E: مجموعه ایستگاه‌های انتهایی

S_C: مجموعه ایستگاه‌های اجباری

بر طبق شرط (٣) هر مسیر ساخته شده باید حداقل دارای یک ایستگاه از مجموعه ایستگاه‌های اجباری باشد. محدودیت‌های اعمال شده نیز مطابق روابط (٤) الی (٧) می‌باشد:

$$\left[\left(x_{s_i}-x_{s_{i+1}}\right)^2+\left(y_{s_i}-y_{s_{i+1}}\right)^2\right]^{1/2} \geq L_{\min} \quad , \quad (i=1,2,...,n-1) \qquad (٤)$$

$$\left[\left(x_{s_i}-x_{s_{i+1}}\right)^2+\left(y_{s_i}-y_{s_{i+1}}\right)^2\right]^{1/2} \leq L_{\max} \quad , \quad (i=1,2,...,n-1) \qquad (٥)$$

$$\alpha_i = tg^{-1}\left(\frac{\left|m_{L_{(i-1,j)}}-m_{L_{(i,i+1)}}\right|}{1+m_{L_{(i-1,j)}}.\ m_{L_{(i,i+1)}}}\right) \geq \alpha \quad , \quad m_{L_{(i,j)}}=\frac{y_j-y_i}{x_j-x_i} \qquad (٦)$$

$$n-1 \leq n_L \qquad (٧)$$

(x_i,y_i): مختصات جغرافیایی ایستگاه i

$L_{\min}$: حداقل فاصله بین ایستگاهی مجاز

$L_{\max}$: حداکثر فاصله بین ایستگاهی مجاز

α_i: زاویه شکست مسیر در ایستگاه i

α: زاویه شکست مجاز

n_L: حداکثر تعداد مجاز کمان‌های یک مسیر

مطابق روابط (٤) و (٥) برای فواصل بین ایستگاه‌های متوالی در یک مسیر حداقل و حداکثری در نظر گرفته می‌شود. در نظر گرفتن حداقل فاصله بین ایستگاهی سبب به وجود آمدن تراکم مناسب ایستگاه‌ها در یک منطقه شده است و از نزدیکی بیش از حد آنها به یکدیگر جلوگیری می‌کند. همچنین سبب کاهش تعداد ایستگاه‌های یک مسیر و در نتیجه کاهش هزینه‌های ساخت، تعمیرات و نگهداری شده و با کاهش تأخیرات ناشی از توقف‌های مکرر سبب بهبود عملکرد مسیر می‌گردد. از طرف دیگر، اعمال محدودیت حداکثر فاصله بین ایستگاهی سبب بالا بردن دسترسی سیستم و کاهش فاصله پیاده‌روی مسافران می‌شود. به طور تجربی حداقل و حداکثر فاصله بین ایستگاهی به ترتیب ٥٠٠ متر و ٢٠٠٠ متر در نظر گرفته شده است.

با توجه به این محدودیت طبق رابطه (٨) مجموعه نقاطی که در فاصله مابین دوایری به شعاع $L_{\min}$ و $L_{\max}$ و به مرکزیت ایستگاه S_i قرار دارند، به عنوان مجموعه نقاط همسایگی ایستگاه S_i می‌باشند.

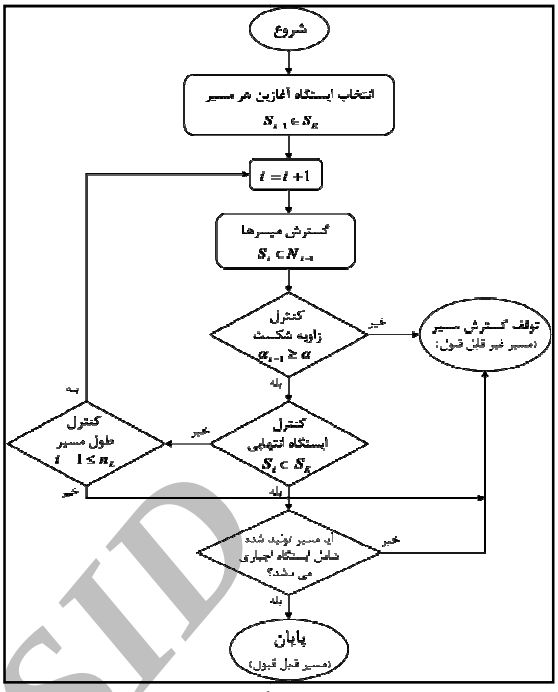
$$N_i=\left\{S_j \in S \;\middle|\; L_{\min} \leq \left[\left(x_{s_i}-x_{s_{i+1}}\right)^2+\left(y_{s_i}-y_{s_{i+1}}\right)^2\right]^{1/2} \leq L_{\max}\right\} \qquad (٨)$$

N_i: مجموعه ایستگاه‌های همسایه ایستگاه i

محدودیت دیگری که با توجه به ملاحظات فنی مطابق رابطه (٦) در نظر گرفته می‌شود، محدودیت زاویه شکست در هر ایستگاه می‌باشد. این محدودیت جهت جلوگیری از به وجود آمدن مسیرهایی با زوایای تند و مارپیچ اعمال می‌گردد و در نهایت، محدودیتی مطابق رابطه (٧) برای کنترل تعداد حداکثر کمان‌های یک مسیر اعمال می‌شود که هدف از آن، جلوگیری از تولید مسیرهایی طولانی و با ایستگاه‌های زیاد می‌باشد. شکل (١) روند کار الگوریتم تولید مسیر را نشان می‌دهد. این الگوریتم در نرم‌افزار MATLAB پیاده‌سازی شده است. داده‌های ورودی به این الگوریتم شامل مختصات ایستگاه‌های کاندید (x_{s_i},y_{s_i})، ایستگاه‌های انتهایی S_E و اجباری S_C،کمترین و بیشترین فاصله بین ایستگاهی $L_{\min}$ و $L_{\max}$، زاویه شکست مجاز α و حداکثر تعداد مجاز کمان‌های یک مسیر n_L می‌باشد. خروجی‌های برنامه نیز مسیرهای تولید شده است.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۱. روند کار الگوریتم تولید مسیر

۷- ایجاد و طراحی شبکه مترو

گام سوم و نهایی مدل پیشنهادی طراحی شبکه مترو، ایجاد شبکه‌های مختلف از طریق ترکیب مسیرهای تولید شده و انتخاب مناسب‌ترین آنها است. مدل پیشنهادی، حل مسئله طراحی شبکه خطوط مترو را از طریق بهینه‌سازی تابع هدف شبکه با توجه به پارامترها و محدودیت‌های شبکه انجام می‌دهد.

تابع هدف در نظر گرفته شده در مدل پیشنهادی این پژوهش مطابق رابطه (۹) است و شامل پارامترهایی چون: طول کل شبکه مترو، مجموع طول کوتاهترین مسیرهای شبکه خیابانی متناظر با هر کمان شبکه مترو، زمان کل سفرهای تخصیص یافته بر شبکه مترو و میزان تقاضای پوشش داده نشده، می‌باشد.

$$Min\ Z = W_1 C_1 \left(L_{Metro} + \frac{L_{Equivalent} - L_{Metro}}{L_{Metro}} \right) + W_2 C_2 T_{Total} + W_3 C_3 Q_{UCD} \qquad (۹)$$

L_{Metro}: طول کل شبکه مترو

$L_{Equivalent}$: مجموع طول کوتاهترین مسیرهای متناظر با کمان‌های شبکه

T_{Total}: زمان کل سفرها در شبکه مترو

Q_{UCD}: مجموع تقاضای سفرهای پوشش داده نشده[11]

C_1 ,C_2 ,C_3: ضرایب همسنگ‌سازی بعد[12]

W_1 ,W_2 ,W_3: ارزش پارامترها در سیاست‌گزاری

طول کل شبکه، رابطه مستقیمی با میزان سرمایه‌گذاری اولیه جهت ساخت شبکه خطوط مترو دارد [Sigurd Grava, 2001]. بنابراین در نظر گرفتن این پارامتر در تابع هدف و بهینه‌سازی آن بسیار لازم و مؤثر می‌باشد. از طرفی احداث مسیرهای مترو در زیر معابر موجود به دلیل نیاز نداشتن به تملک مسیرهای یک شبکه مترو منطبق بر معابر بالاسری باشد، هزینه سرمایه‌گذاری کمتری را به همراه خواهد داشت.

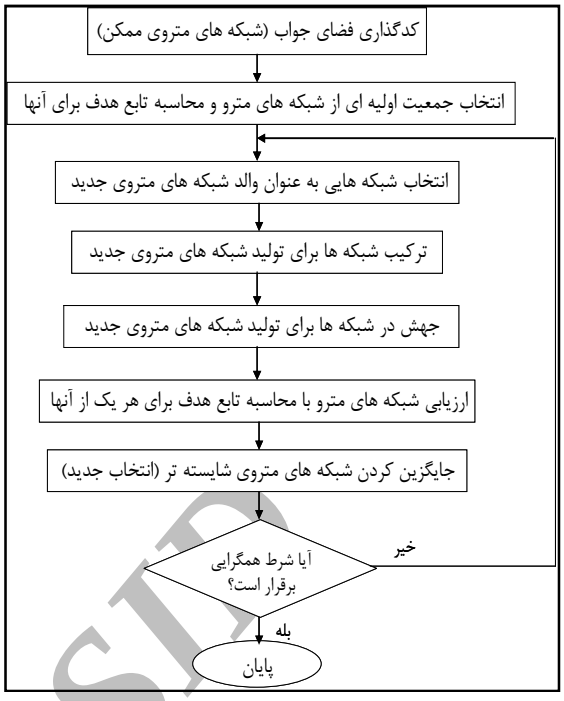
برای دست‌یابی به این دو هدف یعنی طول بهینه شبکه مترو و انطباق هرچه بیشتر مسیرهای شبکه مترو با شبکه معابر شهری، در تابع هدف کمینه‌سازی اختلاف بین طول کل شبکه (مجموع طول کمان‌های شبکه) با مجموع طول کوتاهترین مسیرهای شبکه معابر شهری متناظر با کمان‌های شبکه، مورد توجه قرار گرفته است. آشکار است هرچه این تفاوت کمتر باشد، طول بیشتری از مسیر مترو، منطبق بر شبکه معابر بوده و هزینه تملک مسیر کمتر خواهد بود.

پارامتر دیگری که در تابع هدف از آن استفاده شده است، زمان کل سفرها در شبکه مترو می‌باشد. یکی از مهم‌ترین عوامل جذب مسافر و کارآیی شبکه مترو، زمان سفر کمتر در آن است. بنابراین، بهینه‌سازی آن در بالا بردن کارآیی و مطلوبیت شبکه مترو، بسیار تأثیرگذار است. به این منظور، با فرض ثابت و معلوم بودن ماتریس تقاضا تخصیص صورت می‌گیرد.

همچنین، هرچه شبکه مترو سفرهای بیشتری را بین مبدأ و مقصد سفرهای شهری پوشش دهد، در کاستن از ترافیک سطحی و جذب مسافر، موفق‌تر خواهد بود. در نتیجه هرچه میزان تقاضای سفر پوشش داده نشده بیشتر باشد، شبکه ناکارآمدتر خواهد بود. بنابراین، در تابع هدف کمینه‌سازی تقاضای سفر پوشش داده نشده، مد نظر قرار گرفته است.

در مدل پیشنهادی برای ایجاد شبکه از مسیرهای تولید شده در گام تولید مسیر و بهینه‌سازی آن، از الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود. روند کلی کار به این ترتیب است که الگوریتم ژنتیک با ترکیب مسیرهای به دست آمده از الگوریتم تولید مسیر، شبکه‌ای از مسیرهای مترو ایجاد کرده است و تابع هدف را برای هر یک از آنها حساب می‌کند و بعد از تعداد تکراری مشخص، بهترین شبکه یافت شده را معرفی می‌کند. شکل (۲) مراحل مختلف تولید شبکه‌های مترو و انتخاب مناسب‌ترین شبکه توسط الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد.

Archive of SID
www.SID.ir



شکل۲. مراحل مختلف تولید شبکه‌های مترو و انتخاب مناسب‌ترین آنها توسط الگوریتم ژنتیک

برنامه‌نویسی این الگوریتم در محیط نرم‌افزار MATLAB انجام شده است. داده‌های ورودی به این الگوریتم شامل مختصات ایستگاه‌های کاندید (x_{s_i}, y_{s_i})، خطوط تولید شده توسط برنامه تولید مسیر و ماتریس فواصل میان ایستگاه‌ها روی شبکه معابر شهری است. همچنین در خروجی برنامه نیز، شبکه مترو برتر می‌باشد.

۸- مطالعه موردی

شبکه در نظر گرفته شده برای مطالعه موردی، شبکه شهر مشهد مقدس می‌باشد. این شبکه دارای ۱۴۱ ناحیه ترافیکی، ۸۶۰ گره و ۱۱۸۲ کمان می‌باشد [پژوهشکده حمل و نقل دانشگاه شریف، ۱۳۷۳]. نمونه فیزیکی گره‌های شبکه، تقاطعات و نمونه فیزیکی کمان‌های آن، قطعه‌ای از مسیری که مابین دو گره قرار گرفته است، می‌باشد.

از میان گره‌های موجود در شبکه معابر، ۱۰۵ گره به عنوان نقاطی که پتانسیل ایجاد ایستگاه دارند، در نظر گرفته شدند. ۸ گره به عنوان ایستگاه‌های انتهایی، ٤ گره به عنوان ایستگاه اجباری و مابقی به عنوان مجموعه ایستگاه‌های میانی انتخاب شدند. در گام بعدی تعداد ۲۵۵ مسیر توسط برنامه تولید مسیر به‌دست آمد.

همچنین، برای ایجاد و طراحی شبکه ابتدا پارامترهای الگوریتم ژنتیک مربوطه مورد تحلیل حساسیت قرار گرفت و مقادیر بهینه احتمال ترکیب و جهش، همچنین اندازه جمعیت و تعداد تکرار انتخاب شدند.

۸-۱- تعیین مقادیر بهینه احتمال جهش و ترکیب

ترکیب میان دو عضو جمعیت بر اساس احتمال ترکیب، صورت می‌گیرد و مقدار آن تعیین‌کننده تعدادی از جمعیت می‌باشد که عمل ترکیب روی آنها انجام شده است. عمل جهش نیز برای حفظ پراکندگی جمعیت و جلوگیری از تغییر نکردن برخی از اعضای جمعیت یا پارامترهای جواب در تعداد نسل‌های زیاد می‌باشد. تعیین مقادیر مناسب برای احتمال ترکیب P_c و احتمال جهش P_m سبب افزایش کیفیت تمرکزدهی و تنوع بخشی به جستجوی الگوریتم ژنتیک در فضای جواب می‌شود.

نتیجه تحلیل حساسیت این دو پارامتر به صورت دو بعدی در شکل (۳) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده شد، بهترین مقدار تابع (کمینه‌ترین) هدف به ازای $P_m = 0.06$ و $P_c = 0.5$ حاصل می‌گردد.

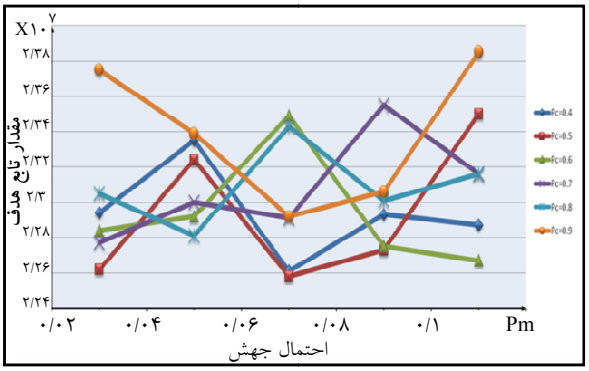
۸-۲- تعیین مقادیر بهینه اندازه جمعیت و تعداد تکرار

هر چقدر میزان اندازه جمعیت بیشتر باشد، امکان یافتن جواب بهینه در تعداد تکرار (نسل) کمتری میسر خواهد بود ولی با افزایش اندازه جمعیت، زمان صرف شده در هر تکرار برای محاسبه تابع هدف، برای اعضای جمعیت (شبکه‌ها) نیز افزایش خواهد یافت. همچنین، تعیین تعداد تکرار مناسب علاوه بر تضمین رسیدن به جواب بهینه سبب صرفه‌جویی زمانی نیز خواهد شد. بنابراین لازم است برای تعیین مقدار بهینه این دو پارامتر، تحلیل حساسیت آنها با هم صورت گیرد.

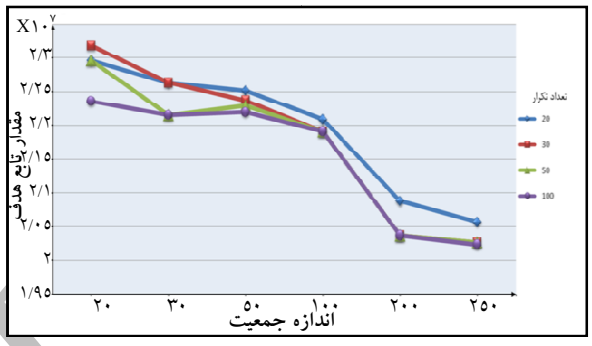
به این منظور، برنامه با توجه به مقادیر بهینه به دست آمده برای احتمال جهش و احتمال ترکیب یعنی $P_m = 0.06$ و $P_c = 0.5$، برای ترکیبات مختلفی از اندازه جمعیت و تعداد تکرار، چندین مرتبه اجرا شده است و میانگین مقادیر به دست آمده برای هر ترکیب، ملاک قضاوت قرار گرفته است.

نتیجه تحلیل حساسیت دو پارامتر اندازه جمعیت و تعداد تکرار در شکل (٤) و میانگین زمان صرف شده برای رسیدن به جواب نهایی در شکل (۵)، ارایه شده است.

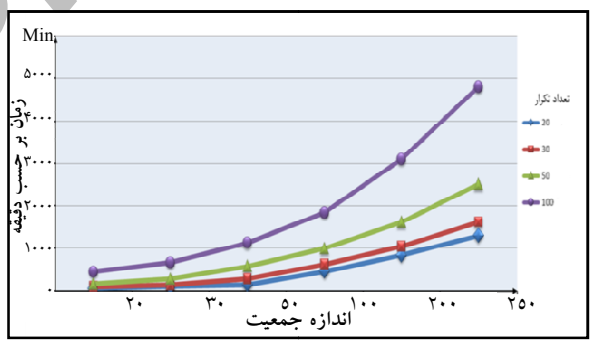
Archive of SID
www.SID.ir



شکل۳. نتیجه تحلیل حساسیت دو پارامتر احتمال ترکیب P_c و احتمال جهش P_m به صورت دو بعدی

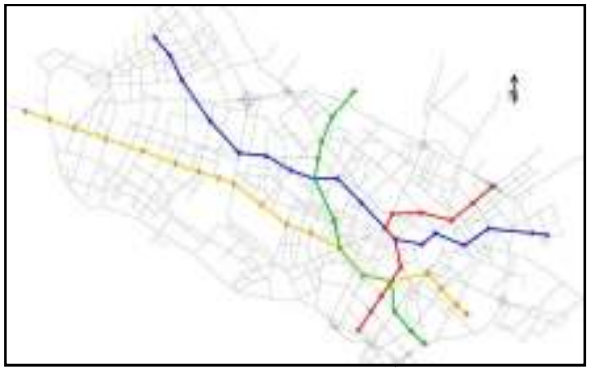


شکل٤. تحلیل حساسیت دو پارامتر اندازه جمعیت و تعداد تکرار



شکل۵. میانگین زمان صرف شده برای تحلیل حساسیت دو پارامتر اندازه جمعیت و تعداد تکرار

همان‌طور که در شکل‌های بالا مشاهده می‌شود، هرچه اندازه جمعیت بیشتر شود علاوه بر افزایش زمان صرف شده در نهایت جواب بهینه‌تری نیز به‌دست می‌آید. این نتیجه، با توجه به اینکه الگوریتم ژنتیک با اندازه جمعیت بالاتر و تعداد تکرار بیشتر، فضای بزرگ‌تری را مورد جستجو قرار می‌دهد، منطقی به نظر می‌رسد. با توجه به شکل (٤) جواب‌ها برای تعداد تکرارهای بیشتر از ۳۰ و اندازه جمعیت‌های بالا همگرا می‌شود. در نتیجه اندازه جمعیت و تعداد تکرار بهینه به ترتیب برابر با ۲۵۰ و ۳۰ می‌باشد. شبکه پیشنهادی مترو مشهد حاصل از روش این تحقیق، در شکل (٦) نشان داده شده است. شبکه متروی خروجی برنامه دارای ٤ مسیر، ۵۱ ایستگاه، ۵۲ کمان و به طول ۵۵/۰۸۷ کیلومتر می‌باشد.



شکل٦. شبکه پیشنهادی مترو مشهد حاصل از روش این مطالعه

مسیرهای شبکه متروی حاصل، قطری بوده است و به دلیل گسترش در سطح شهر، پوشش سطحی مناسبی را ایجاد کرده‌اند. دو مسیر این شبکه مترو دارای امتداد شرقی- غربی می‌باشند که یکی در نیمه شمالی و دیگری در نیمه جنوبی شهر واقع شده‌اند. دو مسیر دیگر نیز تقریباً امتدادی شمالی- جنوبی دارند که یکی واقع در مناطق اصلی تولید و جذب سفرهای شهری، یعنی شرق مشهد واقع شده و دیگری با عبور از مرکز شهر، بین شمال و جنوب شرقی مشهد ارتباط برقرار می‌کند.

در شبکه متروی پیشنهادی، با توجه به اینکه تمامی خطوط یکدیگر را قطع کرده‌اند، ارتباط خوبی بین تمامی نقاط شبکه برقرار بوده و امکان انتقال بین مسیرها به سهولت میسر است. همچنین، شبکه متروی حاصل از روش پیشنهادی این پژوهش، دارای پوشش جمعیتی مناسبی می‌باشد. زیرا تراکم ایستگاه‌ها در نیمه شرقی مشهد که بافتی قدیمی و متراکم‌تر دارد، بیشتر است. این شبکه مترو با توجه به گسترش سطحی مناسب، پوشش جمعیتی خوب و داشتن چهار ایستگاه در چهار طرف حرم مطهر امام رضا (ع) دسترسی خوبی را برای زائران از تمامی مناطق مشهد فراهم می‌کند.

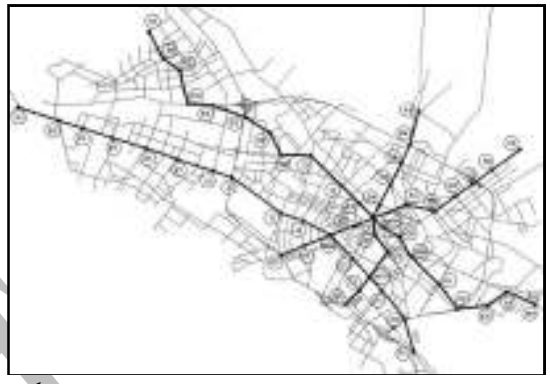
لازم به ذکر است، مسیرهای پیشنهادی در سطح این مطالعه کریدور کلی مسیر را نشان می‌دهد. تعیین مسیر قطعی هر خط در راستای تعیین شده، نیازمند مطالعه در جزئیات آنهاست. به این ترتیب، حسب مورد، به خاطر صلاحدیدها، ضرورت‌ها یا مسایل اجرایی ممکن است مسیر پیشنهادی در راستای مربوطه تا حدی جابه‌جا شود.

Archive of SID

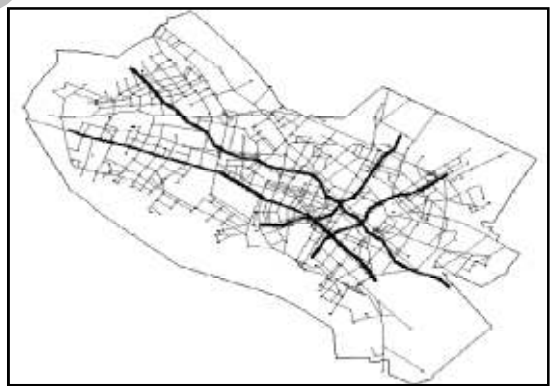
www.SID.ir

۹- اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی مدل پیشنهادی این پژوهش، مطالعه سیستم حمل و نقل سریع مشهد توسط پژوهشکده حمل و نقل دانشگاه شریف [پژوهشکده حمل و نقل دانشگاه شریف، ۱۳۸۲] و مدل ارایه شده در پایان‌نامه [محرابیان، وحید، ۱۳۸۲] مورد مقایسه قرار گرفت. شبکه‌های حاصل از این مطالعات در شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده شده است. نتایج به‌دست آمده نشان از عملکرد بهتر روش این پژوهش و طراحی شبکه‌ای با میزان تابع هدف بهتر (در حدود ۱۰ درصد) دارد [هاشمی، محسن، ۱۳۸۹].



شکل۷. شبکه متروی پیشنهادی پژوهشکده حمل و نقل دانشگاه شریف [پژوهشکده حمل و نقل دانشگاه شریف، ۱۳۸۲]



شکل۸. شبکه متروی پیشنهادی مطالعه محرابیان [وحید محرابیان،۱۳۸۲]

۱۰- نتیجه‌گیری

استفاده از روش‌های ابتکاری و بهینه‌سازی ترکیبی در طراحی شبکه‌های مترو، در مقایسه با روش‌های رایج می‌تواند منجر به طراحی شبکه‌ای مناسب در زمانی به مراتب کمتر گردد. همچنین استفاده از پارامترها، محدودیت‌ها و فرضیات کافی و صحیح می‌تواند کارآیی روش‌های ابتکاری را افزایش دهد و خروجی مطلوب‌تری را حاصل نماید.

روش ابتکاری این تحقیق، طراحی شبکهٔ مترو را در سه مرحله انجام می‌دهد. در مرحله نخست، گره‌هایی از شبکه خیابانی به عنوان نقاطی که پتانسیل احداث ایستگاه‌های شبکه مترو را دارند، در نظر گرفته می‌شوند. در مرحله دوم توسط الگوریتم پیشنهادی تولید مسیر و با توجه به شرایط و محدودیت‌های اعمال شده، تعداد زیادی از مسیرهای ممکن تولید می‌شود. در مرحله آخر، از طریق الگوریتم پیشنهادی ایجاد و طراحی شبکه مترو، شبکه‌هایی از مسیرهای تولید شده در مرحله قبل، ایجاد و با توجه به تابع هدف در نظر گرفته شده، مناسب‌ترین شبکه انتخاب می‌شود. از ویژگی‌های مدل ارایه شده، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- صرف زمان بسیار کمتر و نیاز نداشتن به فعالیت گروهی نسبت به روش‌های رایج.
- ارایه پاسخی بهینه برای تابع هدف مد نظر در طراحی شبکه مترو.
- طراحی مسیرهایی که از لحاظ فرم هندسی فاقد پیچش، شکستگی‌های تند و تغییرات راستای پیاپی هستند.
- استفاده از پارامترهای بیشتر و مؤثرتر در تابع هدف در مقایسه با سایر روش‌های ابتکاری.
- ساخت تعداد زیادی سناریو (شبکه‌های مترو) و بهینه‌یابی آنها

همچنین مدل پیشنهادی در این تحقیق بر خلاف سایر روش‌های ابتکاری که به مسیریابی یک خط مترو پرداخته‌اند، شبکه‌ای از خطوط مترو را طراحی می‌کند. در روش ارایه شده تعداد بسیار زیادی شبکه ایجاد و مورد ارزیابی قرار می‌گیرند که می‌توان از آن برای سناریوسازی نیز بهره جست. به علاوه از این مدل می‌توان جهت ارزیابی شبکه موجود و چگونگی توسعه مناسب آن در آینده استفاده کرد. استفاده از الگوریتم ژنتیک در طراحی شبکه مترو، ارایه الگوریتم ابتکاری تولید مسیرهای مترو و دخالت ندادن قضاوت‌های شخصی در روند طراحی خطوط و شبکه مترو نیز از دیگر نوآوری‌های این پژوهش می‌باشد.

۱۱- پی‌نوشت‌ها

1. Mass Rapid Transit
2. Operating Research
3. Heuristic
4. Decesare
5 .Current
6. Maximum Covering Shortest Path
7. Median Shortest Path

Archive of SID
www.SID.ir

8. Dufourd
9. Tabu Search
10. Bruno
11. Uncovered Demands
12. Dimension

۱۲- مراجع

- پژوهشکده حمل و نقل دانشگاه شریف (مرکز مطالعات و تحقیقات حمل و نقل) (۱۳۷۳)، مطالعات جامع حمل و نقل مشهد، مطالعات مبدأ ـ مقصد.
- پژوهشکده حمل و نقل دانشگاه شریف (مرکز مطالعات و تحقیقات حمل و نقل) (۱۳۸۰)، مطالعه سیستم حمل و نقل سریع شهر شیراز.
- پژوهشکده حمل و نقل دانشگاه شریف (مرکز مطالعات و تحقیقات حمل و نقل) (۱۳۸۲)، مطالعه سیستم حمل و نقل سریع شهر مشهد.
- محرابیان، وحید (۱۳۸۲) "روشی ابتکاری برای مسیریابی قطار سبک شهری"، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشکدهٔ عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.
- هاشمی، محسن (۱۳۸۹) "مدل طراحی شبکه خطوط مترو با استفاده از الگوریتم ژنتیک" پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشکدهٔ عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

- Angel Marin, Ricardo Garcia-Rodenas, (2009) "Location of infrastructure in urban railway networks", Computers & Operations Research, Vol. 36, Issue 5, pp. 1461-1477.
- Current, J. R., ReVelle, C. S., Cohon, J., (1985) "The Maximum Covering/Shortest Path Problems: A Multiobjective Network Design and Routing Formulation", European Journal of Operational Research, Vol. 21, Issue 2, pp. 189-199.
- Gilbert Laporte a, Juan A. Mesa, Francisco A. Ortega, (2000) "Optimization Methods for the Planning of Rapid Transit Systems", European Journal of Operational Research. Vol. 122, Issue 1, pp. 1-10.
- Gilbert Laporte, Angel Marin, Juan Mesa, (2007) "An Integrated Methodology for the Rapid Transit Network Design Problem", Railway Optimization, Algorithmic Methods for Railway Optimization, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 4359, pp. 187-199.
- Giuseppe Bruno, Gianpaolo Ghiani, Gennaro Improta, (1998) "A Multi-Modal Approach to the Location of a Rapid Transit Line", European Journal of Operational Research, Vol. 104, Issue 2, pp. 321-332.
- Giuseppe Bruno, Michel Gendreau, Gilbert Laporte, (2002) "A Heuristic for the Location of a Rapid Transit Line", Computers & Operations Research, Vol. 29, Issue 1, pp. 1-12.
- Helene Dufourd, Michel Gendreau, Gilbert Laporte, (1996) "Locating a Transit Line Using Tabu Search", Location Science, Vol. 4, Issues 1-2, pp. 1-19.
- Jienky Synn, (2005) "Systems Approach to Metro Network Design", Presented to the Faculties of the University of Pennsylvania in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy.
- PPK Environment & Infrastructure Pty Ltd, (1999) Esfahan mass rapid transit study, Concord west, Australia.
- Sigurd Grava, (2001) "Urban Transportation System, Choice for Communities", NewYork, McGraw-Hill.
- Vokan Vuchic, (2004) "Urban Transit, Operation Planning and Economy", Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons.

Archive of SID

www.SID.ir