

## ارائه روشی برای اصلاح شبکه خطوط اتوبوس رانی در شبکه‌های شهری

(مطالعه موردی: شهر مشهد)

یاسر تقی‌زاده (مسئول مکاتبات)، دانشجوی دکتری برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، شرکت مهندسی مشاور طرح و تدبیر طابران، مشهد، ایران

**E-mail: info@tabaranco.ir**

علی‌اصغر نیشابوری، کارشناس ارشد الهیات و معارف اسلامی، سازمان اتوبوسرانی شهر مشهد، مشهد، ایران

مرتضی چایچی مطلق، کارشناس ارشد برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، سازمان اتوبوسرانی شهر مشهد، مشهد، ایران

سروش صدرائی، کارشناس ارشد برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، سازمان اتوبوسرانی شهر مشهد، مشهد، ایران

### چکیده

مهم‌ترین مسئله‌ای که باید هم‌زمان با توسعه شهرها در نظر گرفته شود، طراحی و اصلاح شبکه خطوط حمل‌ونقل همگانی است که مهم‌ترین بخش آن، طراحی شبکه خطوط اتوبوس‌رانی است. در شهر مشهد، ایجاد خطوط مترو و BRT در شبکه شهری و همچنین رشد جمعیت، باعث تغییرات اساسی در الگوی سفرهای شهری شده است و لذا اصلاح شبکه خطوط اتوبوس‌رانی امری ضروری است. روش‌هایی که تا به امروز برای طراحی شبکه اتوبوس‌رانی ارائه شده‌اند، کمتر به جنبه اجرایی توجه نموده‌اند و پیاده‌سازی آن‌ها در شبکه‌های واقعی و بزرگ‌مقیاس بسیار زمان‌بر است. هدف اصلی این مطالعه، ارائه روشی اجرایی و کاربردی برای طراحی شبکه اتوبوس‌رانی شهری است. روش این مطالعه ترکیبی از روش‌های ابتکاری و فرا ابتکاری بوده و مبتنی بر الگوریتم ژنتیک است. به‌منظور به‌کارگیری این روش حل و امکان پیاده‌سازی آن برای شهر مشهد، از برنامه‌نویسی در محیط ++C بهره گرفته شد که امکان طراحی سریع شبکه اتوبوس‌رانی را برای اهداف و محدودیت‌های مختلف فراهم می‌آورد. خروجی و نتایج این روش برای شهر مشهد استخراج شد و شبکه بهینه اتوبوس‌رانی با شبکه موجود مقایسه گردید. نتایج نشان داد که پوشش تقاضا و سایر شاخص‌های عملکردی در شبکه اتوبوس‌رانی پیشنهادی، بهبود قابل‌توجهی نسبت به شبکه وضع موجود دارد.

واژه‌های کلیدی: طراحی شبکه اتوبوس‌رانی، الگوریتم ژنتیک، شبکه بهینه، پوشش تقاضا

## ۱. مقدمه و تعریف مسئله

در شهرهای بزرگ به دلایل مختلفی نیاز به طراحی مجدد و اصلاح شبکه اتوبوس‌رانی است. به‌عنوان مثال، راه‌اندازی خطوط BRT یا قطار شهری در یک شهر بزرگ، الگوی سفرها را کاملاً تغییر خواهد داد که در نتیجه نیاز به بازطراحی شبکه اتوبوس‌رانی خواهد بود. این شرایط در شهر مشهد به‌وضوح قابل مشاهده است. طراحی شبکه اتوبوس‌رانی شهری اولین مرحله از مراحل چهارگانه برنامه‌ریزی در سیستم‌های اتوبوس‌رانی شهری است (مراحل بعد به ترتیب زمان‌بندی، تخصیص ناوگان و تخصیص خدمه است). اهمیت این مرحله بسیار بالاست چراکه تأثیر مستقیم بر سایر مراحل و روند ارائه خدمات دارد.

در زمینه طراحی شبکه اتوبوس‌رانی مطالعات متعددی انجام شده است. سدر و ویلسون یک روش حل دوسطحی برای مسئله طراحی شبکه اتوبوس‌رانی پیشنهاد داده‌اند که پارامترهای زمان سفر، تعداد تغییر خط و حجم ناوگان موردنیاز کمینه می‌شود. در دهه ۹۰ سه مطالعه مهم توسط باج و مهمسنی انجام شد که آن‌ها را می‌توان شاخص‌ترین مطالعات این دهه به شمار آورد. در مطالعه اول، یک روش ابتکاری برای حل مسئله طراحی شبکه اتوبوس‌رانی شهری تدوین شده و کمینه کردن مجموع وزن‌دار حجم ناوگان و زمان سفر از اهداف مهم طراحی است. در مطالعه دوم یک روش ابتکاری سریع‌تر برای حل مسئله طراحی شبکه معرفی شده که بر روی شبکه مندل آزمایش و نتایج مثبت آن ارائه شده است. در مطالعه سوم فرآیندی برای اصلاح شبکه با اعمال فیلترهای مختلف بدون استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری معرفی شده است.

مطالعه پاتنیک و همکاران در سال ۱۹۹۸ را می‌توان آغاز به‌کارگیری روش‌های فرا ابتکاری در طراحی شبکه اتوبوس‌رانی واقعی دانست. آن‌ها جزئیات بیشتری از شرایط واقعی را وارد مسئله طراحی شبکه اتوبوس‌رانی شهری کردند و با به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک، مسئله را باهدف کمینه کردن مجموع وزن‌دار حجم ناوگان و زمان سفر کل حل نمودند. سدر نیز در یک تابع

هدف کاربردی را به‌صورت چندهدفه معرفی می‌کند که در یک ترم آن حجم ناوگان و درترم دیگر آن مجموع وزن‌دار زمان انتظار، ظرفیت استفاده‌نشده سیستم اتوبوس‌رانی و انحراف از کوتاه‌ترین مسیر برای سفرها، به چشم می‌خورد.

از این زمان به بعد (سال ۲۰۰۰ به بعد)، بخش اعظم مطالعات انجام‌شده، مسئله نسبتاً کاملی را تعریف نموده و با استفاده از روش‌های فرا ابتکاری مختلف، به حل آن می‌پرداختند؛ یا با ایجاد یک الگوریتم ابتکاری، مسئله طراحی شبکه اتوبوس‌رانی را حل می‌نمودند. مطالعات بسیاری به استفاده از روش‌های فرا ابتکاری برای طراحی شبکه روی آوردند که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به استفاده از الگوریتم ژنتیک، الگوریتم تجمع مورچگان، الگوریتم شبیه‌سازی سرد و گرم کردن اشاره کرد. تعدادی از مطالعات نیز مانند فن و مکمل، سدر و اسدی، سپیریانی و همکاران از ترکیب دو روش حل ابتکاری و فرا ابتکاری در حل مسئله طراحی خطوط شبکه حمل‌ونقل همگانی استفاده کردند.

لی و ووچیک یک روش حل تکراری برای مسئله طراحی شبکه معرفی کردند که تابع هدف آن به دنبال کمینه کردن زمان سفر در شبکه تعریف می‌شود. سدر و اسدی نارضایتی کاربران شبکه را به‌صورت زمانی که برای سفر خود در شبکه صرف می‌کنند، تعریف کرده‌اند. این زمان شامل زمان پیاده‌روی، زمان انتظار، زمان تعویض خط و زمان داخل اتوبوس است. سپیریانی و همکاران از یک روش ابتکاری برای ایجاد مجموعه‌ای از مسیرهای نامزد برای حمل‌ونقل همگانی استفاده کردند و در ادامه به کمک روش فرا ابتکاری از میان این مسیرها، مسیر بهینه و تواتر عبوری آن‌ها را انتخاب می‌کنند. ماتونه و ارکهارت به ایجاد اصلاحاتی در روش حل تولید و توسعه مسیر پیشنهادی باج و مهمسانی پرداختند. این محققین در مطالعه دیگر خود، مسئله طراحی شبکه اتوبوس‌رانی را به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه با رویکرد کمینه کردن هزینه استفاده‌کننده (بر اساس زمان داخل وسیله نقلیه، زمان انتظار و تعداد تعویض خط) در

## ارائه روشی برای اصلاح شبکه خطوط اتوبوس‌رانی در شبکه‌های شهری (مطالعه موردی: شهر مشهد)

مهم در بررسی ساختار شبکه، درصد پوشش تقاضا با یک تغییر خط است. آن‌ها با بررسی داده‌های مربوط به سه دوره شبکه اتوبوس‌رانی بارسلونا به این نتیجه رسیدند که با وجود افزایش این شاخص از ۲۶ درصد به ۵۷ درصد، میزان جذب مسافر نیز افزایش داشته است.

در مطالعات داخلی نیز مسئله طراحی شبکه اتوبوس‌رانی شهری به‌دفعات مورد بررسی قرار گرفته که به مهم‌ترین آن‌ها اشاره می‌شود. رنجبری در پایان‌نامه خود مسئله طراحی شبکه اتوبوس‌رانی شهری با تقاضای الاستیک را با به‌کارگیری یک روش ابتکاری حل کرد و بهزاد نیز مسئله را با به‌کارگیری الگوهای نظریه گراف حل نمود. چگینی و همکاران نیز باهدف پیشینه‌سازی رضایت استفاده‌کنندگان و با به‌کارگیری الگوریتم کلونی مورچگان مسئله طراحی شبکه اتوبوس‌رانی را حل نمودند. افندی‌زاده و همکاران نیز مسئله طراحی شبکه را با به‌کارگیری روش جستجوی ممنوعه حل نمودند. همچنین افندی‌زاده و افیونیون در مسئله را با به‌کارگیری روش شاخه و کران حل کردند.

با مرور مطالعات در زمینه طراحی شبکه اتوبوس‌رانی مشخص گردید که توابع هدف مختلفی در نظر گرفته شده و متناسب با شرایط مدل، روش‌های متنوعی برای حل مسئله پیشنهاد شده است. پارامترهایی همچون زمان سفر کل شبکه، پوشش تقاضا، صندلی خالی ساعت، زمان انتظار در کل شبکه، رفاه اجتماعی، هزینه کل شبکه و هزینه اپراتور در توابع هدف مطالعات استفاده شده است. علیرغم مطالعات انجام گرفته تا به امروز، اجرایی بودن شبکه‌های خطوط اتوبوس‌رانی که حاصل به‌کارگیری روش‌های موجود بوده است، تضمین شده نیست و لذا طراحی‌های جدید عمدتاً سعی بر در نظر گرفتن شرایط واقعی را دارند. در این مقاله با توجه به این مسئله مهم و هدف مطالعه که طراحی شبکه اتوبوس‌رانی در مقیاس بزرگ است، ابتدا در بخش دوم تعریف مسئله متناسب با شرایط شهر مشهد انجام شده و در ادامه روش حل مبتنی بر الگوریتم ژنتیک در بخش سوم ارائه خواهد شد.

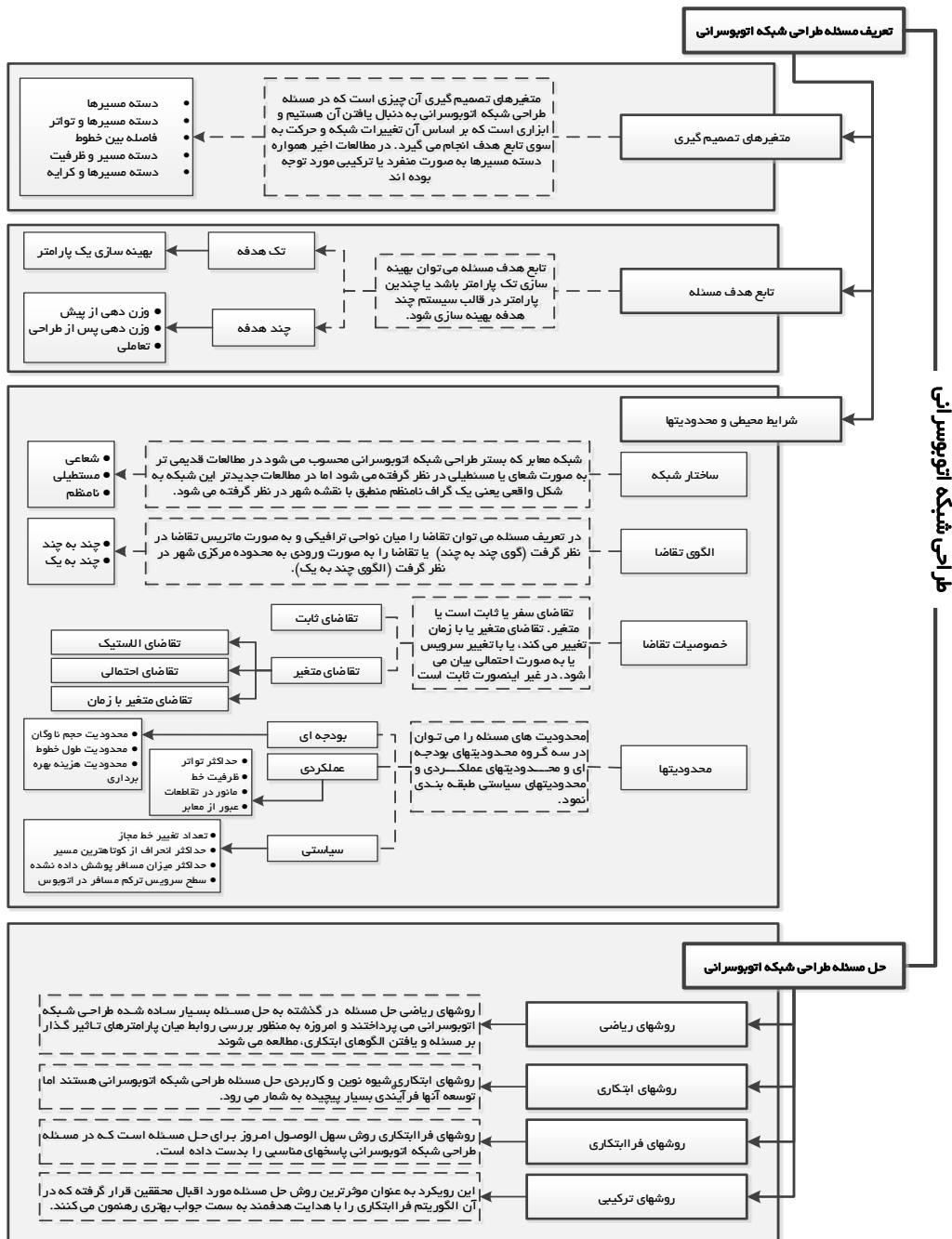
تابع هدف اول و کمینه کردن تعداد ناوگان در تابع هدف دوم مطرح کرده‌اند.

چپو و همکاران مسئله طراحی شبکه اتوبوس‌رانی را به‌صورت یک تابع دو هدفه باهدف کمینه کردن هزینه استفاده‌کننده و هزینه اجتماع مدل کرده‌اند. در مطالعات، امیری پور و همکاران یک روش ترکیبی برای مسئله طراحی شبکه اتوبوس با تغییرات تقاضای فصلی زیاد، ارائه کرده‌اند. رنجبری مسئله طراحی شبکه اتوبوس‌رانی را با فرض تقاضای الاستیک مدل کرده و روشی برای حل آن ارائه کرده است. چو، مسیر خطوط و زمان‌بندی را به‌صورت یک الگوریتم تکرارشونده برای سیستم‌های اتوبوس شهری بهینه کرده است. ایده کلیدی فرمول‌بندی مدل و الگوریتم حل مسئله، در نظر گرفتن جدول زمان‌بندی حرکت اتوبوس‌ها در کنار مسیر و نحوه اعزام به‌عنوان متغیر تصمیم‌گیری است. لاپورته و همکاران زمان‌بندی خطوط، تخصیص ناوگان و انتخاب مسیر توسط کاربران را به‌صورت هم‌زمان در مسئله طراحی شبکه در نظر گرفته‌اند.

سوتو و همکارانش استراتژی ایستگاه-محدود را در مسئله طراحی شبکه وارد نمودند. آن و لو یک مدل دوفازه احتمالی برای حل مسئله طراحی شبکه حمل‌ونقل همگانی در شرایط عدم قطعیت تقاضا ارائه کرده‌اند. برای حل مدل از الگوریتم فرا ابتکاری ژنتیک استفاده شده است. در مطالعه، فیلباوم و همکاران رویکرد طراحی شبکه خطوط حمل‌ونقل همگانی را در چهار حالت مستقیم و بدون تغییر خط، سریع و السیر، سیستم هاب و سیستم فیدری بررسی کرده‌اند. بوبا و لی مدلی برای طراحی هم‌زمان شبکه خطوط و میزان تواتر موردنیاز معرفی نموده‌اند. در مطالعه یک رویکرد دیفرانسیلی پیشرفته برای حل مسئله طراحی شبکه پیشنهاد شده که به‌طور هم‌زمان مجموعه مسیرهای حمل‌ونقل همگانی و سرفاصله متناسب با آن را با حداقل کردن هزینه مسافر و تقاضای پوشش داده نشده محاسبه می‌کند. در مطالعه، بادیا و همکارانش به بررسی تأثیر ساختار شبکه اتوبوس‌رانی بر روی جذب تقاضا پرداخته‌اند. یکی از پارامترهای

این میان محدودیت تواتر حداقل و حداکثر، محدودیت طول خط و محدودیت تعداد ناوگان مهم‌ترین این محدودیت‌ها می‌باشند. مراحل طراحی شبکه اتوبوس‌رانی که شامل تعریف متغیرهای تصمیم‌گیری، تابع هدف، شرایط محیطی، محدودیت‌های مسئله، روش حل و پیاده‌سازی و بازبینی مجدد شبکه است، در شکل (۱) نمایش داده شده است.

در نهایت، نتایج طراحی شبکه اتوبوس‌رانی در شهر مشهد و مقایسه آن با وضع موجود در بخش چهارم ارائه می‌شود. طراحی شبکه اتوبوس‌رانی مسئله‌ای است که طی آن مجموعه خطوط اتوبوس‌رانی به همراه تواتر موردنیاز در آن تعیین می‌شود (متغیرهای تصمیم‌گیری خطوط و تواتر هستند). در این مسئله مجموعه‌ای از محدودیت‌ها نیز باید در نظر گرفته شوند که در



شکل ۱. چارچوب مسئله طراحی شبکه اتوبوس‌رانی

## ارائه روشی برای اصلاح شبکه خطوط اتوبوس رانی در شبکه های شهری (مطالعه موردی: شهر مشهد)

شایان ذکر است که برای ترکیب کردن این پارامترها در تابع هدف، باید شرط استقلال پارامترها را نیز در نظر گرفت. پارامترهایی که تا حد زیادی به یکدیگر وابسته باشند، نباید در یک تابع هدف باهم ترکیب شوند. بدین منظور در این مطالعه، وابستگی پارامترها در روند ترکیب آن‌ها در نظر گرفته شد و سپس توابع هدف گوناگونی برای شهر مشهد تشکیل و آزمایش شد. در نهایت تابع هدف ذیل انتخاب گردید و مسئله تعریف شده در این مقاله نیز به شرح ذیل فرموله سازی شد.

در اولین گام اهداف طراحی شبکه اتوبوس رانی باید مشخص شوند. بر اساس مطالعات گذشته، دسته بندی ذیل در اهداف مورد استفاده در ادبیات مسئله مشاهده می شود:

- ۱- حداکثر کردن سود کاربر
- ۲- حداقل کردن هزینه اپراتور
- ۳- حداکثر کردن رفاه اجتماعی
- ۴- حداکثر کردن ظرفیت
- ۵- حفظ محیط زیست و کاهش مصرف انرژی
- ۶- بهینه کردن پارامتر مستقل

$$\min z = C_1 \sum_{i,j \in R} d_{ij} \cdot t_{ij} + C_2 \sum_{k \in K} f_k \cdot t_k + C_3 \cdot \alpha \cdot D_u$$

زمان سفر	سرویس	جریمه تقاضای
کل شبکه	مورد نیاز	پوشش داده
		نشده

*s.t.*:

$$f_{\min} \leq f_k \leq f_{\max}$$

$$t_{i,j} < \xi T_{i,j}^{SP}$$

$$L_{\min} < L_k < L_{\max}$$

$$D_u < D_u^{\max}$$

$L_k$ : طول خط اتوبوس  $k$

این تابع به دنبال کمینه کردن کل زمان سفر - مسافر در شبکه است، درحالی که شاخص صندلی - مسافر نیز می بایست کمینه شود. همچنین در این تابع یک جریمه برای تقاضای پوشش داده نشده اعمال می شود.

پارامتر  $t_{ij}$  نشان دهنده زمان سفر بوده که شامل زمان انتظار، زمان داخل اتوبوس و زمان تغییر خط است. کمینه کردن این پارامتر (بخش اول تابع هدف) نیاز به ایجاد خطوط بیشتر در شبکه و افزایش اتصال نقاط به صورت مستقیم دارد؛ اما بخش دوم تابع هدف که سعی در کمینه کردن صندلی - مسافر دارد، اجازه نمی دهد که تعداد خطوط اتوبوس بی رویه افزایش یابد. به عبارتی بخش های اول و دوم این تابع هدف در تقابل با یکدیگر هستند و در نهایت در نقطه بهینه به تعادل می رسند. در بخش سوم نیز به تقاضای پوشش داده نشده جریمه وارد می شود تا شبکه های

$R$ : مجموعه گره های پوشش داده شده به وسیله خطوط با شروط

حداکثر تعداد انتقال مجاز و شعاع تحت پوشش ایستگاه ها

$K$ : مجموعه مسیرها

$d_{ij}$ : تقاضای بین دو گره  $i$  و  $j$  در ساعت اوج صبح،

$$i, j \in R$$

$t_{ij}$ : کوتاه ترین زمان سفر با اتوبوس بین دو گره  $i$  و  $j$  در ساعت

اوج صبح با لحاظ زمان انتظار،  $i, j \in R$

$f_k$ : تواتر خط  $k$ ،  $k \in K$

$t_k$ : زمان چرخه خط  $k$ ،  $k \in K$

$D_u$ : مجموع تقاضای پوشش داده نشده در ساعت اوج صبح

$\alpha$ : جریمه تقاضای پوشش داده نشده

$C_1$ ،  $C_2$  و  $C_3$ : ضرایب ارزش گذاری هزینه ها

$T_{i,j}^{SP}$ : زمان سفر کوتاه ترین مسیر بین  $i$  و  $j$

در ابتدا مجموعه مسیرهای نامزد (مجموعه مرجع) که متشکل از خطوط موجود، خطوط پیشنهادی متخصصین (کارشناسان سازمان اتوبوس‌رانی مشهد و افراد آشنا به شبکه موجود) و خطوط ایجادشده در الگوریتم کوتاه‌ترین مسیرها میان نقاط ترمینالی است، تشکیل می‌شود. بدون تشکیل مجموعه مرجع، امکان حل مسئله طراحی شبکه در شهرهای بزرگ مقیاس از لحاظ ریاضی به دلیل محذب بودن فضای جواب نیست.

بر اساس روند کلی الگوریتم ژنتیک، کروموزوم‌ها که همان شبکه‌های مختلف انتخاب‌شده از میان خطوط دارای پتانسیل انتخاب می‌شوند. در جمعیت اولیه کروموزوم‌ها به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند. تابع برازندگی که همان تابع هدف مسئله است برای کلیه کروموزوم‌ها محاسبه می‌شود. این محاسبه نیازمند انجام پروسه تخصیص مسافرتین به خطوط است که زمان‌برترین مرحله حل مسئله به شمار می‌رود. پس از محاسبه برازندگی هر کروموزوم یا شبکه مراحل ترکیب و جهش صورت گرفته و بر اساس نتایج به دست آمده نسل دوم ساخته می‌شود. بهترین کروموزوم موجود در هر نسل بدون هیچ‌گونه تغییر به نسل بعد منتقل می‌شود (نخبه‌گرایی). این روند آن‌قدر ادامه می‌یابد تا بهترین جواب در نسل‌های مختلف تغییر نکند. پیاده‌سازی این روش حل و الگوریتم بهینه‌سازی با برنامه‌نویسی در محیط ++C محقق گردید.

### ۳. تحلیل داده‌ها

شهر مشهد بیش از ۳ میلیون نفر جمعیت ساکن دارد و به دلیل داشتن زائرین بارگاه امام هشتم (ع) سالانه به‌طور تخمینی حدود ۲۰ میلیون مسافر به خود می‌بیند. شبکه اتوبوس‌رانی موجود شهر مشهد دارای ۱۳۵ خط و حدود ۱۷۰۰ دستگاه اتوبوس است. در روند طراحی، ابتدا یک تحلیل جامع بر خطوط موجود شهر مشهد صورت گرفت و وضعیت آن‌ها از دیدگاه عملکردی موردبررسی قرار گرفت.

برای ساخت مجموعه مرجع، ابتدا خطوط اتوبوس موجود شهر در سه دسته تقسیم‌بندی شدند. دسته اول خطوط پرمسافر، دسته فصلنامه مهندسی ترافیک/ سال بیست و سوم/ شماره ۹۴ / پاییز ۱۴۰۲

تهی (با خطوط بسیار کم) تابع هدف بهتری نداشته باشند. این تقاضای پوشش داده نشده شامل دو بخش است بخش اول تقاضای مربوط به آن‌گره‌هایی است که در شبکه نهایی خطی از آن‌ها عبور نکرده است، بخش دوم نیز آن دسته از گره‌هایی است که تقاضای آن‌ها در محدوده تغییر خط مجاز پوشش داده نشده است. به عبارتی در صورت نبود بخش سوم در این تابع هدف، شبکه‌های کوچکی برگزیده می‌شوند که هم‌زمان سفر کل در آن‌ها کمینه است و هم صندلی - مسافر و این در حالی است که تقاضای مسافران پوشش داده نشده است.

### ۲. روش پژوهش

در یک تقسیم‌بندی کلی می‌توان روش‌های طراحی و یا حل مسئله طراحی شبکه اتوبوس‌رانی را به دو دسته روش‌های تولید و انتخاب و روش‌های ساخت و بهبود تقسیم‌بندی کرد. در روش‌های تولید و انتخاب ابتدا یک مجموعه مرجع از خطوط ساخته می‌شود که در گام دوم از میان آن‌ها شبکه اتوبوس‌رانی با توجه به تابع هدفی که بر اساس اهداف ساخته شده است، انتخاب می‌شود. در فرآیند تولید مجموعه مرجع می‌توان از قضاوت مهندسی، روش‌های کوتاه‌ترین مسیر و برخی روش‌های ابتکاری استفاده نمود و در مرحله انتخاب از انواع الگوریتم‌های فرا ابتکاری بهره جست.

در روش ساخت و بهبود این‌گونه عمل می‌شود که ابتدا خط یا خطوط بر اساس یک الگوریتم که معمولاً بر پایه جریان تقاضا در شهر است ساخته شده و طی الگوریتم‌های بهبود به سمت تابع هدف از پیش تعیین‌شده هدایت‌شده و مسیرها اصلاح می‌شوند.

آنچه در ادبیات حمل‌ونقل در خصوص روش‌های بیان‌شده آمده است، در عمل می‌تواند به صورت ترکیبی مورد استفاده قرار گیرد. در طراحی شبکه اتوبوس‌رانی برای شهر مشهد اساس روش بر مبنای روش تولید و انتخاب بوده که یک فرآیند اصلاح خطوط نیز به آن اضافه شده است. همان‌طور که اشاره شد در روند بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک استفاده شد.

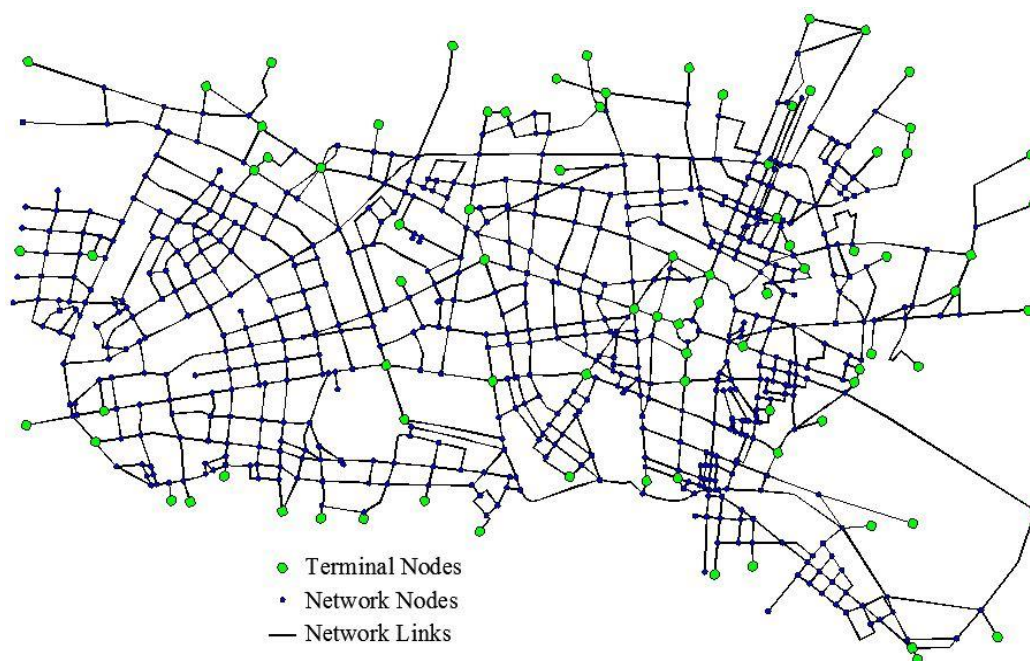
## ارائه روشی برای اصلاح شبکه خطوط اتوبوس‌رانی در شبکه‌های شهری (مطالعه موردی: شهر مشهد)

گردید که در شکل (۲) نمایش داده شده است. گراف مذکور متشکل از ۷۶۰ گره و ۱۱۹۰ کمان و ۱۲۰ نقطه ترمینالی است. این گراف به صورت کامل کدگذاری شده و به عنوان ورودی وارد مسئله می‌شود. بدین ترتیب هر گره یک شماره شناسایی دارد و هر کمان با شماره گره‌های ابتدا و انتهای آن و طول کمان قابل شناسایی است. هر خط اتوبوس نیز با سری گره‌های عبوری از آن خط مشخص می‌گردد.

ورودی دیگر مسئله، ماتریس تقاضای حمل و نقل همگانی (ماتریس OD) در ساعت اوج تقاضای شهر مشهد است که اطلاعات این ماتریس بر اساس مطالعات بازنگاری طرح جامع حمل و نقل این شهر برای اهداف مختلف با هماهنگی با سازمان حمل و نقل و ترافیک شهر مشهد دریافت شد.

دوم خطوطی با مسافر متوسط ولی با عملکرد مطلوب و دسته سوم خطوط کم مسافر بودند. کلیه خطوط موجود با احتمال انتخاب متفاوت در مجموعه مرجع وارد شدند. در ادامه، خطوط پیشنهادشده توسط کارشناسان سازمان و افراد آشنا به شبکه که مجموعاً ۲۰ خط بودند نیز در مجموعه مرجع قرار گرفت. در نهایت خطوط به دست آمده از اجرای الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر بین نقاط ترمینالی شهر نیز وارد مجموعه مرجع شدند (حدود ۳۰۰۰ خط). علاوه بر این، خطوط مترو و BRT به عنوان خطوطی با ظرفیت و سرعت بالا و به صورت ثابت در شبکه وارد شدند.

به منظور تشکیل گراف پایه برای طراحی شبکه اتوبوس‌رانی، تنها کمان‌هایی در نظر گرفته شد که قابلیت تردد اتوبوس در آن‌ها وجود دارد. بر این اساس، گراف شبکه معابر شهر مشهد استخراج



شکل ۲. گراف شبکه معابر شهر مشهد

شرح ذیل است:

۱. مبنای طراحی، ساعت اوج صبح است که منطبق بر ساعت اوج در ماتریس تقاضا است.
۲. تمامی کمانه‌ای شبکه به صورت دوطرفه عمل می‌کنند.
۳. گره‌ها به عنوان ایستگاه‌ها در نظر گرفته شده‌اند.

ضرایب تابع هدف نیز باید به عنوان ورودی به نرم‌افزار معرفی شوند. پس از تحلیل حساسیت بر روی ضرایب  $C_1$  و  $C_2$  به ترتیب مقادیر ۱،۵ و ۱ برای این ضرایب انتخاب شدند و مقدار  $C_3 \cdot \alpha$  برابر ۱۰۰ در نظر گرفته شده است. فرضیات به کار گرفته شده برای طراحی شبکه اتوبوس‌رانی شهر مشهد نیز به

امکان اجرا، مسیر نامناسب و سایر موارد حذف شدند و برخی تثبیت شدند. در این فرآیند، الگوریتم ژنتیک پس از حدود ۵۰۰ نسل همگرا شده و شبکه اتوبوس‌رانی منتخب تولید می‌شود. مقدار تابع برازندگی این شبکه اولیه ۲۶۰۴۶۴۰ است و دارای خصوصیات زیر است.

پس از این مرحله خطوط تثبیت‌شده به همراه سایر خطوط ثابت مجدداً وارد فرآیند طراحی شدند و این کار چند مرحله ادامه یافت تا شبکه نهایی استخراج شد. این شبکه بهترین مقدار تابع هدف را در خروجی‌های مختلف به خود اختصاص داده و از دیدگاه اجرایی نیز قابل اجرا است.

شبکه منتخب دارای ۱۶۵ خط اتوبوس است که از این تعداد، ۱۲۰ خط از شبکه وضع موجود انتخاب شده است. تغییرات شبکه پیشنهادی در مقایسه با شبکه وضع موجود این چنین بوده است که ۱۵ خط از خطوط شبکه وضع موجود حذف و ۴۵ خط جدید به آن اضافه شده است (۱۶۵=۱۵+۴۵). به عبارتی، می‌توان گفت که شبکه وضع موجود برای تبدیل شدن به شبکه پیشنهادی تنها نیازمند ۲۷ درصد تغییر است. لیست خطوط جدید پیشنهادشده در جدول (۱) ارائه شده است.

۴. زمان سفر در کمان‌ها ثابت و مستقل از جریان ترافیک است.

۵. ظرفیت هر دستگاه اتوبوس ۵۰ نفر فرض شده است (نشسته و ایستاده).

۶. زمان انتظار نصف سرفاصله خط مورد استفاده در نظر گرفته می‌شود.

۷. حداکثر تعداد تغییر خط برای هر سفر به جهت حفظ مطلوبیت شبکه ۲ تغییر خط در نظر گرفته شده است.

۸. حداقل تواتر برای خطوط اتوبوس ۳ اتوبوس بر ساعت فرض شده است.

۹. حداکثر شعاع پوشش برای هر ایستگاه خط ۳۵۰ متر منظور گردیده است.

پس از آماده‌سازی ورودی‌های نرم‌افزار (مجموعه مرجع، گراف شهر مشهد و ماتریس تقاضا)، با استفاده از الگوریتم ژنتیک، روند انتخاب مسیرها انجام و شبکه اولیه مشخص گردید. پس از استخراج این شبکه اولیه که پس از اجراهای متعدد و انجام تحلیل‌های گوناگون به دست آمد، خطوط به صورت تک‌تک مورد بررسی کارشناسی قرار گرفتند و برخی از آن‌ها به دلیل عدم

جدول ۱. لیست خطوط جدید در شبکه پیشنهادی

ردیف	مبدأ	مقصد	ردیف	مبدأ	مقصد
۱	بیمارستان قائم	میدان بوعلی	۲۴	انتهای صبا	بیمارستان قائم
۲	پایانه ذکریا	میدان فردوسی	۲۵	انتهای صبا	عباس‌آباد
۳	میدان آزادی	میدان شهدا	۲۶	فلکه آب	بلوار ذکریا
۴	بلوار فکوری	میدان فردوسی	۲۷	پایانه الهیه	هاشمیه ۹۱
۵	میدان فلسطین	خیابان خواجه ربیع	۲۸	میدان ترتیب	شهرک حجت
۶	پایانه امام رضا	میدان شهدا	۲۹	بلوار الهیه	باغ شاهنامه
۷	بلوار کامیاب	میدان خیام	۳۰	میدان ترتیب	کاشانی
۸	پایانه ذکریا	میدان فردوسی	۳۱	پایانه الهیه	هاشمیه ۹۱
۹	بلوار سرافرازان	بلوار سید رضی	۳۲	پایانه الهیه	بلوار امامت
۱۰	بلوار فکوری	میدان فردوسی	۳۳	پایانه الهیه	میدان فردوسی
۱۱	میدان فردوسی	میدان صیاد شیرازی	۳۴	وحدت	شهرآباد
۱۲	میدان بسیج	بلوار لادن	۳۵	بزرگراه رضوی	قلعه خیابان

ارائه روشی برای اصلاح شبکه خطوط اتوبوس‌رانی در شبکه‌های شهری (مطالعه موردی: شهر مشهد)

ردیف	مبدأ	مقصد	ردیف	مبدأ	مقصد
۱۳	بلوار سرافرازان	بزرگراه کلانتری	۳۶	بزرگراه رضوی	بلوار مصلی
۱۴	انتهای معلم	بلوار لادن	۳۷	حجت آباد	میدان خیام
۱۵	بلوار الهیه	بلوار صیاد شیرازی	۳۸	بلوار مصلی	قلعه خیابان
۱۶	انتهای تیمور	بلوار کامیاب	۳۹	فلکه آب	انتهای مهریز
۱۷	میدان جانباز	خیابان خواجه ربیع	۴۰	فلکه آب	بلوار توس
۱۸	میدان فلسطین	خیابان خواجه ربیع	۴۱	پایانه امام رضا	میدان فردوسی
۱۹	خیابان خواجه ربیع	بزرگراه رضوی	۴۲	انتهای صبا	هاشمی نژاد
۲۰	میدان خیام	انتهای فداییان اسلام	۴۳	قرقی	خیابان خواجه ربیع
۲۱	پنجراه وحدت	انتهای تیمور	۴۴	قرقی	انتهای تیمور
۲۲	اول روح آباد	انتهای تیمور	۴۵	توس	بزرگراه آزادی
۲۳	بزرگراه رضوی	میدان فردوسی	۴۶	پایانه الهیه	پایانه سرافرازان

در مجموع، تقاضای پوشش داده‌شده در شبکه پیشنهادی ۹۳٫۵ درصد است که نسبت به شبکه موجود به میزان ۶ درصد افزایش داشته است. این نتیجه در حالی است که تقاضای پوشش داده‌شده بدون تغییر خط و با یک تغییر خط به میزان ۹٫۲ درصد افزایش و تقاضای پوشش داده‌شده با ۲ تغییر خط به میزان ۳٫۳ درصد کاهش یافته است. این نتیجه بهترین حالت بهبود پوشش تقاضا است، بدین معنی که کل تقاضای پوشش داده‌شده افزایش یابد درحالی‌که تقاضای پوشش داده‌شده با تعداد تغییر خط بالا کاهش یابد.

ذکر این نکته ضروری است که طراحی شبکه در این تحقیق با دیدگاه اجرایی و با در نظر گرفتن کمترین تغییرات ممکن نسبت به شبکه وضع موجود انجام شده است. از دیدگاه تئوری، اگر طراحی شبکه اتوبوس‌رانی شهر مشهد بدون در نظر گرفتن شبکه وضع موجود و نکات اجرایی انجام شود، شاید تابع هدف بهتری حاصل شود، اما پیاده‌سازی این شبکه نیازمند تغییرات بسیار زیادی در وضع موجود بوده و لذا قابل اجرا نیست. در جدول (۲)، شاخص‌های عملکردی شبکه پیشنهادی با شبکه موجود شهر مشهد مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که

جدول ۲. مقایسه شاخص‌های شبکه پیشنهادی با شبکه وضع موجود

شاخص	شبکه موجود	روش پیشنهادی
تعداد خطوط	۱۳۵	۱۶۵
درصد پوشش تقاضا	۸۷٫۵	۹۳٫۵
درصد تقاضای پوشش داده‌شده بدون تغییر خط	۱۴٫۶	۲۰٫۵
درصد تقاضای پوشش داده‌شده با یک تغییر خط	۴۵٫۲	۴۸٫۵
درصد مسافر پوشش داده‌شده با دو تغییر خط	۲۷٫۷	۲۴٫۵
درصد مسافر پوشش داده نشده	۱۲٫۵	۶٫۵
مقدار تابع هدف (واحد هزینه)	۳،۵۱۲،۱۲۰	۲،۶۰۴،۶۴۰
زمان انتظار کل (دقیقه)	۷۷۹،۱۹۱	۸۸۴،۵۳۳
متوسط زمان انتظار به ازای یک سفر (دقیقه)	۷٫۸	۸٫۸

شاخص	شبکه موجود	روش پیشنهادی
حجم ناوگان	۱,۷۲۰	۱۸۵۰
صندلی خالی ساعت (دقیقه)	۶۳,۷۹۵	۵۶,۰۱۹

ممکن است در نگاه اول به نظر برسد که افزایش ۶ درصدی در پوشش تقاضا، عدد قابل توجهی نباشد، اما باید توجه نمود که این عدد در میزان تقاضای ساعت اوج ضرب خواهد شد که نتیجه آن قابل توجه خواهد بود. با توجه به اینکه کل تقاضای اتوبوس شهر مشهد در ساعت اوج حدوداً ۱۰۰۰۰۰ سفر است، افزایش ۶ درصدی بدین معنی است که در شبکه پیشنهادی نسبت به شبکه وضع موجود، ۶۰۰۰ سفر بیشتر پوشش داده شده است. این افزایش تقاضا تنها با ایجاد تغییر حدوداً ۲۷ درصدی در شبکه اتوبوس‌رانی صورت گرفته است.

تعداد ناوگان مورد نیاز برای شبکه پیشنهادی ۱۸۵۰ و برای شبکه وضع موجود ۱۷۲۰ به دست آمده است. لذا برای اجرای شبکه پیشنهادی نیاز به ۱۳۰ دستگاه ناوگان جدید است. همچنین تابع هدف در شبکه پیشنهادی به میزان حدوداً ۲۵ درصد نسبت به شبکه وضع موجود بهبود داشته که بسیار قابل توجه است. نکته قابل توجه اینکه متوسط زمان انتظار یک سفر در شبکه پیشنهادی نسبت به شبکه وضع موجود افزایش داشته که نامطلوب است. باید در نظر داشت که اولاً این افزایش قابل توجه نبوده و کمتر از ۱ دقیقه به ازای هر مسافر است. ثانیاً خطوط جدید در شبکه پیشنهادی در مسیرهایی ایجاد شده‌اند که قبلاً خط اتوبوس در آن‌ها وجود نداشته است و در بسیاری از این خطوط به دلیل مسافر نه‌چندان زیاد، مقدار تواتر عبوری حداقل است (۳ اتوبوس بر ساعت). این مسئله سبب می‌شود که کل زمان انتظار در شبکه به دلیل زمان انتظار نسبتاً زیاد در خطوط جدید بالا برود؛ اما باید توجه نمود که طراحی شبکه اتوبوس‌رانی برای شهر مشهد نشان داده که ایجاد این خطوط جدید به نفع شهر بوده و تابع هدف، پوشش کل تقاضا و سایر شاخص‌های عملکردی را بهبود می‌بخشد.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله مدلی جهت طراحی بهینه شبکه اتوبوس‌رانی ارائه شد که علاوه بر قابلیت اجرا در شبکه‌های شهری بزرگ‌مقیاس، شرایط و محدودیت‌های اجرایی نیز در آن وارد شده است. با این رویکرد شبکه‌ای طراحی می‌شود که خروجی‌های اصلی آن یعنی مسیر، تعداد ناوگان و تواتر خطوط به گونه‌ای باشد که تابع هدف تعریف‌شده کمینه شود. بدین منظور ابتدا رابطه‌ای برای نحوه تعریف تابع هدف در سطح شبکه ارائه شده و با ورود آن به مسئله طراحی شبکه، یک مدل جامع ساخته شد. سپس برای حل این مدل ترکیبی از روش‌های ابتکاری و فرا ابتکاری مبتنی بر الگوریتم ژنتیک به کار گرفته شد. با پیاده‌سازی این مدل در شهر مشهد، شبکه نهایی و مجموعه خطوط حاضر در آن مشخص گردید. مقایسه شاخص‌های عملکردی این شبکه با شبکه موجود بهبود قابل توجهی در شاخص‌های عملکردی را نشان داد. شبکه پیشنهادی پوشش تقاضا را به میزان ۶ درصد نسبت به شبکه موجود افزایش داد، درحالی‌که متوسط تعداد تغییر خط مسافران کاهش یافت.

#### ۵. مراجع

- رنجبری، ا.، طراحی شبکه اتوبوس‌رانی با تقاضای الاستیک. ۱۳۹۰، دانشگاه علم و صنعت ایران.
- بهزاد، ر.، طراحی شبکه اتوبوس‌رانی شهری بر اساس نظریه گراف. ۱۳۹۰، دانشگاه علم و صنعت ایران.
- چگینی و همکاران، طراحی شبکه اتوبوس‌رانی با هدف پیشینه‌سازی رضایت استفاده‌کنندگان، دوازدهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی حمل‌ونقل و ترافیک. ۱۳۹۱: تهران.
- افندی‌زاده و همکاران، طراحی خطوط شبکه اتوبوس‌رانی شهری با استفاده از روش جستجوی ممنوع، مهندسی حمل‌ونقل، شماره چهارم، تابستان ۱۳۸۹.

- Zhao, F. and X. Zeng, Optimization of user and operator cost for large-scale transit network. *Journal of transportation engineering*, 2007. 133(4): p. 240-251.
- Fan, W. and R.B. Machemehl, Using a simulated annealing algorithm to solve the transit route network design problem. *Journal of Transportation Engineering*, 2006. 132(2): p. 122-132.
- Asadi Bagloee, S. and A.A. Ceder, Transit-network design methodology for actual-size road networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2011. 45(10): p. 1787-1804.
- Cipriani, E., S. Gori, and M. Petrelli, Transit network design: A procedure and an application to a large urban area. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2012. 20(1): p. 3-14.
- Lee, Y.-J. and V.R. Vuchic, Transit network design with variable demand. *Journal of Transportation Engineering*, 2005. 131(1): p. 1-10.
- Mauttone, A. and M.E. Urquhart, A route set construction algorithm for the transit network design problem. *Computers & Operations Research*, 2009. 36(8): p. 2440-2449.
- Mauttone, A. and M.E. Urquhart, A multi-objective metaheuristic approach for the transit network design problem. *Public Transport*, 2009. 1(4): p. 253-273.
- Chew, J.S.C., L.S. Lee, and H.V. Seow, Genetic algorithm for biobjective urban transit routing problem. *Journal of Applied Mathematics*, 2013. 2013.
- Amiripour, S.M.M., A. Ceder, and A. Shariat Mohaymany, Hybrid Method for Bus Network Design with High Seasonal Demand Variation. *Journal of Transportation Engineering*, 2014. 140(6).
- Amiripour, S.M.M., A. Ceder, and A. Shariat Mohaymany, Bus-Network Design Considering High Seasonal Demand Variations, in *Transportation Research Board Annual Meeting*. 2012: Washington D.C.
- Ceder, A., *Public Transit Planning and Operation: Modelling, Practice and Behavior*, Second Edition. 2015: Butterworth-Heinemann.
- Ceder, A. and N.H.M. Wilson, Bus network design. *Transportation Research Part B*, 1986. 20(4): p. 331-344.
- Baaj, M.H. and H.S. Mahmassani, TRUST: A LISP program for the analysis of transit route configurations. *Transportation Research Record*, 1990. 1283: p. 125-135.
- Baaj, M.H. and H.S. Mahmassani, AI-based approach for transit route system planning and design. *Journal of advanced transportation*, 1991. 25(2): p. 187-210.
- Baaj, M.H. and H.S. Mahmassani, Hybrid route generation heuristic algorithm for the design of transit networks. *Transportation Research Part C*, 1995. 3(1): p. 31-50.
- Pattnaik, S.B., S. Mohan, and V.M. Tom, Urban bus transit route network design using genetic algorithm. *Journal of Transportation Engineering*, 1998. 124(4): p. 368-375.
- Ceder, A., Operational objective functions in designing public transport routes. *Journal of advanced transportation*, 2001. 35(2): p. 125-144.
- Ngamchai, S. and D.J. Lovell, Optimal time transfer in bus transit route network design using a genetic algorithm. *Journal of Transportation Engineering*, 2003. 129(5): p. 510-521.
- Tom, V. and S. Mohan, Transit route network design using frequency coded genetic algorithm. *Journal of Transportation Engineering*, 2003. 129(2): p. 186-195.
- Yang, Z., B. Yu, and C. Cheng, A parallel ant colony algorithm for bus network optimization. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2007. 22(1): p. 44-55.
- Hu, J., et al., Optimal design for urban mass transit network based on evolutionary algorithms, in *Advances in Natural Computation*. 2005, Springer. p. 1089-1100.

- Ranjbari, A., A. Shariat Mohaymany, and S. Amiripour, Transit Network Design: The Necessity of Elastic Demand Consideration. *Applied Mechanics and Materials*, 2011. 97: p. 1117-1122.
- Chu, J.C., Mixed-integer programming model and branch-and-price-and-cut algorithm for urban bus network design and timetabling. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2018. 108: p. 188-216.
- Laporte, G., et al., Multi-objective integration of timetables, vehicle schedules and user routings in a transit network. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2017. 98: p. 94-112.
- Soto, G., H. Larrain, and J.C. Muñoz, A new solution framework for the limited-stop bus service design problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2017. 105: p. 67-85.
- An, K. and H.K. Lo, Two-phase stochastic program for transit network design under demand uncertainty. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2016. 84: p. 157-181.
- Fielbaum, A., S. Jara-Diaz, and A. Gschwender, Optimal public transport networks for a general urban structure. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2016. 94: p. 298-313.
- Buba, A.T. and L.S. Lee, A differential evolution for simultaneous transit network design and frequency setting problem. *Expert Systems with Applications*, 2018. 106: p. 277-289.
- Badia, H., J. Argote-Cabanero, and C.F. Daganzo, How network structure can boost and shape the demand for bus transit. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2017. 103: p. 83-94.
- Afandizadeh, S. and M.R. Afunian, Design of bus transit network based of branch and bound technique. *Amirkabir (Journal of Science and Technology)*, 2003. 13(54 D): p. 578-589.

## Presenting a Method to Modify the Bus Lines in Urban Networks (Case Study: Mashhad)

Yaser Taghizade\*, Ph.D. student of transportation planning, Tabaran Consulting Engineers Company,  
Mashhad, Iran

Aliasghar Neyshabouri, Master in Theology and Islamic Sciences, Mashhad Bus Organization,  
Mashhad, Iran

Morteza Chaichi Motlagh, Master in Transportation Planning, Mashhad Bus Organization, Mashhad,  
Iran

Soroush Sadraei, Master in Transportation Planning, Mashhad Bus Organization, Mashhad, Iran

**E-mail: [info@tabaranco.ir](mailto:info@tabaranco.ir)**

### Abstract

The most important issue that must be considered at the same time as the development of cities is the design and modification of the public transportation network, and the most important part of which is the design of the bus network. In the city of Mashhad, the creation of metro and BRT lines in the urban network, as well as population growth, have caused fundamental changes in the pattern of urban travel, and therefore it is necessary to modify the network of bus lines. The methods that have been presented to design the bus network have paid less attention to the implementation aspect, and their implementation in real and large-scale networks is very time-consuming. The main goal of this study is to provide an effective and practical method for designing the urban bus network. The method of this study is a combination of heuristic and meta-heuristic methods and is based on genetic algorithm. In order to apply this solution method and the possibility of its implementation for the city of Mashhad, programming in C++ environment was used, which provides the possibility of fast design of the bus network for different purposes and limitations. The output and results of this method were extracted for the city of Mashhad and the optimal bus network was compared with the existing network. The results showed that the demand coverage and other performance indicators in the proposed bus network have a significant improvement compared to the existing network.

**Keywords:** Bus network design, Genetic algorithm, Optimized network, Demand coverage