فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۱۷، شماره ۱، پاییز ۱۴۰۴، ص. ۵۰۹۲-۵۰۷۵

مقاله علمی-پژوهشی

ارائه مدلی جدید برای طراحی شبکه اتوبوسرانی با رویکرد کمینه‌سازی یارانه برونسپاری خطوط

شهریار افندی‌زاده (مسئول مکاتبات)، استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

E-mail: zargari@iust.ac.ir

یاسر تقی‌زاده، دانشجوی دکتری برنامه‌ریزی حمل و نقل، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۰ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۱۵

چکیده

برونسپاری خطوط اتوبوس به بخش خصوصی با حداقل یارانه ممکن، از مسائل مهم سازمان‌های اتوبوسرانی در جهان است. تعداد مسافر، تواتر خط، تعداد ناوگان، مسیر خط و هزینه‌های عملیاتی، پارامترهایی هستند که در تعیین یارانه مورد نیاز یک خط اتوبوس نقش دارند. این پارامترها، همان متغیرهای تصمیم‌گیری اصلی در مسئله طراحی شبکه اتوبوسرانی هستند که ارتباط بین این دو مسئله را برجسته می‌سازد. این مقاله مدلی جدید برای طراحی بهینه شبکه اتوبوسرانی ارائه نموده که علاوه بر اهداف مرسوم مانند پوشش تقاضا و کاهش زمان انتظار، کمینه‌سازی یارانه مورد نیاز برای برونسپاری شبکه نیز لحاظ شده است. بدین منظور، ابتدا تابعی برای برآورد یارانه یک شبکه اتوبوسرانی ساخته شده و سپس در تابع هدف مدل پیشنهادی وارد می‌شود. برای حل مدل در شبکه‌های واقعی ترکیبی از روش‌های ابتکاری و فرا ابتکاری مبتنی بر الگوریتم ژنتیک به کار گرفته شده است. روش پیشنهادی در محیط $C++$ کدنویسی شده و برای شهر تهران به عنوان یک شبکه بزرگ مقیاس پیاده‌سازی گردید. نتایج نشان داد که شبکه پیشنهادی این مطالعه بهبود قابل توجهی نسبت به شبکه وضع موجود دارد و با وجود افزایش پوشش تقاضا به میزان ۳/۲۶ درصد، یارانه مورد نیاز به ازای هر نفر به میزان ۷/۹۶ درصد کاهش یافته است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، برونسپاری، طراحی شبکه اتوبوسرانی، یارانه

۱. مقدمه

اولین گام در برنامه‌ریزی سیستم اتوبوسرانی، طراحی بهینه مسیر خطوط است. در شهرهای بزرگ به دلایل مختلفی نیاز به طراحی مجدد و اصلاح شبکه اتوبوسرانی است. به‌عنوان‌مثال، راه‌اندازی خطوط BRT یا قطارشهری در یک شهر بزرگ، الگوی سفرها را کاملاً تغییر خواهد داد که در نتیجه نیاز به بازطراحی شبکه اتوبوسرانی خواهد بود (Ceder, 2015). از سوی دیگر پژوهشگران زیادی باور دارند که بهره‌برداری از خطوط اتوبوسرانی باید به بخش خصوصی واگذار شود، زیرا موجب کاهش چشمگیر هزینه‌های عملیاتی خواهد شد (Bayliss et al., 2021; Hensher, 2007; Pinto et al., 2021). در خطوط اتوبوسرانی، درآمد حاصل از کرایه معمولاً برای پوشش هزینه‌ها کافی نیست. بنابراین، تخصیص یارانه به بخش خصوصی ضرورت می‌یابد که باید تا حد امکان کمینه شود. فرضیه این تحقیق آن است که پیکربندی شبکه اتوبوسرانی، نقش مهمی در مقدار یارانه دارد. انتخاب مسیرها، تعداد ناوگان، و تواتر خدمات باید به گونه‌ای باشد که نه تنها معیارهای پوشش تقاضا و زمان انتظار لحاظ گردد، بلکه یارانه مورد نیاز برای واگذاری شبکه کمینه شود.

در زمینه طراحی شبکه اتوبوسرانی مطالعات متعددی انجام شده است. سدر و ویلسون در یکی از اولین پژوهش‌ها، مدلی دو سطحی برای مسئله طراحی شبکه اتوبوسرانی پیشنهاد دادند که پارامترهای زمان سفر، تعداد تغییر خط و حجم ناوگان مورد نیاز کمینه می‌شود (Ceder & Wilson, 1986). در ادامه، سه مطالعه شاخص توسط باج و مهمسنی انجام شد. در مطالعه اول، یک روش ابتکاری برای حل مسئله طراحی شبکه اتوبوسرانی با اهداف کمینه کردن حجم ناوگان و زمان سفر کل شبکه معرفی شد (Baaj & Mahmassani, 1990). در مطالعه دوم، یک روش ابتکاری سریعتر معرفی و بر روی شبکه مندل آزمایش شد (Baaj & Mahmassani, 1991). در مطالعه سوم، روشی برای اصلاح مسیرها بعد از گام بهینه سازی توسعه داده شد (Baaj & Mahmassani, 1995).

حل مسئله طراحی شبکه اتوبوسرانی در زمره مسائل سخت غیرقطعی[1] قرار می‌گیرد و به همین علت امکان استفاده از روش‌های بهینه‌سازی دقیق در شبکه‌های واقعی وجود ندارد و باید از روش‌های فراابتکاری بهره گرفت (Ceder, 2015). اولین مطالعه با رویکرد بکارگیری روش‌های فراابتکاری در شبکه‌های واقعی، مطالعه (Pattnaik et al., 1998) است که با الگوریتم ژنتیک انجام شد. در ادامه، مطالعات زیادی از الگوریتم‌های فراابتکاری، مانند الگوریتم ژنتیک (Ngamchai & Lovell, 2003; Tom & Mohan, 2003)، الگوریتم کلونی مورچگان (Hu et al., 2005; Yang et al., 2007)، الگوریتم جستجوی ممنوع (افندی زاده و همکاران، ۱۳۸۹) و الگوریتم گرم و سرد کردن شبیه‌سازی شده (Hatzenbühler et al., 2022) برای حل مسئله طراحی شبکه اتوبوسرانی استفاده کرده‌اند. برخی مطالعات نیز، با ترکیب روش‌های ابتکاری و فراابتکاری به حل مسئله پرداخته‌اند (Momenitabar & Mattson, 2021; Wang et al., 2020).

در مطالعه (Lee & Vuchic, 2005)، برای اولین بار مسئله طراحی شبکه اتوبوسرانی با فرض تقاضای متغیر حل شد. در ادامه، امیری پور و همکاران نیز (Amiripour et al., 2014) تغییرات فصلی تقاضا را در مسئله لحاظ نموده و برای شهر مشهد پیاده‌سازی کردند. مطالعه (Mauttone & Urquhart, 2009)، مسئله طراحی شبکه اتوبوسرانی را به صورت یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه با هدف کمینه کردن زمان داخل وسیله نقلیه، زمان انتظار و تعداد تعویض خط در تابع اول و کمینه کردن تعداد ناوگان در تابع دوم توسعه داد. در مطالعه (Szeto & Wu, 2011)، روشی برای حل همزمان مسئله طراحی شبکه و تدوین برنامه زمانبندی خطوط پیشنهاد شد. (سیدابریشمی و همکاران، ۱۳۹۶) یک روش ابتکاری برای تولید مسیر پیشنهاد

دادند که موجب کاهش ۷۰ درصدی مسیرهای نامزد در شبکه سایوکس فالز شد. مطالعه (Fielbaum et al., 2016)، طراحی شبکه اتوبوسرانی را با دو ساختار خطوط مستقیم و شبکه فیدری مورد بررسی قرار داده است. بادیا و همکاران، اثر ساختار شبکه اتوبوسرانی بر افزایش جذب تقاضا را مطالعه کردند (Badia et al., 2017). لاپورت و همکاران، مراحل زمان بندی، تخصیص ناوگان و انتخاب مسیر توسط کاربران را به صورت همزمان در مسئله طراحی شبکه لحاظ نموده‌اند (Laporte et al., 2017). گانگ و همکاران، الگوریتم برنامه‌ریزی عدد صحیح را برای حل مسئله طراحی شبکه اتوبوسرانی به کار گرفتند که متغیر کلیدی آن تعداد تغییر خط مسافران است (Gong et al., 2021).

مطالعه (Duran-Micco et al., 2020)، به بررسی ورود متغیر انتشار گازهای گلخانه‌ای در مسئله طراحی شبکه اتوبوسرانی پرداخت و ثابت کرد که با افزایش ۵ درصدی زمان سفر کاربران، انتشار آلودگی کاهش می‌یابد. چای و لیانگ از الگوریتم ژنتیک چند–جمعیتی در روند بهینه‌سازی استفاده کردند (Chai & Liang, 2020). هوانگ و همکاران، یک مدل بهینه‌سازی دوسطحی برای یافتن مسیرهای بهینه معرفی و روش تحلیل سلسله مراتبی را برای حل آن توسعه دادند (Huang et al., 2020). مطالعه (Zhang et al., 2020) نیز یک رویکرد ترکیبی مبتنی بر دو الگوریتم کلونی مورچگان و ژنتیک را جهت حل مسئله طراحی شبکه مسیرهای همگانی پیشنهاد دادند. در مطالعه (Liu et al., 2020)، یک مدل چندهدفه برای طراحی شبکه با اتوبوس‌های الکتریکی ارائه شده که یک هدف آن تعیین مکان بهینه ایستگاه‌های شارژ اتوبوس است. این موضوع در مطالعه (Iliopoulou & Kepaptsoglou, 2021) نیز بررسی شد. نویسندگان، اثر طراحی مسیرها و مکان‌های شارژ اتوبوس، بر تاخیر زمانی شبکه را مورد بررسی قرار دادند. مطالعه (Xiong et al., 2022)، تعداد بهینه ایستگاه‌های شارژ و تعداد ناوگان مورد نیاز را به صورت همزمان در مسئله طراحی شبکه اتوبوسرانی محاسبه کردند. دوران و همکاران یک روش جدید ارائه کردند که به طور همزمان مسیرها و تواتر خطوط را تعیین می‌کند (Durán-Micco & Vansteenwegen, 2022). در مطالعه (Filgueiras et al., 2023)، به بازطراحی شبکه اتوبوسرانی لندن با لحاظ تغییرات تقاضا پس از شیوع پاندمی کرونا پرداخته شده است. یو و همکاران نشان دادند که حل مسئله با الگوریتم یادگیری ماشین، موجب کاهش زمان اجرا می شود (Yoo et al., 2023). در مطالعه (Gemma et al., 2024) مسئله طراحی شبکه اتوبوسرانی با فرض تقاضای متغیر مدلسازی شده و نتایج آن برای شهر رم به عنوان شبکه واقعی ارائه شده است. مطالعه (Ng et al., 2024) به طراحی شبکه حمل‌ونقل همگانی چندمُدی در مقیاس بزرگ می‌پردازد که وسایل خودران اشتراکی، به عنوان تغذیه‌کننده خطوط اصلی عمل می‌کنند. این مطالعه برای شهر شیکاگو در ۵۰ ناحیه و با ۷ مُد مختلف اجرا شده است. در مطالعه (Wang et al., 2024) مدلی برای طراحی یک شبکه اتوبوس‌رانی سفارشی پیشنهاد شده که اندازه وسیله نقلیه در آن متغیر است و به صورت همزمان با طراحی مسیرها تعیین می‌شود.

با مرور مطالعات در زمینه طراحی شبکه اتوبوسرانی، مشخص گردید که پارامترهایی مانند زمان سفر، پوشش تقاضا، صندلی خالی در ساعت، زمان انتظار، هزینه شبکه و تعداد ناوگان در اهداف مسئله لحاظ شده است. با این حال، جنبه‌های اقتصادی موضوع برونسپاری شبکه به بخش خصوصی تاکنون مورد توجه نبوده است. بنابراین، در این پژوهش یک مدل جدید ارائه شد که یارانه نقش محوری در تابع هدف دارد. در این خصوص، مدلسازی یارانه با لحاظ نمودن تمامی فاکتورهای اقتصادی و هزینه‌های خصوصی‌سازی در شرایط واقعی انجام شده است. نوآوری دیگر این تحقیق، بکارگیری روش‌های ابتکاری در مراحل مختلف حل مسئله است که امکان پیاده‌سازی در شبکه‌های بزرگ‌مقیاس را فراهم می‌کند. برای اثبات این ادعا، مدل و روش حل پیشنهادی برای شبکه مندل[۲] به عنوان نمونه

آزمایشی و شبکه شهر تهران به عنوان نمونه بزرگ‌مقیاس، پیاده سازی شده است. هدف نهایی، معرفی شبکه منتخب اتوبوسرانی برای یک شهر است که علاوه بر سطح سرویس‌رسانی قابل قبول، کمینه‌سازی مقدار یارانه در آن لحاظ شده باشد.

۲. مدلسازی ریاضی مسئله

۲-۱ فرمول‌سازی یارانه

یارانه مورد نیاز یک شبکه اتوبوسرانی برابر مجموع اختلاف هزینه و درآمد خطوط حاضر در شبکه است. هزینه‌ها شامل هزینه عملیاتی، هزینه سرمایه‌گذاری، هزینه استهلاک و هزینه‌های بالاسری بخش خصوصی است. معادله ۱ این تعریف را در قالب یک تابع ریاضی نشان می‌دهد که در ادامه نحوه محاسبه هر یک از اجزای آن بیان می‌گردد.

$$SU = \sum_{k \in R} (CO_k + CP_k + CI_k - I_k) \qquad (۱)$$

که در آن:

SU : یارانه مورد نیاز برای کل شبکه (ریال بر ساعت)

CO_k : هزینه‌های عملیاتی اتوبوس در خط k (ریال بر ساعت)

CP_k : هزینه‌های بالاسری بخش خصوصی در خط k (ریال بر ساعت)

CI_k : هزینه سرمایه گذاری و استهلاک در خط k (ریال بر ساعت)

I_k : درآمد خط k (ریال)

مقدار یارانه و تمامی اجزای رابطه ۱ برای ساعت اوج تعریف شده تا با مسئله طراحی شبکه که ورودی اصلی آن ماتریس تقاضای ساعت اوج است، هماهنگ شود. همچنین کلیه روابط ارائه شده برای محاسبه یارانه، توسط نویسندگان توسعه داده شده است.

هزینه CO_k شامل کلیه هزینه‌های عملیاتی مانند دستمزد راننده، تعمیرات و سوخت است که مطابق رابطه ۲ به دست می‌آید.

$$CO_k = 2F_k L_k \lambda_o \qquad (۲)$$

که در این رابطه F_k تواتر در خط k (وسیله بر ساعت) و L_k طول خط k (کیلومتر) است. λ_o هزینه واحد عملیاتی است که معادل هزینه‌های عملیاتی یک اتوبوس به ازای یک کیلومتر پیمایش است و بر اساس رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

$$\lambda_o = \frac{C_o}{\mathrm{WD} \times \mathrm{DAVK}} \qquad (۳)$$

که در این رابطه، C_o مجموع کلیه هزینه‌های عملیاتی سالانه یک اتوبوس، WD تعداد روزهای کاری اتوبوس در سال و $DAVK$ متوسط پیمایش روزانه یک اتوبوس است. در محاسبه هزینه‌های عملیاتی، مواردی همچون هزینه تعمیرات، تعویض قطعات، مصرف سوخت، دستمزد راننده، باتری، لاستیک، بیمه اتوبوس و پارکینگ منظور می‌گردد.

هزینه‌های بالاسری بخش خصوصی شامل دستمزد عوامل دفتری، عوامل میدانی، هزینه اجاره و تأمین تجهیزات مانیتورینگ می‌باشد. این هزینه‌ها فارغ از میزان پیمایش اتوبوس‌ها بوده و لذا به تناسب تعداد ناوگان و بر اساس رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

$$CP_k = n_k \times \lambda_p \qquad (۴)$$

n_k تعداد اتوبوس در خط k و λ_p هزینه واحد است که از رابطه ۵ به دست می‌آید:

$$\lambda_p = \frac{C_P}{\mathrm{WD} \times \mathrm{DAVH}} \qquad (۵)$$

که در این رابطه، C_P متوسط هزینه‌های بالاسری یک شرکت خصوصی اتوبوسرانی در سال و $DAVH$ متوسط ساعت کاری روزانه یک اتوبوس است.

عبارت سوم در رابطه ۱، (CI_k)، مربوط به هزینه سرمایه‌گذاری و استهلاک است که بر اساس رابطه ۶ برآورد می‌شود. هزینه سرمایه‌گذاری معادل سود مورد انتظار بخش خصوصی بابت خرید اتوبوس است و زمانی معنا دارد که مالکیت اتوبوس با بخش خصوصی باشد و در غیر این صورت صفر است.

$$CI_k = n_k \times (\lambda_i + \lambda_s) \qquad (۶)$$

λ_i هزینه واحد سرمایه گذاری و λ_s هزینه واحد استهلاک است که به ترتیب مطابق رابطه ۷ و رابطه ۸ محاسبه می‌شوند. هر دو پارامتر بر حسب ریال بر ساعت گزارش می‌شوند.

$$\lambda_i = \frac{C_i}{\mathrm{LT} \times \mathrm{WD} \times \mathrm{DAVH}} \quad (۷)$$

C_i سود سرمایه‌گذاری معادل ارزش یک اتوبوس در طول عمر مفید آن است که برای برآورد آن باید نرخ سود و دوره سرمایه گذاری (همان عمر مفید اتوبوس) مشخص گردد. LT نشان دهنده عمر مفید اتوبوس است که ۱۰ سال در نظر گرفته می‌شود.

$$\lambda_s = \frac{P_{bus} - P_s}{\mathrm{LT} \times \mathrm{WD} \times \mathrm{DAVH}} \quad (۸)$$

در این رابطه، P_{bus} ارزش اولیه یک اتوبوس در سال پایه و P_s ارزش اسقاط یک اتوبوس در پایان عمر مفید است. خروجی نهایی این رابطه هزینه استهلاک یک اتوبوس به ازای یک ساعت را نتیجه خواهد داد. آخرین عبارت در معادله ۱، نشان دهنده درآمد کل شبکه در ساعت اوج است که بر اساس رابطه ۹ محاسبه می‌گردد:

$$I_k = Fare_k \times D_k \quad (۹)$$

$Fare_k$ نرخ کرایه خط k بر حسب ریال و D_k تعداد تقاضای خط k در ساعت اوج است. با جمع‌بندی روابط ۱ تا ۹، در نهایت مقدار یارانه لازم برای کل شبکه مطابق رابطه ۱۰ خواهد بود که در تابع هدف مسئله طراحی شبکه اتوبوسرانی وارد می‌شود.

$$Su = \sum_{k=R} \begin{bmatrix} (2F_k L_k \lambda_0) + n_k(\lambda_p + \lambda_i + \lambda_s) \\ -(Fare_k \times D_k) \end{bmatrix} \quad (۱۰)$$

لازم به ذکر است که در شبکه‌های واقعی، ابتدا باید هزینه‌های واحد۴گانه $(\lambda_o , \lambda_i , \lambda_s , \lambda_p)$، محاسبه شوند. این محاسبات برای شهر تهران در بخش ۵ انجام شده است. سایر پارامترها مانند تعداد ناوگان، تواتر و طول خط همان متغیرهای تصمیم گیری در مدل اصلی هستند که در روند بهینه سازی تعیین می شوند.

۲-۲ مدل ریاضی مسئله اصلی

مدل ریاضی تابع هدف و محدودیت‌ها، برای مسئله تعریف شده در این تحقیق، به شرح مجموعه روابط ذیل هستند:

تابع هدف:

$$Min \quad Z = \alpha \sum_{i,j \epsilon N} WT_{i,j} + \beta \sum_{k \epsilon R} EH_k \quad + \gamma \times UD + Su \quad (۱۱)$$

محدودیت‌ها:

$$f_k \geq f_{Min} , \qquad \forall k \in R \quad (۱۲)$$

$$\sum_{k \epsilon R} (n_k) < FS_{max} , \qquad \forall k \in R \quad (۱۳)$$

$$T_{i,j}^k < \tau T_{i,j}^{sp} , \qquad \forall k \in R , \forall i,j \in N \quad (۱۴)$$

$$UD < UD_{max} \quad (۱۵)$$

$$L_{min} < L_k < L_{max} \qquad \forall k \in R \quad (۱۶)$$

$$Tr_{i,j} < Tr_{max} \qquad i,j \in N \quad (۱۷)$$

که در این روابط:

N : مجموعه گره‌ها

R : مجموعه مسیرها

Z : تابع هدف

$WT_{i,j}$: زمان انتظار در شبکه بین گره‌های i و j

EH_k : صندلی خالی در ساعت برای خط k

UD : تقاضای پوشش داده نشده

SU : یارانه کل شبکه که بر اساس رابطه ۱۰ محاسبه می‌گردد.

$\propto$: ارزش ریالی یک ساعت زمان انتظار

β : ارزش ریالی یک صندلی خالی در ساعت

γ : جریمه تقاضای پوشش داده نشده

f_k : تواتر خط k

f_{min} : حداقل تواتر

n_k : تعداد ناوگان در خط k

FS_{max} : حداکثر تعداد ناوگان برای کل شبکه

$T_{i,j}^k$: زمان سفر بین i و j در خط k

$T_{i,j}^{sp}$: زمان سفر بین i و j در کوتاهترین مسیر

τ : حداکثر میزان مجاز انحراف از کوتاهترین مسیر

UD_{max} : حداکثر میزان مجاز تقاضای پوشش داده نشده

L_k : طول خط k

L_{Min} و L_{Max} : کمینه و بیشینه مجاز برای طول خط

$Tr_{i,j}$: تعداد تغییر خط برای سفر بین سفر بین i و j

Tr_{Max} : حداکثر تعداد تغییر خط مجاز

تابع هدف در معادله ۱۱ ترکیبی از منافع کاربر، سازمان اتوبوسرانی و بخش خصوصی را به عنوان اهداف مطلوبیت شبکه در نظر می‌گیرد. عبارت اول تابع هدف در جهت رضایت کاربران به دنبال کمینه‌سازی زمان انتظار است. عبارت دوم تابع هدف با کمینه‌سازی شاخص صندلی خالی در ساعت، از تولید شبکه‌های طولانی با تعداد خطوط زیاد و هزینه بالا جلوگیری می‌کند. در عبارت سوم تابع هدف، جریمه تقاضای پوشش داده نشده لحاظ شده است. دلیل اعمال این جریمه، مواجه نشدن با پاسخ شبکه تهی است. به عبارتی اگر این بخش نباشد، شبکه تهی به عنوان بهترین جواب انتخاب خواهد شد که نادرست است. در نهایت، عبارت چهارم به دنبال کمینه کردن یارانه مورد نیاز برای برونسپاری شبکه است که بر اساس روش پیشنهادی این مطالعه در بند ۲-۱ (معادله ۱۰) محاسبه می‌شود. نکته مهم در خصوص تابع هدف آن است که خروجی تابع بر حسب ریال بر ساعت اوج خواهد بود. ضرایب $\propto$ و β و γ به همین دلیل اعمال شده است.

روابط ۱۲ تا ۱۷، بیانگر محدودیت‌های طراحی و بودجه‌ای مانند حداقل تواتر، حداکثر تعداد ناوگان در دسترس، حداکثر تقاضای پوشش داده نشده و حداکثر تعداد تغییر خط مجاز هستند. محدودیت ۱۴ انتخاب خطوط را در محدوده مجاز انحراف از کوتاهترین مسیر حفظ می‌کند که از دیدگاه مسافران اهمیت بالایی دارد. به طور مثال اگر τ برابر با ۱,۳ فرض شود، به این معنی است که زمان مسافر بین یک مبدا – مقصد نباید بیش از ۱,۳ برابر زمان کوتاهترین مسیر باشد.

۳. بیان روش حل مسئله

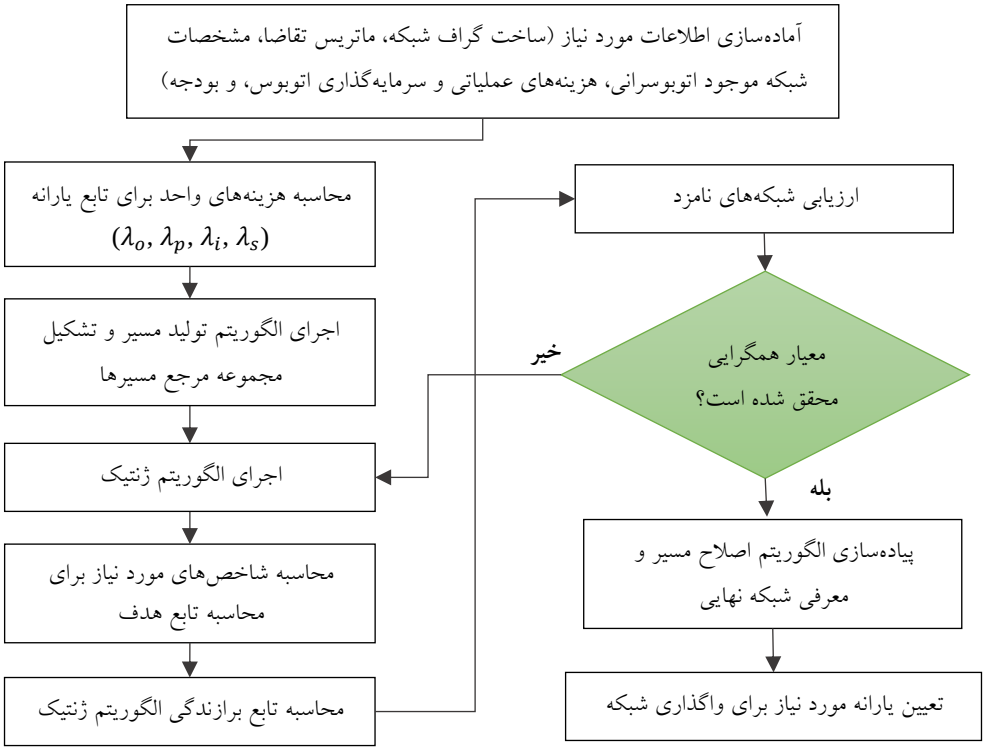
در این بند، راه حل و روش مد نظر برای پیاده‌سازی مدل در شبکه‌های واقعی ارائه می‌شود. شکل ۱ مراحل حل مسئله را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.

گام اول به آماده‌سازی اطلاعات مورد نیاز شامل گراف شبکه معابر، ماتریس تقاضا، مشخصات خطوط موجود اتوبوس و داده های اقتصادی مورد نیاز برای محاسبه هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌گذاری دارد. ارزش اولیه اتوبوس، هزینه‌های تعمیرات و نگهداری، هزینه سوخت، حقوق راننده، نرخ سود سرمایه، دوره سرمایه‌گذاری و نرخ کرایه از پارامترهای مهم اقتصادی هستند.

سایر مراحل و رویکرد ابتکاری استفاده شده برای حل مدل، در سه بخش شامل تولید مجموعه مرجع[۳]، اجرای الگوریتم ژنتیک و اصلاح مسیرها قابل بررسی است. در ادامه، به شرح بیشتر هر مرحله پرداخته می‌شود.

۳-۱ تولید مجموعه مرجع

انتخاب روش مناسب برای تولید مسیر و ساخت مجموعه مرجع، نقش مهمی در کوچک نمودن فضای جواب و افزایش سرعت همگرایی الگوریتم در شبکه‌های واقعی دارد. رویکرد ابتکاری این پژوهش برای ساخت مجموعه در قالب موارد ذیل بیان شده است:



شکل ۱. مراحل حل مسئله با روش پیشنهادی

الف) تعیین نقاط پایانه‌ای: نقاطی هستند که قابلیت ابتدا/انتها بودن یک خط اتوبوس را داشته باشند. این گام به شدت موجب کوچک شدن فضای جواب می‌شود، زیرا الگوریتم تولید مسیر فقط بین این نقاط اجرا می‌شود، نه تمامی گره‌های شبکه.

ب) اجرای الگوریتم K–کوتاه‌ترین مسیر[۴]: کوتاه‌ترین مسیرها (با انحراف مجاز K درصد)، بین زوج نقاط پایانه‌ای تولید و وارد مجموعه مرجع می‌شوند. این الگوریتم، بیشترین تعداد مسیرهای نامزد برای مجموعه مرجع را تولید می‌کند.

ج) فیلتر نمودن خطوط بسیار طولانی و بسیار کوتاه: با توجه به محدودیت تعریف شده در رابطه ۱۶، خطوطی که این محدودیت را ارضا نکنند از مجموعه حذف می‌شوند.

د) افزودن خطوط شبکه وضع موجود: خطوط اتوبوسرانی وضع موجود، با احتمال انتخاب متفاوت بر اساس تعداد مسافر آنها، وارد مجموعه مرجع می‌شوند.

۳-۲ اجرای الگوریتم ژنتیک

با توجه به استفاده اکثر مطالعات شاخص در زمینه طراحی شبکه اتوبوسرانی از الگوریتم ژنتیک، در این پژوهش نیز از الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله استفاده شده است. گام اول در اجرای الگوریتم ژنتیک، تعریف ساختار کروموزوم است. هر کروموزوم بیانگر یک شبکه اتوبوسرانی نامزد است که به صورت بردار صفر و یک تعریف شده است. هر ژن یک خط اتوبوس را نشان می‌دهد که اگر در شبکه نامزد وجود داشته مقدار آن یک و در غیر این صورت صفر است.

شکل ۲ نمونه یک کروموزوم که مربوط به آزمایش شبکه مندل در این پژوهش است را نشان می‌دهد. از آنجا که تعداد مسیرهای نامزد برابر ۱۱۸ مسیر است، طول کروموزوم نیز برابر ۱۱۸ است. این کروموزوم یک شبکه اتوبوسرانی را نمایش می‌دهد که چهار مسیر R6، R37، R81 و R95 در آن حضور دارند. مابقی درایه ها صفر است. ساختار کروموزوم برای شبکه تهران نیز به همین

صورت است، با این تفاوت که طول آن برابر ۴۷۶۶ است (به تعداد خطوط مجموعه مرجع).

شکل ۲. ساختار کروموزوم برای شبکه مندل

اجرای الگوریتم ژنتیک با تولید جمعیت اولیه آغاز می‌شود، به این صورت که شبکه‌های اتوبوس به صورت تصادفی تولید شده و در جمعیت اولیه قرار می‌گیرند. سپس، سه عملگر انتخاب، ترکیب و جهش در هر نسل اجرا می‌شوند، تا جمعیت جدید تولید شود.

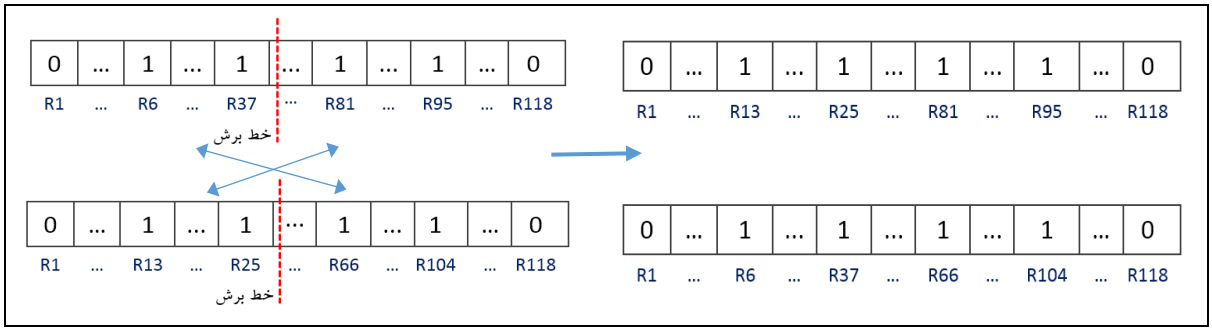
عملگر انتخاب: در این پژوهش، از روش "چرخ رولت" برای انتخاب و تکثیر کروموزوم‌ها استفاده شده است. ابتدا مقدار تابع برازندگی برای هر کروموزوم (هر شبکه اتوبوسرانی) محاسبه می شود. سپس، احتمال انتخاب هر کروموزوم مطابق رابطه ۱۸ به دست می‌آید:

$$P_i = \frac{Z_i}{\sum_{i=1}^{n} Z_i} \qquad (۱۸)$$

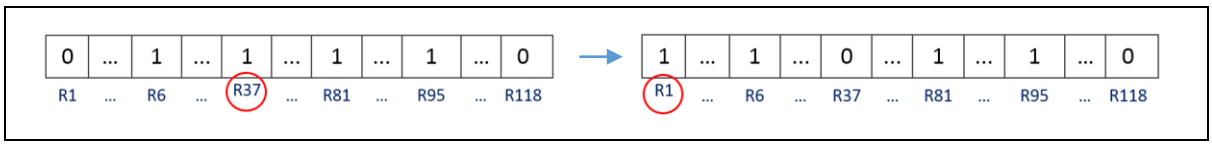
که Z_i مقدار تابع برازندگی کروموزوم i، P_i احتمال انتخاب کروموزوم i و n تعداد جمعیت است. ضمناً، تابع برازندگی همان تابع هدف مسئله در رابطه ۱۱ است. بنابراین، هر شبکه‌ای که احتمال انتخاب بالاتری به دست آورد، تعداد بیشتری از آن تکثیر و در نسل بعد ظاهر خواهد شد.

عملگر ترکیب و جهش: عملگرهای ترکیب و جهش در هر نسل و با هدف تولید کروموزوم‌های جدید اعمال می‌شوند. روش اجرای عملگر ترکیب در این پژوهش، بر اساس تکنیک "برش تک‌نقطه‌ای" است که نمونه اعمال آن برای شبکه مندل در شکل ۳ آمده است. دو کروموزوم به صورت تصادفی از جمعیت انتخاب و یک نقطه برش تصادفی تعیین می‌شود. مطابق شکل ۳، ژن‌ها از محل این نقطه مبادله و دو کروموزوم جدید (فرزندان) تولید می‌گردد. سپس، تابع برازندگی کروموزوم‌های فرزند محاسبه و درصورتی که بهتر از والدین بودند، جایگزین والدین در نسل جدید می‌شوند، وگرنه خود والدین به نسل جدید منتقل می‌شوند.

مثال اجرای عملگر جهش نیز در شکل ۴ ترسیم شده است. ابتدا یک کروموزوم به صورت تصادفی از نسل فعلی انتخاب می‌شود.



شکل ۳. نحوه اعمال عملگر ترکیب در شبکه مندل



شکل ۴. نحوه اعمال عملگر جهش در شبکه مندل

سپس، یک خط به صورت تصادفی حذف و یک خط جدید به صورت تصادفی اضافه می‌شود. به عبارتی، یک ژن روشن، خاموش و یک ژن خاموش، روشن می‌گردد. در مثال شکل ۴، مسیر R37 حذف و به جای آن مسیر R1 در شبکه اضافه شده است. نحوه اجرای عملگر ترکیب و جهش برای شبکه تهران نیز به همین صورت است.

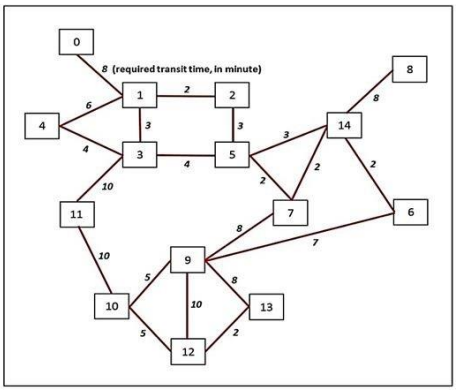
تولید نسل‌ها تا جایی ادامه دارد که معیار توقف برقرار شود. معیار توقف در این پژوهش، عدم تغییر در مقدار تابع برازندگی طی چند نسل متوالی است. در خصوص شبکه تهران، پس از انجام آنالیز حساسیت و اجراهای متعدد، رسیدن به ۱۲۰۰ نسل به‌عنوان معیار توقف در نظر گرفته شد. در شبکه مندل، این مقدار برابر ۵۰۰ نسل است. در نهایت، شبکه‌ای که دارای بیشترین مقدار تابع برازندگی در آخرین نسل است، به عنوان شبکه برتر معرفی می‌گردد.

۳-۳ اصلاح مسیر خطوط

پس از اجرای الگوریتم ژنتیک، شبکه منتخب و مسیر خطوط حاضر در آن مشخص می‌گردد. به دلیل پوشش ناکافی برخی از گره‌های مهم با تقاضای بالا، ممکن است نیاز به اصلاح تا توسعه برخی مسیرها باشد. در این پژوهش، از الگوریتم پیشنهادی باج و مهمسنی (Baaj & Mahmassani, 1995) برای اصلاح مسیرها استفاده شد که بر مبنای اضافه شدن نقاط مهم به مسیرها و ارزیابی تغییرات تابع هدف عمل می‌کند.

۴. اعتبارسنجی مدل با شبکه مندل

قبل از اجرای مدل بر روی شبکه اصلی (شهر تهران)، ابتدا نتایج مدل با شبکه مندل مقایسه و اعتبارسنجی شد. این شبکه توسط مندل برای حل مسئله طراحی شبکه اتوبوسرانی معرفی و نتایج آن در مطالعه (Mandl, 1980) ارائه شده است. گراف شبکه مندل در شکل ۵ نمایش داده شده که اعداد روی کمان‌ها، زمان سفر بر حسب دقیقه است.



شکل ۵. شبکه آزمایشی مندل

برای اجرای مدل، ابتدا فرآیند تولید مسیر اجرا شد که در نتیجه آن ۱۱۸ مسیر نامزد وارد مجموعه مرجع شدند. سپس، الگوریتم ژنتیک با ساختار و روشی که قبلاً بیان شد، اجرا شده و شبکه برتر استخراج گردید. جدول ۱، خطوط منتخب در شبکه پیشنهادی این پژوهش و مطالعه مندل را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مقایسه خطوط منتخب در این مطالعه با مطالعه مندل

مطالعه	خطوط منتخب (حاوی گره‌های عبوری از مسیر)
مطالعه مندل	مسیر اول : ۰-۱-۲-۵-۷-۹-۱۰-۱۲ مسیر دوم : ۴-۳-۵-۷-۱۴-۶ مسیر سوم : ۱۱-۳-۵-۱۴-۸ مسیر چهارم : ۱۲-۱۳-۹
این مطالعه	مسیر اول : ۶-۱۴-۵-۲-۱-۳-۱۱ مسیر دوم : ۱۱-۱۰-۹-۶-۱۴ مسیر سوم : ۰-۱-۲-۵-۱۴-۸ مسیر چهارم : ۴-۳-۵-۷-۹-۱۳-۱۲-۱۰

در جدول ۲ به مقایسه مقادیر اجزای مشترک تابع هدف مسئله پرداخته شده است. مشاهده می‌شود که مقدار تابع هدف در شبکه پیشنهادی این مطالعه نسبت به شبکه مندل بهتر بوده و حدود ۳/۸ درصد کاهش یافته است. از سوی دیگر، اطمینان حاصل شد که مراحل روش حل مسئله و تخصیص تقاضا به‌درستی پیاده سازی شده است.

جدول ۲. مقایسه نتایج این مطالعه با نتایج مطالعه مندل

مطالعه	تعداد خطوط	زمان انتظار (ساعت)	صندلی خالی ساعت	عدم پوشش تقاضا	مقدار تابع هدف
مندل	۴	۳۲،۱۶۴	۱،۸۲۱	۰	۳۳،۹۸۵
این مطالعه	۴	۲۹،۹۶۸	۲،۷۱۷	۰	۳۲،۶۸۵

۵. نتایج مطالعه موردی- شهر تهران

شهر تهران با جمعیت بیش از ۱۲ میلیون نفر دارای ۲۱۹ خط اتوبوس و ۳۲۰۰ ناوگان است. به استثنای خطوط BRT، تمامی

خطوط به شرکت‌های خصوصی واگذار شده است. این واگذاری در قالب قراردادی انجام شده که مبلغ آن معادل مقدار یارانه لازم برای جبران هزینه‌های عملیاتی بخش خصوصی است.

۵-۱ آماده‌سازی داده‌های مورد نیاز

برای پیاده‌سازی مدل، ابتدا گراف شبکه معابر شهر تهران ساخته شد. در این گراف، تنها کمان‌هایی در نظر گرفته شد که قابلیت تردد اتوبوس در آنها وجود دارد. گراف نهایی متشکل از ۱۷۹۳ گره و ۲۹۵۴ کمان است که در شکل ۶ قابل مشاهده است. همچنین ۱۴۲ نقطه به عنوان نقاطی که می‌توانند ابتدا/انتهای یک خط اتوبوس باشند، شناسایی شد که با رنگ قرمز در شکل ۶ متمایز شده‌اند. تعیین این نقاط در شبکه‌های بزرگ مقیاس، نقش بسیار مهمی در کاهش زمان اجرای مدل دارد، زیرا خطوطی که قابلیت اجرا ندارند در ظرف تولید مسیر قرار نمی‌گیرند. این گراف به صورت کامل کدگذاری و به عنوان ورودی به نرم‌افزار داده شد. هر گره یک شماره دارد و هر کمان با شماره گره‌های ابتدا و انتها و طول کمان قابل شناسایی است.

در گام بعد، اطلاعات و پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه هزینه‌های واحد ۴گانه $(\lambda_o, \lambda_i, \lambda_s, \lambda_p)$، که پیش‌نیاز محاسبه یارانه است، جمع‌آوری شد. جدول ۳ مقادیر این پارامترها برای سال ۱۴۰۰ را نشان می‌دهد. مقادیر ریالی مانند قیمت اتوبوس و هزینه‌های عملیاتی سالانه، از شرکت واحد اتوبوسرانی تهران استعلام شده است. با در نظر گرفتن پارامترهای جدول ۳ و روابط ۲ تا ۸، هزینه‌های واحد ۴گانه، به شرح جدول ۴ محاسبه گردید.

آخرین ورودی مدل، ماتریس تقاضای سفر اتوبوس در ساعت اوج شهر تهران است که از شرکت واحد اتوبوسرانی دریافت و بروزرسانی شد. بخشی از این ماتریس به عنوان نمونه در پیوست مقاله آورده شده است.

جدول ۳. برآورد پارامترهای اقتصادی برای یک اتوبوس

پارامتر	مقدار	توضیحات
WD	۳۱۲ روز	روزهای کاری در سال
$DAVK$	۱۵۰ کیلومتر	متوسط پیمایش روزانه
$DAVH$	۱۶ ساعت	متوسط ساعت کاری روزانه
LT	۱۰ سال	عمر مفید یک اتوبوس
P_{bus}	۳۱،۰۰۰،۰۰۰،۰۰۰ ریال	متوسط قیمت یک اتوبوس
C_0	۴،۸۰۰،۰۰۰،۰۰۰ ریال	متوسط هزینه عملیاتی سالانه
C_p	۱۲۰،۰۰۰،۰۰۰ ریال	متوسط هزینه‌های بالاسری شرکت خصوصی
C_I	۳۶،۰۲۸،۸۹۴،۰۴۳ ریال	سود سرمایه‌گذاری در دوره ۱۰ ساله با نرخ سود ۱۸ درصد
P_s	۴،۶۵۰،۰۰۰،۰۰۰ ریال	ارزش اسقاط اتوبوس

جدول ۴. نتایج محاسبه هزینه‌های واحد برای یک اتوبوس

پارامتر	مقدار	واحد اندازه‌گیری
λ_o	۱۰۲،۵۶۴	ریال بر کیلومتر
λ_p	۲۴،۰۳۸	ریال بر ساعت
λ_i	۷۲۱،۷۳۳	ریال بر ساعت
λ_s	۵۲۷،۸۴۵	ریال بر ساعت

۵-۲ تولید مسیر و تشکیل مجموعه مرجع

در گام تولید مسیر، انواع مسیرهای نامزد به شرح گروه‌های ذیل وارد مجموعه مرجع شده‌اند:

۱- خطوط بدست آمده از اجرای الگوریتم کوتاهترین مسیر بین نقاط ترمینالی (با حداکثر انحراف ۱,۳ برابر نسبت به کوتاهترین مسیر): شامل ۴۲۶۰ مسیر

۲- خطوط پرتقاضای تاکسی و ون که قابلیت تبدیل به اتوبوس دارند: شامل ۱۵۵ خط

۳- خطوط اتوبوس موجود: شامل ۲۱۹ مسیر که در سه دسته پرمسافر، با مسافر متوسط و کم مسافر تقسیم‌بندی شده و با احتمال انتخاب مختلف در مجموعه مرجع قرار گرفتند.

۴- خطوط اتوبوس در سوابق گذشته شهر تهران که اکنون فعال نیستند : شامل ۱۳۲ مسیر

بنابراین، در مجموع ۴۷۶۶ مسیر تولید و وارد مجموعه مرجع شدند.

شکل ۶. گراف شبکه معابر شهر تهران و محل نقاط پایانه‌ای

۳-۵ نتایج اجرای مدل و تحلیل

پس از آماده‌سازی اطلاعات (گراف شهر، ماتریس تقاضا، محاسبه هزینه‌های واحد و ساخت مجموعه مرجع)، روش حل پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک اجرا شد. به این منظور مفروضات ذیل لحاظ گردید:

۱- حداقل طول خط ۳ کیلومتر و حداکثر طول خط ۱۵ کیلومتر فرض شد.

۲- حداکثر تقاضای پوشش داده نشده ۱۵ درصد منظور شد.

۳- ظرفیت یک اتوبوس ۵۵ نفر فرض شده است.

۴- بیشینه سرفاصله برابر ۲۰ دقیقه منظور گردید.

۵- حداکثر شعاع پوشش خطوط ۳۵۰ متر فرض شد.

۶- حداکثر تعداد ناوگان برابر ۳۲۰۰ اتوبوس فرض شد که معادل تعداد ناوگان موجود است.

۷- حداکثر تعداد تغییر خط برای هر سفر، ۳ تغییر خط است.

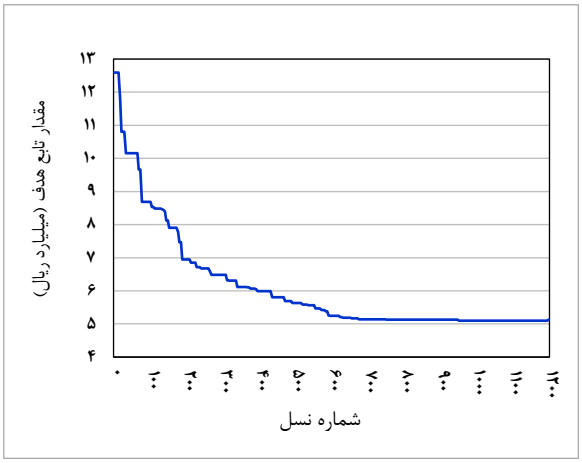
۸- ضرایب تابع هدف اول به این صورت فرض شد:

$(\propto= 5\ ,\beta = 2\ ,\gamma = 10)$

۹- پس از انجام آنالیز حساسیت، تعداد جمعیت ۴۰۰، تعداد تکرار ۱۲۰۰، نرخ آمیزش ۰/۶ و نرخ جهش ۰/۰۰۰۰۵ لحاظ شد.

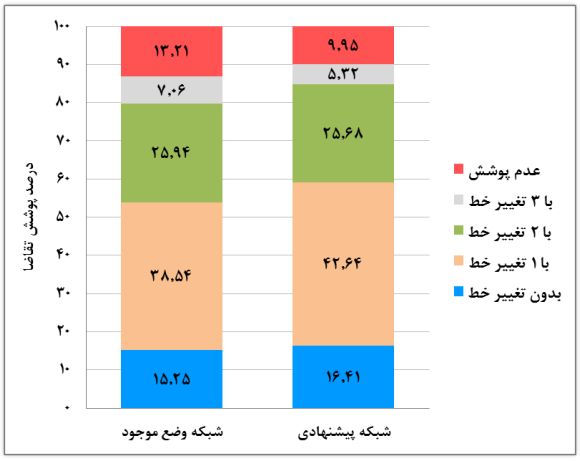
با اجرای چندباره الگوریتم ژنتیک و بررسی نتایج، شبکه برتر استخراج شد. شکل ۷ روند همگرایی الگوریتم ژنتیک و مقدار تابع هدف طی ۱۲۰۰ نسل را نشان می‌دهد. در گام بعد الگوریتم اصلاح مسیر بر روی این شبکه پیاده سازی شد و شبکه نهایی مشخص گردید. شبکه پیشنهادی دارای ۲۲۶ خط اتوبوس است. که از این تعداد، ۱۸۳ خط از شبکه وضع موجود انتخاب شده است. همچنین ۳۶ خط از خطوط شبکه وضع موجود حذف و ۴۳ خط جدید به آن اضافه شده است (۲۲۶=۳۶-۴۳+۲۱۹). به عبارتی، می‌توان گفت که شبکه وضع موجود برای تبدیل شدن به شبکه پیشنهادی، نیازمند ۳۳ درصد تغییر است. این نتیجه با

دیدگاه اجرایی در راستای ایجاد کمترین تغییرات نسبت به شبکه موجود، همخوانی کامل دارد.



شکل ۷. روند همگرایی الگوریتم ژنتیک

شکل ۸ به مقایسه تقاضای پوشش داده در شبکه موجود و پیشنهادی می‌پردازد. تقاضای پوشش داده شده در شبکه پیشنهادی، ۹۰/۰۵ درصد است و نسبت به شبکه وضع موجود، ۳/۲۶ درصد افزایش داشته است. این در حالیست که تقاضای پوشش داده شده بدون تغییر خط و با یک تغییر خط به میزان ۵/۲۶ درصد افزایش و تقاضای پوشش داده شده با ۲ و ۳ تغییر خط به میزان ۲ درصد کاهش یافته است. در نتیجه، نه تنها پوشش کل زیاد شده، بلکه کیفیت پوشش تقاضا با تغییر خط کمتر افزایش یافته است. متوسط تعداد تغییر خط از ۱/۱۷ در شبکه پیشنهادی به ۱/۱ در شبکه پیشنهادی کاهش یافته است.



شکل ۸. مقایسه پوشش تقاضای شبکه پیشنهادی و موجود

در جدول ۵، مقدار تابع هدف و همچنین مقادیر هر یک از اجرای این تابع (شامل ۴ جز)، برای شبکه پیشنهادی و موجود مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که تابع هدف در شبکه پیشنهادی به میزان ۸/۹۴ درصد نسبت به شبکه وضع موجود بهبود داشته که قابل توجه است. مطابق سطر دوم جدول ۵، مجموع زمان انتظار در شبکه پیشنهادی افزایش داشته که در نگاه اول نامطلوب به نظر می‌رسد. اولاً این رخداد همراه با افزایش پوشش تقاضا بوده و اگر به ازای هر مسافر محاسبه شود، افزایش زمان انتظار در شبکه پیشنهادی کمتر از ۴۵ ثانیه است. ثانیاً، خطوط جدید در شبکه پیشنهادی از مناطق با تراکم مسافر کمتر عبور می‌کنند و معمولاً مشمول حالت بیشینه سرفاصله می‌شوند (۲۰ دقیقه) که منجر به زمان انتظار طولانی‌تر می‌شود. بخش دوم تابع هدف، مجموع صندلی خالی در ساعت است که مقادیر آن برای شبکه موجود و پیشنهادی مشابه و تقریباً یکسان است. تقاضای پوشش داده نشده در ساعت اوج نیز از ۲۲۰۳۱ نفر در شبکه موجود به ۱۶۵۹۶ نفر در شبکه پیشنهادی رسیده که به معنای ایجاد پوشش جدید برای ۵۴۳۸ نفر است.

دو سطر آخر جدول ۵ مربوط به آخرین بخش تابع هدف است که یکی یارانه کل شبکه و دیگری یارانه به ازای یک مسافر را نشان می‌دهد. یارانه ساعت اوج برای شبکه موجود ۱/۸۱ میلیارد ریال است که در شبکه پیشنهادی با ۴/۵ درصد کاهش به ۱/۷۳ میلیارد ریال رسیده است. لازم به ذکر است که این کاهش برای یک ساعت اوج گزارش شده است. در طول یک سال، مجموع صرفه‌جویی در یارانه، حدود ۴۰۰ میلیارد ریال خواهد بود که رقم قابل توجهی است. علاوه بر این، به دلیل افزایش پوشش تقاضا، شاخص "یارانه به ازای هر مسافر" کاهش چشمگیرتری به میزان ۷/۹۶ درصد را نشان می‌دهد. خلاصه اینکه، شبکه پیشنهادی پوشش تقاضای بالاتری نسبت به شبکه موجود دارد و همزمان به یارانه کمتری برای واگذاری خطوط نیاز است. این در حالیست که سقف تعداد ناوگان یکسان فرض شده و تبدیل

شبکه موجود به پیشنهادی تنها نیاز به ۳۳ درصد تغییر در مسیرها دارد.

۶. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، یک مدل جدید برای طراحی بهینه شبکه اتوبوسرانی ارائه شد که برای اولین بار، کاهش هزینه‌های خصوصی در صورت مسئله لحاظ گردید. برای حل مدل، روشی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک ارائه شد که قابلیت پیاده‌سازی در شبکه‌های واقعی و بزرگ مقیاس را دارد. این مهم با به کارگیری شیوه‌های ابتکاری در مرحله تولید و انتخاب مسیرها محقق گردید. آزمایش مدل بر روی شبکه مندل و شهر تهران با ۱۷۹۳ گره و ۲۹۵۴ کمان انجام و شبکه اتوبوسرانی پیشنهادی معرفی گردید.

شبکه پیشنهادی تهران دارای ۲۲۶ خط است و ۹۰ درصد تقاضا را پوشش می‌دهد. مقدار تابع هدف در شبکه پیشنهادی نسبت به شبکه موجود ۸/۹۴ درصد بهبود یافته و تقاضای پوشش داده شده ۳/۲۶ درصد افزایش داشته است.

جدول ۵. مقایسه اجزای تابع هدف در شبکه پیشنهادی و موجود

پارامتر	شبکه موجود	شبکه پیشنهادی	مقایسه
مقدار تابع هدف (ریال بر ساعت)	۵/۶۴E+۹	۵/۱۳E+۹	۸/۹۴ درصد کاهش در تابع هدف
زمان انتظار در شبکه (ساعت)	۱۵،۹۹۹	۱۸،۴۵۶	افزایش ۱۵ درصدی
مجموع صندلی خالی در ساعت (ساعت)	۴۱،۲۴۶	۴۱،۱۵۸	تقریباً یکسان
تعداد تقاضای پوشش داده نشده (نفر)	۲۲،۰۳۴	۱۶،۵۹۶	بهبود پوشش برای ۵۴۳۸ نفر
کل یارانه مورد نیاز در ساعت اوج (ریال بر ساعت)	۱/۸۱E+۹	۱/۷۳E+۹	۴/۵ درصد کاهش
یارانه مورد نیاز به ازای هر مسافر (ریال)	۱۲،۵۰۰	۱۱،۵۰۵	۷/۹۶ درصد کاهش

نتایج نشان داد که با وجود افزایش پوشش تقاضا، مجموع یارانه ساعت اوج برای کل شبکه به میزان ۴/۵ درصد کاهش یافته است. همچنین متوسط مقدار یارانه به ازای هر نفر به میزان ۷/۹۶ درصد کاهش داشته است. این بهبودها زمانی قابل توجه است که بدانیم سالانه حدود ۸۰۰ میلیارد تومان برای یارانه اتوبوس‌ها در شهر تهران هزینه می‌شود (سال ۱۴۰۲). بنابراین، با انتقال از شبکه موجود به شبکه پیشنهادی این مطالعه، می‌توان به صرفه‌جویی سالانه حدود ۴۰ میلیارد تومان دست یافت. شایان ذکر است که نتایج این تحقیق برای تمامی سازمان‌های اتوبوسرانی قابل استفاده است و این امکان را فراهم می‌کند که در فرآیند بازنگری شبکه خطوط اتوبوسرانی، کمینه‌سازی هزینه‌های خصوصی‌سازی نیز لحاظ گردد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی به توسعه و تدقیق تابع یارانه که در این پژوهش معرفی گردید، پرداخته شود. همچنین این مسئله، قابلیت توسعه در شرایط تقاضای الاستیک و لحاظ نمودن سایر مُدهای حمل و نقلی را دارد.

۷. پی‌نوشت‌ها

1. NP-hard Problem
2. Mandl
3. Reference Set
4. K-Shortest Path Algorithm

۸. مراجع

– افندی زاده، ش؛ جوانشیر، ح؛ و الیاسی، ر. (۱۳۸۹). طراحی خطوط شبکه اتوبوسرانی شهری با استفاده از روش جستجوی ممنوع. فصلنامه مهندسی حمل و نقل، سال اول، شماره چهارم، ص. ۱۳–۲۶.

– سیدابریشمی، س؛ خانزاد، ا؛ زرین مهر، ا؛ و ممدوحی، ا. (۱۳۹۶). ارائه یک روش ابتکاری برای طراحی خطوط شبکه حمل

ونقل همگانی با استفاده از الگوریتم تولید مسیر. فصلنامه مهندسی حمل و نقل، سال هشتم، شماره چهارم، ص ۶۴۳–۶۵۴.

– Amiripour, S. M. M., Ceder, A. (Avi), & Mohaymany, A. S. (2014). Designing large-scale bus network with seasonal variations of demand. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 48, 322–338.

– Baaj, M. H., & Mahmassani, H. S. (1990). TRUST: A LISP program for the analysis of transit route configurations. Transportation Research Record, 1283, 125–135.

– Baaj, M. H., & Mahmassani, H. S. (1991). AI-based approach for transit route system planning and design. Journal of Advanced Transportation, 25(2), 187–210.

– Baaj, M. H., & Mahmassani, H. S. (1995). Hybrid route generation heuristic algorithm for the design of transit networks. Transportation Research Part C, 3(1), 31–50.

– Badia, H., Argote-Cabanero, J., & Daganzo, C. F. (2017). How network structure can boost and shape the demand for bus transit. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 103, 83–94.

– Bayliss, K., Mattioli, G., & Steinberger, J. (2021). Inequality, poverty and the privatization of essential services: A ‘systems of provision’study of water, energy and local buses in the UK. Competition & Change, 25(3–4), 478–500.

– Ceder, A. A. (2015). Public Transit Planning and Operation: Modelling, Practice and Behavior, Second Edition. Butterworth-Heinemann.

– Ceder, A., & Wilson, N. H. M. (1986). Bus network design. Transportation Research Part B, 20(4), 331–344.

– Chai, S., & Liang, Q. (2020). An improved NSGA-II Algorithm for transit network design and frequency setting problem. Journal of Advanced Transportation, 2020(1), 2895320.

– Durán-Micco, J., & Vansteenwegen, P. (2022). A survey on the transit network design and frequency setting problem. Public Transport, 14(1), 155–190.

– Duran-Micco, J., Vermeir, E., & Vansteenwegen, P. (2020). Considering emissions in the transit network design and frequency setting problem with a heterogeneous fleet. European Journal of Operational Research, 282(2), 580–592.

– Fielbaum, A., Jara-Diaz, S., & Gschwender, A. (2016). Optimal public transport networks for a general urban structure. Transportation Research Part B: Methodological, 94, 298–313.

– Filgueiras, M., Gkiotsalitis, K., Yap, M., Cats, O., Lobo, A., & Ferreira, S. (2023). Bus network design and frequency setting in the post-COVID-19 pandemic: The case of London. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 149(4), 4023020.

– Gemma, A., Cipriani, E., Crisalli, U., Mannini, L., & Petrelli, M. (2024). A Bus Network Design Model under Demand Variation: A Case Study of the Management of Rome’s Bus Network. Sustainability, 16(2), 803.

– Gong, M., Hu, Y., Chen, Z., & Li, X. (2021). Transfer-based customized modular bus system design with passenger-route assignment optimization. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 153, 102422.

– Hatzenbühler, J., Cats, O., & Jenelius, E. (2022). Network design for line-based autonomous bus services. Transportation, 49(2),

– Mauttone, A., & Urquhart, M. E. (2009). A multi-objective metaheuristic approach for the transit network design problem. Public Transport, 1(4), 253–273.

– Momenitabar, M., & Mattson, J. (2021). A multi-objective meta-heuristic approach to improve the bus transit network: a case study of fargo-moorhead area. Sustainability, 13(19), 10885.

– Ng, M. T. M., Mahmassani, H. S., Verbas, Ö., Cokyasar, T., & Engelhardt, R. (2024). Redesigning large-scale multimodal transit networks with shared autonomous mobility services. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 104575.

– Ngamchai, S., & Lovell, D. J. (2003). Optimal time transfer in bus transit route network design using a genetic algorithm. Journal of Transportation Engineering, 129(5), 510–521.

– Pattnaik, S. B., Mohan, S., & Tom, V. M. (1998). Urban bus transit route network design using genetic algorithm. Journal of Transportation Engineering, 124(4), 368–375.

– Pinto, J., Santos, M. C., & Matos, P. V. (2021). Contracting out public transit services: an incentive performance-based approach.

– Szeto, W. Y., & Wu, Y. (2011). A simultaneous bus route design and frequency setting problem for Tin Shui Wai, Hong Kong. European Journal of Operational Research, 209(2), 141–155.

– Tom, V. M., & Mohan, S. (2003). Transit route network design using frequency coded genetic algorithm. Journal of Transportation Engineering, 129(2), 186–195.

– Wang, C., Ye, Z., & Wang, W. (2020). A multi-objective optimization and hybrid heuristic approach for urban bus route network design. 467–502.

– Hensher, D. A. (2007). Bus transport: Economics, policy and planning (Vol. 18). Elsevier.

– Hu, J., Shi, X., Song, J., & Xu, Y. (2005). Optimal design for urban mass transit network based on evolutionary algorithms. In Advances in Natural Computation (pp. 1089–1100). Springer.

– Huang, D., Gu, Y., Wang, S., Liu, Z., & Zhang, W. (2020). A two-phase optimization model for the demand-responsive customized bus network design. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 111, 1–21.

– Iliopoulou, C., & Kepaptsoglou, K. (2021). Robust electric transit route network design problem (RE-TRNDP) with delay considerations: Model and application. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 129, 103255.

– Laporte, G., Ortega, F. A., Pozo, M. A., & Puerto, J. (2017). Multi-objective integration of timetables, vehicle schedules and user routings in a transit network. Transportation Research Part B: Methodological, 98, 94–112.

– Lee, Y.-J., & Vuchic, V. R. (2005). Transit network design with variable demand. Journal of Transportation Engineering, 131(1), 1–10.

– Liu, Y., Feng, X., Zhang, L., Hua, W., & Li, K. (2020). A pareto artificial fish swarm algorithm for solving a multi-objective electric transit network design problem. Transportmetrica A: Transport Science, 16(3), 1648–1670.

– Mandl, C. E. (1980). Evaluation and optimization of urban public transportation networks. European Journal of Operational Research, 5(6), 396–404.

IEEE Access, 8, 12154–12167.

– Wang, J., Miwa, T., Li, D., & Morikawa, T. (2024). Customised bus service design considering flexible vehicle size and transfer incentivization. Transportmetrica A: Transport Science, 2388618.

– Xiong, J., Huang, T., Xu, Y., Li, T., & Peng, F. (2022). Optimal network design of battery-powered electric feeder bus with determination of fleet size and number of chargers. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 148(1), 4021097.

– Yang, Z., Yu, B., & Cheng, C. (2007). A parallel ant colony algorithm for bus network optimization. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 22(1), 44–55.

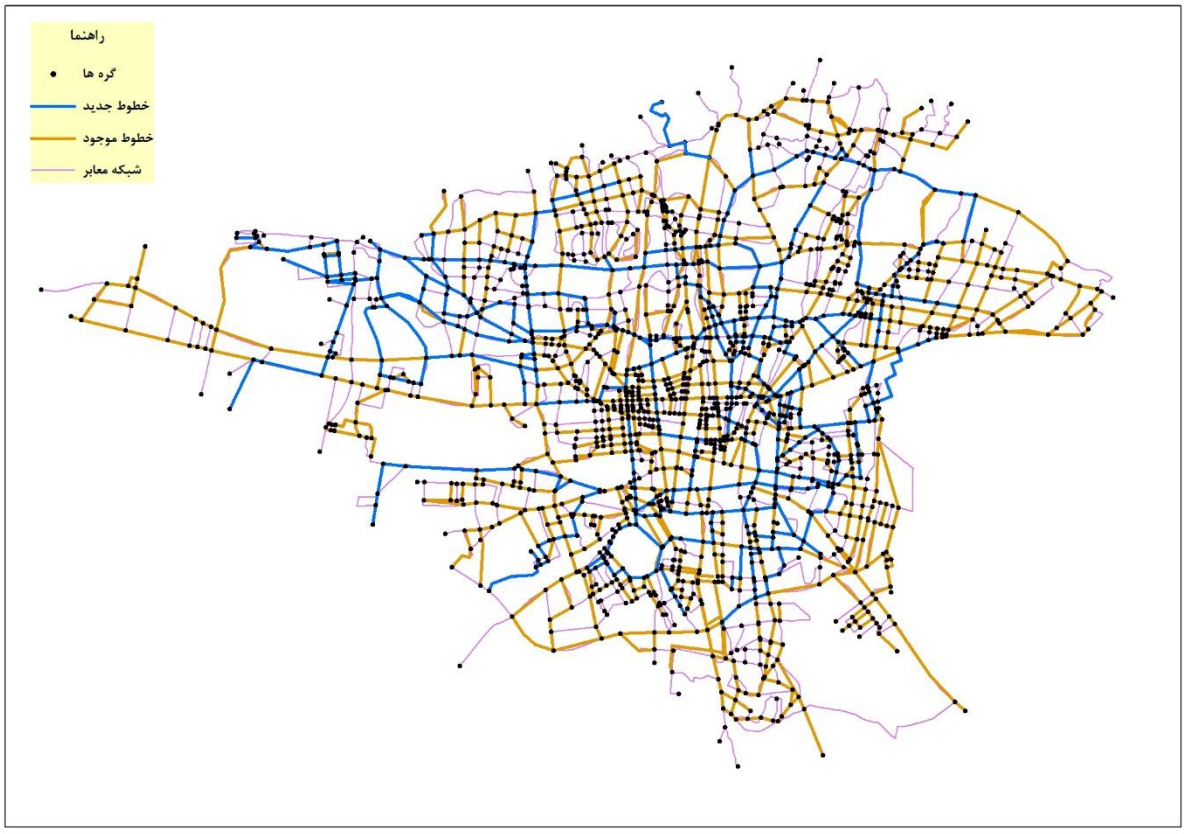
– Yoo, S., Lee, J. B., & Han, H. (2023). A Reinforcement Learning approach for bus network design and frequency setting optimisation. Public Transport, 15(2), 503–534.

– Zhang, T., Ren, G., & Yang, Y. (2020). Transit Route Network Design for Low-Mobility Individuals Using a Hybrid Metaheuristic Approach. Journal of Advanced Transportation, 2020, 7059584.

۹. پیوست

جدول ۶. بخشی از ماتریس تقاضای اتوبوس در ساعت اوج صبح شهر تهران

شماره گره	۱	۲	۳	۴	۵	...	۱۷۹۳
۱	۰	۲/۲۵	۱/۳۴	۲	۱/۶۵	...	۰/۱
۲	۲/۵۶	۰	۲/۹	۰	۰/۳۵	...	۳/۲۳
۳	۱/۲	۱/۹	۰	۰/۵	۰	...	۳/۰۵
۴	۱/۵	۰/۱۱	۰/۶	۰	۱/۲۲	...	۰/۰۱
۵	۱	۰/۱۷	۰/۷	۱/۵	۰	...	۱/۲۴
...	...	...	...	...	...	...	...
۱۷۹۳	۰	۲/۶۶	۲/۳۲	۰	۰/۱	...	۰



شکل ۹. مسیر خطوط در شبکه پیشنهادی برای شهر تهران

شهریار افندی‌زاده، درجه کارشناسی مهندسی عمران از دانشگاه علم و صنعت ایران، درجه کارشناسی ارشد مهندسی راه و ترابری از دانشگاه علم صنعت ایران و درجه دکتری رشته برنامه‌ریزی حمل و نقل از دانشگاه کارلتون کانادا را کسب نموده است. ایشان عضو هیات علمی با مرتبه استاد در دانشگاه علم و صنعت ایران است و زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه، تقاضا در حمل و نقل، مدلسازی و تحلیل سیستم‌های حمل ونقل است.

یاسر تقی‌زاده، درجه کارشناسی مهندسی عمران–عمران از دانشگاه صنعتی شریف و درجه کارشناسی ارشد مهندسی عمران– برنامه‌ریزی حمل‌ونقل از دانشگاه علم و صنعت ایران را کسب نموده است. ایشان دانشجوی دکترای رشته برنامه ریزی حمل و نقل در دانشگاه علم و صنعت است و زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه، حمل و نقل همگانی و اقتصاد در حمل و نقل است.