

طراحی شبکه حمل و نقل همگانی با بهینه سازی چندهدفه دوسطحی مبتنی بر

مدل جانشین: مطالعه موردی شهر کرمان

آرمین جعفرپور، دانشجو دکتری گروه مهندسی برنامه ریزی حمل و نقل، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت

مدرس، تهران، ایران

امیررضا ممدوحی (مسئول مکاتبات)، دانشیار گروه مهندسی برنامه ریزی حمل و نقل، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست،

دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

استاد وابسته، دانشکده مهندسی عمران، زمین شناسی و معدن، دانشگاه فنی مونترال، کانادا

E-mail: armamdoohi@modares.ac.ir

چکیده

طراحی شبکه حمل و نقل همگانی یکی از مسائل پیچیده برنامه ریزی شهری است که به دلیل وابستگی متقابل میان تصمیم های طراحی شبکه و رفتار انتخاب مسیر کاربران، به صورت ذاتی ماهیتی دوسطحی و محاسبات پرهزینه دارد. در این پژوهش، یک چارچوب بهینه سازی چندهدفه دوسطحی مبتنی بر مدل جانشین برای مسئله طراحی شبکه حمل و نقل همگانی ارائه می شود که هدف آن افزایش کارایی محاسباتی بدون تضعیف دقت ارزیابی عملکرد شبکه است. در سطح بالا، تصمیم های برنامه ریز شامل انتخاب خطوط کاندید حمل و نقل همگانی بوده و سه هدف کلیدی شامل بهینه سازی تعداد کاربران حمل و نقل همگانی، کمینه سازی هزینه کل سیستم و کمینه سازی میزان تولید آلاینده های ناشی از حمل و نقل عمومی به طور هم زمان در نظر گرفته شده اند. در سطح پایین، واکنش کاربران از طریق یک مدل تخصیص مبتنی بر سرفاصله در نرم افزار ویزوم شبیه سازی می شود. به منظور کاهش هزینه محاسباتی ناشی از اجرای مکرر مدل تخصیص، از رگرسیون بردار پشتیبان به عنوان مدل جانشین برای تقریب توابع هدف سطح بالا استفاده شده و این مدل به طور مستقیم در حلقه یک الگوریتم فرا ابتکاری چندهدفه ادغام گردیده است. مطالعه موردی شهر کرمان نشان می دهد که مدل جانشین با ضریب همبستگی بالا (۰.۸۲-۰.۷۶) و خطای مطلق میانگین قابل قبول (حدود ۱۰ درصد)، قادر به تقریب مناسب عملکرد شبکه است. نتایج عددی حاکی از کاهش حدود ۹۰ درصدی زمان محاسباتی در مقایسه با حل مستقیم مسئله بوده و در عین حال مجموعه ای پایدار از راه حل های غیر مغلوب پارتو با تنوع مناسب شناسایی شده است. تحلیل روابط میان توابع هدف نیز مبادلات منطقی میان افزایش استفاده از حمل و نقل همگانی، هزینه های سیستم و آلاینده های حمل و نقل عمومی را تأیید می کند. به طور کلی، چارچوب پیشنهادی رویکردی کارآمد و قابل تعمیم برای حل مسائل پیچیده طراحی شبکه حمل و نقل همگانی در مقیاس های واقعی ارائه می دهد.

واژه های کلیدی: طراحی شبکه همگانی، بهینه سازی چندهدفه، الگوریتم فرا ابتکاری

۱. مقدمه

طراحی شبکه حمل و نقل همگانی مستلزم اتخاذ تصمیم‌هایی است که هم‌زمان بر ساختار شبکه، رفتار مسافران و عملکرد کلی سیستم تأثیر می‌گذارند. این تصمیم‌ها شامل انتخاب یا احداث خطوط جدید، اصلاح مسیرها و تعیین ویژگی‌های بهره‌برداری هستند و پیامدهای آن‌ها فراتر از زیرساخت باقی نمی‌ماند، زیرا رفتار مسافران و الگوهای سفر مستقیماً به تصمیم‌های سطح شبکه وابسته است. در نتیجه، مدل‌سازی دقیق شبکه بدون در نظر گرفتن تعامل میان تصمیم‌گیرنده و مسافران، تصویری ناقص از عملکرد واقعی شبکه ارائه می‌دهد.

به‌طور طبیعی، مسئله طراحی شبکه حمل و نقل همگانی در قالب یک مسئله بهینه‌سازی دوسطحی بیان می‌شود. در سطح بالا، تصمیم‌گیرنده به دنبال انتخاب مجموعه‌ای از خطوط حمل و نقل برای احداث یا بهره‌برداری است تا اهداف عملکردی شبکه برآورده شود. در سطح پایین، مسافران مسیرها و خدمات خود را به گونه‌ای انتخاب می‌کنند که هزینه سفرشان به حداقل برسد و الگوی تخصیص جریان در شبکه شکل گیرد. این وابستگی متقابل باعث می‌شود خروجی سطح پایین به‌عنوان ورودی مؤثر در تصمیم‌های سطح بالا عمل کند.

چالش اصلی در حل این نوع مسائل، هزینه محاسباتی بالای اجرای مدل تخصیص در سطح پایین است. هر ارزیابی از یک طرح شبکه در سطح بالا مستلزم اجرای یک مدل تخصیص کامل است که شامل الگوریتم‌های تکراری، توابع هزینه غیرخطی و ماتریس‌های بزرگ مبدأ-مقصد می‌شود. این موضوع، به‌ویژه در شبکه‌های متوسط و بزرگ، حل مستقیم مسئله دوسطحی را تقریباً غیرعملی می‌کند. برای غلبه بر این محدودیت، در این مطالعه از مدل جانشین مبتنی بر رگرسیون بردار پشتیبان استفاده شده است. این مدل قادر است شاخص‌های کلیدی عملکرد شبکه شامل تعداد کل مسافران، هزینه کل سیستم و میزان تولید آلودگی را با دقت مناسب و در زمان کوتاه پیش‌بینی کند و اجرای مکرر مدل تخصیص پرهزینه را جایگزین نماید. نوآوری اصلی

پژوهش در ادغام مستقیم مدل جانشین در حلقه بهینه‌سازی طراحی شبکه است؛ به‌گونه‌ای که امکان بررسی سریع تعداد زیادی از سناریوهای طراحی فراهم شده و قابلیت تعمیم به شبکه‌های بزرگ واقعی حفظ می‌شود. ساختار مقاله به ترتیب ارائه مدل ریاضی دوسطحی، تشریح مدل جانشین، معرفی چارچوب بهینه‌سازی و الگوریتم حل و در نهایت ارائه نتایج عددی و جمع‌بندی نهایی است.

۲. ادبیات پژوهش

مسائل طراحی شبکه حمل و نقل همگانی^۱ به‌طور معمول شامل تصمیم‌هایی در سطح راهبردی هستند که ساختار و عملکرد شبکه را تحت تأثیر قرار می‌دهند. این تصمیم‌ها اغلب به‌صورت سلسله‌مراتبی مدل‌سازی می‌شوند؛ به‌گونه‌ای که در سطح بالا، برنامه‌ریز اقدام به انتخاب یا اصلاح خطوط حمل و نقل همگانی می‌کند و در سطح پایین، کاربران شبکه با توجه به این تصمیم‌ها، مسیر و خدمت مورد استفاده خود را انتخاب می‌کنند. این تعامل منجر به برنامه‌ریزی ریاضی دوسطحی و غیرخطی مسئله طراحی شبکه حمل و نقل همگانی شده و حل آن‌ها را از نظر محاسباتی چالش‌برانگیز می‌سازد. برای مقابله با پیچیدگی این مسائل، مطالعات متعددی از الگوریتم‌های ابتکاری و فرا ابتکاری استفاده کرده‌اند. عویص و عثمان^۲ نشان دادند که ترکیب الگوریتم ژنتیک با روش‌های جست‌وجوی محلی می‌تواند در حل مسائل طراحی شبکه حمل و نقل با ساختار دوسطحی مؤثر باشد. رویکردهای مشابه مبتنی بر الگوریتم ژنتیک نیز برای حل مسائل طراحی شبکه با متغیرهای گسسته و غیر محدب به کار گرفته شده‌اند. با این حال، این روش‌ها معمولاً نیازمند ارزیابی‌های مکرر از مدل سطح پایین هستند که منجر به افزایش قابل توجه زمان محاسباتی می‌شود.

برخی پژوهش‌ها به‌منظور کاهش بار محاسباتی، از روش‌های تقریب سازی استفاده کرده‌اند لی و همکاران^۳ با ارائه تقریب‌های پیوسته برای توابع عملکرد شبکه، تلاش کردند حل مسائل طراحی شبکه را کاراتر سازند. در ادامه، رومان یک رویکرد مبتنی

بر تقریب خطی ارائه دادند که امکان ارزیابی سریع تر طرح های جایگزین شبکه را فراهم می کند. اگرچه این روش ها از نظر محاسباتی کارآمدتر هستند، اما معمولاً با ساده سازی هایی همراه اند که می تواند دقت نمایش رفتار کاربران شبکه را کاهش دهد. از منظر اهداف برنامه ریزی، بسیاری از مطالعات طراحی شبکه حمل و نقل از رویکرد تک هدفه استفاده کرده اند، به طوری که اهداف متعدد نظیر حداقل سازی زمان سفر، هزینه های بهره برداری یا تعداد مداخلات شبکه از طریق ترکیب خطی در قالب یک تابع هدف واحد مدل سازی شده اند. این رویکرد مستلزم تعیین وزن های از پیش مشخص برای اهداف مختلف است که می تواند نتایج را به ترجیحات ضمنی تصمیم گیرنده وابسته سازد.

رومان^۴ یک چارچوب بهینه سازی مبتنی بر مدل جانشین برای حل مسائل طراحی عوارض چندهدفه ارائه می دهد که زمان سفر، مواجهه جمعیت با آلاینده ها و نابرابری زیست محیطی را هم زمان در نظر می گیرد. مدل جانشین به کاهش زمان محاسبات کمک می کند و نتایج روی شبکه های سوفالز و شیکاگو نشان داد که طراحی مناسب عوارض می تواند هم زمان منجر به بهبود عملکرد سفر و عدالت زیست محیطی شود.

چن و همکاران^۵ چارچوب پیشنهادی یک مسئله طراحی شبکه دوسطحی مختلط را با ترکیب توسعه ظرفیت لینک ها و شبیه سازی ترافیک پویا حل می کند. مدل جانشین برای کاهش هزینه محاسبات ناشی از شبیه سازی شبکه های بزرگ استفاده شده و مطالعه موردی روی شبکه مونته گمری^۶ نشان می دهد که این روش با صرفه جویی در زمان، به بهبود قابل توجه زمان سفر شبکه می انجامد.

در مقابل، روش های چندهدفه با رویکرد پس از اجرا^۷ این امکان را فراهم می کنند که بدون نیاز به تعیین وزن های اولیه، مجموعه ای از راه حل های کارا شناسایی شود. ماتون و اورگات^۸ چارچوب هایی برای حل مسائل طراحی شبکه حمل و نقل چندهدفه ارائه کرده اند که به تصمیم گیرنده اجازه می دهد

مبادلات میان اهداف مختلف را به صورت شفاف بررسی کند. این رویکرد به ویژه در شرایطی که اهداف دارای ماهیت های ناهمگن هستند، مانند عملکرد شبکه و عدالت اجتماعی، اهمیت بیشتری می یابد بائو و همکاران^۹ با وجود پیشرفت های قابل توجه در برنامه ریزی ریاضی و حل مسئله طراحی شبکه حمل و نقل همگانی، چالش اصلی همچنان هزینه محاسباتی بالای ارزیابی طرح های شبکه باقی مانده است. به ویژه زمانی که مدل سطح پایین شامل تخصیص تقاضای حمل و نقل همگانی با ساختار تعادلی یا الگوریتم های تکرارشونده باشد. در چنین شرایطی، استفاده از مدل های جانشین به عنوان ابزاری برای تقریب خروجی های مدل های پرهزینه محاسباتی می تواند راهکاری مؤثر باشد. اگرچه بهینه سازی مبتنی بر مدل جانشین در برخی مسائل طراحی شبکه حمل و نقل جاده ای مورد استفاده قرار گرفته است، کاربرد آن در طراحی شبکه حمل و نقل همگانی، به ویژه در چارچوب مسائل دوسطحی، همچنان محدود باقی مانده است. این خلأ پژوهشی انگیزه اصلی توسعه چارچوب پیشنهادی این مطالعه را تشکیل می دهد.

۳. روش پژوهش

در این پژوهش، مسئله طراحی شبکه حمل و نقل همگانی به صورت یک مسئله بهینه سازی دوسطحی^{۱۰} فرموله می شود. در این چارچوب، تصمیم های برنامه ریزی در سطح بالا توسط نهاد تصمیم گیر اتخاذ می شوند، درحالی که واکنش کاربران شبکه حمل و نقل در سطح پایین و بر اساس این تصمیم ها شکل می گیرد. این ساختار، تعامل میان تصمیم های طراحی شبکه و رفتار استفاده کنندگان سیستم را به صورت صریح مدل سازی می کند.

سطح بالای مدل مسئول انتخاب خطوط حمل و نقل همگانی برای احداث یا ارتقا از میان مجموعه ای از خطوط کاندید است، درحالی که سطح پایین مسئله به تخصیص تقاضای سفر به شبکه حمل و نقل و تعیین الگوی استفاده کاربران از سیستم اختصاص دارد. از آنجاکه حل مکرر مسئله تخصیص در فرآیند بهینه سازی دوسطحی از نظر محاسباتی بسیار پرهزینه است، در این مطالعه از

مدل‌های جانشین برای تقریب تابع‌های هدف سطح بالا و کاهش هزینه محاسباتی استفاده می‌شود. جدول ۱ نمادهای استفاده شده می‌دهد. در برنامه‌ریزی ریاضی مسئله طراحی شبکه همگانی را نشان

جدول ۱. نمادهای مورد استفاده در برنامه‌ریزی ریاضی مسئله طراحی شبکه همگانی

نماد	توضیح
y_l	انتخاب یا عدم انتخاب خط کاندید (l) اگر انتخاب شود یک و در غیر این صورت صفر
$\mathbf{x}$	نتایج تخصیص سفر و جریان مسافر در شبکه که به عملکرد خطوط وابسته است
$q_i(\mathbf{y}, \mathbf{x})$	تعداد مسافرانی که از سیستم حمل‌ونقل همگانی در مسیر i و شبکه $\mathbf{y}$ و تخصیص $\mathbf{x}$ استفاده می‌کنند
c_l	هزینه بهره‌برداری یا احداث خط l
f_l	تعداد فراوانی خدمات خط l
L_l	طول خط l
$v_a(\mathbf{y}, \mathbf{x})$	جریان مسافر روی کمان a تحت تأثیر تصمیم‌های سطح بالا و تخصیص سطح پایین
$e_a(v_a)$	میزان تولید آلاینده‌گی کمان a به ازای جریان v_a
B	بودجه کل برای احداث یا بهره‌برداری خطوط همگانی
$F_{PT}(\mathbf{y}, \mathbf{x})$	کل تعداد مسافرانی که از سیستم حمل‌ونقل همگانی استفاده می‌کنند؛ تابعی از تصمیم‌های سطح بالا ($\mathbf{y}$) و خروجی‌های سطح پایین ($\mathbf{x}$)
$F_C(\mathbf{y}, \mathbf{x})$	هزینه کل سیستم، شامل هزینه‌های سفر کاربران و هزینه‌های بهره‌برداری شبکه؛ تابعی از تصمیم‌های سطح بالا و خروجی‌های سطح پایین
$F_E(\mathbf{y}, \mathbf{x})$	میزان تولید آلاینده‌گی ناشی از شبکه حمل‌ونقل همگانی؛ تابعی از جریان‌های شبکه و تصمیم‌های طراحی ($\mathbf{y}, \mathbf{x}$)

۲- هزینه کل سیستم (شامل هزینه‌های سفر کاربران و هزینه‌های بهره‌برداری شبکه)

۳- میزان تولید آلاینده‌گی ناشی از شبکه حمل‌ونقل همگانی این شاخص‌ها به صورت رابطه ۱ تا ۳ تعریف می‌شوند. سطح بالا برای ارزیابی هر طرح شبکه، به خروجی‌های سطح پایین وابسته است.

$$\max F_{PT}(\mathbf{y}, \mathbf{x}) = \sum_{i \in \mathcal{R}} q_i(\mathbf{y}, \mathbf{x}) \quad (۱)$$

$$\min F_C(\mathbf{y}, \mathbf{x}) = \sum_{l \in \mathcal{L}} y_l c_l f_l L_l \quad (۲)$$

$$\min F_E(\mathbf{y}, \mathbf{x}) = \sum_{a \in \mathcal{A}} e_a(v_a(\mathbf{y}, \mathbf{x})) \quad (۳)$$

subject to:

$$\sum_{l \in \mathcal{L}} c_l y_l \leq B \quad (۴)$$

$$y_l \in \{0,1\}, \forall l \in \mathcal{L} \quad (۵)$$

۳-۱ مدل سطح بالا: طراحی شبکه حمل‌ونقل همگانی

در سطح بالا، بردار تصمیم شامل متغیرهای دودویی است که بیانگر انتخاب یا عدم انتخاب هر خط کاندید حمل‌ونقل همگانی برای احداث یا بهره‌برداری است. این تصمیم‌ها به طور مستقیم ساختار شبکه و ظرفیت عرضه حمل‌ونقل همگانی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. هدف سطح بالا، بهینه‌سازی عملکرد کلی سیستم حمل‌ونقل همگانی از منظر برنامه‌ریز است. در این مطالعه، دو شاخص عملکردی به عنوان خروجی نهایی سیستم در نظر گرفته شده‌اند:

۱- کل تعداد مسافرانی که از سیستم حمل‌ونقل همگانی استفاده می‌کنند

۳-۲ مدل سطح پایین: تخصیص تقاضای سفر

در این پژوهش، مدل تخصیص تقاضای سفر در سطح پایین با استفاده از روش سرفاصله-مبنا^{۱۱} در نرم افزار ویزوم^{۱۲} پیاده سازی شده است. در این روش، برنامه زمانی دقیق حرکت وسایل نقلیه لحاظ نمی شود و هر خط حمل و نقل عمومی با مسیر خط، زمان های سیر بین ایستگاه ها و فاصله حرکت توصیف می گردد. تخصیص بر مبنای هزینه تعمیم یافته مسیر انجام می شود که شامل زمان ادراک شده سفر و مؤلفه کرایه بوده و زمان های انتظار به طور ضمنی از سرفاصله خطوط و تحت فرض ورود تصادفی مسافران به ایستگاه ها محاسبه می شوند، مگر آنکه هماهنگی زمانی خطوط به صورت صریح مدل شده باشد.

فرآیند تخصیص شامل محاسبه سرفاصله، جستجوی مسیر و توزیع هم زمان تقاضا میان مسیرهای قابل استفاده است. مسیرها نمایانگر توالی خطوط بوده و مستقل از محور زمان تعریف می شوند. انتخاب خطوط و مسیرها بر اساس مدل های رفتاری تعبیه شده در ویزوم انجام می شود که سطح اطلاعات مسافران را در نظر گرفته و منجر به تخصیص تقاضا به مجموعه ای بهینه از خطوط با حداقل هزینه مورد انتظار سفر می گردد. در نهایت، تقاضای مبدأ-مقصد بر روی مسیرهای شناسایی شده بارگذاری می شود.

با توجه به ماهیت الگوریتمی و شبیه سازی محور روش تخصیص سرفاصله-مبنا، مدل سطح پایین فاقد فرم تحلیلی بسته و مشتق پذیر است و امکان استفاده مستقیم از روش های سنتی بهینه سازی وجود ندارد. از این رو در چارچوب مسئله دوسطحی، خروجی های مدل تخصیص به عنوان پاسخ سیستم به تصمیمات سطح بالا مورد استفاده قرار می گیرند. به منظور کاهش هزینه محاسباتی و تسهیل فرآیند بهینه سازی، مدل رگرسیون بردار پشتیبان برای تقریب توابع هدف سطح بالا بر اساس خروجی های حاصل از مدل تخصیص به کار گرفته شده است.

۳-۳ استفاده از مدل جانشین

برای کاهش بار محاسباتی، در این پژوهش سطح پایین مدل دوسطحی با یک مدل جانشین مبتنی بر رگرسیون بردار پشتیبان جایگزین می شود. ایده اصلی این است که به جای حل صریح مسئله تخصیص برای هر طرح شبکه، خروجی های سطح بالا با استفاده از یک مدل یادگیری ماشین پیش بینی شوند. برای آموزش مدل جانشین، مجموعه ای از طرح های شبکه تولید و مدل تخصیص دقیق برای هر طرح اجرا می شود و خروجی های سطح پایین به عنوان متغیرهای هدف برای آموزش استفاده می شوند. این رویکرد امکان تقریب روابط غیرخطی پیچیده بین ویژگی های شبکه و عملکرد کل سیستم را فراهم می آورد.

برای هر یک از شاخص های عملکرد سطح بالا، یک مدل رگرسیون بردار پشتیبان^{۱۳} جداگانه آموزش داده می شود تا دقت پیش بینی افزایش یابد و امکان تنظیم بهینه پارامترها فراهم گردد. به منظور بهبود پایداری عددی و فرآیند آموزش، خروجی ها نرمال سازی می شوند، درحالی که ورودی ها در مقیاس اصلی خود حفظ می شوند تا قابلیت تفسیر ویژگی های شبکه از بین نرود. رابطه های مدل جانشین به صورت رابطه ۶ تا ۸ می باشند.

$$\hat{F}_{PT}(\mathbf{y}) = SVR_{PT}(\mathbf{y}) \approx F_{PT}(\mathbf{y}, \mathbf{x}) \quad (6)$$

$$\hat{F}_C(\mathbf{y}) = SVR_C(\mathbf{y}) \approx F_C(\mathbf{y}, \mathbf{x}) \quad (7)$$

$$\hat{F}_E(\mathbf{y}) = SVR_E(\mathbf{y}) \approx F_E(\mathbf{y}, \mathbf{x}) \quad (8)$$

استفاده از این مدل جانشین باعث می شود تا تعداد زیادی از طرح های شبکه به سرعت و با دقت مناسب ارزیابی شوند، بدون آنکه نیاز به اجرای مستقیم مدل سطح پایین برای هر طرح باشد و در نتیجه بهینه سازی سطح بالا با کاهش قابل توجه زمان محاسباتی امکان پذیر می شود. در جدول ۲ نمادهای مورد استفاده در الگوریتم فرا ابتکاری مبتنی بر رگرسیون بردار پشتیبان تعریف و در ادامه الگوریتم مورد نظر معرفی شده است.

جدول ۲. نمادهای مورد استفاده در الگوریتم فرا ابتکاری مبتنی بر رگرسیون بردار پشتیبان

نماد	توضیح
N_{iter}	حداکثر تعداد تکرارهای الگوریتم به منظور جستجوی بهینه
N_0	اندازه جمعیت اولیه
N_{cand}	تعداد طراحی های کاندید تولید شده در هر تکرار
F_{sel}	معیار انتخاب طرح های مورد نظر از بین طراحی های کاندید بر اساس مدل جانشین
ϵ	آستانه همگرایی یا میزان تغییرات قابل قبول در نتایج بین تکرارها
α	ضریب به روز رسانی مدل سورروگیت (وزن نمونه های جدید در مدل)
y_{best}	بهترین طراحی انتخاب شده تاکنون در طول اجرای الگوریتم
g	شاخص نسل (یا تکرار)
g_{max}	حداکثر تعداد نسل ها
p_{add}	احتمال افزودن یک راه حل اضافی به والدین
p_{rand}	احتمال انتخاب تصادفی یک راه حل برای ارزیابی با مدل های پرهزینه بدون استفاده از مدل جانشین
p_{cross}	نرخ تلاقی
p_{mut}	نرخ جهش
p_{stat}	احتمال حفظ سطح والدین و جایگزینی آن با فرزند

۳-۴ الگوریتم فرا ابتکاری مبتنی بر رگرسیون بردار

پشتیبان

۱- شماره نسل $g = 1$ در نظر گرفته شده و یک جمعیت اولیه با اندازه N_0 شامل کروموزوم های خطوط $y_j^g x_j^g$ به صورت تصادفی تولید و برای ارضای قیود شبکه اصلاح می شود.

۲- برای هر کروموزوم، تخصیص حمل و نقل همگانی مبتنی بر سرفاصله در نرم افزار ویزوم اجرا شده و مقادیر دقیق توابع هدف $F_{PT}(y, x)$ ، $F_C(y, x)$ و $F_E(y, x)$ محاسبه و در مجموعه آموزش T ذخیره می شود.

۳- با استفاده از داده های مجموعه T ، مدل های جانشین $\hat{F}_{PT}$ ، $\hat{F}_C$ و $\hat{F}_E$ مبتنی بر رگرسیون بردار پشتیبان برای تقریب توابع هدف سطح بالا آموزش داده می شوند.

۴- کروموزوم ها بر اساس غلبه پارتو و با استفاده از پیش بینی مدل جانشین رتبه بندی شده و با احتمال p_n یک کروموزوم

غیر مغلوب و در غیر این صورت یک کروموزوم مغلوب به عنوان والد برای تولید نسل بعدی انتخاب می شود.

۵- با اعمال عملگرهای ژنتیکی، شامل ترکیب با نرخ p_{cross} و جهش با نرخ p_{mut} ، بر والدین منتخب، فرزندان جدید $y x$ تولید شده و مقادیر توابع هدف آن ها توسط مدل جانشین برآورد می شود.

۶- با احتمال p_{rand} ، برخی از فرزندان جدید در ویزوم ارزیابی شده و نتایج حاصل به مجموعه آموزش T افزوده می شوند تا دقت مدل جانشین به روز رسانی شود.

۷- مجموعه والدین و فرزندان ترکیب شده و بهترین N کروموزوم بر اساس رتبه پارتو و معیارهای تنوع برای تشکیل نسل بعدی انتخاب می شوند. احتمال حفظ سطح والدین و جایگزینی آن با فرزند مطابق با p_{stat} نیز در این مرحله اعمال می شود.

۸- در صورت رسیدن g به g_{max} ، الگوریتم متوقف شده و مجموعه نهایی کروموزوم‌های بهینه پارتو گزارش می‌شود؛ در غیر این صورت، $g = g + 1$ و فرآیند تکرار می‌شود.

۳-۵ مزیت روش پیشنهادی

روش‌شناسی ارائه شده، بدون ساده‌سازی رفتار کاربران یا ساختار شبکه، هزینه محاسباتی حل مسئله طراحی شبکه حمل‌ونقل همگانی را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد. استفاده از مدل جانشین مبتنی بر رگرسیون بردار پشتیبان، تعادلی میان دقت پیش‌بینی و کارایی محاسباتی ایجاد کرده و امکان به‌کارگیری مدل‌های دوسطحی در مقیاس‌های بزرگ‌تر و مسائل واقعی را فراهم می‌کند.

۴. معرفی شبکه مورد مطالعه

شبکه مورد مطالعه شامل ۳۰۷۴ گره، ۹۴۶۲ کمان و ۷۹۰ ایستگاه حمل‌ونقل همگانی شهر کرمان است که داده‌های آن از سامانه‌های اطلاعاتی و نقشه‌های حمل‌ونقل شهری استخراج شده‌اند. شبکه شامل تعداد ۱۷۰ جفت مبدأ-مقصد است. تقاضای سفر برای شبکه ثابت در نظر گرفته شد و بر اساس داده‌های آماری مسافران حمل‌ونقل همگانی تعیین شد. شکل ۱ شبکه حمل‌ونقل شهر کرمان را نشان می‌دهد. تمام مسیرها دارای حداقل و حداکثر ظرفیت مشخص هستند و یک بودجه کلی برای اعمال تغییرات در طراحی شبکه در نظر گرفته شده است. مدل تخصیص مسافر به مسیرها با استفاده از الگوریتم توزیع تعادلی شبیه‌سازی شد. برای مدل‌سازی تقاضای سفر، از یک مدل سه مرحله‌ای استفاده شد که شامل مدل توزیع سفر، مدل انتخاب حالت سفر و مدل تخصیص مسافر است.



شکل ۱. شبکه حمل‌ونقل شهر کرمان

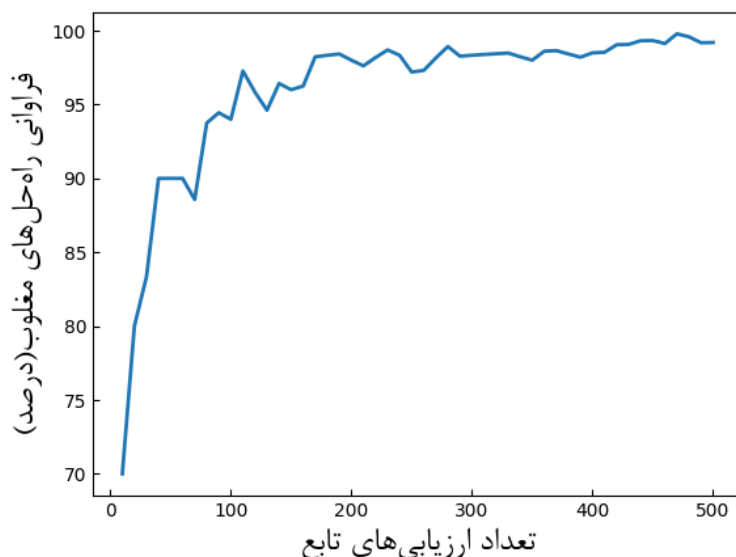
۵. تحلیل داده‌ها

در این بخش، عملکرد چارچوب بهینه‌سازی مبتنی بر مدل جانشین برای مسئله طراحی شبکه حمل‌ونقل همگانی مورد ارزیابی قرار گرفت. تمرکز تحلیل بر رفتار همگرایی الگوریتم و گسترش فضای جواب‌های مغلوب در طول فرآیند جستجو

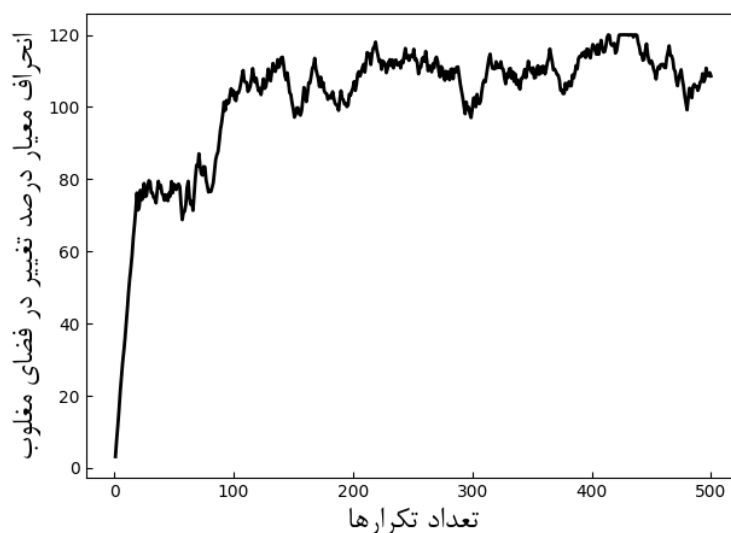
است. مطابق شکل‌های ۲ و ۳، درصد فضای مغلوب در مراحل ابتدایی با سرعت بالایی افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده توانایی الگوریتم در شناسایی سریع نواحی نامطلوب و حذف راه‌حل‌های ضعیف است. با افزایش تعداد ارزیابی‌ها، منحنی به سمت پایداری حرکت کرده و الگوریتم بر بهبودهای موضعی در نواحی

با کیفیت بالاتر تمرکز می‌کند، درحالی‌که نوسانات محدود نشان می‌دهند که فرآیند جستجو فعال باقی می‌ماند و همگرایی زود هنگام رخ نمی‌دهد. این رفتار تأکید می‌کند که الگوریتم تعادلی مناسب بین اکتشاف و بهره‌برداری برقرار می‌کند. استفاده

از مدل جانشین مبتنی بر رگرسیون بردار پشتیبان موجب کاهش میانگین زمان محاسباتی از ۶۰ ساعت به ۷ ساعت (کاهش تقریباً ۹۰٪) شد و امکان ارزیابی تعداد بیشتری از طرح‌های شبکه را بدون کاهش کیفیت راه‌حل‌های غیر مغلوب فراهم آورد.



شکل ۲. تغییرات فراوانی راه‌حل‌های مغلوب در مقابل تعداد ارزیابی‌های واقعی مسئله



شکل ۳. تغییرات درصد راه‌حل‌های مغلوب در مقابل تعداد ارزیابی‌های واقعی مسئله

جدول ۳ همبستگی بین مقادیر واقعی خروجی‌های سطح پایین و پیش‌بینی‌های مدل جانشین را نشان می‌دهد. مقادیر بالای همبستگی (۰٫۷۶-۰٫۸۲) نشان می‌دهد که مدل جانشین تقریباً قابل قبولی از عملکرد شبکه ارائه می‌دهد و دقت انتخاب خطوط و ویژگی‌های بهره‌برداری در سطح بالا تحت تأثیر قابل توجهی

قرار نمی‌گیرد. توجه شود که شاخص میزان آلاینده‌گی F_E تنها شامل آلاینده‌گی ناشی از حمل‌ونقل عمومی است. جدول ۲ ضریب همبستگی بین توابع هدف را ارائه می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش تعداد مسافران F_{PT} با کاهش هزینه کل سیستم F_C و کاهش میزان آلاینده‌گی F_E رابطه منفی دارد، زیرا

منطقی اهمیت تحلیل پارتو و تصمیم‌گیری چندهدفه را در طراحی شبکه برجسته می‌کند و نشان می‌دهد بهبود یک شاخص ممکن است با کاهش عملکرد شاخص‌های دیگر همراه باشد. شکل ۴ خطوط برگزیده را نمایش می‌دهد.

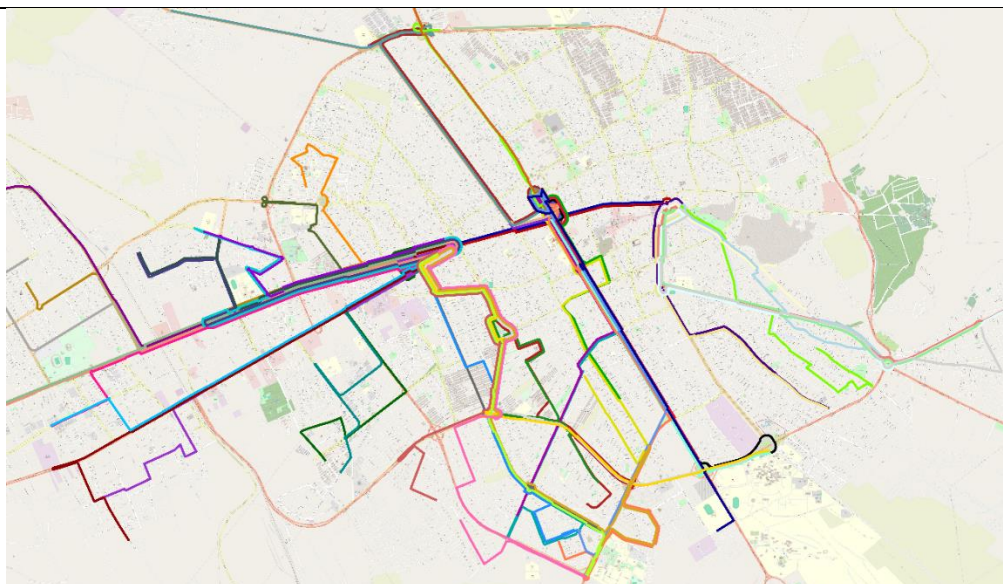
افزایش استفاده از حمل‌ونقل عمومی موجب کاهش هزینه و کاهش آلاینده‌گی حمل‌ونقل عمومی می‌شود. از سوی دیگر، هزینه کل سیستم و میزان آلاینده‌گی همبستگی مثبت دارند که نشان می‌دهد افزایش منابع مصرفی شبکه معمولاً با افزایش آلاینده‌گی حمل‌ونقل عمومی همراه است. این روابط مبادله‌ای

جدول ۳. ضریب همبستگی و میانگین خطای مطلق توابع هدف و مدل جانشین

تابع هدف	ضریب همبستگی (r)	میانگین خطای مطلق	دامنه واقعی
F_{PT}	۰,۸۲	۶۰۰ نفر	۲۰۰۰-۵۰۰
F_C	۰,۷۶	$۱۰ \times ۱۰^۱ - ۸۰ \times ۱۰^۱$ تومان	
F_E	۰,۸۲	۰,۲ تن	۵-۱

جدول ۴. همبستگی میان توابع هدف

تابع هدف	F_{PT}	F_C	F_E
F_{PT}	۱,۰۰	-۰,۶۵	-۰,۵۵
F_C	-۰,۶۵	۱,۰۰	۰,۷۰
F_E	-۰,۵۵	۰,۷۰	۱,۰۰



شکل ۴. شبکه حمل‌ونقل همگانی بر اساس الگوریتم فرا ابتکاری مبتنی بر رگرسیون بردار پشتیبان

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

این پژوهش با هدف توسعه یک چارچوب کارآمد برای طراحی شبکه حمل‌ونقل همگانی، یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه دوسطحی مبتنی بر مدل جانشین ارائه کرد. در این چارچوب، تصمیم‌های سطح بالا شامل انتخاب خطوط کاندید حمل‌ونقل همگانی بوده و ارزیابی عملکرد شبکه از طریق شاخص‌های کل تعداد کاربران حمل‌ونقل همگانی، هزینه کل سیستم و میزان تولید آلاینده‌گی انجام شد. به‌منظور کاهش بار محاسباتی ناشی از اجرای مکرر مدل تخصیص مبتنی بر سرفاصله در نرم‌افزار ویزوم، از رگرسیون بردار پشتیبان برای تقریب توابع هدف سطح بالا استفاده گردید. نتایج حاصل از مطالعه موردی شهر کرمان، کارایی و قابلیت کاربرد چارچوب پیشنهادی را نشان می‌دهد که مهم‌ترین یافته‌های آن به شرح زیر است:

۱. استفاده از مدل جانشین مبتنی بر رگرسیون بردار پشتیبان موجب کاهش قابل توجه زمان محاسباتی شد و امکان ارزیابی تعداد بیشتری از طرح‌های شبکه بدون اجرای مستقیم مدل تخصیص فراهم گردید.

۲. چارچوب پیشنهادی توانست مجموعه‌ای پایدار از راه‌حل‌های غیر مغلوب پارتو شناسایی کند و روابط مبادله‌ای میان اهداف افزایش استفاده از حمل‌ونقل همگانی، کاهش هزینه کل سیستم و کاهش تولید آلاینده‌گی را نمایان سازد.

۳. تحلیل درصد فضای مغلوب نشان داد الگوریتم در مراحل ابتدایی قابلیت اکتشافی بالایی دارد و با پیشرفت تکرارها به نواحی بهینه همگرا می‌شود، بدون آنکه دچار همگرایی زودهنگام گردد.

۴. بررسی انحراف معیار تغییرات فضای مغلوب نشان می‌دهد که الگوریتم پس از مراحل ابتدایی به تعادل مناسبی میان تنوع راه‌حل‌ها و تمرکز بر نواحی امیدبخش دست یافته و پایداری فرآیند جستجو حفظ شده است.

۵. نتایج مطالعه موردی نشان داد که طراحی مناسب شبکه می‌تواند به‌طور هم‌زمان جذابیت استفاده از سیستم، کاهش هزینه‌های کلی و کاهش اثرات زیست‌محیطی را بهبود دهد. این پژوهش با وجود نتایج امیدوارکننده، دارای محدودیت‌هایی است. مدل تخصیص سطح پایین مبتنی بر رویکرد سرفاصله‌منا و با فرض ورود تصادفی مسافران است که می‌تواند برخی جنبه‌های زمان‌مند رفتار واقعی کاربران را ساده‌سازی کند. همچنین، مدل جانشین مبتنی بر رگرسیون بردار پشتیبان بر اساس مجموعه‌ای محدود از طرح‌های شبکه آموزش داده شده و تعمیم‌پذیری آن به طرح‌های خارج از دامنه داده‌های آموزشی ممکن است با کاهش دقت همراه باشد. در این مطالعه، تقاضای سفر ثابت فرض شده و شاخص آلاینده‌گی تنها آلاینده‌گی ناشی از بهره‌برداری حمل‌ونقل همگانی را در نظر می‌گیرد. علاوه بر این، نتایج به مطالعه موردی شهر کرمان محدود بوده و ارزیابی چارچوب در سایر شهرها می‌تواند به تعمیم‌پذیری بیشتر آن کمک کند. در راستای توسعه‌های آتی، به‌کارگیری مدل‌های جانشین پیشرفته‌تر، توسعه چارچوب به حالت پویا و چند دوره‌ای و لحاظ شاخص‌های عدالت اجتماعی و عدم قطعیت می‌تواند دقت و جامعیت نتایج را افزایش دهد.

۷. پی‌نوشت‌ها

1. Transit Network Design Problems
2. Owais, M., & Osman
3. Li et al.
4. Roman
5. Chen et al.
6. Montgomery County
7. A posteriori
8. Mauttone, A., & Urquhart
9. Bao et al.
10. Bi-level Optimization Problem
11. Headway-based
12. PTV-Visum
13. Support Vector Regression

۸. مراجع

Transit Network Design Problem. *Public Transport*, 1, 253–273.

– Tedjopurnomo, D., Bao, Z., Choudhury, F., Luo, H., & Qin, A. K. (2022). Equitable Public Bus Network Optimization for Social Good: A Case Study of Singapore. In *Proceedings of the 2022 ACM Conference on Fairness, Accountability, and Transparency (FAccT '22)* (pp. 278–288).

– Owais, M., & Osman, M. K. (2018). Complete hierarchical multi-objective genetic algorithm for transit network design problem. *Expert Systems with Applications*, 114, 143–154.

– Nayeem, M. A., Rahman, M. K., & Rahman, M. S. (2014). Transit network design by genetic algorithm with elitism. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 46, 30–45.

– Li, M., Lin, X., & Chen, X. Q. (2017). A surrogate-based optimization algorithm for network design problems. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 18, 1693–1704.

– Rodriguez-Roman, D. (2018). A surrogate-assisted genetic algorithm for the selection and design of highway safety and travel time improvement projects. *Safety Science*, 103, 305–315.

– Arbex, R. O., & da Cunha, C. B. (2015). Efficient transit network design and frequencies setting multi-objective optimization by alternating objective genetic algorithm. *Transportation Research Part B: Methodological*, 81(Part 2), 355–376.

– Rodriguez-Roman, D., & Ritchie, S. G. (n.d.). Surrogate-based optimization for multi-objective toll design problems. *Transportation Research Part A*.

– Chen, X., Zhu, Z., He, X., & Zhang, L. (2015). Surrogate-Based Optimization for Solving a Mixed Integer Network Design Problem. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2497, 124–134.

– Mauttone, A., & Urquhart, M. E. (2009). A multi-objective metaheuristic approach for the