فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۱۵، شماره ۳، بهار ۱۴۰۳، ص. ۳۷۸۳-۳۷۶۷

مقاله علمی-پژوهشی

توسعه شبکه حمل‌ونقل ریلی با استفاده از الگوریتم حریصانه مبتنی بر بیشترین تاثیر بر زمان سیر – مطالعه موردی: راه‌آهن ایران

امیرعلی زرین‌مهر (مسئول مکاتبات)، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی‌ومهندسی، دانشگاه مازندران، ایران

E-mail: azarinmehr@umz.ac.ir

رضا محمدحسنی، استادیار، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، ایران

دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۲۷ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۲۰

چکیده

مسئله طراحی شبکه راه‌آهن به نحوه تخصیص میزان محدودی بودجه برای توسعه زیرساخت شبکه ریلی می پردازد. از جمله هدف‌هایی که در این مسئله مورد استفاده قرار می‌گیرد می‌توان به کمینه سازی کل زمان سیر در شبکه، کمینه-سازی هزینه‌های توسعه، یا بیشینه سازی درآمد حاصله از انتقال بار اشاره کرد. با توجه به این که دو گروه تصمیم‌گیرنده در این مسئله تاثیر گذار هستند، شکل عمومی مساله طراحی شبکه یک مسئله دوسطحی خواهد بود که در رده مسائل NP-Hard قرار می‌گیرد که حل آن با استفاده از روش‌های دقیق بهینه سازی در مقیاس‌های حتی کوچک با دشواری روبروست. در این مقاله برای حل مسئله طراحی شبکه ریلی، یک الگوریتم تقریبی ابتکاری از نوع حریصانه ارایه می‌شود. در این الگوریتم تمرکز بر توسعه بلاک‌هایی از شبکه ریلی است که بیشترین اثر در کاهش متوسط زمان سیر در شبکه را دارد. روند اضافه کردن بلاک‌ها در شبکه آنقدر ادامه پیدا می‌کند که کل سطح تقاضای ورودی بتواند از شبکه انتقال پیداکند. این الگوریتم با زبان جاوا پیاده سازی شد و شبکه راه‌آهن ایران برای مطالعه موردی انتخاب شد. نتایج الگوریتم پیشنهادی تحلیل گردید. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با توسعه شبکه تا سطح عبور تقاضای ۵۷ میلیون تن، متوسط زمان سیر به کمترین مقدار خود می‌رسد و برای مقادیر تقاضای بیشتر، متوسط زمان سیر روند افزایشی خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: طراحی شبکه، الگوریتم حریصانه، زمان سیر، شبکه راه‌آهن ایران

۱. مقدمه

برنامه‌ریزی در حمل‌ونقل ریلی با توجه به میزان بودجه در دسترس، سطح تصمیم‌گیرندگان و افق پروژه به سه سطح برنامه‌ریزی استراتژیک، برنامه‌ریزی تاکتیکی و برنامه‌ریزی عملکردی طبقه‌بندی می‌شود. از آنجایی که عملاً نمی‌توان هر سه سطح برنامه‌ریزی را در قالب یک مسئله در نظر گرفت، معمولاً سطوح مختلف برنامه‌ریزی تقریباً به صورت جداگانه و متوالی انجام می‌شود. در این مورد، خروجی برنامه‌ریزی استراتژیک به عنوان ورودی برنامه‌ریزی تاکتیکی و خروجی برنامه‌ریزی تاکتیکی به عنوان ورودی برنامه‌ریزی عملکردی استفاده می‌شود.

وجود گلوگاه‌های ظرفیتی در شبکه ریلی کشور، عدم دسترسی برخی بندرهای فعال باری به شبکه ریلی، عدم وجود ظرفیت برای برآورده شدن تقاضای نهان داخلی و بین المللی، کیفیت پایین خدمت رسانی در حمل‌ونقل بار، قابلیت اطمینان پایین در جابه‌جایی بار از عواملی هستند که منجر به کاهش تقاضای بار ریلی می‌گردد. از طرفی ایران در شاهراه جابه‌جایی بار شرق به غرب قرار دارد و بالا بردن ظرفیت ریلی می‌تواند شرکت‌های حمل‌ونقل بین المللی را قانع نماید که از ایران برای عبور بار به غرب استفاده کنند. با توجه به بلند مدت بودن مسئله طراحی شبکه و صرف هزینه‌های کلان در زیرساخت‌های ریلی، در صورتی که این برنامه‌ریزی بدون پشتوانه علمی انجام نشود سبب از بین رفتن سرمایه‌های ملی شود. از این رو مسئله طراحی شبکه حمل‌ونقل ریلی به عنوان یک مسئله در رده ملی و بین المللی دارای اهمیت است.

موضوع طراحی شبکه یکی از موضوعات مهم در برنامه‌ریزی استراتژیک است. به طور خلاصه، طراحی شبکه به چگونگی تخصیص بودجه محدود به توسعه زیرساخت شبکه ریلی می‌پردازد، به گونه ای که اهداف خاصی مانند به حداقل رساندن زمان سیر بار در شبکه، به حداقل رساندن هزینه‌های توسعه، و به حداکثر رساندن درآمد حاصل از انتقال محموله در نظر می‌گیرد [Seyedvakili et al. 2020; Xin, Ma and Ye 2022].

مسئله شبکه طراحی ریلی را می‌توان از زوایای متخلفی مورد بررسی قرار داد. مطالعه پیش رو، به طور خاص، بر مسئله طراحی شبکه حمل بار ریلی برای توسعه بلاک‌های موجود در شبکه (نه ساخت یک محور جدید) با بیشترین تاثیر بر زمان سیر برای عبور سطح مشخصی از بار عبوری سالانه و ارائه یک الگوریتم تقریبی از نوع حریصانه می‌پردازد. در این مطالعه، فرض می‌شود که شبکه با ظرفیت موجود می‌بایست به گونه ای توسعه بیابید که اولا، زمان سیر بار در شبکه کمینه شود، ثانیا سطح مشخصی از تقاضای بار سالانه عبور داده شود.

در ادامه، بخش ۲ پیشینه تحقیق را به اختصار مرور می‌کند. بخش ۳ به بیان ریاضی عمومی مساله دو سطحی طراحی در این مقاله می‌پردازد. در بخش ٤، الگوریتم تقریبی حریصانه و اطلاعات مورد نیاز برای اجرای این الگوریتم، و در بخش ۵، ویژگی‌های شبکه راه‌آهن ایران و نتایج اجرای الگوریتم پیشنهادی برای شبکه ایران ارایه می‌شود. در انتهای مقاله، در بخش ٦، نتیجه گیری و پیشنهادات آینده ارایه می‌گردد.

۲. پیشینه تحقیق

طراحی شبکه حمل‌ونقلی تا کنون از زوایای مختلف و با رویکردهای متفاوتی مورد بررسی قرار گرفته است. به عنوان مثال از توابع هدف مورد استفاده می‌توان به: کمینه سازی متوسط زمان سیر در شبکه، بیشینه سازی درآمد از شبکه، کمینه سازی هزینه‌های زیست محیطی، بیشینه سازی تقاضای محقق شده، و بیشینه سازی پایداری شبکه اشاره کرد. حجم وسیعی از مطالعات طراحی شبکه حمل‌ونقل ریلی، مسئله شبکه را با هدف کمینه متوسط زمان سیر در شبکه را لحاظ کرده اند، چرا که زمان سیر می‌تواند تا حد زیادی بسیاری از ویژگیهای سیستم (کارآمدی، اتلاف وقت، انرژی، سختی سفر، و ...) را نمایندگی کند. از این رو، این مطالعه نیز کمینه سازی زمان سیر در شبکه را به عنوان تابع هدف انتخاب می‌کند [Cullinane,

2000; Lee, and Vuchic, 2005; Long et al. 2010; Mesbah, Sarvi, and Currie, 2008; Xiong and Schneider, 1992; Zarrinmehr, 2015; Zarrinmehr, Saffarzadeh, and Seyedabrishami, 2018; Zarrinmehr et al. 2016; Seyedabrishami et al. 2017].

متغیرهای فراوانی در انتخاب شیوه و مسیر حرکت بار اثرگذار هستند که از جمله می‌توان به هزینه عبور از مسیر، خدمات ارایه شده توسط گونه حمل‌ونقل، قابلیت اطمینان عبور از شبکه، در دسترس بودن خدمات و تجهیزات اشاره کرد. اگر چه هر یک از این متغیرها در فرآیند تصمیم‌گیری موثر است، اما در سطح کلان تصمیم‌گیری، متغیرهای جزیی جایگاهی ندارند و عمدتا به متغیرهای کلی نیاز است. از این رو معیارهای زمان و هزینه سیر در شبکه عموما در اولویت مدل-سازی قرار می‌گیرند [Cullinane and Toy, 2000].

یکی از منابع مهم پیچیدگی مسئله طراحی شبکه حمل‌ونقل ریلی، وجودِ گزینه‌های مختلف برای توسعه و افزایش موضعی ظرفیت در شبکه ریلی است که در مقایسه با حمل‌ونقل جاده ای تنوع به مراتب بیشتری دارد [Yaghini, Nikoo, and Tamaniee 2011]. راهکارهایی متعدد برای بهبود مسائل ظرفیتی در شبکه حمل‌ونقل ریلی مطرح می‌گردد که می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد:

۱. افزایش ظرفیت از طریق احداث یک قطعه جدید [Rosell and Codina, 2020].

۲. افزایش تراک‌های یک مسیر برای افزایش ظرفیت عبوری [Fatemi, 2002],

۳. افزایش ظرفیت از طریق کاهش زمان سیر قطارها استفاده از تکنولوژی‌های نوین در نیروی پیشران [Barros et al. 2020; Hu et al. 2021]،

٤. بستن ایستگاه‌های میانی به منظور کاهش زمان سیر [Hasany and Shafahi, 2018] و

۵. دسته‌بندی قطارهای با توجه به نوع محموله [Hasany and Shafahi, 2018]

اگر فرض کنیم یک گزینه برای توسعه مسیر که شامل دو تصمیم (توسعه و عدم توسعه) وجود داشته‌باشد، و فرض کنیم تنها تعداد ۲۰ پروژه برای توسعه در نظر باشد، فضای جواب‌های مساله دارای ابعادی در مقیاس 2^{20} گردیده، و حل دقیق چنین مسئله ماه‌ها و حتی سال‌ها به طول می‌انجامد که برای یک تصمیم‌گیری می‌تواند دیر شود [Barahimi, Eydi, and Aghaie, 2021; Poorzahedy and Abulghasemi, 2005]. با افزایش تعداد گزینه‌های تصمیم از ۲ به ٦ (به‌عبارتی ۵+۱، شامل یک گزینه برای تصمیم عدم اجرای پروژه و ۵ گزینه اشاره شده در بالا)، پیچیدگی مساله از رده ۲^n به رده ٦^n افزایش پیدا می‌کند، که حل دقیق آن حتی در مقیاس‌های کوچک هم خارج از ذهن خواهد بود. در کنار این نکته، دو سطحی بودن مسائل طراحی شبکه سبب می‌شود که قریب به اتفاق مطالعات صورت گرفته در حوزه طراحی شبکه، از روش‌های حل خود تقریبی مانند الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری محدود شود [Mathew and Sharma, 2009; Zhang et al., 2022] و تنها تعداد محدودی از مطالعات به بررسی امکان حل دقیق این مساله در مثال‌های کوچک پرداخته‌اند [Najy and Diabat, 2020; Zarrinmehr and Shafahi, 2016].

نگاهی به ادبیات تحقیق نشان می‌دهد که با توجه به پیچیدگی های موجود در فضای حل مسائل طراحی شبکه حمل‌ونقل ریلی، تمرکز بر این مسائل در مقایسه با حمل‌ونقل شهری کمتر بوده‌است. مطالعات صورت‌گرفته در این حوزه عمدتا از زاویه خاصی به مساله نگریسته، هریک با فرض‌های ساده‌کننده و هدف‌های خاصی به مساله پرداخته‌اند.

به عنوان نمونه، کوبی و همکاران [Kuby, Xu, and Xie, 2001] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط به منظور حل مساله توسعه شبکه در یک مرحله و با در نظر گرفتن چندپروژه توسعه پیشنهاد می‌کنند. آنها، سپس، به معرفی یک روش ابتکاری بازگشتی به منظور اولویت‌بندی زمانی پروژه‌ها

پرداخته، و نتایج مدل خود را برای کشور چین گزارش می کنند.

اهوجا و همکاران [Ahuja, Möhring, and Zaroliagis, 2009] به منظور برنامه‌ریزی خطوط در شرایط اختلال، یک مدل برنامه‌ریزی استوار برای طراحی شبکه ریلی پیشنهاد می کنند. مدل این پژوهشگران، برخلاف مدل‌های سنتی موجود در ادبیات، هزینه "استوار" ساختن طراحی شبکه و کاهش کارآمدی جواب را نیز وارد تصمیم‌گیری می‌کند. برای این منظور، آنها به مساله از دو زاویه کاربران و برنامه‌ریزان شبکه ریلی نگاه می‌کنند. در این رویکرد، کاربران به دنبال کمینه‌سازی زمان‌سیر در شبکه و برنامه‌ریزان به دنبال کمینه‌سازی هزینه‌های عملکردی خود هستند.

لین و همکاران [Lin, et al., 2017] به مساله طراحی‌شبکه از زاویه کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی، با تمرکز بر CO_2، می‌پردازند. با در نظر گرفتن منافع زیست‌محیطی حاصل از حرکت به سمت حمل‌ونقل ریلی، آنها از یک مدل دو سطحی به منظور رقابت بین شیوه جاده‌ای و شیوه ریلی استفاده می کنند. مدل این پژوهشگران، هزینه تقاضای برآورده‌نشده را به صورت آلودگی اضافه ایجادشده در تابع هدف وارد می‌کند. در رویکردی مشابه نسبت به تقاضای ازدست‌رفته، سیدوکیلی و همکاران [Seyedvakili et al., 2020] هزینه تقاضای ازدست‌رفته را مستقیما در تابع‌هدف مساله وارد می‌کنند. این پژوهشگران برای مساله یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط ارائه‌دادند و نتایج را برای شبکه ریلی ایران با نرم افزار *CPLEX* گزارش کردند.

جوهانسون و همکاران [Johansson, Camporeale, and Palmqvist, 2020] به مساله از زاویه اثرات حمل‌ونقل ریلی بر بازار کار نگریسته و به حل این مساله برای کشور سوئد پرداخته‌اند. مطالعه این پژوهشگران بر مساله دسترسی متناسب به سیستم حمل‌ونقل ریلی و ارتباط آن با شاخص‌های آماری-اقتصادی تمرکز دارد. هیکیش و همکاران [Hickish, Fletcher, and Harrison, 2022] با تمرکز بر حمل‌ونقل ریلی مسافری، مساله رضایت مسافران (ناشی از خطوط‌ویژه ریلی، عملکرد قطار و راحتی ایستگاه‌ها) را وارد مدلسازی خود می‌کنند. آنها با به کارگیری مدل پیشنهادی خود برروی یک مثال فرضی، نشان می‌دهند که این مدل قابلیت حل مساله در ابعاد بزرگ را داشته و می‌تواند هزینه‌های زیرساختی توسعه شبکه (فرضی) را تا مقدار ۵ میلیارد یورو کاهش دهد.

چنان‌که ملاحظه می‌گردد، مطالعات صورت‌گرفته هر کدام از ویژگی و رویکردهای متفاوتی برخوردار هستند. پژوهش پیش رو بر معرفی و حل مساله طراحی شبکه ریلی برای توسعه خطوط فعلی و نه ساخت خطوط جدید متمرکز می‌گردد. آنچه به عنوان جواب‌های الگوریتم ارایه شده در این پژوهش ارائه می‌شود، در سطح استراتژیک بوده و تنها درصد توسعه خطوط فعلی را گزارش می‌کند ولی نحوه محقق کردن سیاست توسعه بدست آمده از این پژوهش، به مرحله بعدی و تصمیم‌گیرندگان سطح بالا واگذار می‌گردد که از روش‌های در دسترس به سمت توسعه پیشنهادی حرکت کنند.

با توجه به خلا مطالعاتی و نیازهای تحقیقاتی شرکت راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران، این مطالعه به مساله دو سطحی توسعه شبکه ریلی می‌پردازد، به گونه‌ای که در سطح پایین ارتباط بین زمان‌سیر و مقدار بار در بلاک‌ها غیرخطی بوده و از یک مدل تخصیص‌ترافیک جزیی به‌منظور مدلسازی استفاده می‌گردد. در سطح بالا، مدل جدیدی از مساله به فراخور نیاز راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران ارائه می‌گردد، که در آن ضمن انتقال سطح مشخصی از تقاضا در شبکه، متوسط زمان‌سیر بار در شبکه حداقل گردد. در ادامه، این مقاله یک الگوریتم حریصانه جدید با قابلیت توسعه تدریجی شبکه ارائه می‌کند که در آن، به‌صورت تکراری ابتدا یک بلاک به ظرفیت رسیده، که احتمال می‌رود بیشترین اثر را در کاهش زمان‌سیر بار در شبکه داشته‌باشد، انتخاب می‌گردد. سپس بلاک انتخاب‌شده به مقدار

جزئی توسعه ظرفیت پیداکرده و مدل تخصیص‌ترافیک از نو اجرا می‌گردد.

۳. مدل‌سازی ریاضی

مسئله طراحی شبکه حمل‌ونقل ریلی بار به صورت یک مسئله دو سطحی معرفی می‌شود. در زیر بخش اول، بیان ریاضی مسئله طراحی شبکه ارایه می‌شود و در زیر بخش دوم، مسئله تخصیص ترافیک برای یافتن جریان تعادلی در شبکه ازدحامی (که زیرمسئله طراحی شبکه است) بیان خواهد شد.

۳-۱ مساله طراحی شبکه

مشکل طراحی شبکه به طور کلی انتخاب یک زیرمجموعه از مجموعه پروژه‌های عمرانی یا توسعه ای با هدف بهینه سازی یک معیار خاص در سطح شبکه است. در این مسئله دو گروه ذینفع در نظر گرفته شده است. در یک طرف آن مدیران، اپراتورهای شبکه و سیاست گزاران و در طرف دیگر استفاده کنندگان یا صاحبان بار در شبکه قرار دارند. گروه اول در واقع به دنبال برآوردن معیارهای خاصی در سطح شبکه مطابق با تصمیمات کلان خود هستند. معیارهایی مانند حداکثر کردن درآمد، حداکثر کردن پوشش سفر، به حداقل رساندن هزینه‌ها، به حداقل رساندن تلفات و به حداقل رساندن کل زمان سیر. آنچه افراد گروه اول می‌توانند به طور کلی به عنوان گزینه‌های طراحی استفاده کنند شامل طیف گسترده ای از تصمیمات است که عبارتند از: ایجاد یا گسترش زیرساخت‌های موجود، تغییر یا تجدید ناوگان، زمان بندی‌های جدید، تغییرات در سطح بازار، اعمال تعرفه‌های جدید برای حمل‌ونقل ریلی.

در سوی دیگر مساله طراحی شبکه برای گروه دوم که شامل شرکت‌های انتقال بار یا صاحبان بار هستند. این گروه همواره سعی در حداکثر ساختن منافع خود دارند و این حداکثرسازی، معمولا از طریق بهینه‌سازی بر روی روش انتقال بار (همچون انتخاب کوتاهترین مسیر) انجام می‌شود که به آن جریان تعادل ترافیکی گفته می‌شود.

در این بخش، به مدل سازی ریاضی مسئله طراحی شبکه به صورت عمومی می‌پردازیم. پیش از بیان کلی مدل ریاضی مساله، به تعدادی از مفروضات و محدودیت‌های اصلی به‌کارگرفته‌شده در این مطالعه، به شرح زیر، اشاره می‌گردد:

تقاضای بار موجود در شبکه، در این مطالعه، به صورت یکپارچه (تفکیک‌نشده) درنظرگرفته شده، از عدم‌قطعیت‌های مربوط به تقاضا صرف‌نظر می‌گردد[Afandi Zade, Ghafari, and Kalantari, 2011].

توسعه شبکه ریلی، تنها به صورت توسعه ظرفیت بلاک‌های موجود در شبکه (نه بلاک‌های جدید) لحاظ می‌گردد.

زمان‌سیر بار در بلاک‌های شبکه تنها از طریق توابع پیشنهادی مطالعات قبلی (که در بخش بعدی، ۳-۲، به آن اشاره می‌شود) مدل‌شده، و مقاله وارد اندرکنش ترافیک بار و مسافر در خطوط‌ریلی نمی‌شود.

از میان اهداف مختلف تصمیم‌گیری، این مطالعه تنها بر کمینه‌سازی متوسط زمان‌سیر بار در شبکه متمرکز می‌گردد. متوسط زمان‌سیر بار در شبکه عبارت است از متوسط مدت‌زمانی که یک تن بار برای انتقال بین مبدا-مقصد در شبکه طی می‌کند.

مقاله، در سطح استراتژیک تصمیم‌گیری، وارد جزئیات راهکارهای توسعه ظرفیت یک بلاک نشده و جزئیات این تصمیم را به مراحل بعدی تصمیم‌گیری واگذار می‌کند.

با مقدمات یادشده، فرض می‌کنیم Ψ مجموعه بلاک‌های ریلی کاندید برای توسعه، و $a \in \Psi$ یک بلاک مدنظر به منظور توسعه با امکان توسعه به میزان z_a واحد ظرفیت متغیر تصمیم‌گیری مسئله است. هدف مساله انتخاب یک یا چند پروژه از میان پروژه‌های پیشنهادی (انتخاب $Z = (z_a)$، به صورت برداری) است، به نحوی که با بهترین کارکرد (یعنی تابع $F(Z,\Gamma)$) انتقال عبور تقاضای بار میسر گردد. این مساله را به لحاظ ریاضی می‌توان به صورت زیر فرمول بندی کرد:

که در آن:

Ψ: مجموعه بلاک‌های کاندید برای توسعه،

$F(Z,\Gamma)$: تابع ارزیابی عملکرد کلی سیستم، برحسب بردار تصمیم Z در شبکه و جریان تعادلی بار Γ،

z_a: متغیر تصمیم میزان توسعه بلاک a با توجه به ظرفیت پایه آن بلاک،

Z: بردار تصمیم میزان توسعه در شبکه (z_a)،

N: شبکه ریلی فعلی قبل از توسعه،

D: ماتریس تقاضای بار برای افق طرح، و

$\Gamma(D,Z,N)$: جریان تعادلی بار در شبکه N با توجه به توسعه پیشنهادی Z برای عبور تقاضای بار D است.

$$Min\ F(Z,\Gamma) \qquad (۱)$$

s.t.

$$\Gamma=\Gamma(D,Z,N) \qquad (۲)$$

$$Z\in\Psi \qquad (۳)$$

در فرمول بندی فوق، تابع هدف (۱) به بهینه‌سازی عملکرد کلی شبکه ریلی مدنظر می‌پردازد. در محدودیت (۲)، جریان تعادلی بار در شبکه N به همراه توسعه پیشنهادی Z برای عبور تقاضای بار برای مدت افق طرح D را تعیین می‌کند. این محدودیت همان مدل سطح دوم است که باعث دو سطحی شدن مدل طراحی شبکه می‌شود. در این محدودیت، تصمیم‌گیری استفاده کنندگان از شبکه ریلی انجام می‌شود و منجر به جریان تعادل ترافیکی بین مبدا–مقصدها می‌شود. محدودیت (۳) بلاک‌های کاندیدا برای توسعه در شبکه مدنظر را تعیین می‌کند.

۳-۲ مسئله تخصیص جریان ترافیک

مسئله تخصیص ترافیک یکی از مسائل مهم در حوزه برنامه‌ریزی حمل‌ونقل است که هدف آن تعیین زمان سیر در بلاک‌ها و مسیرهای شبکه ریلی و نحوه توزیع جریان ترافیک در سطح شبکه است که به آن نیز جریان ترافیک تعادلی می‌گویند. جریان ترافیک تعادلی بر این اصل ساده استوار است که کاربران به دنبال یافتن کوتاهترین مسیر برای خود هستند. نتیجه چنین رفتاری از سوی استفاده کنندگان از شبکه منجر به جریان تعادل استفاده کنندگان می‌شود. در وضعیت جریان تعادل استفاده کننده، جریان در شبکه به گونه‌ای توزیع می‌شود که برای تمامی مبدا–مقصدها، زمان سفر مسیرهای مورد استفاده برابر است و این مقدار کمتر یا مساوی با زمان سفر مسیرهای استفاده نشده است (Sheffi, 1985).

در مسئله طراحی شبکه، از مسئله جریان تعادل استفاده کنندگان یا کاربران در تخمین رفتار و واکنش استفاده کنندگان به تصمیمات مدیران شبکه، در مسئله سطح پایین استفاده می‌شود. در واقع طراح شبکه (همان مدیر شبکه) علاقه مند است بداند هر یک از تصمیماتش چه تأثیری بر معیارهای عملکرد شبکه و رفتار کاربران دارد. به عنوان مثال، طراح می‌خواهد بداند چه بخشی از کاربران ترجیح می‌دهند محموله خود را از حمل‌ونقل جاده ای به ریل در نتیجه ساخت یا افزایش ظرفیت یک بلاک ریلی جدید منتقل کنند. پاسخ به چنین سؤالاتی مستلزم حل یک مسئله تخصیص ترافیک است که می‌تواند عواقب هر تصمیم را پیش بینی کند.

روش‌های مدل سازی و الگوریتم‌های حل متفاوتی برای مساله تخصیص ترافیک ارائه شده‌است که از ابزارهای اولیه برای تخصیص ترافیک می‌توان به الگوریتم تخصیص همه یا هیچ و الگوریتم تخصیص جزیی نام برد. روش تخصیص همه یا هیچ، علی رغم سادگی آن، روش رایجی برای کاربرد در مساله طراحی شبکه نیست، زیرا اولا قدرت بالایی به لحاظ پیش بینی جریان‌های تعادلی ندارد، و ثانیا از دقت کافی برای مقایسه دو یا چند جواب برخوردار نیست. مشکل دقت کافی ابزار تخصیص همواره مورد توجه پژوهشگران حمل‌ونقلی قرار داشته‌است[Boyce, Ralevic-Dekic, and Bar-Gera, 2004]. به عنوان نمونه، گاهی در مساله طراحی شبکه اختلاف دو جواب در حدود بهینگی با یکدیگر کمتر از یک دهم درصد است، در حالی که خود ابزار تخصیص ترافیک که قرار است

این روی اختلاف دو جواب قضاوت کند، خطایی به مراتب بیش از این مقدار دارد. این نقطه ضعف، در شرایطی که نیاز به دقت‌های بسیار بالا در ارزیابی نیست، با روش تخصیص جزءبه جزء تا حدی قابل جبران است. از سایر ابزارهای مهم برای حل مساله تخصیص می‌توان از الگوریتم ترکیب محدب[Sheffi, 1985]، الگوریتم‌های بر مبنای مسیر[Aashtiani and Magnanti, 1981; Zarrinmehr et al., 2019]، و الگوریتم‌های بر مبنای مبدا [Nie, 2012] نام برد.

یکی از قسمت‌های اصلی مسئله تخصیص ترافیک که می‌تواند بر پیچیدگی میزان دقت یافتن جواب جریان تعادلی تأثیر بگذارد، تابع زمان–حجم سفر است که در واقع رابطه بین جریان عبوری از بلاک و زمان سیر آن خواهد بود. اساساً غیر خطی بودن و عدم تقارن توابع زمان سفر–حجم منجر به دشواری حل مسئله تخصیص ترافیک می‌شود. یکی از متداول ترین توابع زمان–حجم سفر مورد استفاده در برنامه‌ریزی حمل‌ونقل جاده ای که تحقیقات زیادی در مورد آن انجام شده است، به شرح زیر است.

$$t_a(x_a) = t_a^0\left[1+\beta\left(x_a/v_a\right)^{\theta}\right] \qquad (٤)$$

که در آن:

x_a:جریان عبوری از بلاک a،

v_a: ظرفیت بلاک a (جریان در بلاک می‌تواند از این ظرفیت بیشتر شود لذا به این ظرفیت، ظرفیت اسمی هم گفته می‌شود)،

t_a^0: زمان‌سفر جریان آزاد (جریانی از بلاک عبور نمی‌کند) در بلاک a،

$t_a(x_a)$: زمان سیر در بلاک a، و

θ, β: پارامترهای کالیبراسیون رابطه زمان سفر–حجم.

تاکنون مطالعات گسترده ای در حوزه‌ی حمل‌ونقل جاده‌ای به مدل‌سازی و برازش تابع زمان سفر–حجم پرداخته اند[Amini, and Esrafili, 2013]، با این‌حال، مطالعه روی این تابع، در حوزه‌ی حمل‌ونقل ریلی همچنان مغفول مانده است[Yu and Ma, 2016]. این در حالی است یک تابع زمان سفر–حجم معتبر برای انجام مطالعات برنامه‌ریزی حمل‌ونقل ریلی در سطح استراتژیک ضروری است. در ادامه، یکی از مطالعات صورت گرفته به منظور کالیبراسیون تابع زمان‌سفر–حجم ریلی به مطالعه دانشگاه صنعتی اصفهان مربوط می‌شود. مطالعه مذکور، پس از بررسی مقادیر مختلف زمان سیر و ترافیک عبوری در هر بلاک، نهایتا مقادیر θ = ۰,۵ و β = ٤ را برای تابع زمان‌سیر–حجم ریلی در ایران پیشنهاد کرد، که این مقادیر مبنای محاسبات این مطالعه نیز قرار می‌گیرد.

٤. الگوریتم حریصانه پیشنهادی

فصل جاری به معرفی الگوریتم حریصانه پیشنهادی این پژوهش موسوم به "الگوریتم حریصانه بر مبنای کاهش متوسط زمان سیر در شبکه" می‌پردازد. در ادامه، در ابتدا الگوریتم و ساختار آن مرور می‌گردد. در این راستا، ابتدا نگاهی به کاربرد الگوریتم‌های حرصیانه در حل مسائل NP-Hard می‌پردازیم. سپس الگوریتم حل حریصانه پیشنهادی را ارائه و تشریح می‌کند و در انتها به بحثی کوتاه در خصوص پیچیدگی الگوریتم می‌پردازیم.

٤–١ معرفی الگوریتم

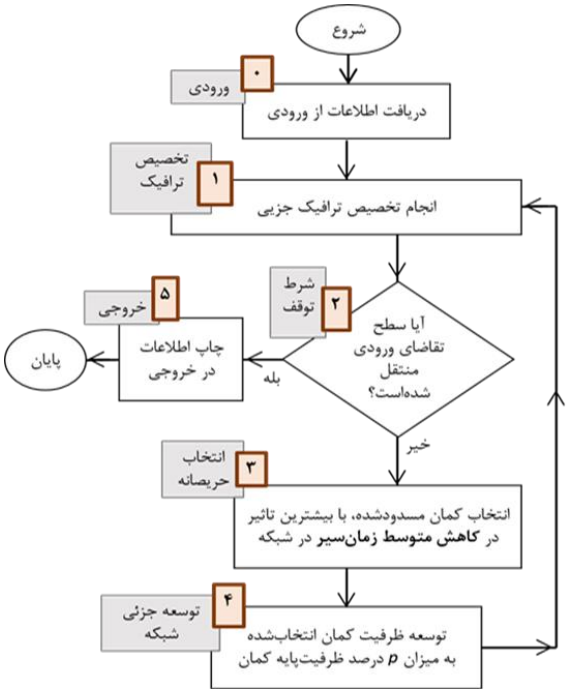
در بخش ۳ بیان شد که مسئله طراحی شبکه از نظر پیچیدگی محاسباتی در دسته مسائل دشوار NP-Hard قرار دارد. در مواجهه با چنین مشکلاتی، دستورهای حل به دو دسته کلی دقیق و تقریبی طبقه‌بندی می‌شوند. دستورهای حل دقیق، اگرچه بهترین جواب جهانی را در بین جواب‌های میسر ارائه می‌دهند، اما با افزایش اندازه و مقیاس مسئله، از نظر محاسبه و زمان حل به اصطلاح غیرقابل مهار هستند. بنابراین دسته دوم از دستورهای حل با نام روش‌های تقریبی برای حل این مسائل مورد استفاده قرار می‌گیرند. به طور کلی، ایده اصلی در حل تقریبی مسائل NP-Hard، از جمله مساله طراحی شبکه، ایجاد

تهاتر بین کیفیت جواب و سرعت رسیدن به جواب بهینه به آن است.

الگوریتم‌های متعددی برای حل تقریبی مسائل NP-Hard پیشنهاد گردیده است، که از آن جمله می‌توان از الگوریتم‌های ابتکاری یا فراابتکاری نام برد. به طور رایج، الگوریتم‌های حریصانه یا گریدی را در دسته الگوریتم‌های فراابتکاری دسته‌بندی می‌شود. در روش حریصانه مستقل از این که در مراحل قبلی چه انتخاب‌هایی صورت گرفته و انتخاب فعلی ممکن است چه انتخاب‌هایی در پی داشته باشد، انتخابی که در ظاهر بهترین انتخاب ممکن است صورت می‌پذیرد. به این دلیل است که به این روش، روش حریصانه گفته می‌شود[Cormen et al, 2022; Zarrinmehr and Moulouk Zadeh, 2022].

در مساله توسعه شبکه ریلی، در کنار هدف کاهش هزینه‌های توسعه که از دید تصمیم‌گیرندگان سطح بالا اهمیت دارد، یکی از موارد مهم از دید استفاده‌کنندگان از سیستم کارایی سیستم به لحاظ متوسط زمان‌سیر بار در آن است. منظور از متوسط زمان-سیر در شبکه آن است که یک تُن از بار به طور متوسط، از مبدا به مقصد چه مدت زمانی را در بلاک‌های شبکه سپری می‌کند. شکل ۱ فلوچارت الگوریتم حریصانه پیشنهادی را نمایش می‌دهد.

الگوریتم با این هدف طراحی شده است که کل یا سطح مشخصی از تقاضا با کمترین متوسط زمان سیر در شبکه بتواند در شبکه انتقال یابد. در ادامه اجزای این الگوریتم با جزییات بیشتری مرور می‌گردد (شکل ۱).



شکل ۱. فلوچارت الگوریتم حریصانه پیشنهادی برمبنای کاهش متوسط زمان‌سیر بار در شبکه

- گام ۰: ورودی

در این گام، الگوریتم اطلاعات مورد نیاز خود را از ورودی دریافت می‌کند. این اطلاعات شامل ماتریس تقاضای سفر بین مبدا–مقصدهای شبکه، تعداد و اسامی ایستگاه‌های شبکه، مشخصات بلاک‌های شبکه (طول، ظرفیت، و یک یا دو تراکه بودن بلاک‌ها)، و غیره می‌گردد. به علاوه، اطلاعاتی همچون پارامترِ "درصد توسعه جزیی شبکه" یا همان p، دقت تخصیص ترافیک جزیی، و غیره نیز همگی از فایل ورودی دریافت می‌گردد.

- گام ۱: تخصیص ترافیک

این گام، گام نخست از حلقه تکرارهای الگوریتم به شمار می-رود. الگوریتم، در این قسمت، از روش تخصیص ترافیک جزیی با تابع زمان سفر–حجم بلاک‌ها استفاده می‌کند، و ماتریس تقاضای ورودی بر روی شبکه بارگزاری می‌شود. در انتهای این گام یکی از این دو حالت ممکن است اتفاق بیافتد: (۱) کل ماتریس تقاضای بار موجود به شبکه تخصیص داده-شود، یا (۲) بخشی از ماتریس تقاضای بار (و نه همه آن) به

شبکه اختصاص یابد، و ارسال بار بیشتر به علت مسدودیت بلاک‌های شبکه غیر ممکن باشد و امکان عبور تقاضا از شبکه میسر نیست. در نتیجه الگوریتم نهایتا در حالت دوم با مجموعه ای از بلاک‌های مسدود شده در سطح شبکه مواجه خواهد شد. منظور از بلاک‌های مسدود شده، بلاک‌هایی هستند که جریان عبوری از آن‌ها به سقف ظرفیت مجاز رسیده است.

- گام ۲: شرط توقف

پس از انجام تخصیص ترافیک، در وضعیتی که تقاضای شبکه منتقل شده باشد، دیگر نیازی به توسعه بیشتر شبکه نیست و الگوریتم به پایان می‌رسد. اما، در غیر این صورت، از میان بلاک‌های شبکه که به ظرفیت خود رسیده اند و مسدود شده اند یکی از بلاک‌ها برای توسعه انتخاب می‌گردد. برای این انتخاب به گام ۳ می‌رویم.

- گام ۳: انتخاب حریصانه

در این گام، الگوریتم از میان بلاک‌های مسدودشده در شبکه در گام ۱، بلاکی را برمی‌گزیند که توسعه آن بتواند بیشترین اثر را در کاهش متوسط زمان‌سیر در شبکه داشته‌باشد. برای تعیین میزان اثر توسعه هر یک از بلاک‌ها همچون a در کاهش متوسط زمان‌سیر، الگوریتم به این ترتیب عمل می‌کند:

الف) یک‌بار تخصیص‌ترافیک را روی شبکه موجود انجام‌داده و از روی آن متوسط زمان‌سیر بار را محاسبه می‌کند و آن را t می‌نامیم.

ب) بار دیگر، ظرفیت بلاک a را به اندازه p_a درصد افزایش داده، مجددا با ابزار تخصیص‌ترافیک متوسط زمان‌سیر بار در شبکه را محاسبه می‌کند و آن را t_a می‌نماییم.

ج) مقدار $\Delta t_a = t - t_a$، به‌طور حریصانه، میزان اثر توسعه بلاک a در کاهش متوسط زمان‌سیر را در شبکه نشان می‌دهد، به این معنی که هرچه مقدار Δt_a بیشتر باشد، توسعه بلاک a نقش پررنگ‌تری در کاهش متوسط زمان‌سیر بار در شبکه خواهد داشت.

- گام ٤ : توسعه جزیی شبکه

الگوریتم بلاکی در گام ۳ که بیشتر اثر در متوسط زمان سیر را دارد انتخاب می‌کند. ظرفیت آن بلاک p درصد افزایش می‌یابد. در اینجا باید توجه داشت که با در نظرگرفتن مقادیر کوچک p می‌توان اطمینان حاصل نمود که افزایش ظرفیت بلاک در حدی نباشد که بخشی از ظرفیت اضافه شده بلا استفاده مانده و سرمایه‌گذاری فاقد توجیه گردد.

- گام ٥: خروجی

الگوریتم در نهایت جواب‌های به دست آمده توسط برنامه را به عنوان اطلاعات خروجی ذخیره می‌کند.

٤-۲ بررسی ویژگی‌های الگوریتم و فضای‌جواب

باید توجه داشت که فضای جواب مساله در این مقاله فوق‌العاده پیچیده و مهارنشدنی است. این امر به دلیل وجود گزینه‌های متعدد توسعه برای هر بلاک و رشد ترکیبی و مهارنشدنی حالات ممکن توسعه بلاک‌ها در شبکه است. با توجه به عدم امکان حل دقیق چنین مساله‌ای (حتی در ابعاد معمولی)، الگوریتم طراحی‌شده در این مقاله یک الگوریتم تقریبی از نوع ابتکاری است که در هر تکرار، مطابق گام ۳ شکل ۱، بر انتخاب اصطلاحا "حریصانه" یک بلاک استوار است و بلاکی که انتظار می‌رود توسعه آن بیشترین تاثیر را در کاهش متوسط زمان‌سیر در سطح کل شبکه داشته‌باشد.

الگوریتم پیشنهادشده، مطابق حلقه ۱-٤-۳-۲-۱ در فلوچارت شکل ۱، در هر تکرار خود با چهار عملیات مواجه است، که عبارت اند از: تخصیص‌ترافیک، کنترل شرط توقف، انتخاب حریصانه یک بلاک مسدود شده، و نهایتا توسعه جزیی بلاک انتخاب شده. از میان این مراحل، دو بخشی که بار محاسباتی قابل توجه ای به الگوریتم وارد می‌کند بخش تخصیص ترافیک (گام ۱) و به ویژه، بخش انتخاب حریصانه یک بلاک مسدود شده (گام ۳) است. الگوریتم پیشنهادی در گام ۳ خود نیاز دارد به تعداد یکایک بلاک‌های مسدودشده موجود، شبکه را در آن بلاک‌ها به طور مصنوعی توسعه داده و یک فرایند تخصیص-ترافیک مجزا انجام دهد. نتیجه اینکه، با فرض وجود n بلاک

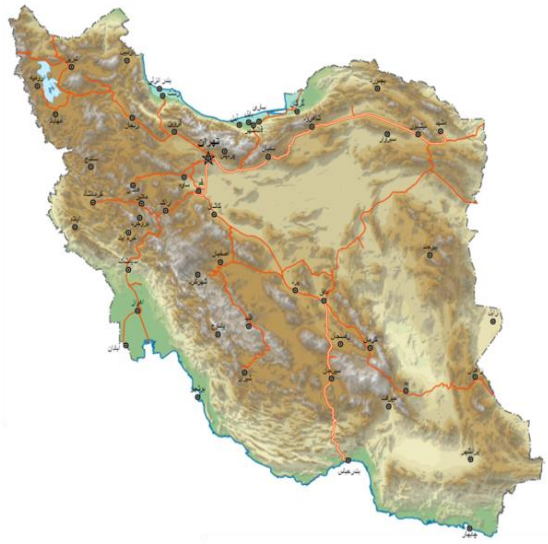
مسدودشده در یک تکرار الگوریتم، در الگوریتم پشنهادی تعداد n+۱ بار تخصیص‌ترافیک صورت می‌پذیرد (یک‌بار در گام ۱ و n بار در گام ۳). می‌یابد.

۵. تحلیل نتایج

در این قسمت، نخست شبکه راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران به عنوان مطالعه موردی در این پژوهش معرفی می‌شود. سپس تحلیل‌هایی در بخش دوم برای شبکه راه‌آهن ارایه می‌گردد و نحوه توسعه پیشنهادی مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد.

۵-۱ شبکه راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران

کشور ایران، اکنون دارای بیش از ۱٤۰۰۰ کیلومتر شبکه راه‌آهن و ٤۳٤ ایستگاه (اهم از ایستگاه تشکیلاتی، ایستگاه سبقت، ایستگاه تعمیرات و ایستگاه صنعتی) است. ساخت و توسعه خطوط آهن در ایران توسط شرکت ساخت و توسعه زیربناهای حمل و نقل کشور انجام می‌پذیرد. نگهداری و تعمیر و هم‌چنین بهره‌برداری از این شبکه برعهده شرکت راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران است[rai.ir 2022]. صورت کلی این شبکه در شکل ۲ قابل مشاهده است.



شکل ۲. صورت کلی شبکه ریلی ایران

تقاضای حمل بار سالانه که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است برگرفته از مطالعه سیدوکیلی و همکاران[Seyedvakili et al., 2018] بر حسب میلیون تن در سال است. البته، برخلاف مطالعه سیدوکیلی و همکاران[Seyedvakili et al., 2018]، در پژوهش فعلی زمان سیر در بلاک ثابت نبوده و همچون مطالعه پژوهشکده حمل‌ونقل دانشگاه صنعتی اصفهان[Iran Ministry of Roads & Urban Development, 2017] وابسته به جریان عبوری از آن بلاک است که برای محاسبه آن از تابع زمان سفر–حجم (که پیش تر در بخش ۳ معرفی گردید) استفاده می‌شود.

۵-۲ نتایج اجرای الگوریتم پیشنهادی

الگوریتم حریصانه پیشنهادی در این مطالعه در محیط برنامه-نویسی Java پیاده سازی، و با سیستم عامل Windows 10, Intel(R) Core(TM) i5-4800U CPU@2.80 GHz، با پردازنده ای از نوع و دارای حافظه RAM معادل ۸ گیگابایت، اجرا گردیده است. اجرای الگوریتم در حدود ۲٦ ساعت به طول انجامید. تعداد تکرارهای الگوریتم تخصیص ترافیک جزئی برابر ۱۰۰ و درصد توسعه جزیی شبکه مقدار معادل ۱۰ درصد ظرفیت پایه یک بلاک درنظرگرفته شد.

با اجرای الگوریتم، میزان توسعه شبکه (در هر مرحله ۱۰ درصد افزایش ظرفیتِ پایه) به ازای مقادیر مختلف تقاضای عبوری گزارش می‌شود. مقدار تقاضای اولیه برابر ۵۰ میلیون تن سالانه به عنوان تقاضای عبوری فعلی تا تقاضای برابر ۷۰ میلیون تن سالانه در نظر گرفته می‌شود[Iran Ministry of Roads & Urban Development, 2017].

در این بخش به ارایه جواب‌های به دست آمده برای تقاضای ۷۰ میلیون تن می‌پردازیم که به صورت درصد توسعه بلاکهای گزارش می‌شود. با توجه به تعدد بلاک‌ها در شبکه راه‌آهن ایران، گزارش یک‌به‌یک میزان درصد توسعه بلاک‌ها کار دشواری است. از این رو، برای خوانایی بهتر، درصد توسعه

بلاک‌ها در نواحی ۱۹ گانه راه‌آهن ایران در جدول ۱ آورده شده است (هفت ناحیه دیگر به دلیل توسعه صفر، در جدول گزارش نشده است).

در جدول ۱، ابتدا مجموع درصدهای توسعه برای بلاک‌های موجود در هر ناحیه بدست آمده است و سپس از بیشترین تا کمترین مجموع درصد توسعه مرتب شده است که منجر به ناحیه‌های هرمزگان، شمال شرق، اصفهان، و... شده است. در جدول ۱ بیشترین میزان توسعه شبکه برای تحقق تقاضای ۷۰ میلیون تن در سال، مربوطه به ناحیه هرمزگان است. ناحیه هرمزگان با واقع شدن در سه استان یزد، کرمان، و هرمزگان از خروجی سوزن ایستگاه اضطراری۲٦ تا ایستگاه بندرعباس گسترده شده است. طول خط ریلی این ناحیه ۱۲۱۲ کیلومتر، ۲۵ ایستگاه و ۲۵ بلاک دارد. از مهمترین ایستگاههای این اداره کل می‌توان به ایستگاه مانوری، انشعاب، تزرج، گل گهر، سیرجان و خاتون آباد نام برد. این ناحیه در شاهراه عبور بار از شمال به جنوب و برعکس قرار دارد. از جمله مهترین انواع بار می‌توان به، غلات، آهن آلات، کانتینرهای داخلی و خارجی، نفت کوره، کود شیمیایی، سنگ آهن و گاز، کنسانتره آهن گندله، مس و اسید سولفوریک اشاره کرد. با توجه به گستردگی انواع بار در این ناحیه، رفتار الگوریتم که نشان دهنده بیشترین توسعه در این ناحیه است کاملا منطقی به نظر می‌رسد.

جدول ۱. اولویت‌بندی مناطق راه‌آهن ایران برحسب درصد توسعه برای تقاضای ۷۰ میلیون تن سالانه

اولویت	نام ناحیه	مجموع درصد توسعه در بلاک‌های هر ناحیه
۱	هرمزگان	۸۳۰
۲	شمال شرق	۳۹۰
۳	اصفهان	۳۸۰
٤	تهران	۳٤۰
۵	یزد	۳۱۰
٦	قم	۱۷۰
۷	خراسان	۹۰
۸	شرق	۹۰
۹	زاگرس	۷۰
۱۰	کرمان	۷۰
۱۱	اراک	۵۰
۱۲	لرستان	۵۰

با توجه به وجود معادن فلزات سنگین در استان های جنوبی و مرکزی کشور، شرکت راه اهن سال هاست با مشکل کمبود ظرفیت خطوط ریلی برای جابه‌جایی بار مواجه است و لذا همیشه به دنبال اولویت بندی توسعه خطوط در این نواحی از راه آهن ایران بوده است. همچنین ناحیه های شمال شرق و تهران به دلیل مرکزیت و عبور بارهای ترانزیتی شرق و غرب و حضور ایستگاه آپرین از نواحی مهم ریلی به حساب می‌آیند. اگر به نتایج الگوریتم مراجعه شود می‌توان به راحتی به اولویت بالای توسعه در نواحی هرمزگان، شمال شرق، اصفهان، تهران، یزد و ... رسید که مطابق انتظار است.

در تحلیل بعدی به ارتباط بین مقدار تقاضای عبوری از شبکه و متوسط زمان سیر در شبکه بر حسب تن پرداخته می‌شود. شکل ۳ این ارتباط را بیان می‌کند. با یک نگاه به این شکل می‌توان متوسط زمان سیر در شبکه را به ازای مقادیر مختلف تقاضا عبوری را بدست آورد. به بیان دیگر، برای سطوح مختلف تقاضای کمتر از ۷۰ میلیون تن، نیاز به اجرای الگوریتم نیست و نتایج از محور قائم نمودار قابل مشاهده خواهد بود.

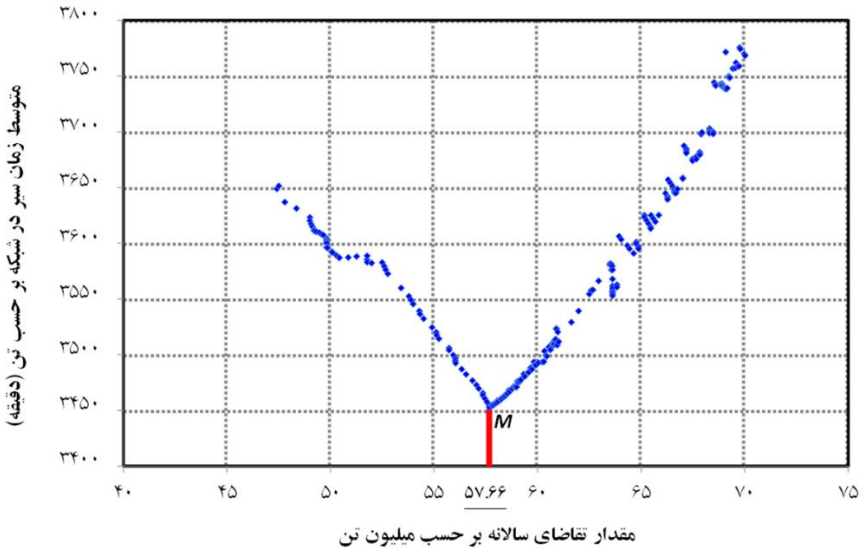
همان طور که در شکل ۳ پیدا است، با افزایش تدریجی مقدار تقاضای عبوری اولیه (حدود ٤۷ میلیون تن)، الگوریتم با توسعه بلاک‌های مختلف در شبکه منجر به کاهش متوسط زمان سیر در شبکه می‌گردد که نشانگر بهبود در شبکه است. این روند تا مرز تقاضای حدود ۵۷ میلیون تن (نقطه M) ادامه می‌یابد. ولی با افزایش بیشتر تقاضای عبوری از شبکه از این مقدار، توسعه

بلاک‌های توسط الگوریتم منجر به افزایش متوسط زمان سیر در شبکه می‌شود و این روند تا نهایت تقاضا (همان ۷۰ میلیون تن) ادامه می‌یابد. این رفتار به دلیل ماهیت غیرخطی "متوسط زمان‌سیر بار در شبکه" هست. در واقع، تا مرز تقاضای ۵۷ میلیون تن شبکه راه‌آهن هنوز پرازدحام نشده است و بهبود در بلاک‌های شبکه در کاهش متوسط زمان سیر موثر است، اما پس از این مقدار، ازدحام بار در شبکه افزایش یافته، متوسط زمان‌سیر رو به افزایش می‌رود.

٦. نتیجه‌گیری

وجود گلوگاه‌های ظرفیتی در شبکه ریلی کشور و کیفیت پایین خدمت رسانی در حمل و نقل بار از عواملی هستند که منجر به کاهش تقاضای ریلی شده است. به دلیل موقعیت استراتژیک ایران و قرارگیری در مسیر شاهراه جابه‌جایی بار شرق به غرب و شمال به جنوب، افزایش ظرفیت ریلی می‌تواند منجر به افزایش درآمد شرکت های ریلی و شرکت راه‌آهن ایران گردد. با توجه به بلند مدت بودن برنامه ریزی طراحی شبکه و سرمایه گذاری کلان در زیرساخت های ریلی، اهمیت مسئله طراحی شبکه دوچندان است. از این رو مسئله طراحی شبکه حمل و نقل ریلی به عنوان یک مسئله استراتژیک دارای اهمیت است.

پژوهش حاضر به مساله توسعه شبکه ریلی کشور ایران اختصاص داشت. در این پژوهش ماتریس تقاضای سفر بار سالانه به صورت داده شده در اختیار بود و توسعه محورهای شبکه به گونه ای مدنظر قرار گرفت که علاوه بر عبور تقاضای‌بار در شبکه، منجر به بیشترین اثر در کاهش زمان سیر در شبکه شود.



شکل ۳. تغییرات متوسط زمان سیر در شبکه بر حسب تن با افزایش مقدار تقاضای عبوری از شبکه

تابع هدف در این پژوهش، کمینه‌سازی متوسط زمان سیر در شبکه است. برای این منظور، یک الگوریتم ابتکاری با رفتار حریصانه پیشنهاد گردید که به صورت تکراری، بلاک‌هایی که بیشتر تاثیر در کاهش متوسط زمان سیر در شبکه را دارند، برای توسعه انتخاب می‌شود. برای این منظور، الگوریتم تمامی بلاک‌های مسدود را در لیست کاندید خود قرار می‌دهد و بلاکی را برای توسعه انتخاب می‌کند که در صورت توسعه در شبکه، به بیشترین کاهش در متوسط زمان سیر منجر شود. نتایج پیاده‌سازی و اجرای الگوریتم پیشنهادی روی شبکه راه‌آهن ایران را به طور خلاصه می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

۱) الگوریتم حریصانه پیشنهادی با توجه به بررسی تمام بلاک‌های مسدود شده به عنوان کاندید و محاسبه متوسط زمان سیر به ازای توسعه هر بلاک از مجموعه کاندیدا، بار محاسباتی سنگینی دارد. ولی در کمتر از ۲۶ ساعت به

جواب‌های خود دست پیدا می‌کند که برای برنامه‌ریزی بلند مدت توسعه شبکه زمان قابل قبولی است.

۲) برای سطح تقاضای ۷۰ میلیون تن در سال، نتایج حاصله نشان می‌دهند که توسعه در ناحیه هرمزگان از بالاترین اولویت برخوردار است که با توجه به موقعیت جغرافیایی این ناحیه کاملا منطقی است.

۳) الگوریتم برای سطح تقاضای ۷۰ میلیون تن در سال اجرا گردید. این الگوریتم این قابلیت را دارد که با صرف زمان اجرای خطی تا هر سطحی از تقاضا به کار خود ادامه دهد و توسعه شبکه متناسب با مقدار تقاضای ورودی را گزارش کند.

نتایج حاصله از پژوهش پیش‌رو را می‌توان در جهات مختلفی توسعه داد، که در اینجا سه مورد از مهم‌ترین آنها اشاره می‌شود.

۱) در این پژوهش برای تعیین وضعیت جریان تعادلی در شبکه، از روش تخصیص ترافیک جزیی استفاده شده است. توصیه می‌شود برای دقیق بیشتر در محاسبات از روش‌های دقیق از جمله الگوریتم ترکیب محدب استفاده شود.

۲) همانطور که مشاهده شد، محاسبه میزان اثر هر بلاک مسدود بر متوسط زمان سیر بخش زیادی از زمان اجرای الگوریتم را به خود اختصاص می‌دهد. با توجه به مستقل بودن محاسبات مربوط به هر بلاک، برای کاهش زمان اجرای الگوریتم، پیشنهاد می‌گردد که در ادامه از موازی سازی الگوریتم استفاده شود.

۳) مسئله طراحی شبکه یک مسئله در رده برنامه‌ریزی استراتژیک است که به عنوان ورودی مسئله‌های رده تاکتیکال در نظر گرفته می‌شود. در صورتی که بتوان مسائل دو رده استراتژیک و تاکتیکال را با هم ترکیب کرد، نتایج معقول‌تری نسبت به حالت فعلی بدست می‌آید.

۷. قدردانی

نویسندگان برخود لازم می‌دانند از نکات سازنده مطرح‌شده توسط داوران مجله مهندسی حمل‌ونقل، که به بهبود کیفیت این مقاله منجر گردید، کمال تشکر و قدردانی را داشته باشند. این مطالعه، از سوی نویسنده اول، مورد حمایت مرکز توسعه، آموزش و فناوری شرکت راه‌آهن جمهوری‌اسلامی ایران قرار داشته است.

۸. مراجع

- Aashtiani, H. Z., and Magnanti, T. L. (1981) “Equilibria on a congested transportation network”, SIAM Journal on Algebraic Discrete Methods, Vol. 2, No. 3, pp 213-226.

- Afandi Zadeh, S., Ghafari, A., and Kalantari, N. (2011), "Demand Box Uncertainty Evaluation in Discrete and ContinuousTransportation Network Design with Genetic and Ant Colony Algorithms", Journal of Transportation Engineering, Vol. 2, No. 3, pp. 205-221(in Persian).

- Ahuja, R. K., Möhring, R. H., and Zaroliagis, C. D. (2009) “Robust and online large-scale optimization: models and techniques for transportation systems”, Springer.

- Amini, B., Esrafili, H. (2013), “Developing Travel Time-volume Functions for Two-way Two-lane Rural Highways in Iran”, Journal of Transportation Engineering, Vol. 4, No. 2, pp. 103-117(in Persian).

- Barahimi, A. H., Eydi, A., and Aghaie, A. (2021), ”Multi-modal urban transit network design considering reliability: multi-objective bi-level optimization”, Reliability Engineering & System Safety, Vol. 216.

- Barros, L. A., Tanta, M., Martins, A. P., Afonso, J. L., and Pinto, J. (2020)

Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, pp 1-23.

- Johansson, E., Camporeale, R., and Palmqvist, C.-W. (2020) " Railway network design and regional labour markets in Sweden", Research in Transportation Economics, Vol. 83.

- Kuby, M., Xu, Z., and Xie, X. (2001). Railway network design with multiple project stages and time sequencing", Journal of Geographical Systems, Vol. 3, No. 1, pp 25-47.

- Iran Ministry of Roads & Urban Development, (2017), "Management report of the consulting project on the analysis of cargo transportation demand and capacity of the main axes of the country's railway network "(in Persian).

- Lee, Y.-J., and Vuchic, V. R. (2005) "Transit network design with variable demand", Journal of Transportation Engineering, Vol. 131, No. 1, pp 1-10.

- Lin, B., Liu, C., Wang, H., and Lin, R. (2017) "Modeling the railway network design problem: A novel approach to considering carbon emissions reduction", Transportation Research Part D: Transport and Environment, Vol. 56, pp 95-109.

- Long, J., Gao, Z., Zhang, H., and Szeto, W. Y. (2010), "A turning restriction design problem in urban road networks", European Journal of Operational Research, Vol. 206, No. 3, pp 569-578.

- Mathew, T. V., & Sharma, S. (2009) "Capacity expansion problem for large urban transportation networks", Journal of Transportation Engineering, Vol. 135, No. 7, pp 406-415.

"Opportunities and challenges of power electronics systems in future railway electrification", Paper presented at the 2020 IEEE 14th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering.

- Boyce, D., Ralevic-Dekic, B., and Bar-Gera, H. (2004) "Convergence of traffic assignments: how much is enough?", Journal of Transportation Engineering, Vol. 130, No. 1, pp 49-55.

- Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., and Stein, C. (2022) "Introduction to algorithms", MIT press.

- Cullinane, K., and Toy, N. (2000) "Identifying influential attributes in freight route/mode choice decisions: a content analysis", Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Vol. 36, No. 1, pp 41-53.

- Fatemi, E. (2002) "Lane tracking, a new technique to reduce headway and increase travel capacity", The Seven International of Railway Engineering.

- Hasany, R. M., and Shafahi, Y. (2018) "Modeling formulation and a new heuristic for the railroad blocking problem", Applied Mathematical Modelling, Vol. 56, pp304-324.

- Hickish, B., Fletcher, D. I., and Harrison, R. F. (2022) "A methodology to optimise a rail network specification for maximum passenger satisfaction and reduced initial investment", Journal of Rail Transport Planning & Management, Vol. 21.

- Hu, X., Zhou, S., Chen, T., and Ghiasi, M. (2021) "Optimal energy management of a DC power traction system in an urban electric railway network with dogleg method", Energy

- Mesbah, M., Sarvi, M., and Currie, G. (2008), “New methodology for optimizing transit priority at the network level”, Transportation Research Record, Vol. 2089, No. 1, pp 93-100.

- Najy, W., and Diabat, A. (2020), “Benders decomposition for multiple-allocation hub-and-spoke network design with economies of scale and node congestion”, Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 133, pp 62-84.

- Nie, Y. (2012), “A note on Bar-Gera's algorithm for the origin-based traffic assignment problem”, Transportation Science, Vol. 46, No. 1, pp 27-38.

- The official website of Railway of Iran, www.rai.ir.

- Poorzahedy, H., and Abulghasemi, F. (2005), Application of ant system to network design problem. Transportation, Vol. 32, No. 3, pp 251-273.

- Rosell, F., and Codina, E. (2020), “A model that assesses proposals for infrastructure improvement and capacity expansion on a mixed railway network”, Transportation Research Procedia, Vol. 47, pp 441-448.

- Seyedabrishami, E., Khanzad, I., Zarinmehr, A., and Mamdouhi, A. (2017), "A Heuristic Method for Public Transportation Network Design using Route - Generation Algorithm", Journal of Transportation Engineering, Vol. 8, No. 4, pp. 643-654(in Persian).

- Seyedvakili, S. A., Nasr Azadani, S. M., Zakeri, J. A., Shafahi, Y., and Karimi, M. (2018), “New model for the railway network design problem”, Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, Vol. 144, No. 11.

- Seyedvakili, S. A., Zakeri, J.-A., Azadani, S. N., and Shafahi, Y. (2020), “Long-term railway network planning using a multiperiod network design model”, Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, Vol. 146, No. 1.

- Sheffi, Y. (1985), “Urban transportation networks”: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

- Xin, X., Wang, X., Ma, L., Chen, K., and Ye, M. (2022), “Shipping network design–infrastructure investment joint optimization model: a case study of West Africa”, Maritime Policy & Management, Vol. 49, No. 5, pp 620-646.

- Xiong, Y., & Schneider, J. B. (1992). Transportation network design using a cumulative genetic algorithm and neural network. Transportation Research Record (1364).

- Yu, T., & Ma, J. (2016), “A review of the link traffic time estimation of urban traffic”, IEEE International Conference on Intelligent Transportation Engineering.

- Yaghini, M., Yamani, N., Tamaniee, M. (2011), “A Methodology for Assessing the Increasing Capacity Methods Using an Optimization Approach with a Case Study on Badrood- Ardakan Route”, Journal of Transportation Engineering, Vol. 3, No. 2, pp. 159-173(in Persian).

- Zarrinmehr, A. (2015), “Parallelization of Ant Colony Algorithm in Transportation Discrete Network Design”, Modares Civil Engineering journal, Vol. 15, No. 2, pp 37-50.

- Zarrinmehr, A., Aashtiani, H. Z., Nie, Y., and Azizian, H. (2019), “Complementarity Formulation and Solution Algorithm for Auto-Transit Assignment Problem”, Transportation

Research Record, Vol. 2673, No. 4, pp 384-397.

- Zarrinmehr, A., and Moulouk Zadeh, H. (2022), “Transit Routes Network Design by Greedy Prioritization of the Routes in Grid Networks”, Journal of Transportation Research (in Persian).

- Zarrinmehr, A., Saffarzadeh, M., and Seyedabrishami, S. (2018), “A local search algorithm for finding optimal transit routes configuration with elastic demand”, International Transactions in Operational Research, Vol. 25, No. 5, pp 1491-1514.

- Zarrinmehr, A., Saffarzadeh, M., Seyedabrishami, S., and Nie, Y. M. (2016), “A path-based greedy algorithm for multi-objective transit routes design with elastic demand”, Public Transport, Vol. 8, No. 2, pp 261-293.

- Zarrinmehr, A., & Shafahi, Y. (2016), “Parallelization of the Branch-and-Bound Algorithm in Transportation Discrete Network Design”, Scientia Iranica, Vol. 23, No. 2, pp 407-419.

- Zhang, Y., Luo, X., Han, X., Lu, Y., Wei, J., & Yu, C. (2022), “Optimization of Urban Waste Transportation Route Based on Genetic Algorithm, Security and Communication Networks.

امیرعلی زرین‌مهر، دوره‌های کارشناسی، کارشناسی‌ارشد، و دکتری خود را در رشته و گرایش مهندسی‌عمران – برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، به ترتیب در دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران، دانشگاه صنعتی‌شریف، و دانشگاه تربیت‌مدرس طی نمود. در حال حاضر، او استادیار برنامه ریزی حمل و نقل در دانشکده فنی‌مهندسی دانشگاه مازندران بوده، پژوهش او بر مسائل طراحی‌شبکه حمل‌ونقلی تمرکز دارد.

رضا محمدحسنی، درجات کارشناسی، کارشناسی‌ارشد، و دکتری خود را در رشته از دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی‌شریف اخذ نمود. او هم‌اکنون استادیار گروه حمل‌ونقل ریلی دانشکده مهندسی راه‌آهن دانشگاه علم‌وصنعت ایران است و فعالیت‌های پژوهشی وی در حوزه تحقیق‌درعملیات است.