مجله علمی - پژوهشی
مهندسی عمران مدرس
دوره بیست و سوم، شماره ۳، سال ۱۴۰۲

ارایه یک الگوریتم حریصانه توسعه شبکه مبتنی بر توسعه با کمترین هزینه – مطالعه موردی: شبکه راه آهن کشور ایران

امیرعلی زرین مهر ، رضا محمدحسنی *

۱-استادیار، گروه مهندسی‌عمران، دانشکده دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه مازندران، ایران
۲- استادیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت، ایران

ایمیل rmhasany@iust.ac.ir*

تاریخ دریافت ۱۴۰۱/۰۵/۲۳ تاریخ پذیرش ۱۴۰۱/۱۰/۳

چکیده

مسائل حمل‌ونقلی به سه سطح استراتژیک، تاکتیکی و کارکردی دسته‌بندی می‌شود که هریک سطح نفوذ، میزان بودجه مورد نیاز، تصمیم گیران و دوره زمانی متفاوتی دارند. مسئله طراحی و توسعه شبکه حمل‌ونقل ریلی یکی از مسائل مهم و کلیدی از سطح استراتژیک است. به طور خلاصه، طراحی شبکه به چگونگی اختصاص دادن بودجه محدود به توسعه زیرساخت شبکه ریلی می‌پردازد، به گونه‌ای که هدف‌های خاصی همچون کمینه‌سازی کل زمان سفر در شبکه، کمینه‌سازی هزینه‌های توسعه یا نگهداری شبکه، بیشینه سازی درآمد به دست آمده از انتقال بار، یا بیشینه‌سازی جذب تقاضای سفر به سوی شیوه ریلی لحاظ شود. شکل عمومی مساله طراحی شبکه یک مسئله دو سطحی در رده مسائل NP-Hard به شمار می‌رود که حل دقیق آن حتی در مقیاس‌های کوچک با دشواری روبروست.

در این مقاله برای حل مسئله طراحی شبکه یک الگوریتم حریصانه ارایه می‌شود که سعی دارد ضمن عبور سطح مشخصی از تقاضای بار از شبکه، هزینه‌های توسعه شبکه را در سطح کمینه نگه دارد. برای این منظور، الگوریتم از یک سطح تقاضای اولیه شروع کرده، پس از اعمال الگوریتم تخصیص ترافیک در هر تکرار، یکی از بلاک‌های به ظرفیت رسیده را انتخاب می‌کندو ظرفیت آن را به صورت جزئی افزایش می‌دهد. در یک رویکرد حریصانه، اولویت انتخاب در هر تکرار به بلاک دارای کمترین هزینه توسعه داده می‌شود. این روند تا جایی پیش می‌رود که کل سطح تقاضای ورودی بتواند از شبکه انتقال پیدا کند. مطالعه پیش رو این الگوریتم را به زبان جاوا پیاده سازی و نتایج حاصله را برای شبکه راه آهن ایران به عنوان مطالعه موردی گزارش می‌کند. مطابق نتایج، با توجه به معیارهای سطح تقاضای عبوری و سطح توسعه (سرمایه گذاری) در شبکه، می‌توان به جواب‌های به دست آمده به دید جواب‌های چندهدفی "شبه پاریتو" نگریست. این جواب‌ها با درصدهای متفاوت از اهمیت این دو هدف مورد بررسی قرارگرفته و نتایج به دست آمده تحلیل می‌شوند.

واژگان کلیدی: طراحی شبکه، الگوریتم حریصانه، شبکه راه آهن ایران، بهینه سازی چند هدفه

۱- مقدمه

امروزه، با حرکت پرشتاب کشورهای جهان به سوی رشد و توسعه پایدار، رشد اقتصادی از جایگاه ویژه‌ای در برنامه‌ریزی برخوردار شده است،و حمل ونقل یکی از مهم‌ترین و تاثیرگذارترین ارکان در فرایند رشد اقتصادی به شمار می‌رود. از همین رو، دستیابی به توسعه و به طور خاص توسعه اقتصادی بدون برنامه‌ریزی حمل‌ونقل امری ناممکن است. برنامه‌ریزی حمل ونقل دایره وسیعی از برنامه‌ریزی‌ها از جمله جابه‌جایی انسان‌ها، جابایی فعالیت‌ها و انتقال کالا را دربرمی‌گیرد، که این موارد نیازمند طراحی یک شبکه کارآمد حمل ونقلی است؛ شبکه‌ای که بتواند وظیفه انتقال فرد یا کالا را از یک مبدا به یک مقصد در زمان و هزینه قابل قبول به انجام برساند.

با رشد جمعیت، افزایش مصرف و نیاز فزاینده به جابه‌جایی بار، توسعه زیرساخت‌های حمل ونقل بار نقش کلیدی در شکوفایی اقتصادی کشورها، از جمله کشور ایران، یافته است. در این میان، حمل ونقل ریلی، به دلیل هماهنگی بیشتر آن با مفهوم توسعه پایدار، نقش پررنگ تری را نسبت به سایر شیوه‌های حمل ونقلی (از جمله شیوه جاده‌ای) ایفاء می‌کند. با وجود این، آمار و ارقام حاکی از آن است که حمل ونقل ریلی در کشور ایران تا رسیدن به جایگاه مطلوب خود هنوز فاصله‌ای قابل توجه دارد. بدیهی است که فراگیر شدن استفاده از شیوه ریلی در حمل بار نیازمند برنامه‌ریزی برای توسعه و ارتقاء شبکه ریلی کشور است. مساله طراحی شبکه ریلی، یکی از پایه‌ای‌ترین مسائلی است که در این راستا مطرح می‌شود و در مطالعه حاضر مورد توجه قرار می‌گیرد.

برنامه‌ریزی درحمل‌ونقل ریلی با توجه به میزان سرمایه‌گذاری، سطح تصمیم‌گیری و افق زمانی به سه سطح برنامه‌ریزی استراتژیکی، برنامه‌ریزی تاکتیکی و برنامه‌ریزی کارکردی تقسیم می‌شود. به دلیل اینکه در نظرگیری هر سه سطح برنامه‌ریزی در قالب یک مسئله در عمل امکان ناپذیراست، به طور معمول سطوح مختلف برنامه‌ریزی به صورت تقریبا مجزا و پی‌درپی انجام می‌شود. در این صورت خروجی برنامه‌ریزی استراتژیکی به عنوان ورودی برنامه‌ریزی تاکتیکی و خروجی برنامه‌ریزی تاکتیکی به عنوان ورودی برنامه‌ریزی کارکردی بکار برده می‌شود [1].

مسئله طراحی شبکه یکی از مسائل مهم در برنامه‌ریزی استراتژیک است. به طور خلاصه، طراحی شبکه به چگونگی اختصاص دادن بودجه محدود به توسعه زیرساخت شبکه ریلی می‌پردازد، به گونه‌ای که هدف‌های خاصی همچون کمینه‌سازی زمان سفر بار در شبکه، کمینه–سازی هزینه‌های توسعه یا نگهداری شبکه، بیشینه‌سازی درآمد به دست آمده از انتقال بار، یا بیشینه‌سازی جذب تقاضای سفر به سوی شیوه ریلی برآورده شود[2].

مساله طراحی شبکه ریلی را می‌توان از زوایای مختلفی تعریف نموده، مورد تحلیل قرار داد؛ از جمله می‌توان به اهداف مساله، محدودیت‌های آن، دوره زمانی، مسافری یا باری و روش حل اشاره کرد. مطالعه پیش رو، به طور خاص، بر مساله "طراحی شبکه حمل بار ریلی مبتنی بر توسعه بلاک (نه ساخت یک خط جدید) با کمترین هزینه با محدودیت عبور سطح مشخصی از تقاضا بار سالانه و ارایه یک الگوریتم حریصانه" متمرکز می‌شود. در این مطالعه، فرض می‌شود که شبکه با ظرفیت موجود باید به گونه‌ای توسعه پیدا کند که سطح مشخصی از تقاضای بار بتواند از آن منتقل شود به شکلی که هزینه توسعه کمینه شود. شکل (۱) حوزه این پژوهش را با توجه به جنبه‌های مختلف تقسیم‌بندی روی مساله مشخص می‌کند.

شکل ۱. حوزه مطالعه حاضر

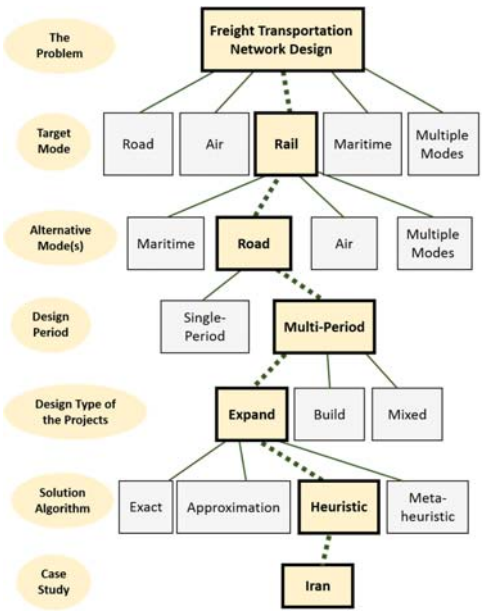


Fig. 1. Scope of the present study

پس از مقدمه فوق، بخش ۲ پیشینه تحقیق را اجمالا مرور می‌کند و جایگاه مطالعه حاضر مشخص می‌شود. بخش ۳ به بیان عمومی مساله می‌پردازد. در بخش ٤، الگوریتم حریصانه پیشنهادی و اطلاعات مورد نیاز برای اجرای این الگوریتم ودر بخش ۵، شبکه راه آهن ایران و نتایج اجرای الگوریتم برای این شبکه ارایه می‌شود. در پایان رویکرد دو هدفه برای توسعه شبکه معرفی و نتایج مربوطه گزارش می‌شود و در بخش ٦، نتیجه‌گیری و پیشنهادات آینده ارایه می‌شود.

۲- پیشینه تحقیق

شیوه حمل‌ونقل ریلی به دلیل قابلیت حمل بار انبوه در مسیرهای طولانی، صرفه‌جویی در مصرف حامل‌های انرژی، استهلاک کمتر، سرعت بالا در تخلیه و بارگیری و کاهش آلودگی محیط‌زیست، دارای مزایای متعددی است [3]. اما علی‌رغم مزایای یادشده و به زعم افزایش تقاضای سفر زمینی بار، در سال‌های اخیر، سهم حمل‌ونقل ریلی بار همگام با حمل‌ونقل جاده‌ای رشد نداشته و در برخی محورها حتی با کاهش همراه بوده است [4]. اهمیت حمل‌و نقل ریلی در ایران تا به جایی بوده‌است که مطابق مصوبه مجلس در سال ۱۳۸٦، سهم حمل‌ونقل ریلی در حمل کالا تا تاریخ ۱۳۹۰ باید به مقدار ۳۰ درصد برسد [5]، که متاسفانه این مقدار با گذشت سال‌ها از آن تاریخ هنوز حاصل نشده است. بدیهی است که تا زمانی که مطالعات تخصصی و جامعی در حوزه برنامه‌ریزی حمل‌ونقل کالا در ایران صورت نگیرد، عدد یادشده به عنوان یک درصد، تنها روی کاغذ و به عنوان یک ایده‌آل اعتبار داشته و ممکن است هرگز به مرحله تحقق نرسد. این مطالعه، به عنوان یک گام پژوهشی در این راستا، با نگاه مدل‌سازی کلان در سطح استراتژیک، به بررسی نقش توسعه زیرساخت‌های ریلی در افزایش سهم شیوه ریلی بار می‌پردازد.

تاکنون اهداف گوناگونی در ادبیات موضوع برای مساله طراحی شبکه حمل‌ونقل و به طور خاص طراحی شبکه حمل‌ونقل ریلی مطرح شده است. به عنوان نمونه، از این اهداف می‌توان به کاهش متوسط زمان سفر، افزایش منافع به دست آمده از شبکه، کاهش آلودگی و سروصدا و هزینه‌های محیط‌زیستی، افزایش جذب تقاضای سفر و افزایش پایداری شبکه اشاره کرد. حجم وسیعی از مطالعات، در ادبیات موضوع، مساله طراحی شبکه را با هدف کمینه سازی متوسط زمان سفر در شبکه حل کرده‌اند. در این دسته از مطالعات، زمان‌سفر بخش مهمی از هزینه‌های تحمیل شده به سیستم را نمایندگی می‌کند [6-12]

بیشتر شبکه‌های حمل‌ونقل، از جمله شبکه‌های ریلی، همواره با ورودی‌ها، داده‌ها و شرایطی همراه هستند که فرض ثابت و بدون تغییر ماندن در مورد آنها قطعیت ندارد. در واقع، شبکه‌ها در طول برنامه‌ریزی همواره مطابق پیش‌بینی عمل نمی‌کنند، که این پدیده می‌تواند ریشه در تغییرات در ورودی‌ها یا بروز حوداث غیر مترقبه داشته‌باشد. در کنار این نکته، باید توجه داشت که در سطح طراحی شبکه، اعمال تغییرات در تصمیم‌های بزرگ و استراتژیک به‌سادگی و در کوتاه‌مدت امکان‌پذیر نیست. از این‌رو، طراحی شبکه‌ای که اصطلاحا در مقابل تغییرات احتمالی "استواری" داشته باشد، اهمیت پیدا می‌کند [14 13].

متغیرهای فراوانی در انتخاب شیوه و مسیر انتقال بار اثرگذار هستند. به عنوان نمونه، در مطالعه کولیان و همکاران، بر اساس فراوانی کاربرد این متغیرها، به فهرستی از آنها به این ترتیب اشاره شده است: هزینه، خدمات، قابلیت اطمینان به زمان سفر، فراوانی سفر، فاصله، سرعت، انعطاف‌پذیری برنامه–ها، دسترسی زیرساخت‌ها، در دسترس بودن خدمات و تجهیزات، آسیب‌پذیری بار ویژگی‌های کالا (همچون نوع کالا یا ارزش و اندازه آن)، تجربه شرکت انتقال‌دهنده و قابلیت ردیابی وسیله انتقال بار. اگرچه هریک از این معیارها به نوبه خود و بسته به مطالعه می‌توانند حائز اهمیت باشند، اما در سطوح کلان تصمیم‌گیری یک مطالعه بیشتر به متغیرهای کلی و همفزون، نیازمند است. کاربردی ترین متغیرها (که در مطالعات بیشترین استفاده را داشته‌اند) به ترتیب اهمیت عبارت‌اند از: هزینه، سرعت (زمان)، قابلیت‌اطمینان به زمان‌سفر ویژگی‌های کالا و خدمات. چنان‌که ملاحظه می‌شود هزینه و زمان انتقال بار همچنان در اولویت مدل‌سازی قرار می–گیرند [15].

مساله زیرساخت‌ها به کمبود ظرفیت در بخش‌هایی از شبکه ریلی کشور مربوط می‌شود. وجود گلوگاه‌های ظرفیتی در شبکه ریلی کشور، به علاوه عدم دسترسی برخی بندرهای فعال باری به شبکه، سبب کاهش تقاضای ریلی بار می‌شود. گلوگاه‌های ظرفیتی اگرچه پیش‌تر مورد مطالعه قرار گرفته اند، اما راهکارهای ارائه شده برای سرمایه‌گذاری و اولویت‌بندی توسعه آنها بیشتر در حد انجام تحلیل حساسیت بوده است[16].

پیچیدگی مسئله طراحی شبکه حمل‌ونقل ریلی، گستردگی گزینه‌های برای توسعه و افزایش ظرفیت شبکه است که در مقایسه با حمل‌ونقل جاده تنوع به مراتب بیشتری دارد. راهکارهایی که برای بهبود مشکل ظرفیتی در محورهای ریلی معمولا مورد استفاده قرار می‌گیرد به شرح ذیل است:

- ✓ دوخطه‌سازی: افزایش ظرفیت از طریق احداث یک خط جدید [17].
- ✓ تراک‌بندی: تقسیم هر بلاک به چند تراک به منظور افزایش ظرفیت [18]،
- ✓ برقی‌سازی: افزایش ظرفیت از طریق کاهش زمان سیر قطارها در اثر برقی‌سازی [19]،
- ✓ بازگشایی ایستگاه بسته: کوتاه‌شدن فاصله بین بلاک‌ها و در نتیجه افزایش ظرفیت [20]،
- ✓ اعزام قطار طویل: افزایش ظرفیت حمل بار از طریق افزایش طول قطار [20]،

اگر فرض کنیم در هر بلاک تنها یک انتخاب از نوع احداث (یعنی دو تصمیم: احداث یا عدم احداث) وجود داشته‌باشد و فرض کنیم تنها تعداد ۲۰ پروژه برای احداث مدنظر قرار داشته‌باشد، فضای امکان‌پذیر مساله دارای ابعادی به بزرگی 2^{20} شده، حل دقیق کامپیوتری مساله ممکن است به ماه‌ها زمان احتیاج داشته باشد [21]. با افزایش تعداد گزینه‌های تصمیم از ۲ به ٦ (به عبارتی ٥+١، شامل یک گزینه برای تصمیم عدم اجرای پروژه)، پیچیدگی مساله از رده 2^n به رده 6^n افزایش پیدا می‌کند، که حل دقیق آن حتی با سوپرکامپیوترها نیز غیرممکن است. از همین روست که قریب به اتفاق مطالعات صورت گرفته در حوزه طراحی شبکه، روش‌های حل خود را به الگوریتم‌های ابتکاری-فراابتکاری محدود می‌کنند [22]، و تنها تعداد محدودی از مطالعات به بررسی امکان حل دقیق این مساله پرداخته‌اند [23].

مسئله طراحی شبکه حمل‌ونقل ریلی به شکل مدل‌های برنامه‌ریزی دو سطحی فرموله می‌شود که ذاتا غیر محدب؟ هستند و از این‌رو حل آنها برای یافتن نقطه بهینه جهانی حتی برای شبکه‌های کوچک بسیار مشکل است. برنامه‌ریزی دو سطحی به لحاظ وابستگی زمان‌های سفر بلاک‌ها به جریان عبوری از آن، به‌دنبال به دست آوردن جریان شبکه با ازدحام است. بنابراین، استفاده این مدل‌ها به میزان زیادی به توسعه یک الگوریتم کارا برای غلبه بر مشکلات و پیچیدگی‌های دنیای واقعی متکی است. با وجود تلاش‌های زیادی که در حل دقیق این مدل‌ها صورت گرفته است، متاسفانه این الگوریتم‌های دقیق قادر نیستند جواب بهینه جهانی را برای جواب خود تضمین کنند.

با بررسی ادبیات تحقیق گسترده مرتبط با طراحی شبکه، می‌توان دریافت که تعداد مطالعات صورت گرفته با تمرکز بر طراحی شبکه حمل‌ونقل ریلی در مقایسه با حمل‌ونقل جاده ای بسیار محدودتر بوده است. شاید بتوان یک دلیل این محدودیت را پیچیدگی و گستردگی فضای جواب طراحی شبکه ریلی دانست. مطالعات صورت گرفته در این حوزه، عمدتا، هر یک بر جنبه خاصی از مساله، به عنوان نمونه، بروز اختلال در شبکه [24]، بررسی تاثیر زیست محیطی [25]، یا مساله ایجاد دسترسی و ارتباط آن با توسعه اقتصادی [26]، تمرکز کرده‌اند. راه حل‌های ارائه شده نیز بیشتر مبتنی بر انجام تحلیل حساسیت یا کاربرد نرم افزارهای تجاری بوده است(۲) و بنابه اطلاع نویسندگان، معرفی و کاربرد الگوریتم‌های ابتکاری مبتنی بر ساختار مساله (از جمله الگوریتم‌های حریصانه) مورد توجه کافی قرار نگرفته است.

با مقدمات ذکر شده در این بخش، اکنون می‌توان بهتر به موقعیت پژوهش حاضر در ادبیات موضوع پرداخت. همانگونه که پیشتر در شکل (۱) ملاحظه شد، پژوهش پیش رو بر مساله طراحی شبکه ریلی متمرکز شده، به طور خاص طراحی شبکه ریلی به معنای توسعه (یا افزایش ظرفیت) بلاک‌های موجود در

شبکه (و نه احداث خطوط یا بلاک‌های جدید) را مدنظر قرار می‌دهد. برای این منظور، در این مقاله، یک الگوریتم ابتکاری جدید از نوع حریصانه پیشنهاد می‌شود. الگوریتم پیشنهاد شده دارای این قابلیت است که جواب‌هایی با ماهیت چند دوره‌ای تولید کند، که می‌توان در سرمایه گذاری برای توسعه در طی افق طرح مفید واقع شود. مقاله پیش رو، الگوریتم پیشنهادی را برای شبکه واقعی کشور ایران اجرا و به تحلیل و بررسی نتایج حاصله می‌پردازد.

۳- طرح ریاضی مسئله

۳-۱- مساله طراحی شبکه

مساله طراحی شبکه، به صورت عمومی، عبارت است از انتخاب زیرمجموعه‌ای امکان‌پذیر از مجموعه پروژه‌های احداث یا توسعه، با هدف بهینه‌سازی یک معیار مشخص در سطح شبکه. در این مسئله دو گروه ذی‌النفع در نظر گرفته می‌شوند. در یک سوی آن، مدیران، گردانندگان شبکه و سیاست‌گزاران قرار دارند و در سوی دیگر استفاده‌کنندگان یا صاحبان بار در شبکه هستند. گردانندگان یا سیاست‌گزاران در واقع با تصمیم‌های کلان خود به دنبال برآورده کردن معیار یا معیارهای خاصی در سطح شبکه هستند؛ معیارهایی همچون بیشینه‌سازی منافع، بیشینه‌سازی پوشش سفر، کمینه‌سازی هزینه‌ها، کمینه‌سازی تعداد تلفات و کمینه‌سازی کل زمان‌سفر. آنچه سیاست‌گزاران در حالت کلی می‌توانند به عنوان ابتکار عمل در طراحی به کار گیرند دایره وسیعی از تصمیمات را شامل می‌شود: احداث یا توسعه زیرساخت‌های موجود، تغییر یا نوسازی ناوگان، برنامه‌های زمان‌بندی جدید، تغییرات در سطح بازار همچون اعمال تعرفه‌های جدید برای حمل بار ریلی، یا سیاست‌های یارانه‌ای در بخش سوخت و غیره.

در سوی دیگر مساله طراحی شبکه شرکت‌های انتقال بار یا صاحبان بار هستند که همواره سعی در حداکثرساختن منافع خود دارند. این حداکثرسازی منفعت، معمولا از طریق بهینه‌سازی روش انتقال بار (همچون انتخاب کوتاه‌ترین مسیر) بروز پیدا می‌کند که به آن تعادل ترافیکی گفته می‌شود.

در این بخش، به بیان ریاضی عمومی مسئله طراحی شبکه می‌پردازیم. برای این منظور، فرض می‌کنیم Ω مجموعه بلاک‌های ریلی مورد نظر به منظور توسعه بوده و $a \in \Omega$ یک بلاک مدنظر به منظور توسعه، با امکان توسعه y_a واحد ظرفیت (متغیر تصمیم گیری) و هزینه توسعه $c_a(y_a)$ باشد. هدف مساله انتخاب یک یا چند پروژه از میان پروژه‌های پیشنهادی (انتخاب Y) است، به طوری که با بهترین کارکرد (یعنی $F(Y,\Lambda)$) انتقال عبور تقاضای بار میسر شود و محدودیت بودجه برآورده باشد. این مساله را به لحاظ ریاضی می‌توان به صورت زیر فرمول‌بندی کرد:

$$\underset{Y}{Opt}\ F(Y,\Lambda) \qquad (۱)$$

$$s.t.$$

$$\Lambda = \Lambda(D,Y,N) \qquad (۲)$$

$$CY \le B \qquad (۳)$$

$$Y \in \Omega \qquad (۴)$$

که در آن:

Ω: مجموعه بلاک‌هایی که توسعه برای آنها در دست بررسی قرار دارد،

$F(Y,\Lambda)$: یک تابع کلی ارزیابی سیستم، برحسب بردار تصمیم Y در شبکه و جریان تعادلی Λ،

y_a: متغیر تصمیم میزان توسعه بلاک a نسبت به ظرفیت پایه آن،

Y: بردار تصمیم میزان توسعه در شبکه $[y_a]$،

C: بردار هزینه توسعه در شبکه $[c_a]$،

N: شبکه ریلی موجود،

B: بودجه در دسترس،

D: ماتریس تقاضای سفر بار و

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

در فرمول بندی فوق، تابع هدف (۱) به بهینه‌سازی عملکرد سیستم حمل‌ونقل ریلی می‌پردازد. در محدودیت (۲)، همان جریان تعادلی بار در شبکه N با توجه به توسعه پیشنهادی Y برای عبور تقاضای بار D را تعیین می‌کند. این محدودیت همان مدل سطح دوم است که تصمیم‌گیری استفاده

کنندگان از شبکه ریلی انجام می‌شود که برای آنها تعادل ترافیکی با محدودیت ظرفیت روی بلاک‌ها قابل تصور است. محدودیت (۳)، محدودیت بودجه برای توسعه در بلاک‌های پیشنهادی را تعریف می‌کند. محدودیت (٤) بلاک کاندیدا برای توسعه در شبکه را مشخص می‌کند.

با توجه به صورت کلی مدل مساله طراحی شبکه، اشاره به این نکته ضروری است که مطالعه پیش رو، فرض‌ها و محدودیت‌هایی را برای حل این مساله درنظر می‌گیرد، که مهمترین آنها عبارت اند از:

- در این مطالعه افزایش ظرفیت شبکه تنها از طریق توسعه ظرفیت بلاک‌های موجود در شبکه (و نه احداث بلاک‌های جدید) درنظر گرفته می‌شود.
- از عدم قطعیت‌های مرتبط با تغییرات تقاضا در طی افق طرح صرف نظر می‌شود.
- تقاضای بار به صورت یکپارچه درنظرگرفته شده، برحسب انواع بارهای ریلی تفکیک نمی‌شود.
- این مقاله وارد مدلسازی اندرکنش ترافیک ریلی بار و مسافر در سطح شبکه نمی‌شود.
- به منظور مدلسازی زمان سیر بار بین دو ایستگاه متوالی، از تابع زمان سیر حجم غیرخطی از نوع BPR استفاده می‌شود که برای راه آهن ایران کالیبره شده است.

۲-۳- مساله تخصیص ترافیک

مسئله تخصیص ترافیک یکی از مسائل مهم در برنامه‌ریزی حمل‌ونقل به شمار می‌رود که هدف آن تعیین زمان سفر در بلاک‌ها و مسیرهای شبکه ریلی و چگونگی توزیع جریان ترافیک در سطح شبکه است، که به آن جریان ترافیک تعادلی نیز گفته می‌شود. ورودی مساله تخصیص ترافیک اطلاعات شبکه و تقاضای سفر است، که شامل توپولوژی شبکه و گره‌های آن، ظرفیت و تابع زمان سفر–حجم برای هر بلاک و تقاضای سفر هر مبدا–مقصد می‌شود. خروجی این مساله نیز جریان تعادلی در بلاک‌های کل شبکه است.

اساس مساله تخصیص ترافیک بر این اصل ساده استوار است که استفاده کنندگان به دنبال یافتن کوتاهترین مسیر برای خود هستند. نتیجه چنین رفتاری، از سوی کاربران شبکه، منجر به تعادل استفاده کننده می‌شود. در یک وضعیت تعادل استفاده کننده، جریان ترافیک به گونه‌ای در شبکه توزیع می‌شود که برای همه مبدا–مقصدها زمان سفر مسیرهای استفاده شده برابر بوده و این مقدار کوچکتر یا مساوی زمان سفر مسیرهای استفاده نشده است [27].

در مساله طراحی شبکه، این مساله در برآورد رفتار و واکنش کاربران به تصمیم‌های گردانندگان، در مساله سطح پایین کاربرد می‌یابد. در واقع، طراح شبکه علاقه‌مند است که بداند هر تصمیم او چه اثری روی معیارهای عملکردی شبکه و رفتار کاربران دارد. برای نمونه، طراح می‌خواهد بداند در اثر احداث یا افزایش ظرفیت یک بلاک ریلی جدید چه بخشی از کاربران ترجیح می‌دهند بار خود را از حمل‌ونقل جاده‌ای به سوی ریلی منتقل کنند. پاسخ به چنین سوالاتی مستلزم حل یک مساله تخصیص ترافیک است که بتواند پیامدهای هر تصمیم را پیش‌بینی کند.

تاکنون روش‌های مدل‌سازی و الگوریتم‌های حل متفاوتی برای مساله تخصیص ترافیک ارائه و از زوایای مختلفی (سرعت الگوریتم‌ها، دقت، عملکرد و ...) مورد بررسی قرار گرفته است. مشکل دقت کافی ابزار تخصیص همواره مورد توجه پژوهشگران حمل‌ونقلی قرار داشته است [28]، از ابزارهای مهم برای حل مساله تخصیص می‌توان به الگوریتم ترکیب کوژ [27]الگوریتم‌های مبتنی بر مسیر [29, 30]، و الگوریتم‌های مبتنی بر مبدا [31]، اشاره نمود.

یکی از بخش‌های مهم مساله تخصیص ترافیک، که می‌تواند بر پیچیدگی‌های حل آن تاثیرگذار باشد و مقدار دقت پیش بینی و اعتبار آن را تحت تاثیر قرار دهد، تابع زمان سفر–حجم است. اصولا غیرخطی بودن و نامتقارن بودن توابع زمان سفر–حجم است که منجر به پیچیدگی حل مساله تخصیص ترافیک می‌شود. یکی از متداول ترین توابع زمان سفر–حجم که در برنامه‌ریزی حمل‌ونقل جاده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد به صورت زیر است:

$$t_a(x_a) = t_a^0\left(1+\alpha\left(x_a/v_a\right)^{\beta}\right) \qquad (۵)$$

که در آن:

x_a:جریان ترافیک در بلاک a،

v_a: ظرفیت ترافیکی در بلاک l،

t_a^0: زمان‌سفر جریان آزاد (بدون ترافیک) در بلاک l،

$t_a(x_a)$: زمان‌سفر در بلاک l و

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

اگرچه تابع زمان سفر حجم در مطالعات حمل‌ونقل جاده ای، به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما کاربرد آن در مدل‌سازی زمان سفر ریلی از پشتوانه کافی برخوردار نیست [32]. این درحالی است که مطالعات برنامه‌ریزی حمل‌ونقل ریلی در سطح استراتژیک در هر صورت به یک تابع زمان سفر–حجم مناسب برای برنامه‌ریزی احتیاج دارند.

۴- الگوریتم حریصانه پیشنهادی

۴-۱- معرفی الگوریتم

همان‌گونه که در بخش ۳ بیان شد، مساله طراحی شبکه، به لحاظ پیچیدگی محاسباتی در رده مسائل NP-Hard قرار می‌گیرد. در مواجهه با این گونه مسائل، راه حل‌ها به دو دسته کلی دقیق و تقریبی طبقه بندی می‌شوند. مجموعه راه حل‌های دقیق این مساله، اگرچه از میان جواب‌های امکان‌پذیر بهترین جواب جهانی را به دست می‌دهند، به لحاظ محاسباتی و زمان حل با افزایش اندازه مسئله مهارنشدنی هستند. نمونه مساله‌های زیادی در ادبیات تحقیق وجود دارند که بعضا حل آنها نیازمند حتی چندین سال زمان اجرا است. از همین رو، دسته دومی از الگوریتم‌های تقریبی برای حل این مسائل شکل گرفتند.

به طور کلی، ایده اصلی در حل تقریبی مسائل NP-Hard، از جمله مساله طراحی شبکه، ایجاد تهاتر بین کیفیت جواب و سرعت دستیابی به آن است. این ایده به این ترتیب است که از بخشی از کیفیت جواب صرف نظر می‌شود ولی در مقابل، زمان حل از مقدار چندسال به مقدار به مراتب کمتر کاهش پیدا می‌کند.

الگوریتم‌های متعددی برای حل تقریبی مسائل NP-Hard پیشنهاد شده است، که از آن جمله می‌توان از الگوریتم‌های یابنده و فرایابنده نام برد. به طور رایج، الگوریتم‌های حریصانه را در دسته الگوریتم‌های یابنده طبقه بندی می‌کنند. علت نامگذاری این الگوریتم‌ها به حریصانه آن است که راه‌حل‌ها مبتنی بر ایده‌های حریصانه‌ای هستند که در ساختار الگوریتم نهفته است. در روش حریصانه رسیدن به هدف در هر گام مستقل از گام قبلی و بعدی است. یعنی در هر مرحله برای رسیدن به هدف نهایی، 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 همین دلیل است که به این روش، روش حریصانه گفته می‌شود [33, 34].

الگوریتم پیشنهادی برای حل مساله طراحی شبکه در این مقاله یک الگوریتم حریصانه است که سعی در کاهش هرچه بیشتر هزینه‌های توسعه شبکه دارد. شکل (۲) فلوچارت این الگوریتم را نمایش می‌دهد. الگوریتم با این هدف طراحی شده است که کل یا سطح مشخصی از تقاضا با کمترین هزینه توسعه شبکه بتواند در شبکه انتقال یابد. در ادامه اجزای این الگوریتم با جزییات بیشتری مرور می‌شود.

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 دوتراکه بودن بلاک‌ها) و غیره می‌شود. به علاوه، اطلاعاتی همچون درصد توسعه جزیی شبکه همان p، دقت تخصیص ترافیک جزیی، هزینه واحد توسعه هر بلاک و غیره نیز از فایل ورودی دریافت می‌شود.

شکل ۲. فلوچارت الگوریتم حریصانه پیشنهادی بر مبنای کاهش هزینه‌های توسعه شبکه

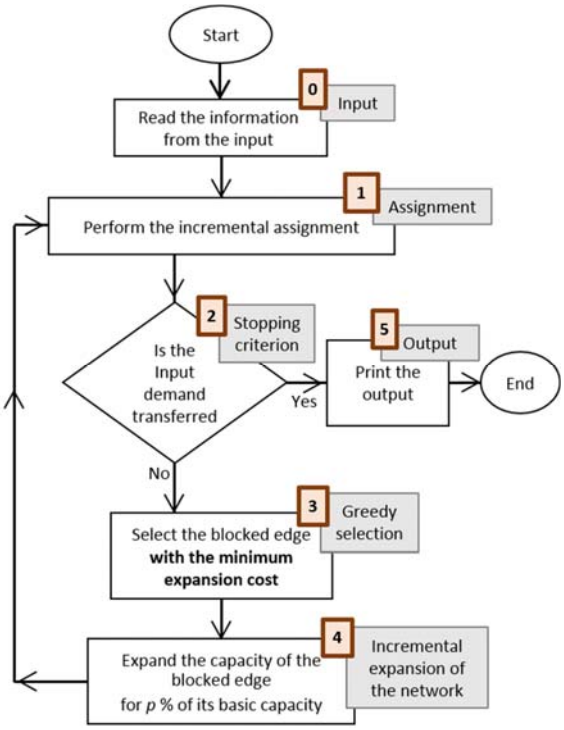


Fig. 2. flowchart of the proposed greedy algorithm based on reducing network development costs

گام ۱ : تخصیص ترافیک

این گام، گام نخست از حلقه تکرارهای الگوریتم به شمار می‌رود. الگوریتم، در این قسمت، از روش تخصیص ترافیک جزیی با تابع زمان سفر حجم بلاک‌ها استفاده می‌کند [35]، و ماتریس تقاضای ورودی 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 مجموعه‌ای از بلاک‌های مسدود شده (به ظرفیت رسیده) در سطح شبکه مواجه خواهد شد.

در مورد بلاک‌های مسدود شده، در اینجا، ذکر این نکته لازم است که به منظور مدل‌سازی برنامه نویسی این بلاک‌ها، پس از هر بار انجام تخصیص ترافیک، مقدار زمان سیر در آنها با یک جریمه بی‌نهایت (یک زمان‌سیر مصنوعی بزرگ) جمع می‌شود. به این ترتیب، بلاک مسدودشده در ادامه نمی‌تواند مورد انتخاب الگویتم و انتقال بار قرار گیرد.

گام ۲ : شرط توقف

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

گام ۳ : انتخاب حریصانه

در این قسمت، الگوریتم با تعدادی بلاک مسدود شده مواجه است که مقدار بارعبوری از آنها به ظرفیت بلاک رسیده است، در نتیجه عبور بار بیشتری از این بلاکها ممکن نیست. واضح است که توسعه هر یک از این بلاک‌ها می‌تواند به طور جزیی منجر به افزایش تقاضای بار عبوری از شبکه شود. الگوریتم تمامی این بلاک‌ها را به عنوان کاندید توسعه انتخاب می‌کند و در گام ٤ انتخاب از میان این مجموعه صورت می‌گیرد.

گام ٤ : توسعه جزیی شبکه

الگوریتم یک بلاک از بلاک‌های کاندید را انتخاب می‌کند به این صورت که بلاکی با کمترین هزینه توسعه انتخاب می‌شود و ظرفیت آن p درصد افزایش می‌یابد. 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 بدون توجیه شود. در پژوهش حاضر، این مقدار معادل ۲۰ درصد ظرفیت پایه یک بلاک درنظرگرفته شده است.

گام ۵ : خروجی

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

۳-۳- ۲-٤- پیچیدگی محاسباتی الگوریتم

مطابق حلقه ۱-٤-۳-۲-۱ در فلوچارت شکل (۲)، الگوریتم در هر تکرار خود با چهار عملیات مواجه است، که عبارت اند از: تخصیص ترافیک، کنترل شرط توقف، انتخاب حریصانه یک

بلاک مسدود شده و در پایان توسعه جزیی بلاک انتخاب شده. از میان این مراحل، تنها بخشی که بار محاسباتی قابل توجه‌ای به الگوریتم وارد می‌کند بخش تخصیص ترافیک است.

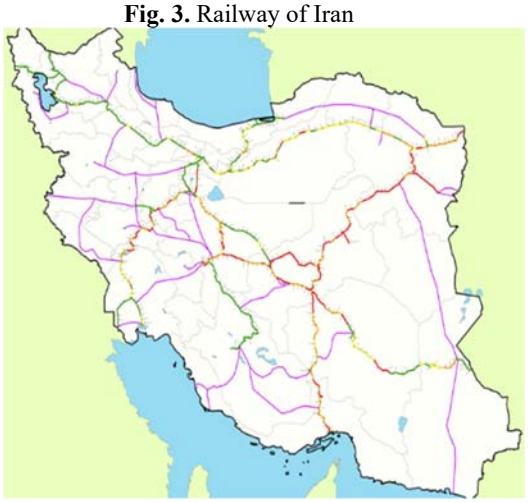
باید توجه داشت که، الگوریتم معرفی شده در این فصل در بخش ۳ خود (یعنی بخش انتخاب حریصانه) با عملیات محاسباتی پیچیده‌ای مواجه نیست. این عملیات، به سادگی، عبارت است از جستجو در میان بلاک‌های مسدود شده و انتخاب بلاک مسدود با کمترین هزینه توسعه. در این پژوهش، بدون ورود به جزئیات هزینه توسعه و متناسب با سطح استراتژیک تصمیم گیری، فرض شده است که هزینه توسعه با طول بلاک رابطه مستقیم دارد.

۵- تحلیل نتایج

۴-۳- ۱-۵-شبکه راه آهن جمهوری اسلامی ایران

شبکه ریلی ایران که در این مطالعه در دستور پژوهش قرار می‌گیرد، شبکه‌ای نسبتا بزرگ دارای ٤٣٤ ایستگاه و مجموعا ٤٤٢ بلاک و در حدود ۱۲۰۰۰ کیلومتر است [36]، صورت کلی این شبکه در شکل ۳ قابل مشاهده است.

Fig. 3. Railway of Iran



شکل ۳. صورت کلی شبکه ریلی ایران

داده‌های مورد استفاده مرتبط با تقاضای سفر و ویژگی‌های شبکه از مطالعات سیدوکیلی و همکاران [37]، و دانشگاه صنعتی اصفهان [35]، اخذ شده است. به بیان دقیق‌تر، اطلاعات تقاضای سفر، بر حسب میلیون تن در سال، به مطالعه سیدوکیلی و همکاران [37]، ارجاع داده می‌شود. همچنین، توپولوژی شبکه، ایستگاه‌ها، ظرفیت بلاک‌ها و تابع زمان‌سیر-حجم هماهنگ با مطالعه انجام شده توسط پژوهشکده حمل-ونقل دانشگاه صنعتی اصفهان [35]، است.

۵-۳- ۲-۵- جواب‌های شبه پارتو دو هدفی

الگوریتم حریصانه پیشنهادی دارای دو مولفه تقاضای عبوری از شبکه و هزینه توسعه شبکه است که انتظار می‌رود که برای محقق کردن تقاضای عبوری بیشتر نیاز به افزایش هزینه توسعه شبکه هستیم. این دو هدف ماهیت متضاد دارند و به تقاضا عبوری از شبکه هدف مثبت (مانند درآمد) و به هزینه توسعه شبکه هدف منفی (مانند هزینه) گفته می‌شود. هر چه هدف مثبت بیشتر شود مطلوبیت جواب مدنظر بیشتر می‌شود و هر چه هدف منفی بیشتر شود، مطلوبیت جواب مدنظر کمتر می‌شود [38].

الگوریتم حریصانه پیشنهادی مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه شبه‌پارتو در فضای تقاضای عبوری شبکه – هزینه توسعه شبکه به دست می‌دهد. اما باید توجه داشت که دو کمیت یاد شده یعنی تقاضای عبوری و هزینه توسعه در شبکه از دو "جنس" مختلف هستند و این تفاوت ممکن است باعث دشوارشدن ارزیابی آنها شود. یک راهکار برای حل این مشکل این است که هر دو هدف را به یک جنس، برای نمونه درصد (٪)، تبدیل نماییم. به علاوه، این تبدیل را به گونه‌ای صورت دهیم که هر دو کمیت برای افزایش مقدار، مطلوب و به منظور کاهش مقدار، نامطلوب باشند. برای بیان دقیق‌تر، اهداف مساله را می‌توان در دو مورد زیر خلاصه نمود:

- ✓ بیشینه‌سازی: تقاضای عبوری D
- ✓ کمینه‌سازی: هزینه توسعه C

این دو کمیت مطابق جدول نرمال سازی می‌شوند:

جدول ۱. نرمال‌سازی کمیت‌های تابع هدف

Objective term	Mathematical representation	Normalization relationship
Normalized freight demand	D^N	$\frac{D - D_{min}}{D_{max} - D_{min}}$
Normalized development cost	C^N	$\frac{C_{max} - C}{C_{max} - C_{min}}$

Table 1. Normalization of objective function quantities

در جدول (۱)، منظور از D_{min}، D_{max}، C_{min}، C_{max} عبارت است از:

D_{min}: کمترین سطح تقاضای عبوری از شبکه در میان مجموعه جواب‌های به‌دست‌آمده (میلیون‌تن)،

D_{max}: بیشترین سطح تقاضای عبوری از شبکه در میان مجموعه جواب‌های به دست‌آمده (میلیون‌تن)،

C_{min}: کمترین مقدار هزینه توسعه شبکه در میان مجموعه جواب‌های به‌دست‌آمده (کیلومتر) و

C_{max}: بیشترین مقدار هزینه توسعه شبکه در میان مجموعه جواب‌های به‌دست‌آمده (کیلومتر) هستند.

به این‌ترتیب، هریک از تابع هدف‌ها به صورت یک عدد بین صفر تا ۱۰۰ برحسب درصد نرمال می‌شوند، به گونه‌ای که هریک از آنها هرچقدر به ۱۰۰ درصد نزدیک‌تر باشند نماینده طراحی بهتری برای آن تابع هدف خواهندبود.

یکی از راه‌های بهینه‌سازی چندهدفی استفاده از ضرایب یا همان وزن‌هایی برای اهداف مختلف و تبدیل آنها به یک تابع هدف استاندارد است. این وزن‌دهی می‌تواند متوسط توسط تصمیم‌گیرندگان سطح بالا بسته به اهمیت اهداف مورد بحث، انجام گیرد. اگر فرض کنیم دو هدف بیشینه‌سازی تقاضای عبوری شبکه و کمینه‌سازی هزینه توسعه در شبکه به ترتیب دارای وزن‌های w_D و w_C باشند، به طوری‌که هر یک از این مقادیر بین صفر و یک بوده و $w_D + w_C = 1$، تابع هدف کلی مساله به صورت زیر در می‌آید:

$$Z = w_D D^N + w_C C^N$$

۶-۳- ۳-۵- نتایج

الگوریتم‌های پیشنهادی این مطالعه در محیط برنامه‌نویسی Java پیاده سازی و در محیط سیستم عامل Windows 8, Intel(R) Core(TM) i5-4200U CPU@1.60 GHz و دارای حافظه RAM معادل ۸ گیگابایت، اجرا شدند.

با اجرای الگوریتم، میزان توسعه شبکه (در هر مرحله ۲۰ 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 درنظرگرفته می‌شود و برنامه تا تقاضای افق طرح برابر ۱۱۰ میلیون تن سالانه اجرا می‌شود [35]، توجه به این نکته لازم است که الگوریتم یک روند تدریجی به منظور افزایش ظرفیت عبوری از شبکه را در پیش می‌گیرد و به این ترتیب، نوعی ترتیب را در افزایش ظرفیت شبکه اعمال می‌کند. از این رو، می‌توان به جواب‌های به دست آمده در روند حل الگوریتم به عنوان جواب‌های توسعه چنددوره ای نیز نگریست که می‌تواند به ایجاد دید در برنامه‌ریزان به منظور سرمایه گذاری تدریجی تا افق طرح کمک کند.

همچنین، در مورد تقاضای ۱۱۰ میلیون تن، لازم به ذکر است که این مقدار از تقاضا ممکن است یک ایده‌آل خوش بینانه به نظر برسد که با توجه به شرایط موجود، دستیابی به آن بسیار بعید باشد. به همین دلیل، علاوه بر گزارش جواب‌های بدست آمده از الگوریتم پیشنهادی برای تقاضای ۱۱۰ میلیون تن، توسعه شبکه برای تقاضای ۷۰ میلیون تن نیز به عنوان یک سطح معقول از تقاضا در نظر گرفته می‌شود.

در ابتدا به جواب‌های به دست آمده برای تقاضای ۱۱۰ میلیون تن می‌پردازیم که به صورت میزان توسعه در هر بلاک گزارش می‌شود. با توجه به توسعه ۲۰ درصدی در هر تکرار از الگوریتم، میزان توسعه برای بلاک‌های شبکه قابل استخراج است. با توجه به تعدد بلاک‌ها در شبکه راه اهن ایران، گزارش میزان توسعه بلاک‌ها کار دشواری است. از این رو، میزان توسعه بلاک‌ها در نواحی ۱۹ گانه راه اهن ایران اورده شده است(دو ناحیه به دلیل عدم توسعه، گزارش نشده است). هر

واحد توسعه در بلاک به میزان ۲۰ درصد ظرفیت بـلاک فعلـی را افزایش می‌دهد.

جدول ۲. اولویت بندی مناطق ۱۹ گانه راه آهن برحسب میزان توسعه برای تقاضای ۱۱۰ میلیون تن سالانه

Priority	District name	The total number of blocks selected by the algorithm
1	North East	295
2	East	265
3	Esfahan	243
4	Tehran	160
5	Yazd	153
6	Khorasan	144
7	Hormozgan	117
8	Qom	109
9	Arak	89
10	Lorestan	73
11	Zagros	65
12	North West	20
13	Kerman	15
14	South East	9
15	South	6
16	Azerbaijan	2
17	North	2

Table 2 Prioritization of 19 railway regions according to the level of development for the annual demand of 110 million tons

در جدول فوق روشن است که بیشترین میـزان توسـعه شـبکه برای تحقق تقاضای ۱۱۰ میلیون تن در سال، مربوطه به ناحیـه شمال شرق است. این ناحیه شامل دو ناحیه شمال شرق ۱ و ۲ است. ناحیه شـمال شـرق ۱ شـامل حـد فاصـل ایسـتگاههای گرمسار(راه آهن تهران) و نقاب (راه آهن خراسان) به مرکزیت شاهرود است. از مجموع ۹۲٦ کیلومتر خط آهن مسیر تهران – مشهد ۵۸٪ از کـل مسـیر بـه طـول ۵٤۰ کیلـومتر بـه صـورت دوخطه در حوزه استحفاظی اداره کل راه آهن شمالشرق۱ واقع است. ناحیه شمال شرق ۲ از ایستگاه گلوگاه آغاز و به ایستگاه اینچه‌برون ختم می‌شـود. ایـن ناحیـه دارای۱٤٦ کیلـومتر خـط اصلی و حدود ۵ کیلومتر خطوط فرعی و مجموعـا ۸ ایسـتگاه باری و مسافری است [36]. جایگاه و نقش مرز اینچـه‌برون در صادرات و ترانزیت کالا به کشورهای آسیای میانـه و اورآسـیا، چین، توسعه خطوط منتهی بـه ایسـتگاه اینچـه‌برون و تقویـت کریدور شمال و جنوب نیـاز اساسـی بـرای توسـعه اقتصـادی کشور و درآمدزایی برای شرکت راه آهـن اسـت. همچنـین بـا توجه به قرار گیری این ناحیه در مسیر ترانزیت کالا از شرق و شمال شرق کشور، به منظور محقق شدن تقاضای ۱۱۰ میلیـون تن در سال، این ناحیه از اهمیت بالای برخوردار است.

همان طور که توضیح داده شد، مقدار تقاضای ۱۱۰ میلیون تـن سالانه بسیار ایده آل‌گرایانه است. در ادامه، برای این که میـزان توسعه در شبکه برای مقدار تقاضا واقع گرانه را بدسـت آورد، میزان توسعه در شبکه برای تقاضـای ۷۰ میلیـون تـن در سـال مطابق جدول (۳) گزارش می‌شود.

جدول ۳. اولویت بندی مناطق ۱۹ گانه راه آهن برحسب میزان توسعه برای تقاضای ۷۰ میلیون تن سالانه

Priority	District name	The total number of blocks selected by the algorithm
1	North East	295
2	Esfahan	203
3	East	191
4	Khorasan	142
5	Tehran	141
6	Qom	94
7	Arak	78
8	Yazd	72
9	Lorestan	65
10	Zagros	54
11	North West	14
12	Hormozgan	9
13	South East	8
14	South	3
15	Kerman	3
16	North	1

Table 3. Prioritization of 19 railway regions according to the level of development for the annual demand of 70 million tons

از مقایسه جداول (۲ و ۳) می‌توان به این نکته رسید که تعـداد بلاک‌های ناحیه شمال شرق برای عبور ۷۰ و ۱۱۰ میلیـون تـن در سال برابر هستند و با توجه به واقع گرایانـه بـودن تقاضـای ۷۰ میلیون تن، توسعه بلاک‌های ناحیـه شـمال شـرق بایـد در اولویت توسعه شرکت راه آهن قرار گیرد تا مسیر برای برآورده شدن تقاضای ۱۱۰ میلیون تن فراهم شود. همچنـین از مقایسـه این دو جدول می‌توان به اولویت‌بندی زمانی توسعه بلاک‌ها در

شبکه راه آهن هم پی برد که در تامین اعتبار شرکت ساخت و توسعه زیرشرکت ساخت و توسعه زیربناهای حمل‌ونقل کشور به عنوان متولی ساخت زیرساخت‌های راه آهن بسیار دارای اهمیت است.

همان گونه که در بخش ۵-۲ بیان شد، از مزیت‌های در اختیار داشتن جواب‌های بهینه چندهدفی یا شبه پارتو آن است که، با دراختیار داشتن آنها، جواب بهینه وزنی نیز در اختیار خواهد بود. در این بخش، سیستم وزن دهی W_D = ۰/٦، W_C = ۰/٤، به این معنا است که اهمیت ٦۰ درصدی برای هدف عبور حداکثر تقاضا و اهمیت‌های ٤۰ درصدی برای هر یک از اهداف کاهش هزینه توسعه در شبکه است. با این کار مدل دو هدفی به یک مدل تک هدفی با یک مقیاس بین صفر و یک تبدیل می‌شود که ارزیابی جواب‌های شبه پارتو به راحتی میسر خواهد بود.

برای بررسی عملکرد الگوریتم حریصانه پیشنهادی با نگاه دو هدفی، درصد اهمیت تقاضا (عددی بین صفر تا صد) را از مقدار صفر در نظر گرفته (معادل درصد اهمیت ۱۰۰ درصدی برای هزینه توسعه) و الگوریتم اجرا می‌شود. برای کمی سازی نتایج الگوریتم، مجموع توسعه بلاک‌های شبکه برای هر حالت را به عنوان شاخص آن جواب در نظر می‌شود. فرض کنید که سه بلاک در شبکه نیاز به توسعه ۵۰ درصد، ۳۰ درصد و ۲۰ درصد باشد، در این صورت شاخص این جواب برابر ۰.۲+۰.۳+۰.۵=۱ گزارش می‌شود. در شکل (٤) نتایج الگوریتم برای افزایش درصد اهمیت تقاضا در برابر مجموع توسعه بلاک‌های شبکه در جواب الگوریتم حریصانه آورده شده است. همان‌گونه که مشخص است با افزایش درصد اهمیت تقاضا، الگوریتم برای عبور تقاضای مدنظر(در اینجا ۱۱۰ میلیون تن در سال) به دنبال توسعه ظرفیت شبکه برای افزایش توان شبکه برای عبور جریان است. تا زمانی که درصد اهمیت هدف تقاضا کمتر از ۳۰ درصد است، الگوریتم هیچ گونه توسعه در شبکه را توصیه نمی‌کند و این به دلیل اهمیت بالای درصد هدف توسعه شبکه است. به عبارتی اهمیت نسبی بیشتر هزینه توسعه نسبت به تقاضای عبوری منجر به عدم توسعه در شبکه می‌شود و الگوریتم وضعیت فعلی شبکه را بهینه می‌داد و توسعه لزومی ندارد. زمانی که اهمیت تقاضا از ۳۰ بیشتر می‌شود، الگوریتم با توسعه مختصر شبکه تلاش می‌کند که تقاضای مدنظر را از شبکه عبور دهد. تا اهمیت کمتر از٤۰ درصد، تغییری در توسعه شبکه رخ نمی‌دهد ولی با افزایش اهمیت تقاضا به بیش از ٤۰ درصد، شاخص توسعه شبکه به عدد ۷۵ می‌رسد و با اهمیت کمتر از ٦۰ درصد جواب بدون تغییر می‌ماند. با افزایش اهمیت تقاضا به بیش از ٦۰ درصد، توسعه گسترده در شبکه برای عبور تقاضا انجام می‌شود که تا اهمیت مطلق تقاضا این توسعه بدون تغییر می‌ماند. این آزمایش به عنوان اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهادی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرید. انتظار این است که در صورتیکه اهمیت هدف هزینه توسعه بیشتر از هدف تقاضای عبوری باشد، الگوریتم توسعه در شبکه را تصمیم بهینه نداد. هر چه اهمیت تقاضای عبوری بیشتر شود شبکه عبور تقاضا را در اولویت قرار می‌دهد که سبب افزایش هزینه توسعه برای افزایش تقاضای عبوری از شبکه می‌شود که مطابق انتظار است.

شکل ٤. عملکرد دو هدفه الگوریتم با افزایش درصد اهمیت تقاضا

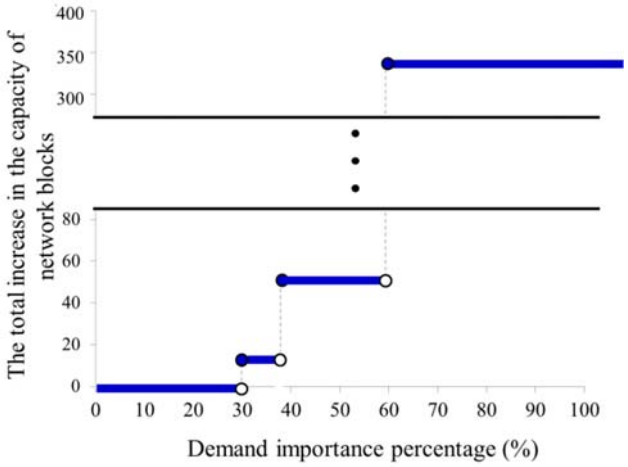


Fig. 4. Algorithm's dual-objective performance with increasing demand importance percentage

۷-۳- ٦-نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به مساله طراحی به معنی توسعه شبکه ریلی کشور ایران اختصاص داشت، به گونه‌ای که برای یک ماتریس تقاضای بار ورودی، محورهای شبکه به گونه‌ای توسعه پیدا کنند که، ضمن فراهم‌شدن امکان عبور کل تقاضای‌بار ورودی، هدف کمینه‌سازی هزینه‌های مربوط به توسعه شبکه تامین شد.

برای این منظور، یک الگوریتم حریصانه پیشنهاد شد که به طور تکراری، بلاک‌هایی را کـه اولا در افـزایش عبـور تقاضـا مـوثر هستند و دوم کمترین هزینه افزایش ظرفیت را دارنـد، توسـعه می‌دهد. نتایج پیاده‌سازی و اجرای این الگوریتم روی شبکه راه آهن ایران را به طور خلاصه می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

۱. الگوریتم حریصانه پیشنهاد بار محاسباتی سـبکی داشـته و در کمتر از ۱ ساعت به جواب‌های خود دست پیـدا مـی-کند.

۲. الگوریتم برای دو سطح تقاضای ۷۰ میلیـون تـن در سـال (واقع گرایانه) و ۱۱۰ میلیون تن در سال (ایده آل گرایانه) اجرا شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که توسعه در ناحیه شمال شرق از بالاترین اولویت برخـوردار اسـت و میزان توسعه بلاک‌ها در این دو سطح تقاضا ایده‌ال گرایانه و واقع گرایانه برابر است. البته برای سایر نـواحی از ایـن دست تحلیل‌ها می‌توان داشت.

۳. با وزن‌دهی به جواب‌های شبه‌پارتوی به‌دست‌آمده از نتایج دو الگوریتم، مـی‌تـوان برتـری نسـبی آنهـا را نسـبت بـه یکدیگر به دسـت‌آورد. اعمـال وزن‌دهـی مختلـف بـرای هدف تقاضا بر عملکرد الگوریتم حریصانه مـورد بررسـی قرار گرفت.

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

۱. این مطالعه برای حل زیرمساله تخصیص‌ترافیـک از روش مشابه مطالعه دانشگاه صنعتی‌اصفهان (تخصـیص جزئـی) استفاده کرد، درحالی‌کـه کـاربرد تـابع زمـان‌سـفر–حجـم BPR برای خطوط ریلی مـی‌توانـد مـورد بحـث باشـد. استفاده از روش‌های جدیدتر تخصیص ترافیـک همچـون مطالعه هوانگ و اویانگ [39]، مـی‌توانـد درآینـده مـدنظر قرار گیرد.

۲. در این پژوهش، هزینه واحد توسعه هر محور، متناسب بـا طول آن محور، برحسب کیلومتر درنظر گرفته‌شد. از آنجـا که این هزینه برای محورهای مختلف (دشت و کوهسـتان و ...) کشور متفاوت است، می‌توان با تنظیم آن در ورودی برنامه و نتایج دقیق تری از برنامه استخراج نمود.

۷-مراجع

[1] Hasany RM, Shafahi Y. Modeling formulation and a new heuristic for the railroad blocking problem. Applied Mathematical Modelling. 2018;56:304-24.

[2] Seyedvakili SA, Zakeri J-A, Azadani SN, Shafahi Y. Long-term railway network planning using a multiperiod network design model. J Transp Eng Part A: Syst. 2020;146(1):04019054.

[3] Profillidis V. Railway Planning, Management and Engineering: Taylor & Francis Limited; 2022.

[4] Tamannaei M, Zarei H, Rasti-Barzoki M. A game theoretic approach to sustainable freight transportation: Competition between road and intermodal road–rail systems with government intervention. Transportation Research Part B: Methodological. 2021;153:272-95.

[5] Assembly IC. Law on the development of public transportation and fuel consumption management (in Persian). 2006.

[6] Zarrinmehr A, Saffarzadeh M, Seyedabrishami S. A local search algorithm for finding optimal transit routes configuration with elastic demand. International Transactions in Operational Research. 2018;25(5):1491-514.

[7] Zarrinmehr A, Saffarzadeh M, Seyedabrishami S, Nie YM. A path-based greedy algorithm for multi-objective transit routes design with elastic demand. Public Transport. 2016;8(2):261-93.

[8] Zarrinmehr A. Parallelization of Ant Colony Algorithm in Transportation Discrete Network Design. Modares Civil Engineering journal. 2015;15(2):37-50.

[9] Mesbah M, Sarvi M, Currie G. New methodology for optimizing transit priority at the network level. Transportation Research Record. 2008;2089(1):93-100.

[10] Long J, Gao Z, Zhang H, Szeto WY. A turning restriction design problem in urban road networks. European Journal of Operational Research. 2010;206(3):569-78.

[11] Lee Y-J, Vuchic VR. Transit network design with variable demand. Journal of Transportation Engineering. 2005;131(1):1-10.

[12] Xiong Y, Schneider JB. Transportation network design using a cumulative genetic

algorithm and neural network. Transportation Research Record. 1992(1364).
[13] . Laporte G, Mesa JA, Perea F. A game theoretic framework for the robust railway transit network design problem. Transportation Research Part B: Methodological. 2010;44(4):447-59.
[14] Miralinaghi M, Lou Y, Keskin BB, Zarrinmehr A, Shabanpour R. Refueling station location problem with traffic deviation considering route choice and demand uncertainty. International Journal of Hydrogen Energy. 2017;42(5):3335-51.
[15] Cullinane K, Toy N. Identifying influential attributes in freight route/mode choice decisions: a content analysis. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. 2000;36(1):41-53.
[16] Shafipour Borojni M. Examining the requirements of privatization in the construction of the infrastructure of the country's rail network (in Persian). Isfahan University of Technology: Isfahan University of Technology; 2017.
[17] Rosell F, Codina E. A model that assesses proposals for infrastructure improvement and capacity expansion on a mixed railway network. Transportation Research Procedia. 2020;47:441-8.
[18] Fatemi E. Lane tracking, a new technique to reduce headway and increase travel capacity. The Seven International of Railway Engineering2002.
[19] Barros LA, Tanta M, Martins AP, Afonso JL, Pinto J, editors. Opportunities and challenges of power electronics systems in future railway electrification. 2020 IEEE 14th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG); 2020: IEEE.
[20] Wardrop A, Pudney P. Development of strategic infrastructure and train operations modelling: Railway Technical Society of Australasia; 2000.
[21] Poorzahedy H, Abulghasemi F. Application of ant system to network design problem. Transportation. 2005;32(3):251-73.
[22] Mathew TV, Sharma S. Capacity expansion problem for large urban transportation networks. Journal of Transportation Engineering. 2009;135(7):406-15.
[23] Zarrinmehr A, Shafahi Y. Parallelization of the Branch-and-Bound Algorithm in Transportation Discrete Network Design. Scientia Iranica. 2016;23(2):407-19.
[24] Ahuja RK, Möhring RH, Zaroliagis CD. Robust and online large-scale optimization: models and techniques for transportation systems: Springer; 2009.
[25] Lin B, Liu C, Wang H, Lin R. Modeling the railway network design problem: A novel approach to considering carbon emissions reduction. Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2017;56:95-109.
[26] Johansson E, Camporeale R, Palmqvist C-W. Railway network design and regional labour markets in Sweden. Research in Transportation Economics. 2020;83:100921.
[27] Sheffi Y. Urban transportation networks: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ; 1985.
[28] Boyce D, Ralevic-Dekic B, Bar-Gera H. Convergence of traffic assignments: how much is enough? Journal of Transportation Engineering. 2004;130(1):49-55.
[29] Aashtiani HZ, Magnanti TL. Equilibria on a congested transportation network. SIAM Journal on Algebraic Discrete Methods. 1981;2(3):213-26.
[30] Zarrinmehr A, Aashtiani HZ, Nie Y, Azizian H. Complementarity Formulation and Solution Algorithm for Auto-Transit Assignment Problem. Transportation Research Record. 2019;2673(4):384-97.
[31] Nie Y. A note on Bar-Gera's algorithm for the origin-based traffic assignment problem. Transportation Science. 2012;46(1):27-38.
[32] Yu T, Ma J, editors. A review of the link traffic time estimation of urban traffic. 2016 IEEE International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE); 2016: IEEE.
[33] Cormen TH, Leiserson CE, Rivest RL, Stein C. Introduction to algorithms: MIT press; 2022.
[34] Zarrinmehr A, Mouloukzadeh H. Transit Routes Network Design by Greedy Prioritization of the Routes in Grid Networks (in Persian). Journal of Transportation Research. 2023; 20(2):147-160.
[35] 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). IUT Transportation Research Institute, 2017.
[36] 36.The official website of Railway of Iran [Available from: www.rai.ir.
[37] Seyedvakili SA, Nasr Azadani SM, Zakeri JA, Shafahi Y, Karimi M. New model for the

railway network design problem. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems. 2018;144(11):04018070.
[38] Makui AT, Ata Allah. Decision Making Techniques and Models (in Persian): Iran University of Science and Technology; 2021.
[39] Hwang T, Ouyang Y. Assignment of freight shipment demand in congested rail networks. Transportation Research Record. 2014;2448(1):37-44.

Introducing a network expansion greedy algorithm based on least cost expansions - Case study: Iran's railway network

Amirali Zarrinmehr[1], Reza Mohammad Hasany[2]*

1.Civil Engineering Group, Department of Engineering and Technology, University of Mazandaran, Babolsar
2.Faculty of Railway Engineering, Iran University of Science and Technology

Abstract

Transportation problems can be categorized into three strategic, tactical, and operational levels, each of which has a different level of influence, required budget, decision making process, and time period. The problem of developing the rail transportation network or rail network design is one of the key issues at the strategic level of planning. In short, rail network design deals with the solution of allocating a limited budget to a feasible subset of projects, in such a way that certain planning objectives are met, including minimizing the total travel time in the network, the developing costs of the network, maximizing revenue from freight transportation or maximizing the attraction of freight demand to the rail mode. Two stakeholders are involved in the problem of rail network design. On one side, the operators make the macro decisions to meet the criteria; such as maximization of benefit, maximization of travel coverage, minimization of development costs, minimization of casualties and minimization of total travel time. On the other side users who try to maximize their benefits such as finding the shortest route through the network. To account for both sides of this problem, a bi-level structured problem should be taken into account. The general form of the network design problem, as a bi-level problem, falls in the category of NP-hard problems, which are difficult to solve in even small scales. To solve this problem, the solution algorithms are classified into two general categories: exact and approximate. The exact solution algorithms strive to provide the best global solution among the possible solutions. Regarding the combinatorial explosion of the problem, they are considered as intractable in terms of memory usage and solution time with the increase in the size of the problem. Therefore, the second category of so-called approximate algorithms should be presented to solve the problem. Greedy algorithms are classified in the category of approximate algorithms.

This article proposes a greedy algorithm to solve the problem of network design trying to minimize the expansion costs of the rail network. In each iteration, the proposed algorithm performs a traffic assignment over the rail network and thereby obtains a list of rail blocks that have reached their capacity. Among these block, in a greedy approach, the algorithm gives the priority of expansion to the block that has the least cost of expansion and marginally increases the capacity of that block. The process of traffic assignment, block selection and marginal expansion continues until the entire level of input freight demand can be transferred through the rail network. This algorithm is implemented in Java programming language and the railway network of Iran is applied as a case study. Considering the track of two criteria in the solutions obtained in the process of the algorithm, namely the throughput of the system and the expansion costs, we also present and analyze "pseudo-pareto". The results are presented for two demand levels of 70 and 110 million tons of freight transportation per year. Analyzing the solutions shows that the more emphasis is put on the expansion cost criterion, the fewer blocks are developed and as a result, less demand is passed through the network. Also, with the increasing importance of freight demand, the algorithm leads to solutions that have caused extensive development in the network. We also observe that the proposed greedy algorithm entails a light computational burden and, for Iran’s railway network with more than 434 rail stations, achieves the track of its solutions in less than 1 hour.

Keywords: Network design, greedy algorithm, Railway of Iran, multi-objective optimization