

ارائه الگوریتم رفع بهینه گلوگاههای شبکه ریلی با هدف توجیه پذیر نمودن برقی سازی محورها، مطالعه موردی: محور ریلی ناحیه راه آهن شمال ایران

محمد تمنایی^۱، محمد حسین ولی^۲

۱ استادیار، دانشکده مهندسی حمل و نقل، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲ کارشناس ارشد برنامه ریزی حمل و نقل، دانشکده مهندسی حمل و نقل، دانشگاه صنعتی اصفهان

m.tamannaei@cc.iut.ac.ir

تاریخ پذیرش ۹۶/۱۰/۹

تاریخ دریافت ۹۶/۰۴/۲۲

چکیده

یکی از راهکارهای مناسب برای رفع گلوگاههای ظرفیتی شبکه ریلی، برقی سازی است. با این حال، برقی سازی یک محور به صورت مجزا و بدون فراهم نمودن ظرفیت کافی و زیرساخت های لازم در نقاط مختلف شبکه، ممکن است نتواند جذب تقاضای ریلی شبکه را به نحو قابل قبول افزایش دهد. در این صورت، پروژه برقی سازی از نظر اقتصادی توجیه پذیر نخواهد بود. هدف از پژوهش حاضر، ارائه الگوریتمی است که مشخص نماید اصلاحات ظرفیتی در کدام نقاط شبکه ریلی باید انجام شود تا برقی سازی یک محور ریلی از نظر اقتصادی توجیه پذیر باشد. محور ریلی مورد نظر در این پژوهش برای برقی سازی، محور ریلی ناحیه شمال ایران است. این محور، دارای پتانسیل بالا در جذب بار ریلی است. در این پژوهش، سناریوهای مختلفی در نظر گرفته شده اند و میزان افزایش جذب بار ریلی شبکه و نیز تحلیل اقتصادی هزینه-فایده، به عنوان مهمترین معیارهای مقایسه سناریوها لحاظ شده اند. نتایج حاکی است که برقی سازی محور ریلی مذکور، به تنهایی و بدون رفع گلوگاههای ظرفیتی موجود در سایر نواحی شبکه، از نظر اقتصادی توجیه پذیر نیست و قادر به جذب بار ریلی قابل توجهی نیست. در حالی که با رفع برخی گلوگاههای شبکه همزمان با برقی سازی این محور ریلی می توان میزان جذب بار ناحیه شمال را تا حدود ۴ میلیون تن افزایش داد. الگوریتم پیشنهادی در این پژوهش، می تواند در تصمیم گیری پیرامون بایسته های اثربخشی پروژه های برقی سازی محورها، برای استفاده کارشناسان و مدیران راه آهن قرار گیرد.

واژه های کلیدی: شبکه ریلی، برقی سازی، گلوگاه های ظرفیتی، تقاضای بار، تخصیص

۱- مقدمه

دنیا، کمبود ظرفیت در شبکه است. این مشکل، در شبکه راه آهن ایران نیز یکی از مسائل اصلی و جدی محسوب می شود و در آینده نزدیک، با افزایش ناگزیر تقاضای حمل و نقل ریلی، به صورتی مضاعف رخ می نماید که تمهیدات اساسی برای رفع آن، نیاز است. این مسئله اهمیت زیادی دارد به

راه آهن به عنوان یک گونه حمل و نقل سازگار با محیط و مقرون به صرفه از نظر اقتصادی، در بسیاری از کشورها مورد توجه و استفاده قرار گرفته است. یکی از مشکلات اصلی سیستم حمل و نقل ریلی در بیشتر شبکه های راه آهن

۲- مبانی نظری پژوهش

همان گونه که بیان شد، تقاضای مبادی و مقاصد حمل ریلی، با توجه به ظرفیت محورها بر روی شبکه تخصیص داده می‌شود. در ادامه، مفاهیم ظرفیت در سیستم ریلی، برقی‌سازی و نیز تخصیص تقاضای بار در شبکه ریلی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۲-۱- ظرفیت ریلی

ظرفیت یک خط در سیستم ریلی عبارتست از بیشینه تعداد قطار قابل عبور در بازه زمانی مشخص. ظرفیت شبکه بستگی به زیرساخت، ناوگان و برنامه زمان بندی حرکت قطارها دارد. بنابراین محاسبه ظرفیت راه آهن، پیچیده تر از محاسبه ظرفیت سایر شیوه‌های حمل و نقل است [1]. روش‌های مختلفی برای افزایش ظرفیت در سیستم ریلی ذکر شده‌اند که از آن جمله میتوان به دوخطه کردن مسیر ریلی، تراک بندی، برقی کردن، افزایش بار محوری، بهبود زیرسازی به منظور افزایش بیشینه تناز قابل تحمل هر محور چرخ به دلیل عبور تناژ بیشتر قطار، بازگشایی ایستگاه‌های بسته (کاهش طول سیرگاه‌ها) اشاره کرد [2,3].

در مطالعات گوناگون برای محورهای دوخطه (یک طرفه)، ظرفیت به دو صورت مختلف محاسبه شده‌است: به صورت ظرفیت مجموع هر دو خط ریلی و به صورت مجزا برای هر یک از خطوط. در حالی که در کلیه مطالعات انجام شده در محورهای تک‌خطه (دوطرفه)، ظرفیت خط بدون تفکیک جهات رفت و برگشت محاسبه شده‌است. کد ۴۰۵ اتحادیه بین‌المللی راه‌آهن‌ها (UIC) روشی را برای محاسبه ظرفیت ارائه می‌کند که با تکیه بر زمان سیر، زمان لازم برای اخذ مجوز و زمان آزادسازی، بلاک اقدام به استخراج چهار نوع هدوی کرده و سپس با در نظر گرفتن زمان‌های حائل و اضافی به محاسبه ظرفیت می‌پردازد. رابطه محاسبه ظرفیت خط در روش UIC 405 به صورت زیر است [4]:

$$C = \frac{T - W}{t_{fm} + t_r + t_{zu}}$$

(۱)

لحاظ این که ایران در مسیر کریدورهای مهم بین‌المللی قرار دارد و افزایش قابلیت حمل تقاضای ریلی می‌تواند نقش کلیدی در کاهش هزینه‌های تحمیلی توسط سیستم جاده‌ای و در نتیجه، افزایش رشد اقتصادی کشور ایفا نماید.

یکی از راهکارهای مناسب برای رفع گلوگاههای ظرفیتی شبکه ریلی، برقی‌سازی است. این راهکار، در بسیاری از شبکه‌های ریلی دنیا برای حمل و نقل مسافر و بار در سطح وسیعی استفاده شده است. راه آهن برقی تاثیر زیادی بر افزایش ظرفیت شبکه ریلی و در نتیجه، صرفه‌جویی در هزینه انرژی، افزایش ایمنی و کاهش آلاینده‌های زیست محیطی دارد. با این حال، میزان تأثیرگذاری اعمال این راهکار در افزایش جذب تقاضای ریلی و بهبود مطلوبیت حمل و نقل ریلی نسبت به گزینه‌های رقیب (همچون حمل و نقل جاده‌ای) تابعی از میزان تقاضای مبادی و مقاصد مختلف، ظرفیت سیرگاه‌ها و نیز موقعیت گلوگاه‌های شبکه است. به عبارت دیگر، نمی‌توان بدون فراهم نمودن زیرساخت‌های لازم در نقاط مختلف شبکه، انتظار داشت که برقی‌سازی یک محور به صورت مجزا، به تنهایی قادر به جذب تقاضای ریلی قابل توجه به شبکه و افزایش منافع اقتصادی باشد. هدف از پژوهش حاضر، ارائه الگوریتمی است که مشخص نماید اصلاحات ظرفیتی در کدام نقاط شبکه ریلی بایستی انجام شود تا برقی‌سازی یک محور ریلی از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر باشد.

در بخش دوم این مقاله، مبانی نظری پژوهش مطرح شده‌اند. در این بخش، ظرفیت در سیستم ریلی، برقی‌سازی در راه‌آهن و نیز تخصیص بار در شبکه ارائه شده‌اند. در بخش سوم، الگوریتم پیشنهادی برای رفع بهینه گلوگاههای شبکه ریلی با هدف توجیه پذیر نمودن برقی‌سازی محورها ارائه شده است.

در بخش چهارم، الگوریتم پیشنهادی ارزیابی شده است. در این بخش، از محور ریلی ناحیه شمال ایران به عنوان مطالعه موردی برای برقی‌سازی استفاده شده‌است. در بخش پنجم، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری انجام شده‌است.

برقی سازی یکی از راهکارهای مناسب برای کاهش زمان سیر قطارها و در نتیجه، افزایش ظرفیت محورهای ریلی است. کشنده‌های برقی دارای قدرت بسیار بیشتر از کشنده‌های دیزلی هستند و همین نکته باعث می‌شود تا ظرفیت محور با استفاده از قطارهای برقی (نسبت به قطارهای دیزلی) افزایش داشته باشد. راهکار برقی سازی برای حمل بار در مسیرهای کوهستانی که توانایی دیزل‌ها بسیار پایین می‌آید و همچنین مسیرهای با ترافیک زیاد، استفاده می‌شود. این راهکار از نظر سهولت اجرایی بعد از دو خطه کردن و قبل از افزایش بار محوری قرار می‌گیرد. ساختار قطار برقی با سیستم زنجیروار شامل تجهیزات کابلی و برق رسانی بالا سری است که از طریق پانتوگراف برای ارسال جریان برق به لکوموتیو برقی یا واحد چندگانه اعم از واگن برقی یا وسایط ریلی سبک به کار می‌رود [6].

۲-۳- تخصیص تقاضای بار ریلی

تقاضای زوج مبدأ-مقصد‌های مختلف موجود در شبکه ریلی، با توجه به موقعیت آنها و مسیرهای موجود ریلی و نیز ظرفیت این مسیرها، روی شبکه تخصیص می‌یابند. با انجام عملیات تخصیص ترافیک باری بر روی شبکه ریلی، میزان عبور بار از هر یک از سیرگاه‌های شبکه و نسبت حجم عبوری به ظرفیت آن سیرگاه معین می‌شود. بدیهی است با ایجاد تغییرات زیرساختی در شبکه و اعمال راهکارهای افزایش ظرفیت (همچون برقی سازی محورها یا دوخطه سازی سیرگاه‌ها) مسیر حرکت بار برخی زوج مبدأ-مقصد‌ها و در نتیجه حجم عبوری از برخی سیرگاه‌های شبکه دستخوش تغییرات می‌شود.

به منظور انجام عملیات تخصیص در برنامه‌ریزی حمل و نقل، روش‌ها و الگوریتم‌های مختلفی توسعه داده شده‌اند. متناسب با این روش‌ها نرم افزارهای گوناگونی استفاده می‌شود که از آن جمله می‌توان به نرم‌افزارهای EMME، TRANSCAD، VISSIM اشاره نمود. به دلیل نحوه عملکرد قطارها در شبکه ریلی، ظرفیت سیرگاه‌ها، نقش ایستگاه‌ها و ... تخصیص در شبکه حمل و نقل ریلی تفاوت زیادی با تخصیص در شبکه معابر دارد. نرم‌افزارهای اشاره شده با وجود قابلیت بالا در

که در آن C ظرفیت خط از نظر تعداد قطارها در مدت زمانی مورد بررسی، T مدت زمان مورد بررسی، W زمان مسدودی تعمیر و نگهداری، t_{fm} میانگین هدوی بین کلیه قطارهایی که در خط اعزام می‌شوند، t_r زمان حائل و t_{zu} زمان اضافی هستند. مهمترین پارامتر برای محاسبه ظرفیت در فرمول مذکور، میانگین سرفاصله میانگین قطارها (t_{fm}) است. برای محاسبه سرفاصله بین دو قطار قبلی و بعدی، ۴ حالت مختلف می‌تواند رخ دهد: سرفاصله‌های رفت-رفت، رفت-برگشت، برگشت-برگشت و برگشت-رفت. هر یک از راهکارهای افزایش ظرفیت ریلی، بسته به میزان کاهش سرفاصله‌های چهارگانه حرکت قطارها، می‌تواند ظرفیت خط ریلی را تا میزان مشخصی افزایش دهند.

۲-۲- برقی سازی

از جمله راهکارهای اساسی برای افزایش ظرفیت یک مسیر ریلی، برقی سازی است. در این راهکار، نوع لکوموتیوهای مورد استفاده و نیز چگونگی تأمین نیروی محرکه قطار، دارای تفاوت‌های اساسی با سیستم قطار غیر برقی است. کشنده‌های برقی دارای قدرت بسیار بیشتر از کشنده‌های دیزلی بوده (تا حدود ۶ برابر) و می‌توان با این کشنده‌ها، بار بیشتری را با سرعت بالاتر حمل نمود. کشنده برقی انرژی خود را از طریق شبکه بالاسری یا ریل هادی تأمین می‌نمایند. لکوموتیوهای برقی انرژی الکتریکی موردنیاز تراکشن موتورهای خود را مستقیماً از طریق شبکه الکتریکی تأمین می‌کنند، که این شبکه الکتریکی خود به صورت‌های شبکه بالاسری و ریل سوم تأمین می‌شود [5]. برقی سازی خطوط ریلی مزایای بسیاری دارد که عبارتند از: افزایش ظرفیت شبکه، کاهش هزینه نگهداری لکوموتیو، کاهش تأخیرها، طول عمر بالاتر لکوموتیو برقی، افزایش سیر متوسط لکوموتیو و واگن، کاهش زمان توقف لکوموتیو در تعمیرات، افزایش آماده به کاری لکوموتیو، کاهش آلودگی صوتی و زیست محیطی، توان بالاتر لکوموتیوهای برقی، هزینه سرویس و نگهداری پایین‌تر و کاهش نیروی انسانی، کاهش مصرف انرژی به ازای واحد حمل [5].

مبدأ-مقصد، تا اتمام کامل تقاضای آن یا انسداد کلیه مسیرهای مربوط به آن ادامه می‌یابد [7].

۳- الگوریتم پیشنهادی با هدف توجیه پذیر نمودن برقی سازی محورها

به منظور تعیین پیش‌نیازهای ظرفیتی لازم برای توجیه پذیر نمودن برقی سازی یک محور ریلی، الگوریتمی در پژوهش حاضر ارائه شده است. این الگوریتم بر اساس تخصیص ماتریس تقاضای بار ریلی به شبکه راه‌آهن، شناسایی و رفع گلوگاه‌های ظرفیتی و تکرار فرآیند تا رسیدن به حد مطلوب جذب تقاضای بار عمل می‌نماید. در این الگوریتم، گلوگاه‌های ظرفیتی در کل شبکه ریلی که مانع جذب تقاضای ناشی از برقی سازی یک محور ریلی هستند، با استفاده از تکرارهای متناوب تخصیص شناسایی و رفع می‌شود. گام‌های مختلف مربوط به الگوریتم پیشنهادی مذکور ارائه شده است:

گام ۱: کلیه ورودی‌های مسئله فراخوانی شوند. میزان جذب تقاضای مورد انتظار تعیین شد.

گام ۲: محور ریلی مورد نظر برای برقی‌سازی، مشخص شود و روی شبکه اعمال شود (سناریوی اول). با انجام عملیات تخصیص، گلوگاه‌های شبکه شناسایی شوند.

گام ۳: اگر میزان تقاضای جذب شده به شبکه برابر یا بیشتر از میزان جذب تقاضای مورد نیاز (RD)^۴ است، مجموعه گلوگاه‌های رفع شده (BS)^۵ ارائه شود. الگوریتم پایان یافته است. در غیر اینصورت، گلوگاه‌های شناسایی شده افزایش ظرفیت داده شوند و به مجموعه گلوگاه‌های رفع شده اضافه گردند (سناریوی جدید).

گام ۴: هزینه‌های مربوط به سناریوی جدید محاسبه شوند.

گام ۵: عملیات تخصیص روی شبکه اجرا شود و میزان تقاضای جذب شده به شبکه تعیین شود. گلوگاه‌های شبکه شناسایی شوند.

تخصیص در شبکه معابر، در مورد تخصیص در شبکه ریلی کارایی لازم را ندارند. بنابراین نیاز به توسعه الگوریتم برای تخصیص بار شبکه ریلی کشور است. در این راستا تلاش‌هایی در مجموعه راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان به توسعه «نرم افزار بارگذاری شبکه ریلی ایران» اشاره نمود. الگوریتم استفاده شده در این نرم افزار بر اساس تخصیص همه یا هیچ^۱ است. در این الگوریتم، عملیات تخصیص، تنها بر اساس یافتن کوتاه‌ترین مسیر برای یک زوج مبدأ-مقصد و بدون در نظر گرفتن ظرفیت سیرگاه‌ها صورت می‌گیرد که این امر موجب ارائه نتایج غیر واقع بینانه می‌شود؛ زیرا در حالتی که حجم عبوری از یک سیرگاه از ظرفیت سیرگاه فراتر می‌رود، روش تخصیص همه یا هیچ سیرگاه مذکور را مسدود نمی‌نماید [8]. در حالی که در واقعیت، با رسیدن حجم عبوری به ظرفیت، سیرگاه مسدود می‌شود.

در این پژوهش، برای تخصیص بار ریلی، از نرم‌افزار FARS^۲ استفاده شد. این نرم‌افزار توسط پژوهشکده حمل و نقل دانشگاه صنعتی اصفهان توسعه یافته است. در این نرم افزار، ماتریس تقاضای شبکه ریلی به همراه شبکه خطوط راه‌آهن، به عنوان پارامتر ورودی مسئله در نظر گرفته شدند. روش تخصیص استفاده شده در نرم‌افزار FARS، به صورت تخصیص جزئی^۳ ماتریس تقاضا با لحاظ نمودن ظرفیت سیرگاه‌ها است. در این روش، برای هر زوج مبدأ-مقصد، کوتاه‌ترین مسیر شناسایی می‌شود و واحد جزء بار، به مسیر یافت شده تخصیص می‌یابد. پس از تخصیص بار جزئی کلیه مبادی-مقاصد، مجموع حجم بار عبوری از هر یک از سیرگاه‌های شبکه ریلی با ظرفیت آن‌ها مقایسه می‌شود و در صورت رسیدن بار عبوری به ظرفیت، سیرگاه موردنظر مسدود می‌شود. سپس در تکرار بعدی، برای هر زوج مبدأ-مقصد، کوتاه‌ترین مسیر به‌روزرسانی می‌شود و واحدهای جزء بار از شبکه عبور داده می‌شوند. این فرآیند برای هر زوج

4 Required Demand
5 Bottleneck Set

1 All or Nothing Assignment
2 Freight Assignment in Railway System (FARS)
3 Incremental Assignment

گام ۶: ارزیابی اقتصادی سناریوی جدید با استفاده از شاخص‌های ارزش خالص فعلی (NPV) و خالص یکنواخت سالیانه (NEUA) انجام گردد. به گام ۳ بروید.

در شکل (۱)، فلوچارت متناظر با الگوریتم مذکور ارائه شده است.

شکل ۱. فلوچارت پیشنهادی در پژوهش حاضر جهت توجیه پذیر نمودن

برقی سازی سیستم ریلی

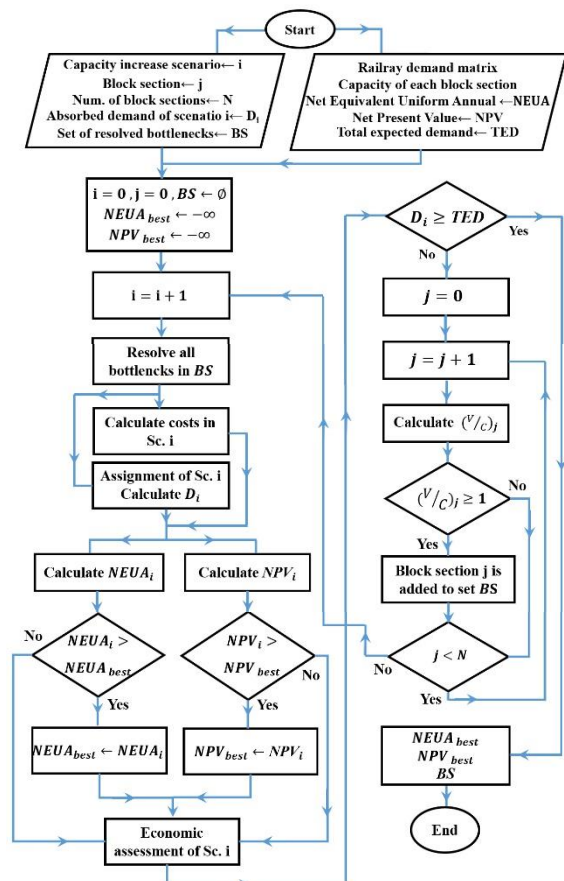


Fig. 1. Proposed algorithm to justify the electrification of the railway corridors

۴- ارزیابی الگوریتم پیشنهادی

به منظور ارزیابی الگوریتم پیشنهادی در این پژوهش، برقی سازی محور ریلی ناحیه شمال ایران، مورد مطالعه موردی قرار گرفت. ناحیه راه‌آهن شمال از چهار استان سمنان، تهران، مازندران و گلستان عبور می‌کند. راه‌آهن ناحیه شمال در تمام طول مسیر یک خطه بوده و شامل ۴۰۲ کیلومتر خط اصلی و ۳۱ کیلومتر خط فرعی صنعتی-تجاری و ۴۱ کیلومتر خط مانور است. محور ریلی این ناحیه دارای ۹۴ دهانه تونل یک

لازم به ذکر است که داده‌های ورودی به نرم‌افزار (شبکه ریلی، طول، ظرفیت کمانها، ماتریس تقاضای سفر) از مراجع معتبر تهیه شده‌اند. داده‌های مربوط به شبکه ریلی و نوع و ظرفیت کمان‌ها، از اداره سیر و حرکت راه‌آهن کشور اخذ شده‌اند. همچنین داده‌های مربوط به ماتریس تقاضا با استفاده از بارنامه‌های صادر شده سالانه مأخوذ از اداره بازرگانی راه آهن کشور تهیه شده‌اند. برای ارزیابی الگوریتم پیشنهادی، از ماتریس تقاضای ریلی مبدای و مقاصد کشور که برای سال ۱۳۹۸ توسعه داده شده، استفاده شده است.

شکل ۲- راه آهن ناحیه شمال

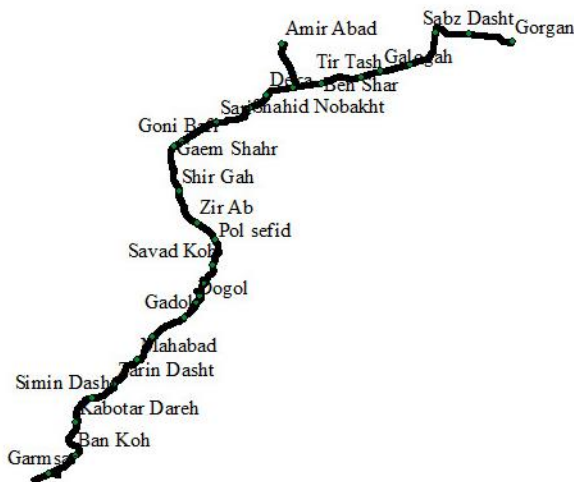


Fig. 2. Railway corridor at North of Iran

۴-۱- سناریوهای استفاده شده برای افزایش ظرفیت ریلی

برای ارزیابی تأثیر برقی سازی راه آهن ناحیه شمال بر میزان جذب تقاضای ریلی پنج سناریو تعریف شده است و جذب بار در این پنج حالت باهم مقایسه شده است:

سناریوی صفر: جذب تقاضای بار محور شمال بدون تغییر نسبت به وضعیت موجود (سال ۱۳۹۵) که در شکل (۳) نشان داده شده است.

سناریوی ۱: بررسی جذب تقاضای بار محور شمال با فرض برقی نمودن این محور که در شکل (۴) نشان داده شده است.

6 Net Present Value

7 Net Equivalent Uniform Annual

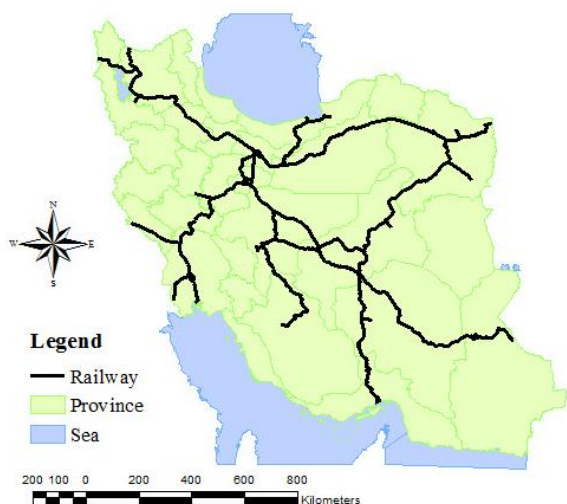


Fig. 3. Scenario 0: Existing Iranian railway network

میزان افزایش ظرفیت ریلی پس از برقی سازی محور ریلی، بستگی به سرعت ماکزیمم قطار برقی و میزان شتاب افزایشده و کاهنده آن دارد. در این پژوهش، افزایش ظرفیت ریلی پس از برقی سازی محور تکخطه ریلی شمال ایران، برابر با ۴۰٪ در نظر گرفته شده است. همچنین میزان افزایش ظرفیت راهکار دوخطه سازی برابر با ۱۰۰٪ لحاظ شده است.

شکل ۴ - سناریوی یک: برقی سازی محور ریلی شمال ایران

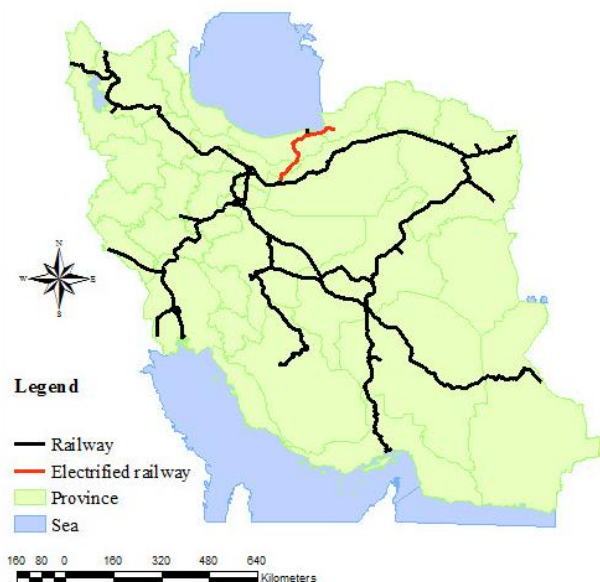


Fig. 4. Scenario 1: Network with electrified railway corridor at North of Iran

شکل ۵. سناریوی دو: برقی سازی محور شمال همزمان با رفع گلوگاههای ظرفیتی مرتبه اول

سناریوی ۲: بررسی جذب تقاضای بار محور شمال با فرض برقی نمودن این محور همزمان با رفع گلوگاههای ظرفیتی ایجاد شده در شبکه که در شکل (۵) نشان داده شده است.

سناریوی ۳: بررسی جذب تقاضای بار محور شمال با فرض برقی نمودن این محور همزمان با رفع گلوگاه های ظرفیتی ایجاد شده در شبکه که در شکل (۶) نشان داده شده است.

سناریوی ۴: بررسی جذب تقاضای بار محور شمال با فرض برقی نمودن این محور همزمان با رفع گلوگاه های ظرفیتی ایجاد شده در شبکه که در شکل (۷) نشان داده شده است.

در سناریوی ۲، گلوگاههایی که با استفاده از دوخطه سازی افزایش ظرفیت یافته اند عبارتند از: سیرگاه باغیک - ساقه، سیرگاه بالارود - مازو، سیرگاه دهنار - کاشان، سیرگاه فیروزه - اصفهان، سیرگاه یزد - نظرآباد، سیرگاه مانی - اضطراری ۲۶، سیرگاه رباط پشت بادام - شهید منتظر. لازم به ذکر است که سیرگاههای مذکور، پس از اجرای نرم افزار تخصیص در سناریوی ۱، به صورت گلوگاهی (نسبت حجم به ظرفیت بیش از یک) عمل نموده اند و در سناریوی ۲، افزایش ظرفیت برای آنها لحاظ شده است.

در سناریوی ۳، گلوگاههایی که در این سناریو با استفاده از دوخطه سازی افزایش ظرفیت یافته اند علاوه بر گلوگاههای ذکر شده در سناریوی ۲ عبارتند از: سیرگاه تله زنگ - تنگ پنج، سیرگاه امران - لارستان، سیرگاه شوراب - دهنار، سیرگاه هرنند - ورزنه.

در سناریوی ۴، گلوگاههایی که در این سناریو با استفاده از دوخطه سازی افزایش ظرفیت یافته اند علاوه بر گلوگاههای ذکر شده در سناریوی ۲ و ۳ عبارتند از: سیرگاه سرخ گل - بادرود، سیرگاه سیستان - فیروزه، سیرگاه بهرام گور - مهرداد، سیرگاه عباس آباد - کال زرد، سیرگاه خوشوم - نی باد.

شکل ۳ - سناریوی صفر: شبکه ریلی ایران بدون تغییر نسبت به وضع موجود

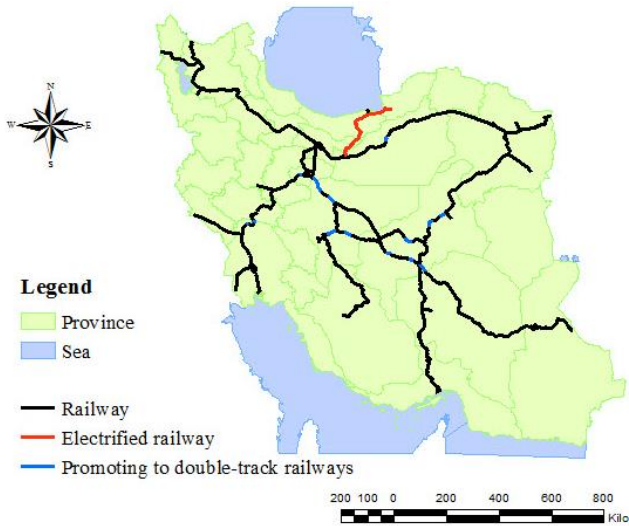


Fig. 7. Scenario 2: Network with electrified railway corridor at North of Iran and 3rd resolution of bottlenecks

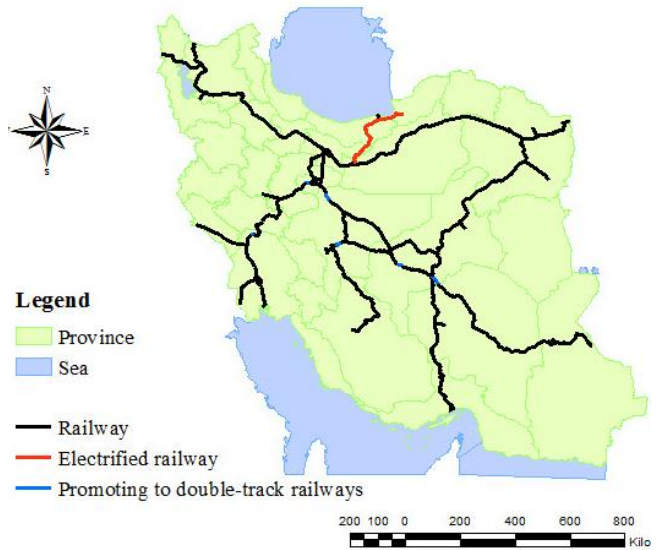


Fig. 5. Scenario 2: Network with electrified railway corridor at North of Iran and 1st resolution of bottlenecks

۲-۴- هزینه‌ها و منافع افزایش ظرفیت

برای هر یک از سناریوهای افزایش ظرفیت ریلی، هزینه‌ها و منافع مربوطه باید محاسبه شوند.

هزینه‌ها:

هزینه‌های مربوط به سناریوها، شامل هزینه برقی سازی محور ریلی ناحیه شمال، به علاوه هزینه رفع گلوگاههای ظرفیتی شناسایی شده در سایر نقاط شبکه است. در این پژوهش، به منظور رفع گلوگاههای شناسایی شده، از راهکار دوخطه سازی استفاده شده است. در جدول (۱)، هزینه تقریبی برقی سازی محور ریلی و نیز هزینه‌های مختلف مربوط به راهکار دوخطه سازی ریلی برای یک کیلومتر ارائه شده‌اند [9].

جدول ۱. هزینه برقی سازی و دوخطه سازی محور ریلی

(بر اساس فهرست‌بهای سال ۱۳۹۳)

Capacity increase solution	Terrain type	Billion Rials Per Kilometer
Promoting to double-track	Level	28
	Rolling	33
	Mountain	38
	Hard mountain	54
Elictrification	---	7.65

Table 1. Costs of electrification and promoting to double-track railways

شکل ۶ - سناریوی سه - برقی سازی محور شمال همزمان با رفع گلوگاه - های ظرفیتی مرتبه‌ی دوم

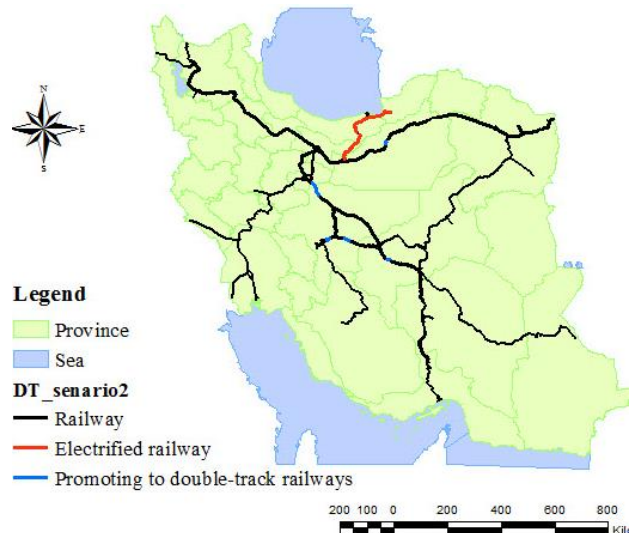


Fig. 6. Scenario 2: Network with electrified railway corridor at North of Iran and 2nd resolution of bottlenecks

شکل ۷. سناریوی چهار: برقی سازی محور شمال همزمان با رفع گلوگاه - های ظرفیتی مرتبه‌ی سوم

منافع:

Environment	960	170	790
Total	2590	580	2020

Table 2. Indirect benefits of railway transportation

جدول ۳- جذب تقاضای بار محور ریلی ناحیه شمال

Scenario	Description	Demand Absorbed (Ton)
0	Existing railway network	1690000
1	Network with electrified railway corridor at North of Iran	1953600
2	Network with electrified railway corridor at North of Iran and 1 st resolution of bottlencks	3633300
3	Network with electrified railway corridor at North of Iran and 2 nd resolution of bottlencks	3633300
4	Network with electrified railway corridor at North of Iran and 3 rd resolution of bottlencks	3976500

Table 3. Demand of North of Iran absorbed to the railway network

همانطور که در جدول (۳)، مشاهده می‌شود شبکه راه‌آهن ایران در محور شمال سالیانه حدود ۱/۶۹ میلیون تن بار جذب می‌نماید. برقی‌سازی محور شمال با افزایش ظرفیت توانسته میزان اضافه جذب بار را به ۱/۹۵ میلیون تن در سال برساند. با این حال، وجود گلوگاه‌های ظرفیتی در شبکه ریلی مانع استفاده از پتانسیل ظرفیتی محور شمال شده است. برقی‌سازی محور شمال به همراه رفع گلوگاه‌های ظرفیتی شبکه ریلی، موجب رسیدن جذب بار به مقدار ۳/۹۷ میلیون تن شده است. نمودار تغییرات جذب تقاضای بار ریلی محور شمال در سناریوهای مختلف در شکل (۸) نشان داده شده است.

شکل ۸. تقاضای جذب شده در سناریوهای مختلف

در این پژوهش، منافع مربوط به هر سناریو، از جمع دو مقدار حاصل می‌شود: منافع مستقیم و منافع غیرمستقیم.

منافع مستقیم، منافع مالی است که به دلیل افزایش جذب تقاضای بار ریلی ناشی از اجرای یک سناریو حاصل می‌شود. به عبارت دیگر، منافع مستقیم اجرای یک سناریو برابر است با حاصل ضرب سود شرکت راه‌آهن از هر تن کیلومتر حمل بار، در میزان افزایش تن-کیلومتر جذب تقاضای مربوطه. متوسط منافع مستقیم با توجه به نوع هر واگن و فشار محوری مجاز هر مسیر برابر ۵۰۰ ریال در نظر گرفته می‌شود [9]. منافع غیر مستقیم، منافع اقتصادی (غیرمالی) است که از دیدگاه ملی اهمیت می‌یابد و مربوط به مزیت نسبی حمل ریلی (نسبت به حمل جاده‌ای) در فاکتورهای همچون مصرف سوخت، ایمنی و محیط زیست است. برای محاسبه منافع غیرمستقیم، مابه‌التفاوت هزینه حمل یک تن-کیلومتر بار در سیستم‌های ریلی و جاده‌ای برای هر یک از فاکتورهای سه-گانه (مصرف سوخت، ایمنی و محیط زیست) باید در نظر گرفته شود. در جدول (۲)، هزینه‌های استفاده شده در این پژوهش برای حمل واحد تن-کیلومتر بار در هر یک از سیستم‌های جاده و ریل و منافع غیرمستقیم حاصل از گذار از حمل جاده‌ای به ریلی ارائه شده است. منافع غیرمستقیم اجرای یک سناریو برابر است با حاصل ضرب منافع غیرمستقیم مربوط به هر تن-کیلومتر حمل بار، در میزان افزایش تن-کیلومتر جذب تقاضای مربوطه.

۴-۳- تحلیل تقاضای حمل و نقل سناریوها

به منظور تعیین تقاضای جذب شده‌ی ریلی برای هر یک از سناریوهای راهکار افزایش ظرفیت تخصیص جزئی بار انجام پذیرفت. در جدول (۳)، جذب تقاضای بار ریلی در محور شمال برای هر یک از این سناریوها نشان داده شده است.

جدول ۲- منافع غیرمستقیم حمل و نقل ریلی

Property	Unit	Road	Rail	Indirect benefit (difference)
Fuel Consumption	Ton-Kilom	630	180	450
Safety		1000	230	780

به منظور مقایسه هزینه‌ها و منافع مالی و غیرمالی، هریک از سناریوهای افزایش ظرفیت در هریک از گلوگاه‌ها به روش NPV در طی یک دوره ۳۰ ساله و نرخ بهره ۵٪ بدون در نظر گرفتن نرخ تورم در هزینه‌ها و منافع محاسبه شد [10]. در روش ارزش خالص فعلی هر کدام مقدارشان بیشتر باشد اقتصادی‌تر می‌باشد. اگر در سناریویی مقدار ارزش خالص فعلی منفی شود نشان‌دهنده‌ی این است که انجام این پروژه غیراقتصادی است. در جدول (۴) ارزش خالص فعلی سناریوهای راهکار افزایش ظرفیت نشان داده شده است.

جدول ۴. ارزش خالص فعلی سناریوها

Scenario	Description	Demand Absorbed (Billion Rials)
0	Existing railway network	0
1	Network with electrified railway corridor at North of Iran	-16686
2	Network with electrified railway corridor at North of Iran and 1 st resolution of bottlencks	327065
3	Network with electrified railway corridor at North of Iran and 2 nd resolution of bottlencks	325514
4	Network with electrified railway corridor at North of Iran and 3 rd resolution of bottlencks	382339

Table 4. Net Present Value (NPV) in different scenarios

بر اساس جدول (۴) ملاحظه می‌شود که مقدار ارزش خالص فعلی سناریوی دوم برابر ۱۶۶۸۶- میلیارد ریال برآورد شده است که این مقدار منفی بیانگر غیر اقتصادی بودن این سناریو می‌باشد. این در حالی است که سناریوی پنجم با ارزش خالص فعلی ۳۸۲۳۳۹ میلیارد ریال مقرون به صرفه و اقتصادی شده است.

در شکل (۹)، مقایسه هزینه‌ها و منافع مالی و غیرمالی هریک از سناریوهای راهکار برتر افزایش ظرفیت بر اساس روش ارزش خالص فعلی آورده شده‌اند.

شکل ۹. نمودار ارزش خالص فعلی برای سناریوهای مختلف

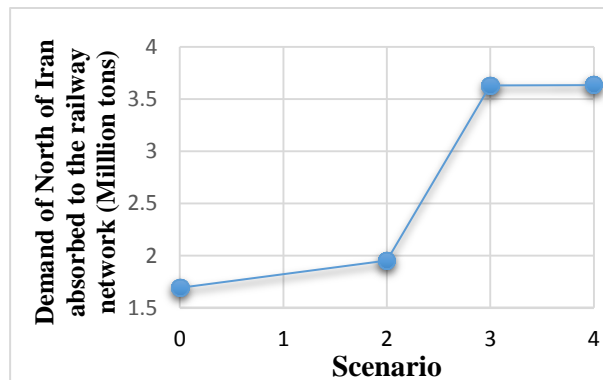


Fig. 8. Demand absorbed in different scenarios

در مقایسه پنج سناریوی بالا دیده می‌شود که با برقی سازی محور شمال به میزان ۰/۲۶ میلیون تن به جذب تقاضای بار ریلی این محور اضافه شده است درحالیکه با شبکه با برقی سازی محور شمال و رفع گلوگاه مرتبه سوم به مقدار، ۲/۲ میلیون تن به جذب تقاضای بار ریلی اضافه شده است.

۴-۴- تحلیل اقتصادی سناریوها

در این بخش، بر مبنای نتایج حاصل از افزایش جذب بار ریلی سناریوهای بررسی شده، تحلیل اقتصادی ارزش خالص فعلی انجام می‌شود. برای هریک از سناریوها، هزینه‌های اجرا و نیز منافع مربوطه مشخص شده‌اند. هزینه‌های برقی‌سازی محور شمال شامل شبکه بالاسری، لوکوموتیو برقی و اصلاح گاباریت‌ها است. منافع مالی هریک از سناریوها، رابطه مستقیم با میزان اضافه بار جذب شده به شبکه ریلی پس از اعمال آن سناریو دارد. منافع اقتصادی با لحاظ صرفه‌جویی حاصله در مصرف سوخت و نیز مابه‌التفاوت هزینه‌های زیست‌محیطی و ایمنی برای هر تن-کیلومتر بار ریلی و جاده‌ای به دست آمده-اند. در روش ارزش خالص فعلی (NPV)، تفاضل منافع (B_t) و هزینه‌ها (C_t) در طول افق برنامه‌ریزی n ساله به ازای نرخ بهره (i) به دست آورده می‌شود که در رابطه (۲) نشان داده شده است [3]

$$\begin{aligned}
 NPV &= \sum_{t=0}^n (B_t - C_t) / (1+i)^t \\
 &= \sum_{t=0}^n (B_t - C_t) / (p/f^n, i, t)
 \end{aligned}
 \quad (2)$$

استفاده از فاکتور A/F به درآمد یکنواخت سالیانه تبدیل می-گردد. پس از آن مقدار SV با علامت منفی با هزینه یکنواخت سالیانه تجمیع می-شود. در رابطه (۴)، محاسبه هزینه یکنواخت سالیانه نشان داده شده است [12].

$$EUAC = P(A/P, i\%, n) - SV(A/F, i\%, n) = P \left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] - F \left[\frac{i}{(1+i)^n - 1} \right] \quad (4)$$

درآمد یکنواخت سالیانه^۹ (EUAB): به منظور محاسبه درآمد یکنواخت سالیانه منافع اقتصادی با لحاظ صرفه جویی حاصله در مصرف سوخت و نیز مابه‌التفاوت هزینه‌های زیست‌محیطی و ایمنی برای هر تن-کیلومتر بار ریلی و جاده‌ای به دست آمده‌اند.

برای ارزیابی اقتصادی سناریوهای مختلف افزایش ظرفیت درآمدها و هزینه‌های یکنواخت سالیانه محاسبه شد و از طریق روابط گفته شده، مقدار خالص یکنواخت سالیانه محاسبه شد و سناریویی که از بیشترین مقدار مربوط به این شاخص برخوردار است به عنوان اقتصادی ترین سناریو در نظر گرفته شد. اگر در سناریویی مقدار خالص یکنواخت سالیانه منفی شود نشان‌دهنده‌ی اینست که انجام این پروژه غیراقتصادی است. در جدول (۵)، خالص یکنواخت سالیانه سناریوهای راهکار افزایش ظرفیت نشان داده شده است.

جدول ۵. خالص یکنواخت سالیانه سناریوها

Scenario	Description	Demand Absorbed (Billion Rials)
0	Existing railway network	0
1	Network with electrified railway corridor at North of Iran	-1085
2	Network with electrified railway corridor at North of Iran and 1 st resolution of bottlencks	21276
3	Network with electrified railway corridor at North of Iran and 2 nd resolution of bottlencks	21175
4	Network with electrified railway	24871

9 Equivalent Uniform Annual Benefit

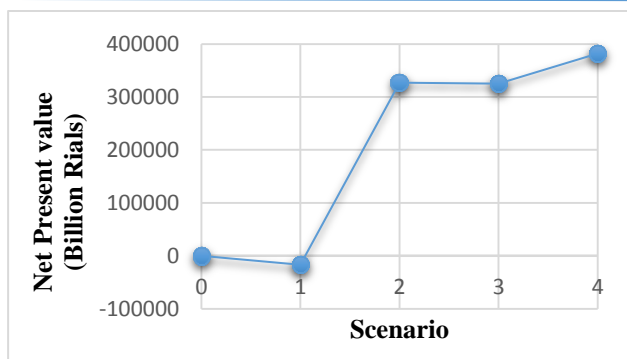


Fig. 9. Net Present Value in different scenarios

با توجه به شکل (۹)، مشخص است که سناریوی ۴ از سایر سناریوها اقتصادی‌تر است. همچنین ملاحظه می‌شود که سناریوی ۱ غیراقتصادی است. به عبارت دیگر اجرای پروژه‌ی برقی نمودن محور شمال بدون رفع گلوگاه غیراقتصادی است؛ در حالی که برقی‌سازی محور شمال همزمان با رفع گلوگاه‌های مشخصی از شبکه بسیار مقرون به صرفه است.

علاوه بر روش ارزش خالص فعلی، تحلیل اقتصادی سناریوهای گفته شده توسط روشی موسوم به «روش خالص یکنواخت سالیانه» (NEUA) نیز انجام شد. در این روش، درآمدها و هزینه‌ها به دریافت یا پرداخت سالیانه یکنواخت تبدیل می‌شوند. یکی از مزایای این روش، برخلاف روش ارزش فعلی، این است که عمر پروژه‌ها تغییری در محاسبات نمی‌دهد و در حقیقت نیازی به تعیین عمر مشترک در حالتی که پروژه‌ها دارای عمر نابرابرند نیست [11]. به منظور محاسبه خالص یکنواخت سالیانه باید بین هزینه یکنواخت سالیانه و درآمد یکنواخت سالیانه مقایسه به عمل آید و در نتیجه خالص یکنواخت سالیانه به دست آید که در رابطه‌ی (۳) نشان داده شده است:

$$NEUA = EUAB - EUAC \quad (3)$$

هزینه یکنواخت سالیانه^۸ (EUAC): فرض کنید هزینه اولیه طرحی (P)، پس از عمر مفید (n) سال دارای ارزش اسقاطی (SV) باشد. به منظور محاسبه EUAC مقدار P را با استفاده از فاکتور A/P به هزینه یکنواخت سالیانه و مقدار SV را با

8 Equivalent Uniform Annual Cost

corridor at North of Iran and 3rd
resolution of bottlenecks

Table 5. Net Equivalent Uniform Annual (NEUA) in different scenarios

همان‌طور که در جدول (۵) نشان داده شده است، روش خالص یکنواخت سالیانه با در نظر گرفتن درآمد یکنواخت سالیانه و هزینه یکنواخت سالیانه محاسبه شده است. نتایج تحلیل این روش حاکی است که در سناریوی پنجم (شبکه با برقی سازی محور شمال و رفع گلوگاه مرتبه ی سوم) مقدار خالص یکنواخت سالیانه برابر ۲۴۸۷۱ میلیارد ریال است. از این رو، از بین سناریوهای راهکار افزایش ظرفیت، سناریوی پنجم اقتصادی‌ترین سناریو بر اساس روش خالص یکنواخت سالیانه تعیین می‌شود. در نتیجه، با توجه به هر دو شاخص اقتصادی ارائه شده در پژوهش، سناریوی پنجم (شبکه با برقی سازی محور شمال و رفع گلوگاه مرتبه ی سوم) بیشترین منفعت خالص مستقیم و غیرمستقیم را دارد و به عنوان سناریوی برتر شناخته می‌شود.

۵- جمع بندی و نتیجه گیری

برقی سازی یک محور ریلی به صورت مجزا و بدون فراهم نمودن ظرفیت کافی و زیرساخت‌های لازم در نقاط مختلف شبکه، ممکن است نتواند جذب تقاضای ریلی شبکه را به شکل قابل قبول افزایش دهد. در این صورت، پروژه برقی-سازى از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر نخواهد بود. هدف از پژوهش حاضر، ارائه الگوریتمی است که مشخص نماید اصلاحات ظرفیتی در کدام نقاط شبکه ریلی بایستی انجام شود تا برقی‌سازی یک محور ریلی از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر باشد. محور ریلی مورد نظر در این پژوهش برای برقی‌سازی، محور ریلی ناحیه شمال ایران است. این محور، دارای پتانسیل بالا در جذب بار ریلی است. تقاضای بار ریلی کلیه مبادی-مقاصد کشور و نیز ظرفیت سیرگاههای شبکه به عنوان ورودی مسئله لحاظ شده‌اند. سناریوهای مختلفی در نظر گرفته شده‌اند و میزان افزایش جذب بار ریلی شبکه و نیز تحلیل اقتصادی هزینه-فایده، به عنوان مهمترین معیارهای مقایسه سناریوها لحاظ شده‌اند. نتایج حاکی است که برقی-سازى محور ریلی ناحیه شمال، به تنهایی از نظر اقتصادی

توجیه‌پذیر نیست و قادر به جذب بار ریلی قابل توجهی نمی‌باشد. برقی سازی محور ریلی ناحیه شمال ایران، به تنهایی می‌تواند جذب تقاضای بار ریلی آن ناحیه را از ۱/۶۳ میلیون تن به ۱/۹۵ میلیون تن برساند. در این سناریو، شاخص تحلیل اقتصادی «ارزش خالص فعلی» برابر ۱۶۶۸۶- میلیارد ریال و شاخص «خالص یکنواخت سالیانه» برابر ۱۰۸۵- میلیارد ریال محاسبه شدند که بیانگر غیر اقتصادی بودن این سناریو می‌باشد. ناچیز بودن افزایش جذب تقاضای بار ریلی پس از برقی‌سازی، به دلیل وجود گلوگاههای ظرفیتی در مناطق دیگر شبکه ریلی است. وجود گلوگاههای شبکه ریلی منجر به عدم استفاده از پتانسیل ظرفیتی حاصل از برقی‌سازی می‌گردد که امکان پاسخگویی کامل به تقاضای ناحیه شمال را با چالش مواجه می‌سازد. با استفاده از الگوریتم پیشنهادی در پژوهش حاضر، گلوگاههایی از شبکه ریلی که مانع استفاده از پتانسیل ظرفیتی مذکور می‌شوند شناسایی شدند و با اجرای سناریوهای افزایش ظرفیت این گلوگاهها، میزان جذب بار ریلی ناحیه شمال ایران افزایش یافت. با اعمال الگوریتم پیشنهادی و رفع گلوگاههای شبکه در تکرار سوم الگوریتم، میزان جذب بار ریلی ناحیه مذکور به ۳/۹۷ میلیون تن افزایش یافت. در این سناریو، ارزش خالص فعلی برابر ۳۸۲۳۳۹ میلیارد ریال و خالص یکنواخت سالیانه برابر ۲۴۸۷۱ میلیارد ریال محاسبه گردید که هر دو، بیانگر توجیه‌پذیری اقتصادی پروژه برقی‌سازی محور شمال (همراه با اصلاحات ظرفیتی در گلوگاههای شناسایی شده شبکه) است می‌شوند. به عبارت دیگر، برای جذب تقاضای باری محور ریلی ناحیه شمال ایران، افزایش ظرفیت خود این محور به تنهایی کافی نیست، بلکه برای جذب تقاضای زوج مبدأ-مقصدهایی که به این محور ریلی مربوط می‌باشند، بایستی ظرفیت‌سازی لازم در کل فاصله بین هر مبدأ و مقصد انجام گیرد. الگوریتم پیشنهادی در پژوهش حاضر، می‌تواند در تصمیم‌گیری پیرامون بایسته-های اثربخشی پروژه‌های برقی‌سازی محورها، مورد استفاده کارشناسان و مدیران راه‌آهن قرار گیرد.

References

مراجع

- [1] Landex, A., Kaas, A.H. and Hansen, S., 2006. Railway operation. Technical University of Denmark, Centre for Traffic and Transport.
- [2] Tamannaie, M., Shafiepour, M., Haghshenas, H., Tahmasebi, B., 2016. Two Comprehensive Strategies to Prioritize the Capacity Improvement Solutions in Railway Networks (Case Study: Iran). *International Journal of Railway Research*, 3(1), 9-18.
- [3] Shafiepour, M., Tamannaie, M. and Abtahi, M., 2017. A Methodology to Prioritize the Construction Projects of New Railway Infrastructures for Privatization in Railway Networks (Case Study: Iran). *International Journal of Transportation Engineering*.
- [4] Leaflet, U.I.C., 1996. 405 OR. Links between Railway Infrastructure Capacity and the Quality of Operations. International Union of Railways.
- [5] Tamannaie, M., 2012. Determination of appropriate solutions to increase capacity of bottlenecks in Iran railway network, Railway research center, Iran railway association (In Persian).
- [6] Tamannaie, M., Saffarzadeh, M., Kalantari, H., 2013. The investigation of the appropriate solutions for increasing the capacity of the bottlenecks in Iranian railway network, the 12th international conference on traffic and transportation engineering, Tehran, Iran (In Persian).
- [7] Haghshenas, H., Tamannaie, M., 2016. Analysis of freight demand and capacity of the main corridors of Iranian railway network, Railway research center, Iran railway association (In Persian).
- [8] Kato, H., Kaneko, Y. and Inoue, M., 2010. Comparative analysis of transit assignment: evidence from urban railway system in the Tokyo Metropolitan Area. *Transportation*, 37(5), pp.775-799.
- [9] Shafiepour, M., 2016. Investigating the privatization feasibility for construction of infrastructures in Iranian railway network, Master of science thesis, Isfahan University of Technology, Iran (In Persian).
- [10] Azadnia, M., 2006. Foundations of engineering economics, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran (In Persian).
- [11] Oskoonejad, M.M., 2016. Engineering economics, evaluation of industrial projects, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran (In Persian).
- [12] Li, Y.B., Wen, Q.Y., Qin, S.J., Guo, F.Z. and Sun, Y., 2014. Practical quantum all-or-nothing oblivious transfer protocol. *Quantum information processing*, 13(1), pp.131-139.

An Algorithm for Optimally Removing Network Bottlenecks to Justify the Electrification of the Railway Corridors, Case Study: Railway Corridor at North of Iran

Mohammad Tamannaei¹, Mohammad Hossein Vali²

1,2. Department of Transportation Engineering, Isfahan University of Technology

m.tamannaei@cc.iut.ac.ir

Abstract

Electrification is one of the appropriate solutions to increase the railway network capacity. However, use of this solution without provision of the sufficient capacity and required infrastructure through the whole of the network, may not acceptably increase the attracted railway demand. In such cases, the electrification project may be uneconomical. This research aims to propose an algorithm to identify which bottlenecks of the network must be removed, in order to justify the electrification of a specific railway corridor. We investigated the electrification of the railway corridor at north of Iran. This corridor has a substantial capability for absorption of the freight transportation demand. The railway freight demand related to all of the origin-destination pairs of Iranian railway network, along with the capacities of all block sections of the network are considered as inputs of the problem. For freight assignment in the railway network, FARS (Freight Assignment in Railway System) software was used. This Iranian software is developed by transportation research center of Isfahan University of Technology (IUT), in 2013. The assignment method used in this software is based on Incremental assignment. Different scenarios are considered and two main criteria are employed to compare the scenarios: tonnage of increase in railway freight demand, and economic index of benefit to cost called Net Present Value. According to the results, the electrification of the railway corridor at north of Iran, with no resolution of the bottlenecks in other locations of the network, cannot absorb a remarkable demand. The individual electrification of the mentioned corridor can only increase the absorbed freight demand from 1.65 million tons to 1.95 million tons, which is not considered an impressive progress. In this scenario, the Net Present Value (NPV) index and Net Uniform Annual (NUA) index are negative, which implies that the execution of this scenario is uneconomical. The low increase of the demand absorption is due to the existence of the capacity bottlenecks in other parts of the railway network. The existence of these bottlenecks prevents the complete usage of the added capacity potential emerged from the electrification. Consequently, the possibility of handling the transportation demand at north of Iran would be limited. By using the algorithm proposed in the present study, the main bottlenecks which prevent the load flow through the network, were identified. Then, by execution of the capacity increase scenarios for the identified bottlenecks, the absorption of the railway freight demand was increased to 3.97 million tons, with positive values for both NPV and NUA indices, which imply the economic justification of the railway electrification at north of Iran, simultaneously with improvements for capacity bottlenecks at other parts of the railway network. In other words, to achieve the absorption of the freight demand of the railway corridor in north part of Iran, it is not adequate to merely increase the capacity of this corridor itself. The railway electrification project in a specified part of the network is preferred to be performed simultaneously by the capacity improvement projects in other parts of the network. The proposed algorithm can be used in decision making for justifying the railway electrification projects.

Key words: Railway, Electrification, Capacity Bottlenecks, Freight Demand, Assignment