مطالعه امکان‌سنجی برقی‌سازی خط ریلی «تهران – مشهد» بر اساس روش‌های تحلیل مالی و اقتصادی

مقاله علمی – پژوهشی

مهران خلج*، دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد پرند، تهران، ایران
داود جعفری، دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد پرند، تهران، ایران
پژمان صالحی، استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد پرند، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: khalajmehran@yahoo.com

دریافت: ۱٤۰٤/۰۱/۲۲– پذیرش: ۱٤۰٤/۰۵/۰۱
صفحه ۱۳۰-۱۱۱

چکیده

شبکه سراسری راه‌آهن ایران شامل قطارهای باری و مسافری به جز دو قطعه «جلفا – تبریز» و «تبریز - آذرشهر» به مسافتی در حدود ۲۰٤ کیلومتر، با استفاده از لوکوموتیوهای دیزلی کار می‌کند. پیاده‌سازی یک سیستم راه‌آهن برقی دارای مزایای فنی و زیست‌محیطی متعددی است که می‌تواند اقتصاد و محیط‌زیست کشور را متأثر نموده و آثار اجتماعی فراوانی داشته باشد. در پژوهش حاضر به مطالعه امکان‌سنجی برقی‌سازی خط ریلی «تهران – مشهد» بر اساس روش هزینه - فایده پرداخته می‌شود؛ بنابراین محققان به ارائه چارچوبی برای ارزیابی منافع مستقیم و غیرمستقیم این طرح و هزینه‌های مترتب بر آن می‌پردازند. نتایج ارزیابی‌های «هزینه – فایده» در این پژوهش نشان داد که دارای نرخ بازده داخلی تعدیل شده ۱۲ ٪ است که با لحاظ تمامی منابع اختصاص‌یافته دارای مطلوبیت اقتصادی مناسبی است و با نتایج مطالعات مرتبط با برقی‌سازی در سایر تحقیقات مطابقت دارد.

واژه‌های کلیدی: برقی‌سازی، راه‌آهن، روش هزینه–فایده، خط ریلی تهران - مشهد

۱–مقدمه

صنعت حمل‌ونقل نقش با اهمیتی در ساختار اقتصادی و اجتماعی کشورها ایفا می‌نماید (فراگیاکومو و پیراینو، ۲۰۲۲). سیستم‌های حمل‌ونقل در یک کشور لازم است باتوجه‌به کمبود منابع مالی در اقتصاد آن مملکت، به ارائه خدمات کارآمد و قابل‌اطمینان با کمترین هزینه ممکن بپردازند (فراگیاکومو و پیراینو، ۲۰۲۲). از این رو در نظام اقتصادی یک کشور باید این اطمینان حاصل گردد که فعالیت‌های متنوع تولیدی و خدماتی به دلیل ضعف ساختاری در نظام حمل‌ونقل دچار خدشه نمی‌شود (عبدالرحمن و همکاران، ۲۰۱۹). صنعت حمل‌ونقل ریلی رکن مهم حمل‌ونقل ملی در یک کشور است. نگاهی به ساختار و تشکیلات اقتصادهای توسعه‌یافته نشان می‌دهد که حمل‌ونقل کالاهای اساسی در یک کشور بر اساس وجود یک شبکه ریلی کارآمد صورت می‌گیرد. راه‌آهن‌ها همچنین در حمل‌ونقل مسافران نیز دارای نقش‌برجسته‌ای بوده و می‌توانند

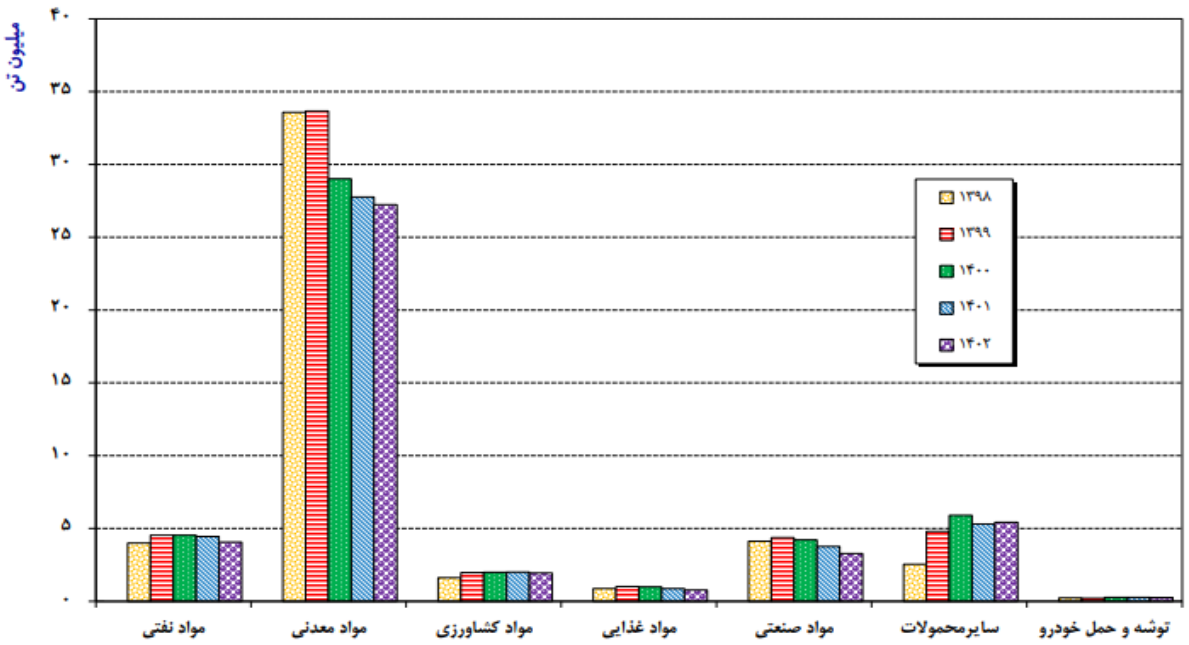
در حجم انبوه شهروندان را در سطوح شهری و بین‌شهری جابه‌جایی نمایند. در میان راه‌آهن‌های جهان، هند و چین در زمره شبکه‌های ریلی بزرگ در سرتاسر جهان بوده و با داشتن سهم ۵۰ درصدی از مجموع ترافیک بار و مسافر بیش از مجموع ترافیک‌های ریلی اروپا و آمریکای شمالی فرایند حمل‌ونقل کشور خود را پوشش می‌دهند (جعفر و همکاران، ۲۰۱۲). همچنین بسیاری از کلان‌شهرهای بزرگ و درحال‌توسعه نظیربوئنوس آیرس، بمبئی و مانند آن نیز برای حمل‌ونقل شهری و بین‌شهری به شبکه ریلی وابسته هستند (جعفر و همکاران، ۲۰۱۲). راه‌آهن‌ها در ایجاد مزیت رقابتی برای صنایع یک کشور دارای نقش حیاتی هستند. امروزه دنیای تجارت به‌گونه‌ای فزاینده متأثر از هزینه‌هایی است که از لجستیک ناشی می‌شود. لجستیک تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای سرعت حمل‌ونقل کالا، قابلیت اطمینان آن، انعطاف‌پذیری جابه‌جایی و تبادل اطلاعات به هنگام میان اجزای زنجیره ارزش دارد (آباد و همکاران، ۲۰۱۹)؛ بنابراین در فضای نامطمئن و مبهم کنونی، کشورهایی که از شبکه‌های ریلی قدرتمندی برخوردار نباشند، مزیت رقابتی را از منظر لجستیکی به کشورهایی با راه‌آهن تواناتر و باکیفیت‌تر واگذار می‌کنند (آربولیا و همکاران، ۲۰۱۹).

از طرفی سرمایه‌گذاری در پروژه‌های ریلی می‌تواند دستیابی به اهداف زیست‌محیطی را نیز امکان‌پذیر نموده و تأثیرات قابل‌ملاحظه‌ای بر کیفیت آب‌وهوا، خاک و سایر مؤلفه‌های اکولوژیک بر جای نهاده و توسعه اقتصادی را از طریق دسترس‌پذیری صنایع مختلف تسهیل نماید (دلا فوئنته و همکاران، ۲۰۱۹).

علاوه بر مزایای ذکر شده پیاده‌سازی شبکه ریلی می‌تواند جریان‌های انبوه جابه‌جایی بار و مسافر را به‌گونه‌ای کارآمد و با کمترین آلودگی دیداری، شنیداری و اقلیمی میسر و مدیریت نماید. جدول شماره (۱) میزان خطوط ریلی برقی‌سازی شده و مقدار اثر آن بر ترافیک شبکه ریلی را در کشورهای عضو اتحادیه اروپا و ژاپن نشان می‌دهد. جدول شماره (۱) میزان خطوط ریلی برقی‌سازی شده و مقدار اثر آن بر ترافیک شبکه ریلی را در کشورهای عضو اتحادیه اروپا و ژاپن (بر حسب درصد)

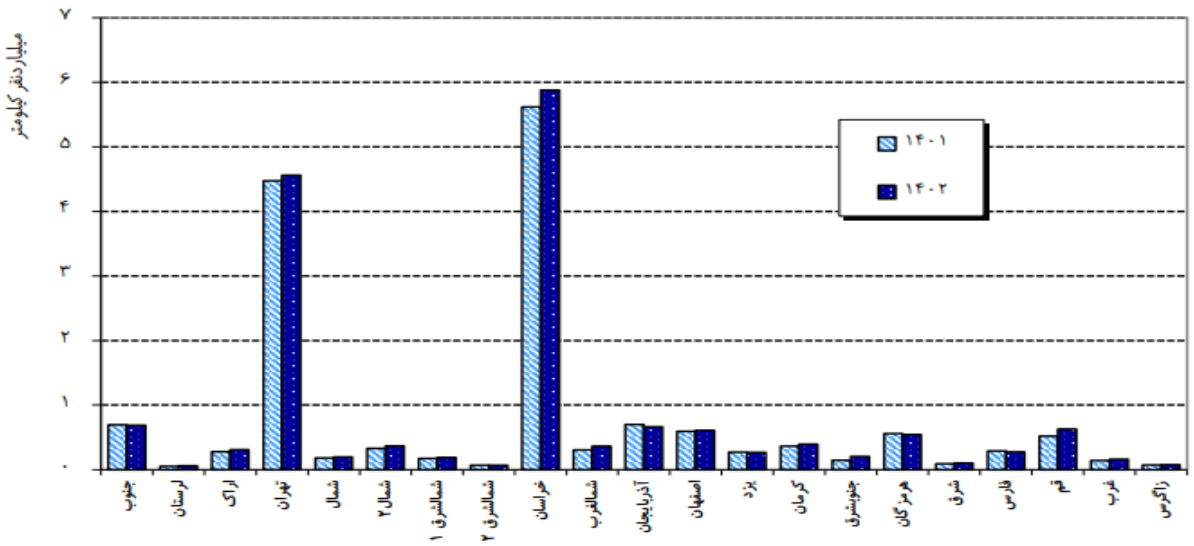
شبکه راه‌آهن سراسری ایران حدود ۱۵۰۰۰ کیلومتر طول دارد و نقش با اهمیتی در جابه‌جایی بار و مسافر در ایران ایفا می‌نماید. یکی از وجوه اهمیت راه‌آهن ایران (رجا) در آن است که از نخستین راه‌آهن‌هایی است که در جهان احداث شده است. راه‌آهن سراسری ایران (رجا) یک سازمان دولتی است که در ذیل نظارت وزارت راه و شهرسازی در هیئت یک معاونت مسئولیت مدیریت، بهره‌برداری، نگهداری و تعمیرات، ارتقای شبکه راه‌آهن و ارائه خدمات به شهروندان را بر عهده دارد. با این وجود نقش راه‌آهن در حمل‌ونقل مسافری (تنها حدود ۱۷ درصد) و سهم آن در جابه‌جایی بار حدود ۸ درصد بوده است. تناژبار بارگیری شده طی سال‌های ۱۳۹۸ الی ۱٤۰۲ در تصویرشماره یک نشان‌داده‌شده است.

نام کشور	بریتانیا	فرانسه	آلمان	ژاپن	ایتالیا	هلند	سوئد	سوئیس
مسیر ریلی برقی شده (درصد)	۳۰	۳۹	٤۵	۵۸	٦۰	۷۰	٦۰	۱۰۰
تأثیر ترافیکی (بر حسب درصد)	۵۵	۸۸	۹۰	۹۳	۹۳	۹۰	۹۵	۱۰۰



تصویر ۱. تناژبار بارگیری شده طی سال های ۱۳۹۸ الی ۱٤۰۲ (منبع: سالنامه جامع راه‌آهن ایران، ۱٤۰۳)

تصویر شماره ۲ نفر کیلومتر جابه‌جایی مسافر را برای مناطق مختلف راه‌آهن سراسری ایران در سال‌های ۱٤۰۲ تا ۱٤۰۳ نشان می‌دهد.



تصویر ۲. نفر کیلومتر جابه‌جایی مسافر را برای مناطق مختلف راه‌آهن سراسری ایران (منبع: سالنامه جامع راه‌آهن ایران، ۱٤۰۳)

با اعمال تحریم‌های سخت‌گیرانه به‌خصوص از سال ۱۳۹۷ راه‌آهن ایران با کمبود منابع مالی روبرو بوده است و از این رو نسبت کارایی برای هزینه‌ها به عنوان حاصل تقسیم درآمد بر هزینه کاهش یافته است (نوری، ۱٤۰۱). هر چند با وضع قوانین حمایتی این کسری تدریجاً بهبودیافته اما استهلاک ناوگان ریلی و سایر تسهیلات ثابت و متحرک، همچنان یک چالش مهم فراروی شبکه ریلی ایران است که سبب شده بازده هزینه‌ها همچنان با حالت ایده آل فاصله داشته باشد (کاظمی و رضائی،

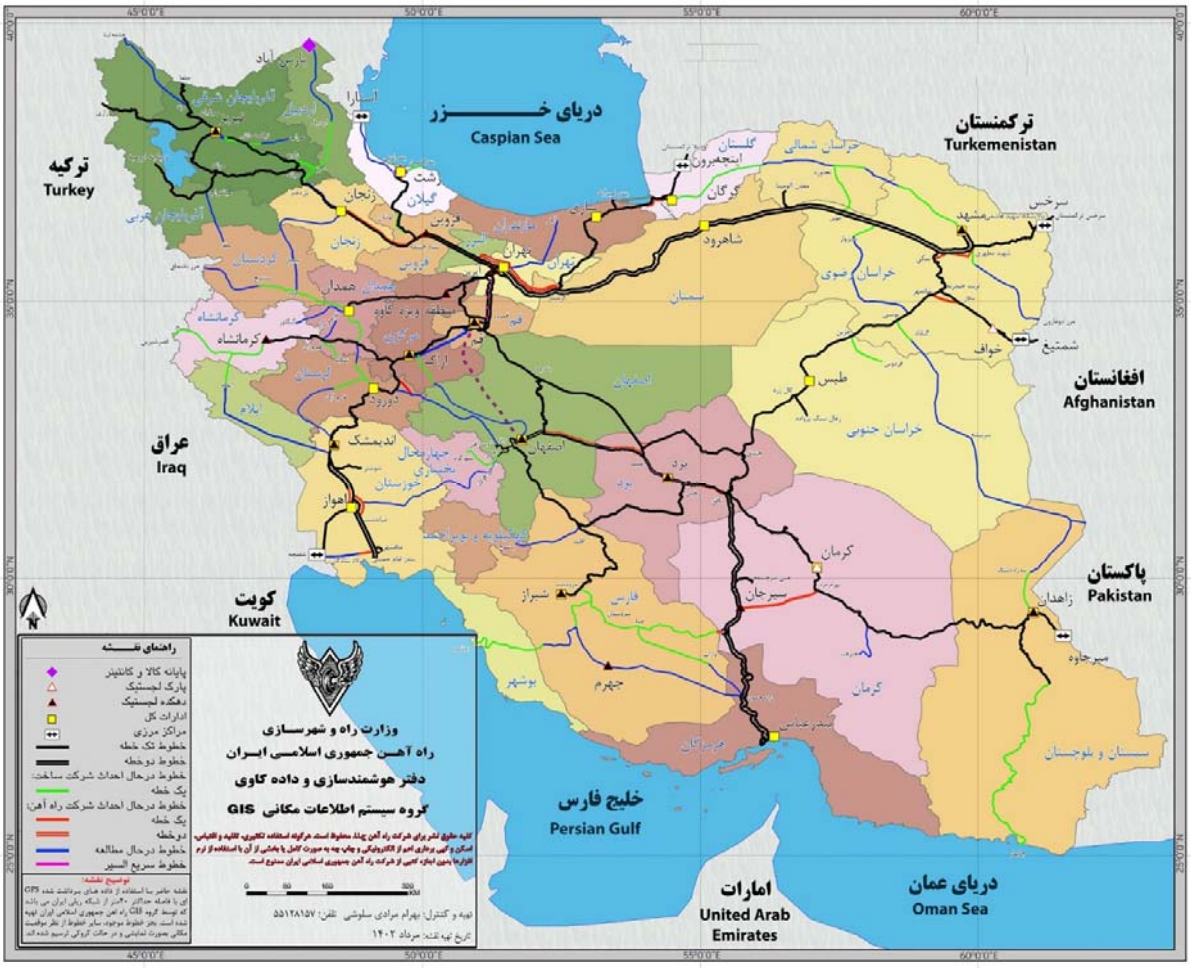
۱۳۸۵). بسیاری از قطارها اعم از باری و مسافری در راه‌آهن ایران با لوکوموتیوهای دیزلی کار می‌کنند. این امر به استثنای خطوط «تبریز – مراغه» و «تبریز – جلفا» با طول حدود ۲۰٤ کیلومتر است. یک شبکه ریلی برقی‌سازی شده دارای مزایای عملیاتی و زیست‌محیطی متعددی است.

از منظر فنی تراکشن موتورهای برقی دارای سرعت و شتاب بالا، توان و قدرت بیشتر و نویز صوتی به‌مراتب کمتر در مقایسه با تراکشن موتورهای دیزلی هستند (هایاشیا و همکاران، ۲۰۲۰). در مجموع بهره مندی از مزایای برقی‌سازی، امکانی را برای شبکه ریلی فراهم می آورد که سطح مطلوبتری از خدمات را به مشتریان ارائه داده و رقابت پذیری راه‌آهن را در مقایسه با سایر شیوه‌های حمل‌ونقل ارتقا بخشد.

نگاهی به مدل‌های حمل‌ونقل ریلی کشورهای توسعه‌یافته نشان می‌دهد که موفقترین بهره‌برداران ریلی جهان در راه‌آهن پرسرعت و بین‌شهری خود، برقی‌سازی شبکه ریلی را پیاده‌سازی نموده‌اند. نگاهی به جدول شماره (۱) نشان می‌دهد که بهبود ترافیک در کشورهایی که برقی‌سازی مسیر ریلی را پیاده‌سازی نموده‌اند تا حدود زیادی ارتقا یافته و بنابراین بکارگیری لوکوموتیوهای برقی در راه‌آهن تا حدود زیادی به روان سازی تراکم و کاهش از تراکم آن کمک می‌کند. برقی‌سازی شبکه ریلی مستلزم احداث تأسیسات تأمین برق شبکه و استقرار تجهیزات انتقال برق است. همچنین به طور متناسب لازم است خطوط مخابراتی کنار مسیر ریلی اصلاح شده و برخی ساختمان های مرتبط نیز بازسازی شوند. از این رو هزینه‌های سرمایه‌گذاری در برقی‌سازی راه‌آهن بسیار نسبتاً بالاست (آئوکی و همکاران، ۲۰۱۸). از این رو برای برقی‌سازی مسیرهای ریلی لازم است توجیه اقتصادی برای هزینه‌های اولیه با توجه ترافیک مسیر و حجم تقاضای بار و مسافر مد نظر سیاست‌گذاران و بهره‌برداران شبکه ریلی قرار گیرد.

در بسیاری از کشورها، وجود یک سطح حداقلی از ترافیک و تقاضا برای آغاز مطالعات امکان‌سنجی برای برقی‌سازی شبکه ریلی الزامی است. در راه‌آهن سراسری ژاپن حداقل سطح مورد انتظار برای نقطه سر به سر اقتصادی و بازدهی، ٤۰ رام قطار در روز تعیین شده است (راتنیومچای و همکاران، ۲۰۱٦). نتایج مطالعات صورت گرفته توسط بانک جهانی، وجود حداقل سطح تقاضا و ترافیک را برای مراحل پیش از ارزیابی طرح ضروری دانسته است (همان منبع، ۲۰۱٦). در کشورهای عضو اتحادیه اروپا ارائه طرح‌های برقی‌سازی شبکه ریلی مستلزم وجود پیوست‌های ارزیابی مالی و اقتصادی در پروپوزال مربوطه بوده و تبیین مستندات کافی در خصوص مزایای مستقیم و غیرمستقیم برای توجیه سرمایه گذاران ضرورت دارد (پاستو و همکاران، ۲۰۱٦). خط ریلی «تهران – مشهد» یکی از پر تردد‌ترین خطوط ریلی ایران است که به‌صورت دو خطه احداث شده و دارای طولی نزدیک به ۱۰۰۰ کیلومتر می باشد. این مسیر ریلی از ایستگاه تهران شروع شده و پس از عبور از ایستگاه های گرمسار، سمنان، دامغان، شاهرود و نیشابور در نهایت به ایستگاه قطار مشهد می‌رسد.

حداکثر سرعت سیر قطارها در مسیر «تهران – مشهد» باتوجه‌به زیرساخت‌های ریلی فعلی به ۱٦۰ کیلومتر بر ساعت می‌رسد که در صورت برقی شدن این مسیر ریلی، حداکثر سرعت قطار می‌تواند تا حدود ۲۰۰ کیلومتر بر ساعت افزایش یابد. از طرفی بر اساس برآوردهای صورت گرفته خط‌آهن «تهران – مشهد» تا سال ۱٤۱۰ لازم است امکان حمل حدود ۳۰ میلیون مسافر و حمل ۱۰ میلیون تُن بار را فراهم نماید. تصویر شماره (۳) شبکه راه‌آهن سراسری ایران را برای برقی‌سازی نشان می‌دهد.



تصویر ۳. شبکه راه‌آهن سراسری ایران (منبع: راه‌آهن ایران، ۱۴۰۳)

در پژوهش حاضر به مطالعه امکان‌سنجی اقتصادی برقی‌سازی خط‌آهن «تهران – مشهد» پرداخته می‌شود و تلاش می‌شود تا چارچوبی جامع برای ارزیابی توسعه این خط به‌منظور شناسایی منابع مستقیم و غیرمستقیم موردنیاز ارائه و مزایای این طرح در طول چرخه حیات پروژه تبیین گردد.

تحلیل‌های اقتصادی و مالی برقی‌سازی خط ریلی «تهران – مشهد»

باتوجه‌به اهمیت سرمایه‌گذاری و تکنیک‌های ارزیابی آن در حوزه حمل‌ونقل دو شیوه تحلیل مالی و تحلیل اقتصادی می‌تواند از طریق تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره مورد بررسی قرار گیرد. تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌تواند علاوه بر توصیف وضعیت‌های مالی و اقتصادی، تفاوت‌های آنها در ارزیابی طرح‌های سرمایه‌گذاری از منظر مفهومی و کاربردی پوشش دهد (توفیق و همکاران، ۲۰۱۰).

تحلیل‌های مالی برقی‌سازی خط ریلی «تهران – مشهد»

تحلیل مالی شیوه‌ای است که با استفاده از آن می‌توان اثرات سرمایه‌گذاری بر روی یک صنعت خاص یا شرکت را اندازه‌گیری نمود. یکی از مؤلفه‌های اصلی تحلیل‌های مالی آن است که می‌تواند تأثیرات مستقیم پروژه بر فرایند کارآفرینی بهره‌برداران را به‌صورت جریان‌های نقدی مطالعه و لحاظ نماید. در مطالعه حاضر تأثیرات مستقیم یا غیرمستقیم اجرای طرح برقی‌سازی بر سایر ذی‌نفعان راه‌آهن در نظر گرفته نشده و بر قیمت‌های واقعی بازار در روند تحلیل و ارزیابی طرح تأکید و نرخ بازگشت سرمایه باتوجه‌به شرایط رقابتی و غیررقابتی بازار برآورد می‌شود. از این رو یکی از مفروضات این تحقیق

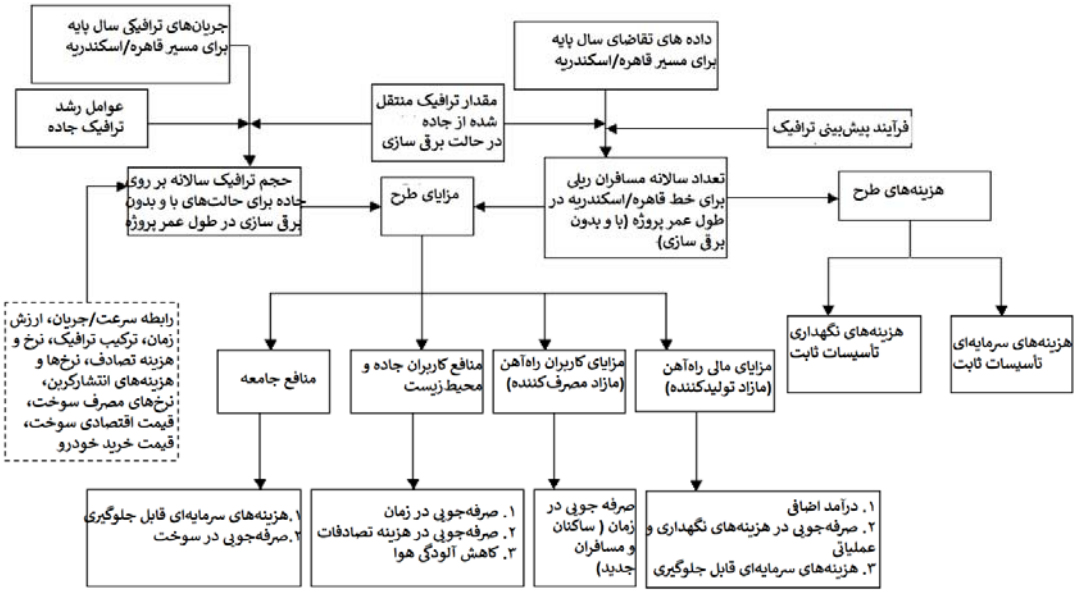
بی‌اهمیت‌بودن تأثیر پروژه بر سایر اعضای جامعه نظیر مصرف‌کنندگان نهایی و قیمت سایه‌ای در روش تحلیل مالی است. بسیاری از پروژه‌های سرمایه‌گذاری مانند برقی‌سازی شبکه ریلی، دارای آثاری فراتر از بهره‌بردار ریلی بوده و می‌توانند کاربران و اجتماع را از منافعی نظیر بهبود کیفیت خدمات و کاهش حجم ترافیک و تصادفات بهره‌مند سازند که این امر در چارچوب تحلیل‌های مالی گنجانده نمی‌شوند (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۹).

تحلیل‌های اقتصادی برقی‌سازی خط ریلی «تهران –مشهد»

روش «هزینه – فایده» یکی متداول‌ترین تکنیک‌های پیاده‌سازی ارزیابی‌های اقتصادی پروژه‌های سرمایه‌گذاری در صنعت حمل‌ونقل است و لذا به‌عنوان یک روش خاص برای ارزیابی مطلوبیت پروژه‌ها در بلندمدت (از منظر آثار و تبعات در آینده) و راهبردی (از منظر تأثیر بر افراد و صنایع) شناخته می‌شوند (پیرگیدیس و همکاران، ۲۰۱۹)؛ بنابراین در این شیوه به ارزیابی تمام هزینه‌ها و منافع مرتبط با طرح پرداخته می‌شود؛ بنابراین یکی از کارکردهای مهم روش‌های تحلیل «هزینه – فایده» آزمون صحت عملکرد طرح‌های پیشنهادی است. در این شیوه به برآورد ارزش کلی منابعی پرداخته می‌شود که لازم است در طرح به کار گرفته شده و هزینه‌های کالاها یا خدماتی که باید تولید شوند با منافع ناشی از آن مقایسه می‌شود. در مقایسه با ارزیابی‌های مالی، روش «هزینه – فایده» تأثیرات کلی یک سرمایه‌گذاری را به‌طورکلی بر جامعه اندازه‌گیری می‌کند (فری، ۲۰۱۵)؛ بنابراین روش «هزینه – فایده» یک تکنیک جامع به شمار می‌آید که می‌تواند تأثیرات واقعی و نیز مورد انتظار از یک طرح سرمایه‌گذاری در حمل‌ونقل را بر جامعه بررسی و تحلیل نماید (هررا و همکاران، ۲۰۱۹). این تأثیرات می‌توانند مستقیم (نظیر کسب درآمد یا سود برای بهره‌بردار ریلی) و یا غیرمستقیم (نظیر ارتقای کیفیت خدمات به مشتریان، کاهش زمان‌های تأخیر ناشی از ترافیک جاده‌ای، هزینه‌های ناشی از تصادفات جاده‌ای، آلودگی‌های زیست‌محیطی و نظایر آن...) بوده و ملموس (قابل‌اندازه‌گیری) و ناملموس (غیرقابل‌اندازه‌گیری) باشد.

چارچوب کلی ارزیابی‌های برقی‌سازی خط ریلی «تهران – مشهد»

ازآنجاکه خط ریلی «تهران – مشهد» در حال حاضر با استفاده از لوکوموتیوهای دیزلی اداره می‌شود، روشی که در این تحقیق ارائه شده بر مبنای ارزیابی طرح توسعه این خط برای حالات برقی‌سازی شده و ادامه بهره‌برداری با لوکوموتیو دیزلی ارائه شده است. تصویر شماره (٤) چارچوب ارزیابی‌های توسعه ی خط ریلی «تهران – مشهد» و برآورد انواع مختلف هزینه‌ها و منافع آن را برای اجرای طرح برقی‌سازی نشان می‌دهد.



تصویر ٤. چارچوب ارزیابی‌های توسعه ی خط ریلی «تهران –مشهد» و برآورد انواع مختلف هزینه‌ها و منافع آن

تبیین الگوریتم فایده

چارچوب کلی ارزیابی‌های طرح برقی‌سازی خط ریلی «تهران – مشهد» در تحقیق حاضر دارای ٤ منبع بالقوه کسب فایده است که در فرایندهای ارزیابی لازم گنجانده شود. این منابع فایده عبارتند از:

-منافع اقتصادی و مالی برای راه‌آهن ایران (مازاد خدمات ارائه شده توسط رجا)

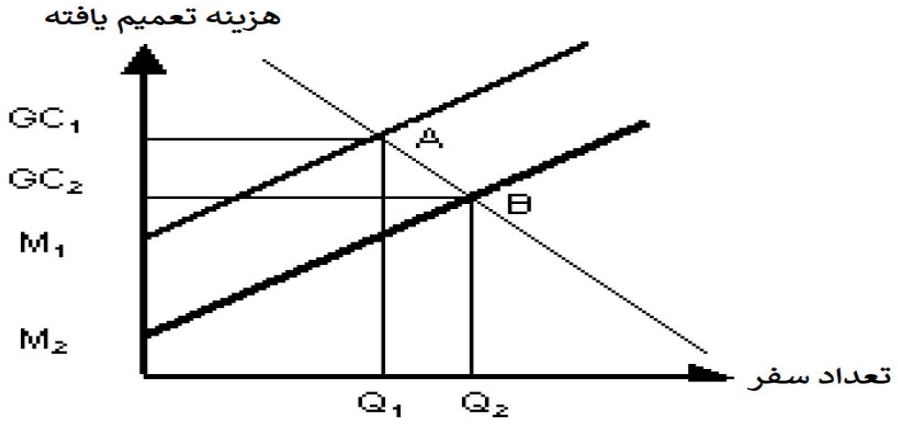
-منافع مصرف‌کنندگان نهایی خدمات راه‌آهن (مازاد مصرف مسافران)

-منافع زیست‌محیطی و سایر بازیگران شیوه‌ی جاده‌ای

-منافع اجتماعی

آنچه در فوق ذکر گردید با استفاده از تصاویر شماره (۵) و (٦) از طریق لحاظ کردن این مزایا در الگوریتم فایده نشان‌داده‌شده است. منافع مالی راه‌آهن شامل سود خالصی است که گاه از آن با عنوان مازاد ارائه خدمات توسط شبکه ریلی یاد شده و از طریق برقی‌سازی عاید راه‌آهن می‌گردد در تصویر شماره (۵) نشان‌داده‌شده است.

چنانکه در این تصویر دیده می‌شود هنگامی که در سرمایه‌گذاری‌های ریلی منحنی هزینه نهایی به سمت پایین تغییر می‌کند ناحیه GC_2BM_2-GC_1AM_1 نشان‌دهنده سود بهره‌بردار راه‌آهن و ارتقای کیفیت خدمات ریلی در برقی‌سازی خط «تهران – مشهد» خواهد بود.

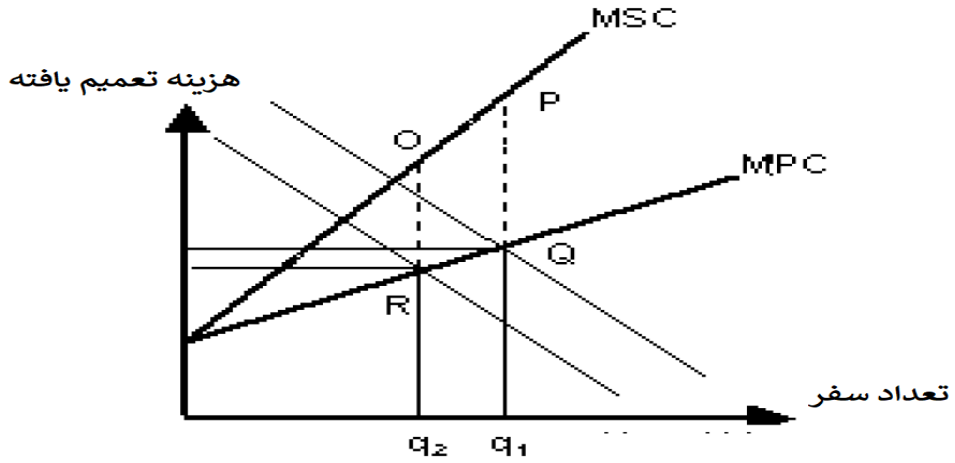


تصویر ۵. سود بهره‌بردار راه‌آهن و ارتقای کیفیت خدمات ریلی در برقی‌سازی خط «تهران –مشهد»

رابطه شماره (۱) مدل ریاضی سود به دست آمده از برقی‌سازی خط ریلی «تهران – مشهد» را نشان می‌دهد.

$$\boldsymbol{rfb = (tr_{with} - toc_{with}) - (tr_{without} - toc_{without})} \qquad (۱)$$

در رابطه فوق $\boldsymbol{rfb}$ سود خالص حاصل از برقی سازی خط ریلی«تهران – مشهد» در چرخه عمر مفید پروژه برای راه‌آهن ایران است. $\boldsymbol{tr_{with}}$ نیز کل درآمد راه آهن ایران را از طریق استقرار طرح برقی‌سازی نشان می‌دهد و $\boldsymbol{tr_{without}}$ کل درآمد را در شرایط استفاده از لوکوموتیوهای دیزلی در این خط را نشان می‌دهد. همچنین در این رابطه $\boldsymbol{toc_{with}}$ مجموع هزینه‌های نگهداری و تعمیرات در حالت برقی‌سازی خط ریلی «تهران – مشهد» و $\boldsymbol{toc_{without}}$ مجموع هزینه‌های نگهداری و تعمیرات در شرایط استفاده از لوکوموتیوهای دیزلی را در این خط نشان می‌دهد. در تصویر شماره (٦)، GC_1 و GC_2 به‌ترتیب هزینه‌های تعمیم یافته سفرهای ریلی از طریق برقی‌سازی خط «تهران – مشهد» و نیز حالت استفاده از لوکوموتیوهای دیزلی در این خط را نشان می‌دهد. همچنین در این تصویر Q_1 و Q_2 به ترتیب تعداد سفرهای مسافری در صورت برقی‌سازی خط و حالت استفاده از لوکوموتیوهای دیزلی در این خط را نشان می‌دهد. در این تصویرGC_1ABGC_2 نشان دهنده مازاد خدمات مشتریان نهایی است که عاید مسافران راه‌آهن ایران (مسافران موجود و مسافران جدید) می‌گردد.



تصویر ٦. عواید حاصل از بهبود کیفیت خدمات ریلی برای مسافران فعلی و جدید راه‌آهن ایران

رابطه شماره (۲) مدل ریاضی منافع مسافران راه‌آهن ایران از استقرار طرح برقی‌سازی شبکه ریلی خط «تهران – مشهد» را نشان می‌دهد.

(۲)

$$rub = \frac{1}{2}(gc_{without} - gc_{with})(q_{without} + q_{with})$$

در رابطه فوق rub مجموع منافعی است که مسافران راه‌آهن ایران در طول چرخه عمر پروژه برقی‌سازی به دست می آورند. در این رابطه همچنین $q_{without}$ و q_{with} ناظر بر تعداد سفرهای ریلی در حالت استفاده از لوکوموتیوهای دیزلی و حالت برقی‌سازی در خط ریلی «تهران – مشهد» است و $gc_{without}$ و gc_{with}به ترتیب هزینه‌های مسافری مترتب بر سفرهای ریلی در خط «تهران – مشهد» در حالت استفاده از لوکوموتیوهای دیزلی و استقرار طرح برقی‌سازی است.

منافع زیست‌محیطی و ذی‌نفعان جاده‌ای

در حالت کلی هزینه‌های جانبی حمل‌ونقل (نظیر زیان‌های زیست‌محیطی، هزینه‌های ناشی از تصادفات و تأخیر حجم بالای ترافیکی) در جاده به طور قابل‌توجهی از بخش ریلی بیشتر است (پاستنا، ۲۰۱۷). در یک مطالعه که توسط هرناندز و سوتیل (۲۰۲۲) در خصوص آثار جانبی حمل‌ونقل انجام شده است، محققان در نتایج پژوهش خود ذکر کرده‌اند که هزینه‌های جانبی حمل‌ونقل در ۱۷ کشور عضو اتحادیه اروپا بالغ بر ۲۷۲ میلیارد یورو بوده که به طور متوسط ٤/٦ درصد از تولید ناخالص داخلی این کشورها را در برمی‌گیرد و حدود ۹۲ درصد آن مربوط به بخش جاده‌ای و حدود ۲ درصد آن مربوط به بخش ریلی است که این خود مدعای هزینه به‌مراتب کمتر بخش ریل در مقایسه با حمل‌ونقل جاده‌ای است (هرناندز و سوتیل، ۲۰۲۲). در این مورد خاص منافع ذی‌نفعان حمل‌ونقل جاده‌ای و مزایای زیست‌محیطی ناظر بر آن دسته از فایده‌های بالقوه‌ای است که برای عموم شهروندان از جمله افرادی که از سفرهای ریلی استفاده نمی‌کنند، به وجود آمده و سبب می‌شود در اثر مزایای ناشی از برقی‌سازی شبکه ریلی، جذب راه‌آهن می‌شود. به دیگر بیان هزینه‌های جانبی حمل‌ونقل جاده‌ای به آن دسته از هزینه‌هایی اطلاق می‌گردد که در اثر حالت مرسوم و بدون استقرار طرح برقی‌سازی شبکه ریلی به جامعه تحمیل می‌شود و از آن جمله می‌توان به ترافیک بزرگراه‌ها، تصادفات جاده‌ای و آلودگی‌های زیست‌محیطی اشاره نمود. همان‌گونه که در تصویر شماره (٦) مشاهده می‌شود هزینه نهایی فردی سفر مسافران (MPC) در شیوه‌های حمل‌ونقل جاده‌ای کمتر از هزینه نهایی اجتماعی سفر (MSC) است که بر اساس این واقعیت توجیه می‌گردد که هزینه‌های جانبی وسایل نقلیه جاده‌ای در اثر تأخیرهای ترافیکی، هزینه‌های آلودگی صوتی، آب‌وهوا و تصادفات ایجاد می‌گردد. با استقرار پروژه برقی‌سازی راه‌آهن و انتقال سفرها از جاده به ریل مزایایی ایجاد می‌گردد که از طریق صرفه‌جویی در هزینه‌های حمل‌ونقل جاده‌ای وارد بخش ریلی می‌شود (برنا و همکاران، ۲۰۲۱). این مزایا را می‌توان در قالب مدل ریاضی ۳ نمایش داد.

$$rueb = \frac{1}{2}(q_1 - q_2)(rec_{with} + rec_{without}) \quad (۳)$$

در رابطه شماره (۳)، $rueb$ ناظر بر منافع زیست‌محیطی و سایر منافعی است که بازیگران حمل‌ونقل جاده‌ای از منظر صرفه‌جویی در هزینه‌های ناشی از تأخیرهای زمانی، پیشگیری از تصادفات و آلودگی‌های صوتی، بصری و اقلیمی به دست می‌آورند که در صورت عدم اجرای برقی‌سازی، هزینه‌های مزبور عیناً به ذی‌نفعان حمل‌ونقل جاده‌ای و سایر بازیگران اجتماعی تحمیل می‌گردد. rec_{with} و $rec_{without}$ نشان دهنده اختلاف میان هزینه‌های نهایی اجتماعی سفر شهروندان و هزینه‌های نهایی شخصی سفر آنها با وسایل حمل‌ونقل جاده‌ای است که منعکس کننده هزینه‌های جانبی سفر است که بازیگران سفرهای جاده‌ای به محیط داخلی و خارجی جاده و سایر ذی‌نفعان جامعه برای حالت های استفاده از لکوموتیو در مسیر ریلی و برقی‌سازی کردن مسیر ریلی «تهران – مشهد» تحمیل می‌گردد.

منافع اجتماعی

انواع دیگری از مزایای اجتماعی و اقتصادی که از تغییر الگوی حمل‌ونقل به دست می‌آید و به برقی‌سازی خط ریلی «تهران – مشهد» نسبت داده شده و لازم است در الگوریتم‌های ارزیابی اقتصادی لحاظ گردد به شرح زیر فهرست می‌شود:

- کاهش هزینه‌های سرمایه‌ای و نیز سایر هزینه‌های مرتبط با مالکیت وسایل نقلیه جاده‌ای؛
- کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات ناشی از تغییر الگوی سفر از حمل‌ونقل جاده‌ای به حمل‌ونقل ریلی؛
- صرفه‌جویی در مصرف سوخت‌های فسیلی از طریق تغییر الگوی سفر از حمل‌ونقل جاده‌ای به شیوه ریلی؛

برآورد منافع جریان‌های ترافیکی

برآورد منافع جریان‌های ترافیکی برای حمل با و مسافر می‌تواند مؤلفه با اهمیتی در برنامه‌ریزی حمل‌ونقل محسوب گردد. این امر ناظر بر نقش‌برجسته‌ی حجم و ازدحام ترافیک در ارزیابی طرح‌های سرمایه‌گذاری و سیاستی در سامانه‌های حمل‌ونقلی مانند صنعت حمل‌ونقل ریلی است (کایاشیا، ۲۰۲۲).

برآورد تقاضای مسافری در راه‌آهن

به‌منظور پیش‌بینی انواع مختلف منافع و مزایای طرح برقی‌سازی خط ریلی «تهران – مشهد» نظیر صرفه‌جویی در هزینه‌های سرمایه‌گذاری، نگهداری و تعمیرات و افزایش تقاضای مسافری، لازم است از شیوه‌های معمول آنالیز مسافری استفاده شود. بر اساس یک مطالعه برای به‌دست‌آوردن آمار مسافری برای دوره‌های زمانی ۲۰۱٤ تا ۲۰۲٤ با استفاده از تحلیل رگرسیون؛ در صورت برقی‌سازی خط ریلی «تهران – مشهد» تا حدود ۱۲ درصد تقاضای مسافری این مسیر ریلی افزایش خواهد یافت. همچنین پیش‌بینی می‌شود با برقی‌سازی این خط، کیفیت خدمات ارائه شده توسط راه‌آهن بهبود می‌یابد (وانگ و همکاران، ۲۰۱۹). از سوی دیگر لازم است هم‌زمان برآوردهای مرتبط با ارتقا و بهبود فن آوری‌ها برای بخش‌های حمل‌ونقل جاده‌ای و ریلی در نظر گرفته شود (همان منبع، ۲۰۱۹).

برآورد ترافیک در حمل‌ونقل جاده‌ای مسیر «تهران – مشهد»

به‌منظور پیش‌بینی مزایای مرتبط با تغییر الگوی حمل‌ونقل از جاده به ریل (منافع اقتصادی ذی‌نفعان، مزایای زیست‌محیطی و برخورداری‌های اجتماعی) لازم است جریان‌های ترافیکی مسیر جاده‌ای «تهران – مشهد» به آلترناتیو اصلی لحاظ گردد. میزان تقاضا در سال پایه از طریق مطالعات حمل‌ونقل کشور به دست می‌آید. رشد سالانه تقاضا برای این خط برای حالتی که از لوکوموتیوهای دیزلی در این مسیر استفاده می‌شود باتوجه‌به برآوردهای ترافیکی حدود ۱ درصد است. بزرگی این مقدار بر اساس روندهای کلی رشد ترافیک در حمل‌ونقل جاده‌ای «تهران – مشهد» به‌دست‌آمده است.

ارزیابی هزینه – منفعت

فرایند تحلیل «هزینه – فایده» برای یک طرح راه‌سازی شامل مجموعه‌ای از مراحل است. به طور معمول طرح‌های سرمایه‌گذاری در حوزه حمل‌ونقل بر اساس دوره‌های زمانی ۲۵ تا ۳۰ ساله مور ارزیابی قرار می‌گیرند (سنگور و همکاران، ۲۰۲۰). برای طرح برقی‌سازی، دوره ارزیابی ۳۰ساله در نظر گرفته شده است که شامل مدت ٤ سال برای ساخت و ۲٦ سال برای بهره‌برداری از این خط ریلی است. انتخاب این دوره زمانی متناسب با متوسط عمر مفید تجهیزات ثابت و متحرک ریلی بوده و با تجارب سایر کشورها و یافته‌های مطالعات مشابه مطابقت دارد (وُن و همکاران، ۲۰۲۰).

هزینه‌های سرمایه‌گذاری و نگهداری و تعمیرات

هزینه‌های برقی‌سازی خط ریلی «تهران – مشهد» شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای استقرار تجهیزات ثابت و متحرک و نیز هزینه‌های مرتبط با نگهداری آن است. هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای تجهیزات ثابت در حدود ۷۰۰ میلیون دلار برآورد شده است که می‌تواند در طول بازه زمانی ٤ساله هزینه گردد. جدول شماره (۲) جزئیات مرتبط با این هزینه‌ها را نشان می‌دهد. این اطلاعات از منابع اطلاعاتی متعدد و به طور خاص داده‌های خط برقی «تهران – کرج» حاصل شده است.

ناوگان موردنیاز برای پیاده‌سازی طرح برقی‌سازی «تهران – مشهد»

ناوگان موردنیاز برای استقرار این طرح شامل لوکوموتیوهای برقی و واگن‌ها است. تعداد لوکوموتیوهای مورد نیاز برای برقی‌سازی خط ریلی «تهران – مشهد» بر اساس تخمین تعداد کل مسافران، ظرفیت قطارها و متوسط مسافتی است که لوکوموتیوها می‌توانند در طول یک روز کاری طی کنند؛ به دست می‌آید (کیم و همکاران، ۲۰۱۸). در این حالت متوسط مقدار سرویس روزانه هر قطار ۱٦ ساعت در طول یک روز کاری خواهد بود. اجرای پروژه برقی‌سازی خط ریلی «تهران – مشهد» سبب بهبود در سرعت سیر و حرکت قطارها و کاهش سرفاصله زمانی از طریق اعزام تعداد بیشتری قطار می‌گردد. براین‌اساس به ٤۰ لکوالکتریک نیاز است که هزینه آن در حدود ۳۰۰ میلیون دلار خواهد بود. همچنین تعداد واگن‌های موردنیاز برای جذب ۱۲٪ مسافر اضافی در این خط بر اساس تعداد سفرهای روزانه، ظرفیت و کیلومتراژ روزانه هر قطار و مانند آن بستگی دارد که در سال اول بهره‌برداری به تعداد ۱۳۰ واگن می رس که هزینه‌ای بالغ بر ۵۰۰ میلیون دلار دارد. علاوه بر این بر اساس رشد سالانه تقاضا لازم است هر چهار سال، ۱۰ واگن برای تأمین افزایش تقاضای مسافری به ناوگان شبکه ریلی افزوده گردد. هزینه‌های نگهداری و تعمیرات تجهیزات ثابت سالانه بالغ بر ۸ میلیون دلار برآورد شده است بااین‌حال یافته‌ها نشان می‌دهد که هزینه نگهداری و تعمیرات لکوالکتریک ها تقریباً به‌اندازه نصف لوکوموتیوهای دیزلی است (عبدالرحمان و همکاران، ۲۰۲۰). بااین‌حال هزینه‌های نگهداری و تعمیرات قطارهای فوق‌العاده‌ای که به مسیر اعزام می‌شوند و هدف آن برآورده نمودن اضافه تقاضای ناشی از شرایط خاص نظیر مناسبت‌ها در خط ریلی «تهران – مشهد» است، مستلزم درنظرگرفتن قطارهای اضافی است که لازم است هزینه‌های خرید و نگهداری آن نیز در نظر گرفته شود. چنین برآوردی بر اساس هزینه‌های جاری نگهداری و تعمیرات بر حسب کیلومتر و باتوجه‌به روندهای قبلی عملیات به‌دست‌آمده و قابل‌تعمیم به میزان انتظار سالانه بر اساس تقاضای این خط است.

جدول ۲. هزینه‌های سرمایه‌گذاری تجهیزات ثابت برای برقی‌سازی خط ریلی «تهران – مشهد»

نوع تأسیسات	تعداد	هزینه‌های کل تخمینی (میلیون دلار)
ایستگاه‌های زیرزمینی	۷ ایستگاه	۱۲۰
سیستم برق‌رسانی شبکه بالاسری	۱۰۰۰ کیلومتر	۹۰۷
کارگاه‌ها	۹۰۰	-
سامانه‌های سیگنال‌دهی	۲۱۰	-
ریل	۱۰۵۰	-
جمع		۱۰۲۷

مزایای مالی راه‌آهن

مزایای مالی راه‌آهن شامل مازاد درآمد ناشی از برقی‌سازی خط ریلی «تهران – مشهد»، ارزش افزوده لوکوموتیوهای دیزلی و صرفه‌جویی در هزینه‌های عملیاتی و نگهداری و تعمیرات است. مسافرانی که به دلیل برقی‌سازی شدن جذب این خط ریلی می‌شوند از مزایای ناشی از کاهش زمان سفر (تا حدود ۱۵۰ دقیقه) بهره‌مند می‌گردند. این مسافران خود به دودسته مسافران با مقصد ایستگاه مشهد و مسافران محلی که بین راه از قطار پیاده می‌شوند، تقسیم می‌کردند. پس از انجام برقی‌سازی به‌منظور جبران هزینه‌ها، می‌توانند بر افزایش کرایه‌ها از طریق بهبود کیفیت خدمات ارائه شده به مسافران تکیه نمایند و لذا این امر می‌تواند مزایای مالی طرح برقی‌سازی «ترهان – مشهد» را بیشتر کند. برقی‌سازی خط ریلی «تهران – مشهد» همچنین می‌تواند به کاهش هزینه‌های سرمایه‌ای از طریق استفاده مجدد از لوکوموتیوهای دیزلی این خط در سایر خطوط کمک نماید. برقی‌سازی خط ریلی «تهران – مشهد» همچنین منجر به صرفه‌جویی در هزینه‌های عملیاتی می‌گردد. این تفاوت هزینه از اختلاف هزینه‌های عملیاتی قطارهای دیزلی و برقی و صرفه‌جویی‌هایی از قبیل هزینه‌های استفاده روان کارها و روغن‌کاری و نظایر آن ناشی می‌شود. میزان روغن و روانکار مورد استفاده در لکوالتریک‌ها تقریباً نصف مصرف لکوموتیودیزل‌ها است. از سوی دیگر استقرار لکوالکتریک‌ها سبب صرفه‌جویی در مصرف سوخت‌های فسیلی و هزینه‌های نگهداری و تعمیرات لوکوموتیوها می‌گردد.

منافع ذی‌نفعان راه‌آهن

یکی از مهم‌ترین منافع مسافران از برقی‌سازی خط ریلی «تهران – مشهد» صرفه‌جویی در زمان سیر است که از طریق بهبود سرعت بازرگانی و کاهش ۱۵۰ دقیقه در زمان سیر حدفاصل ایستگاه تهران تا ایستگاه مشهد حاصل می‌شود. به‌منظور برآورد این مزایا لازم است مسافران راه‌آهن در این مسیر به دودسته تقسیم گردند نخست مسافران دائمی که از مزایای کاهش زمان سیر بهره‌مند می‌شوند و دوم مسافران جدید که پس از برقی‌سازی از بخش جاده به بخش ریل منتقل می‌شوند. از طرفی ایمنی سفرهای ریلی در مقایسه با جاده به‌مراتب بیشتر است و این خود شهروندان را به استفاده از مترو ترغیب می‌کند (کلوسپیس و همکاران، ۲۰۲۰).

مزایای زیست‌محیطی و منافع ذی‌نفعان جاده‌ای

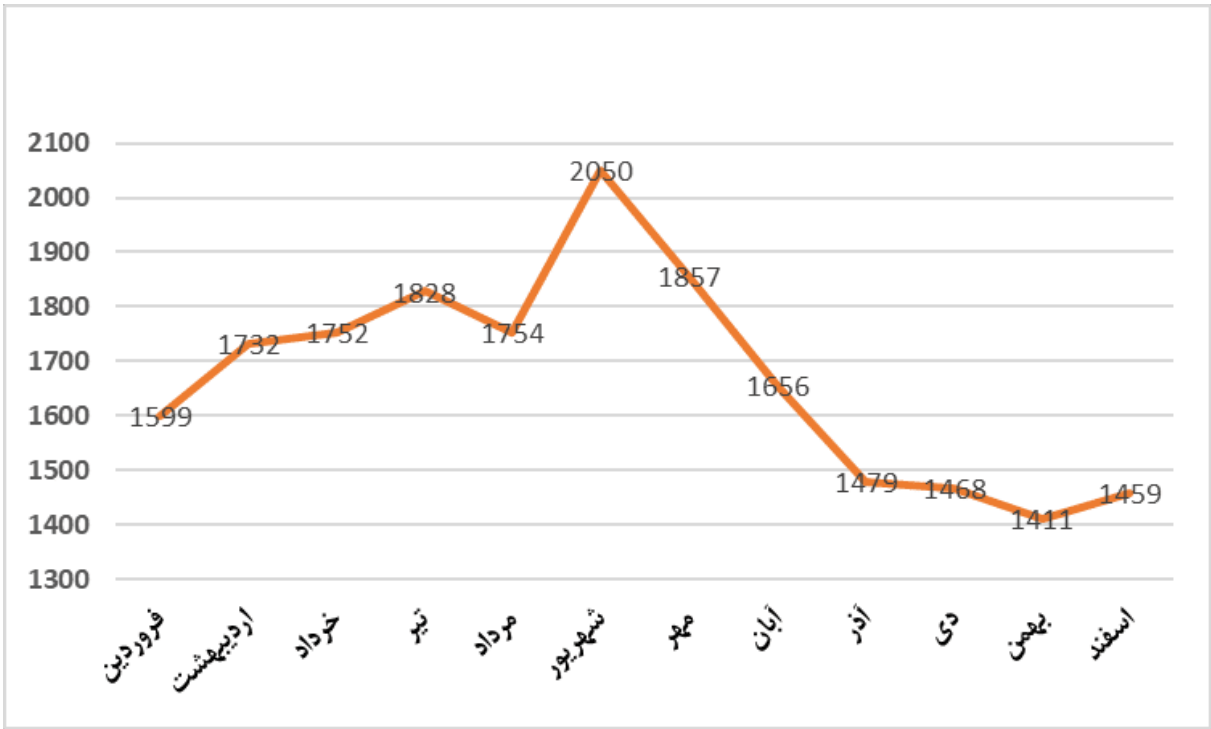
مسافرانی که از حمل‌ونقل جاده‌ای استفاده می‌کنند با برقی شدن خط ریلی «تهران – مشهد» می‌توانند با انتقال به بخش ریل از خدامت بهبودیافته، استفاده نمایند. برخی از این مزایا شامل صرفه‌جویی در هزینه‌ها و نیز کاهش هزینه‌های ناشی از تصادفات جاده‌ای است. همچنین روان‌شدن ترافیک در جاده‌ها می‌تواند سبب افزایش سرعت خودروها در جاده تهران – مشهد شده و در نتیجه مصرف سوخت‌های فسیلی کاهش می‌یابد. برای برآورد مزایای کاربران جاده‌ای لازم است در ابتدا ترافیک روزانه در یک مسیر ۱۲ ساعته را برای حالت استفاده از لکودیزل‌ها بررسی نماییم تا سرعت متوسط حمل‌ونقل جاده‌ای به دست آید.

در ادامه آن دسته از سفرهایی که به دیگر شیوه‌های حمل‌ونقل منتقل می‌شوند لحاظ می‌گردد. سپس سناریوی لکودیزل (حالت معمول) با جریان ترافیکی در سناریوی برقی‌سازی شده مقایسه می‌شود. همچنین لازم است سرعت حالت برقی‌سازی شده با سرعت و جریان ترافیک در جاده مقایسه شود. باتوجه‌به متوسط فاصله سفر در این خط (حدود ۱۰۰۰ کیلومتر) می‌توان سرعت‌های حالت معمول از طریق لکودیزل را با برقی‌سازی از طریق لکوالکتریک مقایسه نمود. در نهایت نیز با استفاده از ارزش زمانی وسایل نقلیه و نسبت‌های مرتبط با انواع وسایل نقلیه‌ای جاده‌ای، مجموع کل زمان ذخیره شده برای ذی‌نفعان جاده‌ای را در طول چرخه حیات پروژه برقی‌سازی محاسبه نمود.

جدول ۳. ارزش زمانی انواع وسایل نقلیه باتوجه‌به مؤلفه قیمت

نوع وسیله نقلیه	نسبت تجمعی انواع وسیله وسایل نقلیه بر حسب درصد	نسبت قطار به هر واحد خودروی شخصی	ارزش زمانی (بر حسب دلار)
خودروی شخصی	۲٤	۱	۸،۵
تاکسی	۳۱/۷	۱	۷،۸
اتوبوس	۸/۵	۱/۷	۱۲/۳
کامیون	۳۵/۸	۲	۰/۸۷۵
مجموع	۱۰۰		

تبدیل سفرهای جاده‌ای به ریلی و انتقال مسافران به بخش ریلی می‌تواند وقوع تصادفات جاده‌ای و در نتیجه هزینه‌های ناشی از تصادفات را مسیر جاده‌ای «تهران– مشهد» به طور محسوسی کاهش دهد. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که یک تصادف در مسیرهای جاده‌ای می‌تواند منجر به برخی از تبعات گردد که از آن جمله می‌توان به مرگ یا جراحات جزئی و کلی افراد، تخریب وسایل نقلیه، آسیب به تسهیلات یا سایر اموال و تجهیزات، هزینه‌های غیرمستقیم نظیر اتلاف زمان پلیس، هزینه‌های اداری و انسانی، هزینه‌های پزشکی، درد، رنج و غم بستگان قربانیان تصادفات جاده‌ای و نظایر آن اشاره نمود. نتایج یک مطالعه نشان می‌دهد هزینه‌های اجتماعی در تصادفات جاده‌ای بریتانیا تا ۱/۵ درصد از تولید ناخالص داخلی را به‌نظام پولی و مالی این کشور تحمیل می‌کند (ژو و همکاران، ۲۰۲۰). در سال ۱٤۰۲ در ایران حدود ۲۰۰٤۵ تن در تصادفات جاده‌ای جان خود را ازدست‌داده و ۳۹۱ هزار تن دیگر نیز مجروح شدند، این آمار در تصویر شماره (۷) نشان‌داده‌شده است.



تصویر ۷. آمار کشته شدگان تصادفات رانندگی ایران در سال ۱٤۰۲ (منبع: شکراللهی، ۱٤۰۲)

محاسبه مزایای برقی‌سازی مستلزم ارزیابی جامعی از پیامدهای مرتبط با تصادفات و سوانح جاده‌ای است. از این رو در تحقیق حاضر عمده تمرکز محققان بر کاهش مرگ و میرهایی است که در نتیجه برقی‌سازی حاصل می‌شود. باتوجه‌به نرخ حوادث جاده‌ای در ایران با برقی‌سازی خطآهن «تهران – مشهد» این سوانح می‌توانند از حمل‌ونقل جاده‌ای این مسیر حذف شده و لذا می‌توان ارزش عمر و صرفه‌جویی تلفات را با استفاده از شاخص میانگین درآمد سالانه افراد باخته برآورد نمود (فنگ و همکاران، ۲۰۲۰). همچنین برخی مزایای زیست‌محیطی برقی‌سازی خط ریلی تهران – مشهد به شرح زیر فهرست می‌شود:

-کاهش انتشار آلاینده‌های هوا در نتیجه تغییر شیوه رانش از تراکشن موتورهای دیزلی به الکتریکی

-کاهش آلودگی هوا در حمل‌ونقل جاده‌ای در نتیجه انتقال تقاضا از بخش جاده به ریل

باتوجه‌به آثار مخرب زیست‌محیطی ناشی از تردد وسایل نقلیه با سوخت فسیلی چنین می‌توان استدلال نمود که برقی‌سازی منجر به کاهش استفاده از دیزل لوکوموتیوها و کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی می‌شود؛ بنابراین برخی از مزایای زیست‌محیطی از این طریق حاصل خواهد شد؛ بنابراین برای بررسی دقیق اثرات سیستم‌های تولید و مصرف انرژی به یک تحلیل جامع علاوه بر انتشار گازهای گلخانه‌ای در عملیات بهره‌برداری از ناوگان قطارها نیاز است تا بتوان از آن طریق صرفه‌جویی مصرف انرژی در صنعت حمل‌ونقل ریلی برقی‌سازی شده را با سایر شیوه‌های حمل‌ونقل مقایسه نمود. به‌عنوان‌مثال در حمل‌ونقل ژاپن، صنعت راه‌آهن تنها ۵ درصد از کل مصرف انرژی را به خود اختصاص داده است. در حالی که این مقدار برای راه‌آهن سوئیس ٤ درصد بوده است؛ بنابراین مشاهدهمی‌شودد که میزان آلایندگی وسایل حمل‌ونقل ریلی به‌مراتب کمتر از حمل‌ونقل جاده‌ای است (کراستف و همکاران، ۲۰۱۹). مطالعه کراستف و همکاران (۲۰۱۹) همچنین نشان می‌دهد در صورتی که میزان باری که در حال حاضر توسط بخش ریل حملمی‌شودد به بخش جاده منتقل شود میزان انتشار دی اکسید کربن تا حدود ۷۰ درصد افزایش خواهد یافت. نتایج برخی از مطالعات نشان می‌دهد که برآورد هزینه‌های ناشی از آلودگی هوا لازم است بر اساس برآوردهای حداقلی باشد که در

استانداردهای مربوطه در نظر گرفته شده است. جدول شماره (٤) تخمین جریان‌های مسافری و سفرهای منتقل شده از بخش جاده به ریل را بر اساس میزان گازهای آلاینده منتشر شده در نتیجه برقی‌سازی شدن ترسیم نموده است. این جدول با استفاده از جدیدترین داده‌ها و آخرین برآوردهای مرتبط با هر واحد آلاینده در حمل‌ونقل بریتانیا به دست آمده که در برخی تحقیقات به عنوان مبنا مورد استفاده قرار گرفته است. لازم به توضیح است که هزینه‌های هر واحد آلاینده در بریتانیا به دلیل تفاوت‌های درآمد با ایران با ضریب ۳۷ درصد کاهش یافت (آگوادو و همکاران، ۲۰۱۹).

جدول ٤. میانگین آلاینده های منتشر شده در اثر عملیات حمل‌ونقل ریلی و جاده‌ای (برحسب گرم بر مسافر در کیلومتر)

نوع وسیله نقلیه / نوع آلاینده	حمل‌ونقل جاده‌ای		حمل‌ونقل ریلی	
	خودروی‌های شخصی یا تاکسی	اتوبوس	لکودیزل	لکوالکتریک
دی‌اکسیدکربن	۱۸۰/۳۰	٤۹/۸۰	۱۳۱/۰٦	۹۷/۳۳
اکسیدهای نیتروژن	۱/٦٥	۰,۳۹	۱/۲٥	۰/٤٥
منوکسید کربن	۷/۹۲	۰,۲۹	۰/۸۸	۰/٤۲
هیدروکربن‌ها	۰/۸٦	۰,۰٦	۰/۳۷	۰,۰۰۱

جدول ٥. خلاصه نتایج ارزیابی برقی‌سازی خط ریلی «تهران – مشهد» با نرخ تنزیل ۱۰ درصد برای طول ۳۰ سال در چرخه حیات پروژه برقی‌سازی

عامل‌های هزینه و منافع	ارزش خالص کنونی (NPV)
هزینه‌ها	
هزینه‌های پست برق‌های ایستگاه‌های راه‌آهن	۳۳۲,۹۸
هزینه‌های شبکه برق بالاسری	۲۳۸,۰۰
هزینه‌های کارگاهی	٦٦٥,۹۲
هزینه‌های راه‌سازی (روسازی و زیرسازی)	۸۳۲,٤۳
هزینه‌های احداث سیستم‌های سیگنالینگ	۱٦٦,٤۷
هزینه‌های خرید و بهره‌برداری از لکوالکتریک‌ها	۷٤٦,٦۳
هزینه نگهداری و تعمیرات پست‌های برق	٦٥,۷۱
هزینه‌های نگهداری و تعمیرات شبکه برق بالاسری	۱۰۹,۳٦
هزینه‌های خرید واگن‌های جدید	۱۰۱۸۲,٤۳
هزینه عملیاتی و نگهداری و تعمیرات واگن‌های جدید	۷۹,۲۸

عامل‌های هزینه و منافع	ارزش خالص کنونی (NPV)
مجموع کل هزینه‌ها	۵۵۰۹/۳۳
بیان مزایا	
افزایش درآمدهای مسافری راه‌آهن	٤۰۸۸,۱۵
کاهش هزینه‌های سرمایه‌ای قابل‌اجتناب برای راه‌آهن (ارزش باقی‌مانده از استفاده لوکوموتیوهای دیزلی در سایر خطوط ایران)	۳۰۹,٦۲
صرفه‌جویی در هزینه‌های نگهداری و تعمیرات راه‌آهن	۱۱٤,۲۰۱
صرفه‌جویی در هزینه‌های عملیاتی راه‌آهن	۱۸۰,٦۷
مجموع کل مزایای مالی	٤٦۹۲,٦٤
نرخ بازده داخلی تعدیل‌شده	٪۳۸,٦۵
صرفه‌جویی زمانی ذی‌نفعان جاده‌ای	۸,۸۷
کاهش آلودگی هوا در حمل‌ونقل جاده‌ای	۱,٤۰
میزان صرفه‌جویی در تصادفات جاده‌ای	۱,٦۲
کاهش مصرف سوخت وسایل نقلیه جاده‌ای	۷۱,۲۲
کاهش مصرف سوخت در راه‌آهن	۱۲۳,۳٦
زمان صرفه‌جویی شده برای مسافران کنونی راه‌آهن و مسافران جدید	٤۵۷,۲٦

برقی‌سازی خط ریلی «تهران – مشهد» شامل بر مزایای دیگری نیز می‌شود که از آن جمله می‌توان به تعداد سفرهایی اشاره نمود که از بخش حمل‌ونقل جاده‌ای به ریل منتقل می‌شود.

برخی از این مزایای اجتماعی عبارت است از:

-هزینه‌های سرمایه‌ای قابل صرف‌نظر برای وسایل نقلیه‌ای جاده‌ای

-صرفه‌جویی در مصرف سوخت برای سفرهایی که پیش‌تر از طریق جاده صورت می‌گرفته و با برقی‌سازی به بخش ریلی منتقل شده است.

-کاهش هزینه‌های احداث، نگهداری و تعمیرات راه‌های جاده‌ای

برخی مزایا از صرفه‌جویی در هزینه‌های سرمایه‌ای وسایل نقلیه جاده‌ای بر اساس تعداد بالقوه سفرهایی به دست می‌آید که از بخش جاده به ریل منتقل می‌شود. همچنین سهم انواع مختلف وسایل حمل‌ونقل مسافری جاده‌ای (نظیر اتوبوس و تاکسی) باتوجه‌به نرخ اشغال فضای شهری، حجم ترافیک جاده‌ای، کیلومتراژ سفرهای روزانه هر وسیله نقلیه محاسبه می‌شود. صرفه‌جویی در مصرف سوخت باتوجه به تعداد کل مسافران در هر کیلومتر سفرهای منتقل شده از جاده به ریل و با لحاظ قیمت انرژی به دست می‌آید. از منظر صرفه‌جویی در هزینه‌های احداث، نگهداری و تعمیرات جاده‌ها، باتوجه‌به اهمیت راهبردی مسیر «تهران – مشهد» احتمال کاهش قابل‌توجه در این دسته از هزینه‌ها کم است. از سوی دیگر باتوجه‌به نرخ رشد ترافیک در مسیرهای جاده‌ای «تهران – مشهد» احتمال آنکه صرفه‌جویی قابل‌ملاحظه‌ای در هزینه‌های نگهداری و تعمیرات جاده‌های این مسیر ایجاد شود، بسیار کم است.

سایر مزایای غیرقابل‌اندازه‌گیری دیگر

ساخت تأسیسات الکتریکی ممکن است سبب ایجاد اختلالاتی در اجرای طرح برقی‌سازی خط ریلی «تهران – مشهد» شود. به‌عنوان‌مثال ممکن است تأخیرهایی به دلیل اعمال مهندسی یا لغو برخی خدمات به وجود آید که در تحلیل‌های اقتصادی لحاظ نشده باشد. از این رو راه‌سازی و سایر امور معماری می‌تواند به‌صورت مرحله‌ای صورت گیرد تا احتمال رخ‌دادن اختلالات به‌ویژه در دوره‌های اوج ترافیکی به حداقل ممکن کاهش یابد. سیر و حرکت ناوگان قطارها در مسیر ریلی «تهران – مشهد» همچنین ممکن است سبب ایجاد مزاحمت‌های ارتعاشی برای ساکنین پیرامون حریم ریلی شود. هرچند تفاوت‌ها میان سطح ارتعاشات ایجاد شده توسط قطارهای برقی و دیزلی چندان قابل‌توجه نیست؛ اما با این‌حال بهبود آرایش و تشکیل طراحی قطارها می‌تواند ارتعاشات را حد زیادی کاهش دهد (رونانکی و همکاران، ۲۰۲۰). نویز ناشی از سیر و حرکت قطارها عمدتاً از اندرکنش بین چرخ و ریل و آئرودینامیک قطارها ناشی می‌شود. این مسئله به‌ویژه برای لوکوموتیوهای دیزلی بیشتر محسوس است زیر در سرعت‌های بالا نویز ناشی از اندرکنش چرخ و ریل لکودیزل‌ها بیشتر بوده و لذا لکوالکتریک‌ها از این رو دارای مزایای ویژه‌ای خواهند بود.

۵-نتیجه‌گیری

ترافیک بالا، سوانح جاده‌ای و آلودگی‌های زیست‌محیطی از مسائل جدی حمل‌ونقل ایران محسوب می‌شوند. برخی از این طرح‌ها نظیر کارآمدسازی سیاست‌های قیمت‌گذاری و کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای و نظایر آن از جمله برنامه‌های حاکمیتی برای کاهش ترافیک و آلودگی در حمل‌ونقل جاده‌ای محسوب می‌شوند. برقی‌سازی شبکه ریلی دارای مزایای متعدد اجتماعی برای بهره‌برداران ریلی است. یک سیستم راه‌آهن برقی دارای مزایای عملیاتی و زیست‌محیطی متعدد است که از جمله می‌توان به استفاده از موتورهای پر شتاب، قدرتمند و دارای نویز کمتر اشاره نمود که در مقایسه با موتورهای دیزلی سیر و حرکت قطارها را در مسیر ریلی تسهیل می‌نمایند. از سوی دیگر برقی‌سازی شبکه ریلی سبب بهبود سطح ارائه خدمات به مسافران شده و رقابت‌پذیری حمل‌ونقل ریلی را با سایر شیوه‌های حمل‌ونقل امکان‌پذیر می‌نماید. از سوی دیگر برقی‌سازی راه‌آهن می‌تواند به کاهش هزینه‌های جانبی وسایل نقلیه‌ای جاده‌ای از طریق انتقال مسافران به حمل‌ونقل ریلی منجر شود. همچنین از نظر اجتماعی نیز برقی‌سازی دارای مزایای متعددی است. ارزیابی طرح توسعه خط ریلی «تهران – مشهد» نشان می‌دهد که از نظر مالی این طرح چندان توجیهی ندارد؛ اما محاسبات مزایای مالی آتی بر اساس کرایه فعلی و افزایش کرایه بر اساس بهبود کیفیت خدمات می‌تواند مزایای آتی را تضمین نماید. بررسی مزایای اجتماعی نشان می‌دهد که سرمایه‌گذاری در این طرح بسیار مطلوب است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که بسیاری از هزینه‌ها و منافع اجتماعی و زیست‌محیطی می‌توانند در ارزیابی اقتصادی لحاظ گردد. نتایج این تحقیق می‌تواند در تصمیم‌سازی‌ها و سیاست‌گذاری‌های حاکمیتی در ارائه یک چارچوب منسجم و سازگار برای برقی‌سازی مسیر ریلی «تهران – مشهد» دارای اثرگذاری باشد. از طرفی مفروضات بسیاری در خصوص سایر عوامل جانبی تأثیرگذار موردنیاز است که علی‌رغم دشواری در دستیابی به داده‌ها در این پژوهش، می‌تواند برآورد قابل‌قبولی از مزایای اجتماعی و زیست‌محیطی برقی‌سازی خط تهران – مشهد ارائه نماید.

٦- مراجع

-شکراللهی، محمدرضا (۱٤۰۲). بررسی، تحلیل و نقد سامانه‌های پیشگیری از تصادفات رانندگی، سومین کنفرانس ملی مطالعات و یافته‌های نوین در مهندسی مکانیک و برق، اهواز.

-کاظمی، محمدحسین پور و رضایی، جواد (۱۳۸۵). ارزیابی کارایی نواحی سیزده‌گانه راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران به روش تحلیل پوششی داده‌ها، *نشریه تحقیقات اقتصادی*، دوره ۳۸، شماره ۳ (ویژه‌نامه - پاییز و زمستان)، زمستان، (D.E.A).

-نوری، مصطفی (۱٤۰۱). فرازوفرود تعیین مسیر راه‌آهن سراسری در ایران. *گنجینه اسناد*، سال ۳۲، دفتر دوم، تابستان ۱٤۰۱ پیاپی ۱۲.

-A. Jaafar, C. R. Akli, B. Sareni, X. Roboam and A. Jeunesse, (2012). Sizing and energy management of a hybrid locomotive based on flywheel and accumulators. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 58, No. 8, 3947-3958.

-A. S. Abdelrahman, J. Sayeed and M. Z. Youssef (2020). Hyperloop transportation system: analysis design control and implementation. *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, Vol. 65, No. 9, 7427-7436.

Development of 1-MW inductive power transfer system for a high-speed train. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 62, No. 10, 6242-6250.

-J. Hernandez and F. Sutil, (2022). Electric vehicle charging stations feeded by renewable: PV and train regenerative braking", *IEEE Latin America Transactions*, Vol. 14, No. 7, 3262-3269.

-J. Kluehspies, (2020). Maglev trends in public transport: The perspectives of Maglev transportation systems. *2020 11th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA)*, 1-4.

-J. Taufiq, (2010). Power electronics technologies for railway vehicles. *2010 Power Conversion Conference-Nagoya*, 1388-1393.

-K. Aoki, K. Kikuchi, M. Seya and T. Kato, (2018). Power Interchange System for Reuse of Regenerative Electric Power. *Hitachi Review*, Vol. 67, No. 7, 834-835.

-K. Kwon, J. Yeom and K. A. Kim, (2020). Photovoltaic panel orientation study for tube-enclosed transportation systems. *2020 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2020-ECCE Asia)*, 1149-1154.

-L. Pastena, (2017). A Catenary-Free Electrification for Urban Transport: An Overview of the Tramwave System. *IEEE Electrification Magazine*, Vol. 2, No. 3, 16-21.

-M. Brenna, F. Foiadelli and D. Zaninelli, (2021). *Electrical Railway Transportation Systems*, Vol. 67.

-M. L. Pastor, L. G. T. Rodriguez and C. V. Velez, (2016). Flywheels Store to Save: Improving railway efficiency with energy storage. *IEEE Electrification Magazine*, Vol. 1, No. 2, 13-20.

-P. Arboleya, P. Bidaguren and U. Armendariz, (2019). Energy is on board: Energy storage and other alternatives in modern light railways. *IEEE Electrification Magazine*, Vol. 4, No. 3, 30-41.

-P. Fragiacomo and F. Piraino, (2022). Fuel cell hybrid powertrains for use in Southern Italian railways. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 44, No. 51, 27930-27946.

-Q. Xu, F. Ma, Z. He, Y. Chen, J. M. Guerrero, A. Luo, et al., (2020). Analysis and comparison of modular railway power conditioner for high-speed railway traction system. *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 32, nNo. 8, 6031-6048.

-A. S. Abdelrahman, Y. Attia, K. Woronowicz and M. Z. Youssef, (2019). Hybrid fuel cell/battery rail car: A feasibility study. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, Vol. 2, No. 4, 493-503.

-Aguado, J. A., Racero, A. J. S., & de la Torre, S. (2019). Optimal operation of electric railways with renewable energy and electric storage systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(2), 993-1001.

-C. N. Pyrgidis, (2019). Railway Transportation Systems: Design Construction and Operation, *CRC Press.*

-E. P. De La Fuente, S. K. Mazumder and I. G. Franco, (2017). Railway Electrical Smart Grids: An introduction to next-generation railway power systems and their operation. *IEEE Electrification Magazine*, Vol. 2, No. 3, 49-55.

-G. Abad, (2019). Power electronics and electric drives for traction applications, *John Wiley Sons.*

-H. Hayashiya, Y. Iino, H. Takahashi et al., (2020). Review of regenerative energy utilization in traction power supply system in Japan: Applications of energy storage systems in dc traction power supply system. *IECON 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 3918-3923.

-H. Kayashiya, (2023). Recent Trend of Regenerative Energy Utilization in Traction Power Supply System in Japan. *Urban Rail Transit*, Vol. 3, 183-191.

-I. Krastev, P. Tricoli, S. Hillmansen and M. Chen, (2019). Future of electric railways: advanced electrification systems with static converters for ac railways. *IEEE Electrification Magazine*, Vol. 4, No. 3, 6-14.

-I. Sengör, H. C. Kiliçkiran, H. Akdemir, B. Kekezoğlu, O. Erdinc and J. P. Catalao, (2020). Energy management of a smart railway station considering regenerative braking and stochastic behaviour of ESS and PV generation. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 9, No. 3, 1041-1050.

-J. Feng, W. Chu, Z. Zhang and Z. Zhu, (2020). Power electronic transformerbased railway traction systems: Challenges and opportunities. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol. 5, No. 3, 1237-1253.

-J. H. Kim, B.-S. Lee, J.-H. Lee, S. H. Lee, C. B. Park, S. M. Jung, et al., (2018).

-T. Ratniyomchai, S. Hillmansen and P. Tricoli, (2016). Recent developments and applications of energy storage devices in electrified railways. *IET Electrical Systems in Transportation*, Vol. 4, No. 1, 9-20.

-V. Herrera, A. Milo, H. Gaztañaga, I. Etxeberria-Otadui, I. Villarreal and H. Camblong, (2019). Adaptive energy management strategy and optimal sizing applied on a battery-supercapacitor based tramway. *Applied Energy*, Vol. 169, 831-845.

-W. Zhang, J. Li, L. Xu, M. Ouyang, Y. Liu, Q. Han, et al., (2019). Comparison study on life-cycle costs of different trams powered by fuel cell systems and others. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 41, No. 38, 16577-16591.

-R. He, B. Ai, G. Wang, K. Guan, Z. Zhong, A. F. Molisch, et al., (2019). High-speed railway communications: From GSM-R to LTE-R. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, Vol. 11, No. 3, 49-58.

-Ronanki, D., Singh, S. A., & Williamson, S. S. (2020). Comprehensive topological overview of rolling stock architectures and recent trends in electric railway traction systems. *IEEE Transactions on transportation Electrification*, 3(3), 724-738.

-S. Frey, (2015). Railway electrification, *White word publications.*

Feasibility Study of Electrification of the "Tehran-Mashhad" Railway Line based on Financial and Economic Analysis Methods

Mehran Khalaj, Associate Professor, Faculty of Industrial Engineering, Islamic Azad University, Parand Branch, Tehran, Iran.
Davood Jafari, Associate Professor, Faculty of Industrial Engineering, Islamic Azad University, Parand Branch, Tehran, Iran.
Pejman Salehi, Assistant Professor, Faculty of Industrial Engineering, Islamic Azad University, Parand Branch, Tehran, Iran.

E-mail: khalajmehran@yahoo.com

Received: May 2025- Accepted: August 2025

ABSTRACT
The national railway network of Iran includes freight and passenger trains, except for two sections "Jolfa-Tabriz" and "Tabriz-Azarshahr" with a distance of about 204 km, using diesel locomotives. Implementing an electric railway system has numerous technical and environmental benefits that can affect the economy and environment of the country and have many social effects. In the present study, the feasibility study of electrification of the "Tehran-Mashhad" railway line is studied based on the cost-benefit method; therefore, the researchers provide a framework for evaluating the direct and indirect benefits of this project and its associated costs. The "cost-benefit" assessments in this study showed that it has an adjusted internal rate of return of 12%, which is economically appropriate considering all allocated resources and is consistent with the results of studies related to electrification in other research. The results of this research can be effective in decision-making and government policy-making in providing a coherent and consistent framework for the electrification of the Tehran-Mashhad railway route. On the other hand, many assumptions are required regarding other influential factors that, despite the difficulty in obtaining data in this research, can provide an acceptable estimate of the social and environmental benefits of electrification of the Tehran-Mashhad line.

Keywords: Electrification, Railway, Cost-Benefit Method, Tehran-Mashhad Railway Line