توسعه روشی جهت انتخاب سیستم روسازی (بالاستی- بدون بالاست) بر مبنای معیارهای فنی- اقتصادی

مقاله علمی - پژوهشی

مرجان مهوری حبیب آبادی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
مرتضی اسماعیلی*، استاد، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
مسعود فتحعلی، استادیار، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران
پست الکترونیکی نویسنده مسئول: m_esmaeili@iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۰۲- پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۶
صفحه:۶۲-۴۳

چکیده

موضوع انتخاب نوع سیستم روسازی از یک سو تابع معیارهای فنی و از سوی دیگر تابع هزینه‌های چرخهٔ عمر این خطوط می‌باشد. در این مقاله تلاش شده تا با ارایه مدل تصمیم‌گیری IRSST مبتنی بر هر دو دسته معیارهای فنی و اقتصادی، امکان انتخاب نوع سیستم روسازی (بالاستی- بدون بالاست) فراهم گردد. در این راستا در قالب یک مطالعهٔ موردی برای راه‌آهن سریع‌السیر قم- اصفهان در محدودهٔ کیلومتر ~000 + 5 کیلومتر 110 + 29 ، با توسعهٔ یک مدل کامپیوتری در محیط پایتون بر مبنای الزامات IRS 70727، ابتدا بر اساس معیارهای فنی و اطلاعات پروژهٔ مذکور نقاط اجباری برای انتخاب سیستم روسازی در محدودهٔ مورد نظر مشخص شده و سپس درخصوص سایر نقاط، انتخاب سیستم بر مبنای معیارهای اقتصادی (هزینه چرخه عمر) صورت گرفته است. از آن جا که انتخاب سیستم بر مبنای معیارهای اقتصادی تابع نرخ تورم (i) و تنزیل (r) است، و در عین حال اعداد مربوط به هزینه دوره عمر در سیستم‌های روسازی بدون بالاست و بالاستی به طور دقیق در ایران مشخص نیست، لذا با پذیرفتن اعداد اعلام شده توسط IRS 70727، در بخشی از تحقیق روی این دو پارامتر تحلیل حساسیت در محدوده $0 \le i \le 3$ و $0 \le r \le 8$ صورت گرفته و تأثیر آن بر نوع سیستم روسازی در طول مسیر بررسی شده است. در ادامه نتایج در قالب تغییر نوع سیستم روسازی در طول نسبت به طول کل بخش بالاستی و بدون بالاست و منحنی‌های توزیع چگالی کرنل (KDE)[2] برای مقادیر مختلف i و r ارایه شده‌اند. بررسی نتایج به دست آمده مبین آن است که تا زمانی که نرخ تنزیل کمتر از نرخ تورم باشد، خط بدون بالاست به عنوان روسازی مطلوب معرفی می شود، لیکن در مواقعی که نرخ تنزیل بیش از نرخ تورم است، هزینه دوره عمر روسازی بالاستی کمتر از روسازی بدون بالاست بوده و بنابراین، روسازی بالاستی به لحاظ اقتصادی دارای مطلوبیت بیشتری است.

واژه‌های کلیدی: انتخاب سیستم روسازی راه آهن، خط بالاستی، خط بدون بالاست، معیار فنی، معیار اقتصادی، نرخ تنزیل، نرخ تورم

۱-مقدمه

کمیت و کیفیت زیرساخت‌های حمل و نقل ریلی به منظور جابجایی بار و مسافر، از مهم‌ترین نشانه‌های توسعه یافتگی هر کشوری محسوب می‌شود. روسازی خطوط ریلی یکی از اجزاء مهم در زیرساخت راه‌آهن به شمار می‌رود و اولین عنصری است که در سازهٔ خط ریلی در برابر بارگذاری ناشی از عبور ناوگان قرار می‌گیرد. در طی ۵۰ سال گذشته، روسازی‌های مختلفی برای

ساخت خطوط راه‌آهن در جهان پیشنهاد شده است که به طور کلی می‌توان آن‌ها را به دو طبقه اصلی روسازی بالاستی و روسازی بدون بالاست تقسیم نمود. روسازی بالاستی عموماً متشکل از ریل، تراورس، ادوات اتصال (پابند)، لایه‌های بالاست و زیربالاست است که بر روی بستر خط (زیرسازی) قرار می‌گیرند(سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، ۱۳۸٤). از سوی دیگر، سیستم‌های روسازی بدون بالاست متداول متشکل از ریل، تراورس (در صورت وجود)، ادوات اتصال (پابند) و دال بتنی مسلح است که بر روی لایه‌های متشکل از مصالح دانه‌ای یا بتن غیرمسلح قرار گرفته‌اند(صادقی، ۱۳۸۰). در روسازی‌های بالاستی، مصالح بالاست ضمن کاهش تنش رسیده به بستر، ایجاد مقاومت طولی و عرضی، تسهیل زهکشی، جذب صدا و ارتعاش و ایجاد خاصیت ارتجاعی در خط ریلی، به دلیل بروز نشست و شکست در ذرات، غالباً دلیل اصلی انجام عملیات بهسازی و بازسازی و فعالیت‌های نگهداری و تعمیر خطوط ریلی می‌باشند، به طوری که بخش عمده هزینه‌های نگهداری صرف اصلاح عیوب ناشی از بالاست می‌شود. این عملیات به ویژه در تونل‌ها و پل‌ها که محدودیت فضا وجود دارد، بسیار وقت گیر و پر هزینه است و منجر به انسداد طولانی مدت خط خواهد شد. این خطوط معمولاً به دلیل انعطاف‌پذیری قابلیت بیشتری برای تحمل نشست مطلق و کلی از خود نشان می‌دهند که این موضوع بی تأثیر از بالا آمدن تراز آب زیرزمینی نخواهد بود.

در مقابل در خطوط ریلی بدون بالاست، با ایجاد یک خط صلب بتنی، عامل اصلی نیاز به تعمیر و نگهداری که همان لایهٔ بالاست است حذف شده و خصوصیات ارتجاعی در خط از طریق پابند تأمین می‌شود. بدین ترتیب خطی بدون نیاز به تعمیر و نگهداری ایجاد خواهد شد، اما هزینه سرمایه‌گذاری اولیه در این خطوط به مراتب از خط بالاستی بیشتر است و لذا این موضوع باعث می‌شود به دلیل محدودیت منابع مالی در پروژه‌ها، اغلب سرمایه‌گذاران تمایل بیشتری به ساخت خطوط ریلی بالاستی داشته باشند (UIC, 2021). گرچه صلبیت خطوط بدون بالاست محدودیت‌هایی را در خصوص نشست‌پذیری از نوع مطلق و نسبی ایجاد کرده و در ضمن، حساسیت این خطوط را نسبت به بالا بودن تراز آب زیرزمینی افزایش می‌دهد (Sárik, 2018).

بنابر بر اصول کلی فوق‌الذکر، انتخاب سیستم روسازی در خطوط ریلی به صورت کاملاً بالاستی، کاملاً بدون بالاست و یا ترکیبی از آن دو حائز اهمیت ویژه‌ای است و باید در خطوط باری، مسافری، خطوط با ترافیک ترکیبی و به طور ویژه در خطوط ریلی پرسرعت مدنظر قرار داده شود. مرور ادبیات فنی در این زمینه نشان می‌دهد که در دو دهه اخیر تلاش شده تا با به کار گیری روش‌های مبتنی بر تصمیم‌گیری، ابزارهایی برای انتخاب سیستم روسازی در اختیار طراحان و مدیران صنعت ریلی قرار داده شود. به طور نمونه، در سال ۲۰۰۰ میلادی، راه‌آهن آلمان فرآیند مدیریت استراتژیکی را معرفی کرد که در حال حاضر، اتحادیه‌ها و سازمان‌های مختلفی در حال کار بر روی محتوای استراتژی‌های کارکردی و تجاری آن هستند (Koriath, 2004).

از آنجا که سرمایه‌گذاری‌های ریلی معمولاً در کوتاه مدت قابل بازگشت نیست، در مدل پیشنهادی راه‌آهن آلمان، درخت پشتیبانی از تصمیم گیری طراحی شد که طی پنج گام اصلی زیر، پاسخ‌های روشنی را برای سؤال "آیا می‌توان به یک تصمیم دقیق برای انتخاب روسازی رسید یا آنکه لازم است برای هر سیستم، تحلیل‌های جزئی‌تر انجام شود؟" ارایه داد:

-تعیین سناریوی احداث خط: سه سناریوی احداث خط عبارتند از «احداث خط جدید»، «ارتقای خطوط موجود» و «نوسازی آن‌ها».

-تعیین مشخصات ترافیکی خط: استراتژی‌های ترافیکی بر پایه معیارهای فنی و بهره‌برداری مانند سرعت، بار محوری، تراکم ترافیک و حداقل شعاع قوس دسته‌بندی می‌شوند. سه دسته ترافیکی مورد بررسی عبارتند از مسیر دائمی اکسپرس، مسیر دائمی پرسرعت و مسیر دائمی با ترافیک مختلط.

-طراحی مسیر: در این مرحله بررسی می‌شود که آیا طرح مسیر قبلاً مشخص شده است یا خیر. اگر طرح مسیر قبلاً مشخص شده باشد، درخت تصمیم‌گیری تمام شده و وارد مرحله تحلیل جزئی می‌شود.

-معیارهای حذفی: معیارهای حذفی در دال خط، سطح آب زیر زمینی بالا و بستر مستعد نشست در طولانی مدت است. یکی از معیارهای حذف خطوط بالاستی کم بودن فضای زیر پل زیرگذر است. همچنین در صورتی که طول تونل بیش از ۵۰۰ متر باشد، توصیه می‌شود از روسازی دال خط استفاده شود.

-معیارهای آزمون: در این مرحله معیارهایی کنترل شده و بر اساس آن‌ها تصمیم‌گیری می‌شود که آیا نیاز به تحلیل عمیق مبتنی بر روش‌های تصمیم‌گیری وجود دارد یا خیر. مثلاً ممکن است در گام اول به نظر برسد ساخت دال‌خط توجیه اقتصادی بهتری دارد، اما در این مرحله مشخص شود که این سیستم مزیتی نسبت به خط بالاستی نداشته و حتی نیاز به تمهیدات ویژه کاهش صدا را نیز ضروری می‌کند. در چنینی شرایطی می‌توان نتیجه گرفت که خط بالاستی بدون نیاز به ادامه بررسی جزئی‌تر، اقتصادی‌تر خواهد بود. در صورتی که پس از این پنج مرحله، نیاز به تحلیل جزئی‌تر وجود داشته باشد، جریان نقدینگی هر یک از سیستم‌ها در طول دوره عمر آن‌ها مبنای تصمیم‌گیری نهایی قرار می‌گیرد. اگر جریان نقدینگی گزینه‌ها نزدیک به یکدیگر باشد، نیاز به بررسی و تحلیل تکمیلی بر پایه عواملی مانند معیارهای ایمنی، معیارهای ساخت و نگهداری، تأثیر آلودگی صوتی و ... وجود خواهد داشت. در مطالعه دیگری که در سال ۲۰۱۷ توسط Gailienė و Laurinavičius برای راه‌آهن لیتوانی انجام شد (Gailienė and Laurinavičius, 2017)، جهت تعیین مطلوبیت انتخاب هر یک از گزینه‌های روسازی و تعیین کارآمدی آن‌ها برای اجرا بر روی سازه‌های خاص مانند پل، تونل، تقاطع هم‌سطح و ...، دو درخت تصمیم گیری با عنوان "SP-1" و "SP-2" پیشنهاد شد. در این مدل، ابتدا تحلیل اولیه‌ای بر روی دال خط انجام گرفت تا نکات مثبت و منفی طراحی و اجرای دال، پیش شرط‌های مورد نیاز، معیارهای ممنوعیت استفاده از دال‌خط و ... ارزیابی شوند. سپس مشخص شد که از چه روشی می‌توان تحلیل هزینه‌های دوره عمر (LCC) را برای تصمیم‌گیری نهایی در خصوص انتخاب سیستم روسازی انجام داد. در تحقیق دیگری که توسط Orel و همکاران برای راه‌آهن انگلستان انجام شد(Orel, 2019-2020)، از روش تحلیل هزینه دوره عمر برای تخمین و ارزیابی عملکرد اقتصادی خطوط بالاستی و دال‌خط استفاده شده است که در آن علاوه بر هزینه سرمایه‌گذاری، کلیه هزینه‌ها در طول عمر سیستم مانند هزینه بهره‌برداری، هزینه نگهداری، هزینه انرژی، هزینهٔ بازیافت مصالح و همچنین هزینه‌های اجتماعی حاصل از استفاده از خط در نظر گرفته شد (Orel, 2019-2020). نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که ساخت دال‌خط در مقایسه با خط بالاستی به سرمایه‌گذاری بسیار بالاتری (حدود ۲۰۰ میلیون یورو در کیلومتر) نیاز دارد. لیکن پس از شروع بهره‌برداری از خط، هزینه‌های دال خط تقریباً ثابت می‌ماند، در حالی که هزینه‌های خط بالاستی به دلیل نیاز به نگهداری رو به افزایش است. در حدود سی امین سال بهره‌برداری، خط بالاستی به نوسازی نیاز دارد، در حالی که دال‌خط با کمی تعمیر و نگهداری پیشگیرانه کماکان قابل بهره‌برداری است. پس از گذشت سی سال، دال‌خط از صرفه اقتصادی بیشتری برخوردار خواهد بود تا آن که در پایان بهره‌برداری ۶۰ ساله، هزینه سرمایه گذاری در دال‌خط جبران شده و به همین علت، به راه حل اقتصادی‌تری تبدیل می‌شود.

در سال ۲۰۱۸، پژوهشی دیگر توسط Sárik در سوئد انجام شد (Sárik, 2018) که در آن به منظور انتخاب و اجرای هر یک از گزینه‌های روسازی مدلی با چهار سطح ارائه شد. در این مدل، ابتدا نقاطی که دارای محدودیت فنی برای اجرای نوع خاصی از روسازی هستند مشخص شده و سپس در سایر نقاط، با توجه به نتایج حاصل از روش مونت کارلو و منطق فازی، گزینه مطلوب روسازی انتخاب می‌شود. در این روش از نتایج حاصل از محاسبه هزینه دوره عمر نیز استفاده شده است.

مطالعات مقدماتی صورت گرفته در سال ۲۰۲۱ در ایران توسط فتحعلی و همکاران (Fathali, 2020)، روشی را پیشنهاد می‌دهد که بر مبنای آن لازم است اطلاعات مربوط به مسیر مورد بررسی برای بخش‌های مختلف خط جمع‌آوری شود. سپس بر اساس ارزیابی فنی مبتنی بر محدودیت‌های موجود در انتخاب روسازی، نوع مشخصی از روسازی (بالاستی یا بدون بالاست) به بخش-های مختلف مشخص شده اختصاص می‌یابد. اگر برای بخشی از خط نتوان انتخابی بین سیستم روسازی بالاستی یا دال خط اتخاذ نمود، لازم است تحلیل جزئی‌تری بر اساس هزینه دوره عمر و شاخص انجام شود. در این مطالعه اگرچه روش انتخاب سیستم روسازی خطوط ریلی تعیین شده است، لیکن به دلیل عدم دسترسی به اطلاعات مربوط هزینه دوره عمر و شاخص RAMS برای هر دو سیستم، امکان انجام تحلیل‌های جزئی به صورت گسترده وجود نداشته است. در سال ۲۰۲۱، اتحادیه بین‌المللی راه‌آهن‌ها (UIC) با انتشار سند IRS 70727، روش جامعی را

تدوین نمود که در آن، معیارهای تأثیرگذار بر انتخاب سیستم روسازی در قالب چهار موضوع اصلی «شرایط عملکردی و بهره‌برداری»، «ویژگی‌های فنی زیرساخت»، «شرایط زیست محیطی» و «تحلیل اقتصادی» معرفی شدند (UIC, 2021). روش تحلیل گزینه‌های روسازی در این سند با اعمال محدودیت‌هایی در طرح عملیات عمرانی روسازی و تعیین مقادیر آستانه برای اطمینان از سازگاری طرح با نیازهای عملیاتی، بهره‌برداری، زیست‌محیطی و نیازهای فنی زیرساخت توسعه یافت. به علاوه در این مدل، مزیت اقتصادی سیستم روسازی به عنوان تعیین‌کننده‌ترین معیار در بین سایر معیارها شناخته شده و می‌توان از نتایج حاصل از تحلیل هزینه دوره عمر هر یک از گزینه‌ها در تعیین نوع روسازی استفاده کرد. در همین راستا، در سال ۱۴۰۱ نیز پیش نویس دستورالعملی تحت عنوان «دستورالعمل انتخاب روسازی خطوط راه‌آهن (بالاستی- بدون بالاست)» توسط نویسندگان در قالب یک پروژه تحقیقاتی در مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی تدوین شد که در آن به مبانی انتخاب روسازی خطوط ریلی، الزامات و ملاحظات انتخاب سیستم روسازی و فرایند تصمیم‌گیری در این حوزه پرداخته شده است. با توجه به نیاز به انتخاب نظام‌مند و علمی نوع سیستم روسازی، این دستورالعمل بر روی شناسایی و جمع‌بندی الزامات انتخاب سیستم‌ها در دوره‌های مختلف طراحی، ساخت و بهره‌برداری با توجه به جنبه‌های فنی، هزینه و عملکرد متمرکز است (مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۴۰۱). با توجه به عدم وجود روشی دقیق و مدون در انتخاب سیستم روسازی پروژه‌های ریلی در کشور و اهمیت این موضوع در بهینه‌سازی هزینه‌های ساخت، نگهداری و بازسازی، توسعهٔ روشی که بتواند پاسخگوی این نیاز باشد، الزامی به نظر می‌رسد. لذا در این تحقیق با اعمال تغییراتی در معیارهای معرفی شده توسط IRS 70727، متناسب‌سازی این سند با شرایط موجود در کشور صورت گرفته و در گام بعد با توسعهٔ یک مدل کامپیوتری در محیط پایتون، به نام IRSST روشی نظام‌مند برای انتخاب سیستم روسازی توسعه داده شده است. بدیهی است که مطابق با روش پیشنهادی IRS 70727، دو دسته معیارهای فنی و اقتصادی برای انتخاب سیستم روسازی مدنظر بوده است، لیکن در توسعه مدل کامپیوتری برخی از معیارهای فنی کیفی کنار گذاشته شده و برخی از معیارهای فاقد اطلاعات ورودی لازم نیز صرف نظر شده‌اند.

در عین حال، در بحث هزینه‌های اجرا، نگهداری و بازسازی نیز با توجه به عدم وجود اطلاعات دقیق در کشور، از مقادیر پیشنهادی IRS 70727 استفاده شده است. در پایان و پس از توسعه مدل کامپیوتری، با توجه به اطلاعات اخذ شده از مشاور طراح پروژه راه‌آهن پرسرعت تهران- قم- اصفهان در خصوص بخش قم- اصفهان در محدوده Km 5 + 000~Km 29 + 110 از منظر پروفیل طولی، مقاطع عرضی، شرایط ژئوتکنیکی و شرایط ابنیه فنی موجود شامل پل‌ها و تونل‌ها در قالب یک مطالعهٔ موردی نسبت به انتخاب سیستم روسازی اقدام و روی پارامترهای مؤثری مانند نرخ تنزیل و نرخ تورم در محدوده‌های پیشنهادی ادبیات فنی، تحلیل حساسیت صورت گرفته و تأثیر آن بر طول بخش بالاستی، بخش بدون بالاست و توزیع آن‌ها در طول مسیر مطالعه شده است. لازم به ذکر است که هدف اصلی این مقاله، نشان دادن امکان کاربرد مدل توسعه یافته در انتخاب سیستم‌های بالاستی و بدون بالاست است که قطعاً می‌باید بر اساس داده‌های واقعی هزینه دوره عمر در پروژه‌های کشور تدقیق گردد. بر این اساس، پارامترهای نرخ تنزیل و تورم بر مبنای اعداد اعلام شده توسط IRS 70727 در محدوده‌های $0 \le i \le 3$ و $0 \le r \le 8$ در نظر گرفته شده و تأثیر آن بر نوع سیستم روسازی در طول مسیر بررسی شده است. در ادامه متدلوژی تحقیق صورت گرفته در قالب یک فلوچارت نشان داده شده است.

توسعهٔ مدل جهت انتخاب سیستم روسازی

در این بخش، بر مبنای سند IRS 70727 پیشنهادی توسط UIC، مدلی برای انتخاب سیستم روسازی توسعه داده می‌شود. همان‌طور که در بخش مقدمه بیان شد، در این تحقیق اصلاحاتی

بر روی مدل پیشنهادی در این سند در دو بخش معیارهای فنی و اقتصادی اعمال می‌شود. به طور کلی بر اساس سند مذکور، بررسی میزان مطلوبیت و کارایی گزینه‌های مختلف روسازی در فرایند انتخاب سیستم، در چهار بخش قابل بررسی است:

- شرایط بهره‌برداری و عملکردی؛
- رویکرد فنی زیرساخت‌ها؛
- شرایط زیست‌محیطی؛
- تحلیل اقتصادی.

هدف از سه بخش اول، ارائه محدودیت‌های فنی موجود در طراحی زیرسازی و روسازی است که به هنگام تجاوز از مقدار حدی مشخص شده موجب تغییر در سیستم روسازی می‌شوند. زمانی که هیچ یک از معیارهای فنی به مقادیر حدی تعریف شده نرسند، با ورود به تحلیل هزینه دوره عمر می‌توان نوع روسازی را تعیین نمود.

به طور کلی می‌توان روش ارایه شده در IRS 70727 در انتخاب سیستم روسازی را به دو بخش زیر تقسیم‌بندی کرد:

۱-کنترل مقادیرحدی برای پارامترهای فنی که منجر به قبول یا رد گزینه‌های مختلف روسازی می‌شود.

۲-محاسبه ارزش خالص فعلی سیستم‌های روسازی منتخب در بخش اول (بند۱) و انتخاب سیستم روسازی مناسب.

۲-۱- ارایه معیارهای فنی و اقتصادی در روش پیشنهادی IRS 70727 برای انتخاب سیستم روسازی

ساختار مورد استفاده در IRS 70727، از چهار فاز تشکیل شده است که در هر فاز، بخشی از داده‌های مورد نیاز در تعیین سیستم روسازی به دست می‌آید (جدول۱). لازم به ذکر است تمامی پارامترهای مذکور به صورت مستقیم در فرایند انتخاب روسازی وارد نشده، بلکه تأثیر برخی از آن‌ها به صورت غیرمستقیم در فرایند طراحی لحاظ می‌شود. بنابراین لازم است به منظور بهینه‌سازی انتخاب، گزینه‌های روسازی خط در موقعیت‌های مختلف طراحی با یکدیگر مقایسه شوند تا وابستگی آن‌ها به معیارهای گوناگون، در حین طراحی تعیین گردد. از میان پارامترهای ذکرشده، سه پارامتر «نشست کل»، «ارتفاع خاکریز» و «خطر پرش بالاست» به عنوان معیارهای الزام‌آور در نظر گرفته می‌شوند (جدول۲).

هرچند پارامترهای فنی مهم دیگری در IRS 70727 معرفی شده‌اند که می‌توانند بر انتخاب سیستم روسازی تأثیر بگذارند؛ لیکن در تحقیق حاضر، به دلایل زیر، این پارامترها در روند انتخاب سیستم روسازی لحاظ نشده‌اند:

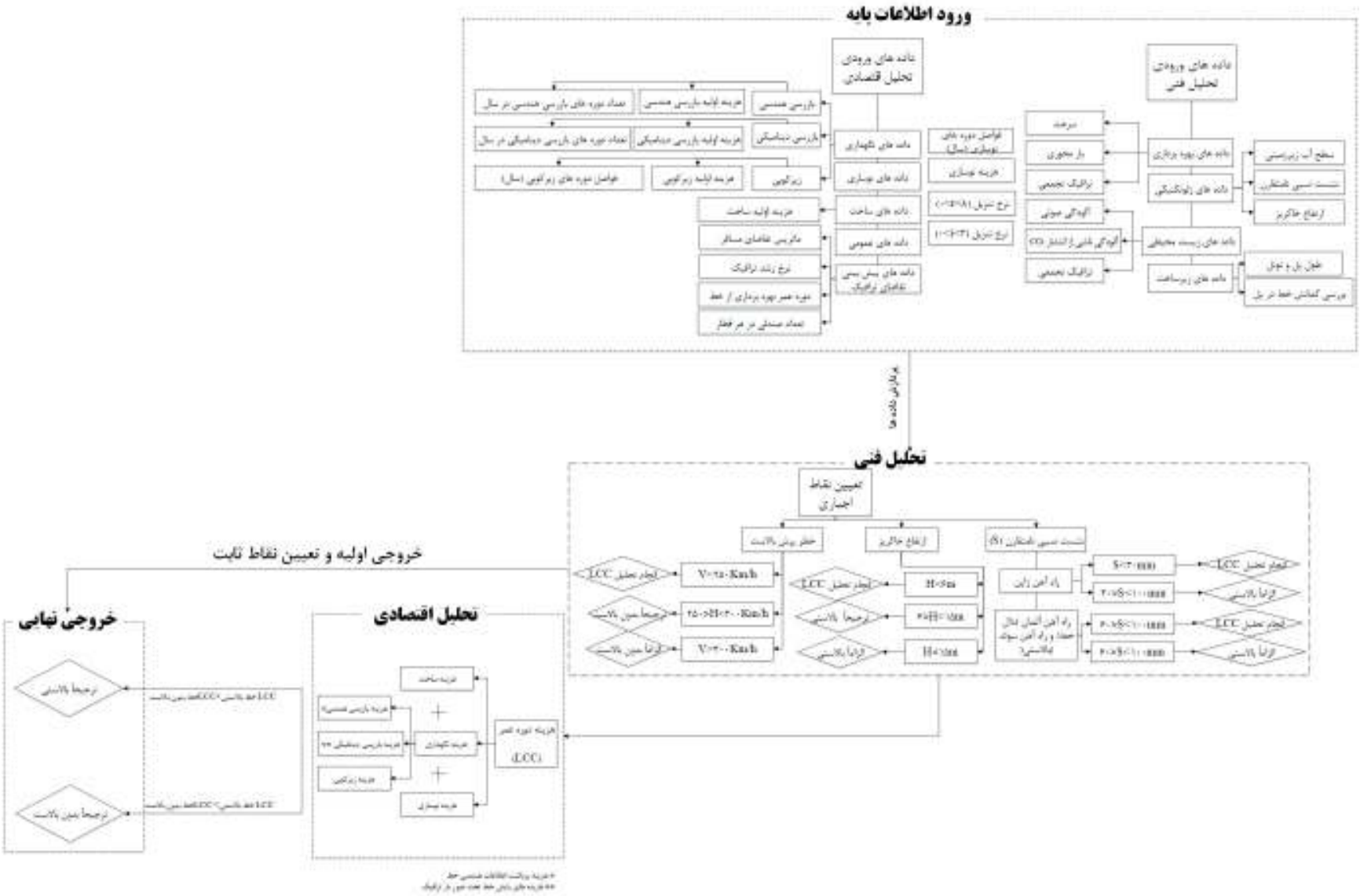
۱-تأثیر پارامتر فنی مورد نظر در هزینه سرمایه‌گذاری اولیه در بخش اقتصادی لحاظ شده و نیازی به بررسی مستقیم آن وجود ندارد.

۲-تأثیر پارامتر در انتخاب روسازی به صورت کیفی در نظر گرفته شده و در IRS 70727 معیار عددی برای آن ارایه نشده است.

۳-برای انجام مطالعهٔ موردی در قالب پروژه راه‌آهن سریع‌السیر تهران-قم-اصفهان داده‌ای برای پارامتر مورد نظر وجود نداشته است.

٤-تأثیر پارامتر مورد نظر به صورت غیر مستقیم و در حین فرایند طراحی پروژه اعمال شده است.

جدول شماره (۱)، وضعیت کلیهٔ پارامترهای فنی ارایه شده در سند IRS 70727 و همچنین پارامترهای انتخاب شده بر اساس معیارهای چهارگانهٔ فوق را برای انجام تحقیق حاضر نشان می‌دهد.



شکل۱. فرایند کلی انتخاب سیستم روسازی

جدول۱. پارامترهای فنی معرفی شده در IRS 70727 (UIC 2021)

پارامتر مورد نظر در فاز پروژه	پارامترهای مورد نیاز		وضعیت دسترسی به پارامتر مورد نظر		علت عدم دسترسی به پارامتر مورد نظر			
			بله	خیر	(۱)	(۲)	(۳)	(٤)
فاز اول: **تعریف روش مورد استفاده و ساختار پروژه**	وضعیت کلی پروژه	- احداث خط جدید یا ارتقای خط موجود	✓					
		- عرض خط	✓					
		- توسعه شهری در مناطق اطراف خط ریلی	✓					
	وضعیت بهره‌برداری	- حداکثر و حداقل سرعت بهره‌برداری	✓					
		- نوع و تراکم ترافیک	✓					
		- حداکثر بارمحوری	✓					
	طراحی اولیه مسیر	- حداقل شعاع قوس دایره‌ای (متر)		×				✓
		- حداقل طول کلوتوئید (متر)		×				✓
		- حداکثر دور (میلی‌متر)		×				✓
		- حداقل طول قوس دایره‌ای (متر)		×				✓
		- حداکثر کسری و اضافه دور (میلی‌متر)		×				✓
		- حداکثر نرخ تغییرات دور		×				✓
		- حداکثر شتاب جانبی خنثی نشده		×				✓
		- حداکثر نرخ تغییرات شتاب جانبی خنثی نشده		×				✓
		- حداکثر شیب		×				✓
		- حداقل شعاع قوس قائم		×				✓
		- حداقل طول موجود بین دو شیب حداقل طول موجود بین دو قوس انتقال قائم		×				✓
	شرایط فیزیکی محلی	- وضعیت زمین‌شناسی منطقه	✓					
		- وضعیت اقلیم‌شناسی منطقه	✓					
		- داده‌های ژئوتکنیکی	✓					
		- تخمین حجم خاکریزی و خاکبرداری مورد نیاز		×				✓
		- تخمین تعداد نیروی انسانی مورد نیاز		×			✓	
	وضعیت زیرساخت‌ها	- طراحی اولیه تونل‌ها		×				✓
		- طراحی اولیه پل‌های دره‌ای		×				✓
	وضعیت زیست‌محیطی	- تعداد و نوع زهکش‌ها، شرایط عمومی هیدرژئولوژی		×				✓
		- حساسیت منطقه نسبت به آلودگی صوتی		×			✓	
		- آلودگی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای		×			✓	

پارامتر مورد نظر در فاز پروژه	پارامترهای مورد نیاز	وضعیت دسترسی به پارامتر مورد نظر		علت عدم دسترسی به پارامتر مورد نظر			
		بله	خیر	(۱)	(۲)	(۳)	(٤)
فاز دوم: **بررسی وضعیت بهره‌برداری و عملکردی**	- عملکرد خط (باری یا مسافری)	✓					
	- مالکیت خط		×	✓			
	- فعالیت‌ها و نیازهای نگهداری		×	✓			
	- رسیدگی به حوادث		×	✓			
فاز سوم: **تعیین ویژگی‌های مختلف خطوط موجود**	- تنظیم ظرفیت باربری جانبی و قائم انواع خطوط		×		✓		
	- حساسیت هر یک از انواع خطوط به نشست و میزان انطباق با نشست پلاستیک	✓					
	- رفتار دینامیکی (بارگذاری دینامیکی بیش از حد معمول) در هر یک از انواع خط		×		✓		
	- صدا و ارتعاشات ناشی از انواع مختلف خطوط		×	✓			
	- ارزیابی آلودگی ناشی از کربن دی اکسید		×			✓	
	- وضعیت سازگاری انواع خطوط با افزایش مقدار دور		×				✓
	- مقاومت مکانیکی		×		✓		
	- خط بالاست پرنده	✓					
	- هزینه نگهداری از خط		×	✓			
	- تحلیل نواحی انتقال		×		✓		
	- برنامه‌ریزی نوسازی خط		×	✓			
	- تکنیک‌های بهسازی بستر		×		✓		
	- حد سرویس دهی در پل‌ها		×		✓		
	- اندرکنش طولی خط و پل		×		✓		
فاز چهارم: **ارزیابی مطلوبیت گزینه‌های روسازی**	- ارایه آستانه‌های فنی که منجر به رد برخی از سیستم‌های خطوط می‌شود.	✓					
	- محاسبه تأثیر اقتصادی (افزایش یا کاهش هزینه) انتخاب سیستم روسازی بر طراحی اولیه زیرساخت و بودجه تعیین شده برای طراحی اولیه.	✓					

جدول ۲. معیارهای فنی الزام آور در انتخاب سیستم روسازی (UIC 2021)

معیارهای فنی الزام‌آور	نام کشور	معیار فنی	حد آستانه
نشست کلی خاکریز (S)	راه‌آهن ژاپن	خط بالاستی روی خاکریز	S<۱۰۰ میلی‌متر
		دال‌خط روی خاکریز	S<۳۰ میلی‌متر
	راه‌آهن آلمان	حداکثر نشست دال خط	S<۶۰ میلی‌متر
		حداکثر نشست نسبی نامتقارن دال خط در طول ۱۰ متر	S<۲۰ میلی‌متر
	راه‌آهن سوئد	حداکثر نشست خط بالاستی روی خاکریز	S<۱۰۰ میلی‌متر
		حداکثر نشست دال‌خط	-
ارتفاع خاکریز	خاکریز با ارتفاع کمتر از ۶ متر		بالاستی و بدون بالاست
	خاکریز با ارتفاع بالاتر از ۶ متر و کمتر از ۱۵ متر		بالاستی و بدون بالاست (مشروط بر استفاده از تکنیک‌های بهسازی زیرسازی در خط بدون بالاست)
	خاکریز با ارتفاع بالاتر از ۱۵ متر		بالاستی
خطر بالاست پرنده (V: سرعت حرکت قطار)	V≤۲۵۰ کیلومتر برساعت		بالاستی یا بدون بالاست
	۲۵۰<V≤۳۰۰ کیلومتر برساعت		ترجیحاً بدون بالاست
	V>۳۰۰ کیلومتر برساعت		بدون بالاست

در تحلیل هزینه دوره عمر، تمام هزینه‌های ناشی از مالکیت، بهره‌برداری، نگهداری و در نهایت هزینهٔ بازیافت مصالح پروژه در نظر گرفته می‌شود. تحلیل هزینه دوره عمر، ارزیابی به مراتب بهتری از تأثیر هزینه بلندمدت یک پروژه نسبت به روش‌های اقتصادی جایگزین که بر هزینه‌های اولیه یا هزینه‌های مربوط به بهره‌برداری در کوتاه مدت تمرکز دارند، ارائه می‌دهد. مهم‌ترین پارامترهای مورد استفاده در تحلیل هزینه دوره عمر و روابط مربوط به هر یک از آن‌ها در جدول ٤ نشان داده شده است.

نکته حائز اهمیت آن است که، لازم نیست همه هزینه‌های مربوط به پروژه در محاسبات LCC وارد شود، بلکه تنها ورود به هزینه‌های مربوط به ساخت، نگهداری و بازسازی و هزینه‌هایی که از یک سیستم به سیستم دیگر تغییر می‌یابد، کفایت می‌کند. گنجاندن هزینه‌هایی که در سیستم‌های روسازی مختلف تقریباً یکسان هستند، منجر به حصول نتیجه اشتباه نخواهد شد، اما می‌تواند نیازمند به جمع‌آوری داده‌های اضافی و تحلیل هزینه‌های مربوطه باشد، فلذا می‌توان برای کاهش زمان ارزیابی از آن صرف نظر کرد. لازم به ذکر است که نتایج حاصل از تحلیل هزینه دوره عمر یکی از شروط لازم در تصمیم‌گیری نهایی است، اما تنها شرط لازم به شمار نمی‌رود.

تحلیل هزینه‌ها در طول دورهٔ عمر زیرساخت (که معمولاً ۱۰۰ سال است)، با در نظر گرفتن دوره مختلف عمر اجزای خط به صورت جداگانه انجام می‌شود. فلذا باید در نظر داشت که دوره عمر خط بالاستی بین ۳۰-٤۰ سال (به طور میانگین ۳۵ سال) و دوره عمر دال‌خط حداقل ٦۰ سال است.

بازسازی نیز زمانی انجام می‌شود که اجزای مختلف خط به پایان دوره عمر خود رسیده باشند. در جدول ۳، دوره عمر اجزای مختلف خط بالاستی و بدون بالاست نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در تحقیق حاضر همانند آنچه که در سند IRS 70727 مشاهده می‌شود، دوره‌های عمر مشخص شده در جدول ۳، مستقیماً در انتخاب سیستم روسازی دخالت داده نشده است، بلکه دوره عمر تمامی اجزای تشکیل دهنده خط با یکدیگر برابر در نظر گرفته شده و همان مقدار دوره عمر خط می‌باشد (UIC, 2021). به علاوه، هزینه‌های نوسازی مسیر نیز با هزینه‌های ساخت (هزینه برچیدن مسیر قدیمی و تنظیم زیرسازی برای روسازی جدید) برابر در نظر گرفته شده است.

جدول ۳. دورهٔ عمر اجزای روسازی بالاستی و بدون بالاست

خط بالاستی (سال)					خط بدون بالاست (سال)				
بستر	لایه بالاست	تراورس	ادوات اتصال	ریل	بستر	لایه بتنی	تراورس (در صورت وجود)	ادوات اتصال	ریل
۱۰۰	۳۰	٤۰	۳۰–۱۰	۳۵	۱۰۰	٦۰	٤۰	۳۰–۱۰	۳۵

جدول ٤. معیارهای اقتصادی مورد استفاده در تحلیل انتخاب سیستم

پارامتر هزینه	هزینه اولیه			
هزینه ساخت (€/کیلومتر)	بالاستی ($C_{construction}$)	۱۲۰۰۰۰۰	$LCC_{construction} = \sum_{t=0}^{100} \frac{C_{construction}(1+i)^t}{(1+r)^t}$ (۱)	
	بدون بالاست ($C_{construction}$)	۲۰۰۰۰۰۰	t: سال r : نرخ تنزیل (٪۸>r>۰) i :نرخ تورم(٪۳>i>۰)	
هزینه نگهداری (€/متر)	بازرسی هندسی ($C_{geom.insp}$)	فرانسه	۰,٦۹	$LCC_{geom.insp} = \sum_{t=0}^{N} \frac{C_{geom.insp} \times n_{insp} \times (1+i)^t}{(1+r)^t}$ (۲)
		اسپانیا	۰,۰۲۱	n_{insp}: تعداد بازرسی های هندسی در سال N: سال نوسازی بالاست
	بازرسی دینامیکی ($C_{din.insp}$)	فرانسه	۰,۰٦۹	$LCC_{din.insp} = \sum_{t=0}^{N} \frac{C_{din.insp} \times n_{insp} \times (1+i)^t}{(1+r)^t}$ (۳)
		اسپانیا	۰,۰۲۱	N: سال نوسازی بالاست n_{insp}: تعداد بازرسی های دینامیکی در سال
	هزینه زیرکوبی ($C_{tamping}$)	فرانسه	۲٦	$LCC_{tamping} = \sum_{t=0}^{N} \frac{C_{tamping} \times (1+i)^t}{(1+r)^{\frac{T_i^{accum}}{T_{year}}}}$ (٤)
		اسپانیا	۹,۵	T_i^{accum}: تناژ تجمعی سالانه در i امین سال زیرکوبی T_{year}: تناژ تجمعی سالانه
	هزینه عدم دسترسی			برآورد این هزینه دشوار است، زیرا به عوامل متعددی مانند تجهیزات تعمیر و نگهداری، تیم‌های منابع انسانی و ... بستگی دارد.
هزینه نوسازی (€/کیلومتر)	بالاستی		۱۲۰۰۰۰۰	$LCC_{renewal} = \sum_{t=0}^{N} \frac{C_{renewal} \times (1+i)^t}{(1+r)^{\left[\frac{T_{renewal}}{T_{year}}\right]}}$ (۵)
	بدون بالاست		۲۰۰۰۰۰۰	$C_{renewal}$: هزینه نوسازی هر بخش $T_{renewal}$: تناژ تجمعی تا سال بازسازی بالاست

جدول ۵. معیارهای زمانی مورد استفاده در تحلیل اقتصادی

	راه آهن فرانسه	راه آهن اسپانیا	راه آهن ایتالیا	راه آهن آلمان
دوره بازرسی هندسی	۳ ماه	۱۲ ماه	۱۲ ماه	۲ ماه
دوره بازرسی دینامیکی	۳ هفته	۳ هفته	۳ هفته	٦ ماه

۲-۲- روند توسعه مدل کامپیوتری IRSST برای انتخاب سیستم روسازی در راه‌آهن ایران

بنا بر آنچه که در بخش ۲-۱ بیان شد، مطابق با شرایط حاکم بر راه‌آهن ایران، مدل کامپیوتری IRSST، در بستر Python توسعه داده شد.

قسمت‌های اصلی این مدل مطابق با فلوچات ارایه شده در شکل ۱ عبارتند از:

ورود اطلاعات پایه :

در این بخش دو دسته اطلاعات به عنوان ورودی مدل کامپیوتری به شرح زیر فراخوان می‌شوند:

-اطلاعات ماتریس تقاضای مسافر: با دریافت تعداد شهرها و تقاضای مسافر بین شهرهایی که خط از آن‌ها عبور می‌کند، ماتریس تقاضای مسافر براورد می‌شود. سپس با دریافت افق مورد نظر و نرخ رشد ترافیک (نسبت ترافیک موجود در سال افق به ترافیک موجود در سال اول بهره‌برداری) از کاربر، ماتریس تقاضای مسافر در سال افق به صورت تخمینی قابل محاسبه است. با وارد کردن تعداد صندلی موجود در هر قطار توسط کاربر، تعداد قطار مورد نیاز در هر سال تخمین زده شده و به کمک این مقدار و نیز بار محوری قطار می‌توان تناژ سالانه عبوری از روی خط را محاسبه نمود. از تناژ سالانه عبوری در محاسبات مربوط به رابطهٔ (٤) و (٥) جدول ٤ استفاده می‌شود.

-ورود اطلاعات فنی: معیارهای فنی الزام آور (جدول ۲) و داده‌های فنی بخش مورد مطالعه، به عنوان ورودی ثانویه درنظر گرفته می‌شود.

- از طریق مقایسه داده‌ها با مقادیر آستانه، وضعیت «نقاط اجباری» تعیین می‌شود. نقاط اجباری نقاطی هستند که نوع روسازی در آن‌ها به دلیل وجود محدودیت فنی، پیش از ورود به تحلیل اقتصادی معین می‌شود.

- به کمک روابط و داده‌های موجود در جدول ۳ و ٤، تحلیل اقتصادی بر روی سایر نقاط انجام می‌شود. بدین منظور پس از تعیین مجموع هزینهٔ دورهٔ عمر خط بالاستی و بدون بالاست، مقایسه‌ای بین این مقادیر در طول دوره عمر زیرساخت (معمولاً ۱۰۰ سال) انجام شده و خطی که هزینه کمتری را در این دورهٔ زمانی در پی داشته باشد، به عنوان روسازی مطلوب انتخاب می‌شود.

۳-انتخاب سیستم روسازی پروژه راه‌آهن پرسرعت تهران- قم- اصفهان

با توجه به نیاز به سرمایه‌گذاری بالا در پروژه راه‌آهن پرسرعت تهران- قم- اصفهان و حساسیت‌های فنی موجود در خطوط پرسرعت، اجرای فرایندی که بتواند با توجه به نیازهای فنی و اقتصادی پروژه به صورت توأمان، انتخاب مناسبی را از میان گزینه‌های روسازی ارائه دهد، ضروری می‌نماید. لذا در ادامه، ضمن معرفی کلی پروژه، روند انتخاب سیستم روسازی در بخش منتخب مورد بررسی قرار داده شده و در عین حال نتایج تحلیل حساسیت روی پارامترهای مؤثر مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. نتایج این بخش در قالب طول بخش بالاستی، طول بخش بدون بالاست و توزیع آن‌ها در طول پروژه ارایه می‌گردد.

۳-۱- معرفی پروژه راه‌آهن پرسرعت تهران- قم- اصفهان

پروژه راه‌آهن تهران- قم- اصفهان به طول کل ٤٠٥,٢١٨ کیلومتر از ایستگاه راه آهن تهران شروع شده و پس از عبور از شهرهای قم، دلیجان و میمه، به اصفهان ختم می‌شود (Construction and development of transportation, 2017). بخش‌های تشکیل‌دهنده این مسیر عبارتند از (شکل۲).

(۱) بخش تهران- قم، در قسمت DK0+000- DK157+891.125 به طول ساخت ۱٦٤,۲٥۱ کیلومتر؛

(۲) بخش قم -اصفهان، در قسمت GK0+000– GK241+257.081 به طول ۲٤۰,۹٦۷ کیلومتر؛

(۳) خط اتصال جمکران- قم، در قسمت TZK0+000– TZK11+241.89 به طول۱۱,۲٤۲ کیلومتر؛

(٤) امتداد خط اصفهان به سمت پایانه کاوه، در بخش DZK0+000–DZK8+750.66 به طول ۸,۷٥۱ کیلومتر.

(٥) امتداد خط تهران به سمت مرکز شهر، در بخش AK0+000 –AK11+666 به طول ساخت ۱۱,٦٦٦ کیلومتر.

این خط از منطقه دشت آبرفتی واریزه‌ای تهران، قم و اصفهان، منطقه دریاچه‌ای دریاچه نمک و منطقه تپه‌ای کم‌عمق متشکل ازسنگ‌های رسوبی عبور می‌کند. ارتفاع از سطح دریا از ۸۰۳ تا ۲۲۰۰ متر متغیر بوده و سرعت بهره‌برداری از خط ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت است.

۳-۲- اطلاعات فنی بخش مورد مطالعه

بخش مورد مطالعه در مسیر قم- اصفهان و در قطعهٔ GK5+000–GK29+110 قرار گرفته است. طول کل این بخش ۲٤۱۱۰ متر و در حدود ۲۰ کیلومتری جنوب غربی استان قم قرار دارد. توپوگرافی بخش GK5+000–GK17+000 نسبتاً هموار و یا دارای ارتفاع کم است. بخش GK 17 + 000 ~ GK 29 + 110 دارای توپوگرافی با ارتفاع زیاد است. این بخش از مسیر بر روی بستر زمین طبیعی، پل و تونل قرار دارد و حداکثر ارتفاع خاکریزی حدود ۱۲ متر و حداکثر عمق خاکبرداری ۳۱ متر است. آب زیرزمینی منطقه عمدتاً در سنگ بستر و در محل انحلال سنگ‌های آهکی درون زمین قرار گرفته است. سطح آب زیرزمینی در پنج منطقه (شامل ۱۸ نقطه) به کمک حفاری اندازه‌گیری شده و نتایج حاصل از آن نشان می‌دهد که سطح آب زیرزمینی در سایر نقاط بیشتر از ۱۵ متر است (Construction and development of transportation, 2018).

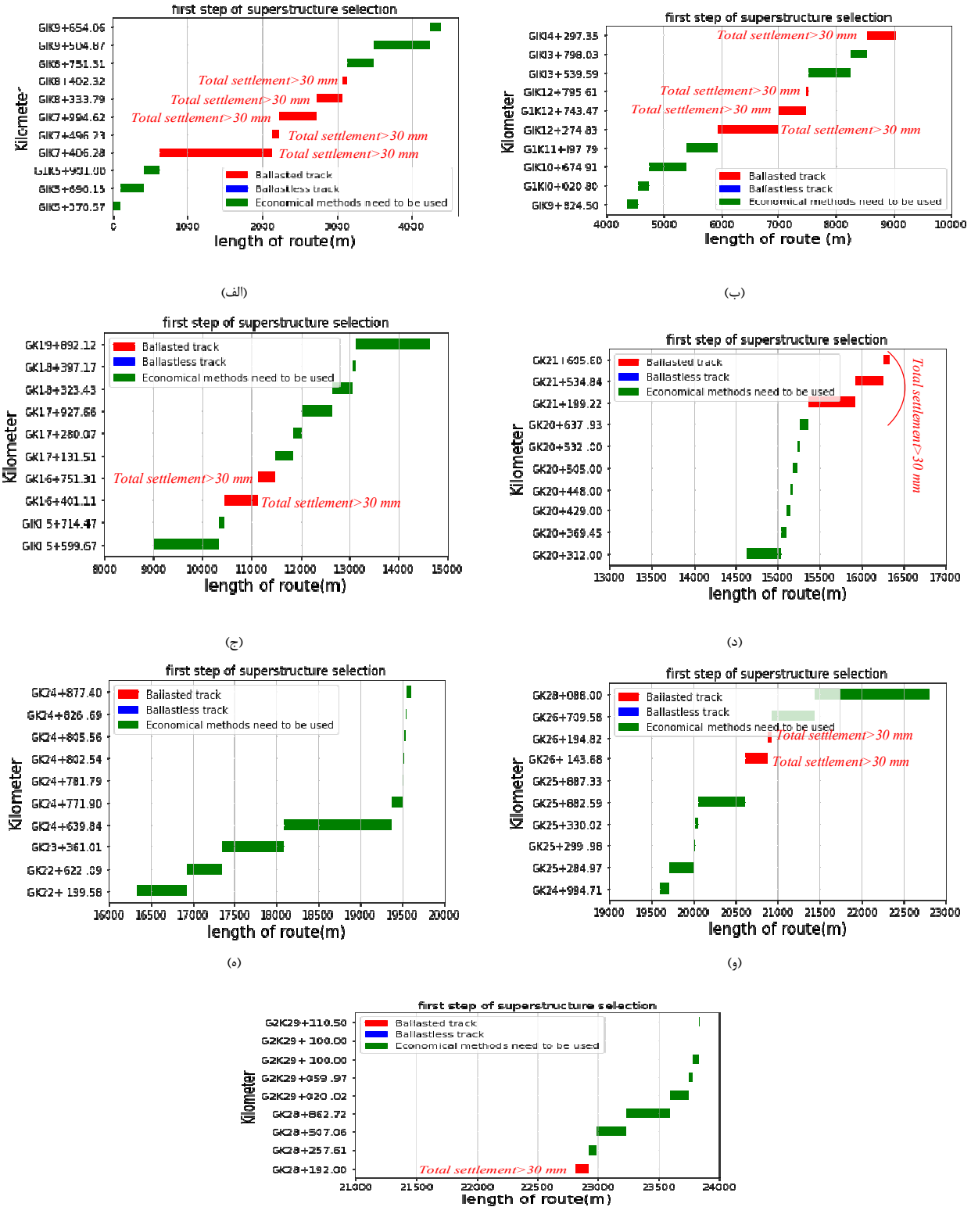
شکل۲. شمای کلی مسیر راه‌آهن پرسرعت تهران- قم- اصفهان و محدودهٔ مورد مطالعه (Design 2018)

جدول ٦. مهم‌ترین مشخصه‌های موجود در قطعهٔ GK5+000–GK29+110 (مترا)

پل		کیلومتراژ پل		دهانه پل	
	(۱)	GK20+500		$5 \times 18m$	
	(۲)	GK28+142		$5 \times 18m$	
تونل		کیلومتراژ تونل		طول تونل (متر)	
	(۱)	GK24+805		54.79	
	(۲)	GK29+00		90.48	
نقاط بحرانی سطح آب زیرزمینی		کیلومتراژ	سطح آب زیرزمینی (متر)		کیلومتراژ	سطح آب زیرزمینی (متر)
	(۱)	GlK8+402.32	7.3	(۱۰)	GK24+802.54	4.7
	(۲)	GlK8+751.31	7	(۱۱)	GK24+805.56	4
	(۳)	G1K12+275.00	3.5	(۱۲)	GK24+826.69	5.5
	(٤)	G1K12+796.00	5	(۱۳)	GK24+877.40	7.3
	(٥)	GK20+429.00	1	(١٤)	GK24+994.71	1.8
	(٦)	GK20+448.00	0.2	(١٥)	GK28+088.00	14
	(۷)	GK20+505.00	1.5	(١٦)	GK28+192.00	9
	(۸)	GK24+771.90	3.8	(۱۷)	G2K29+100.00	8.4
	(۹)	GK24+781.79	5.8	(۱۸)	G2K29+100.00	5.6
نقاط بحرانی نشست کلی		کیلومتراژ	نشست کل (میلی‌متر)		کیلومتراژ	نشست کل (میلی‌متر)
	(۱)	GlK7+406.28	123.84	(۱۰)	GK16+401.11	36.04
	(۲)	GlK7+496.23	123.84	(۱۱)	GK16+751.31	76.94
	(۳)	GlK7+994.62	123.84	(۱۲)	GK21+199.22	73.57
	(٤)	GlK8+333.79	123.84	(۱۳)	GK21+534.84	88.51
	(٥)	GlK8+402.32	123.84	(١٤)	GK21+605.60	91.06
	(٦)	GlK12+274.83	52.72	(١٥)	GK26+ 143.68	37.25
	(۷)	G1K12+743.47	98.60	(١٦)	GK26+194.82	66.17
	(۸)	GlK12+795.61	116.62	(۱۷)	GK28+192.00	54.6
	(۹)	GIKl4+297.35	35.9			

۳-۳- انتخاب اولیه سیستم روسازی بر مبنای معیارهای الزام‌آور

همانطور که در جدول ۲ گفته شد، در گام نخست بر مبنای معیارهای الزام‌آور، بخش‌هایی از خط که می‌بایست در آن‌ها روسازی خاصی طراحی و اجرا شود، تعیین می‌گردد. در شکل ۳، نتایج حاصل از بررسی اولیه بر مبنای معیارهای فنی الزام‌آور و تعیین نقاط اجباری مبتنی بر آن نشان داده شده است. همانطور که مشخص شده است، روسازی تمامی نقاط اجباری از نوع بالاستی است، به بیان دیگر، هیچ یک از معیارهای فنی، بر لزوم اجرای روسازی بدون بالاست در بخش مورد مطالعه دلالت نمی‌کنند. به علاوه، تنها عامل تأثیرگذار بر انتخاب خط بالاستی در این بخش‌ها، بالابودن مقدار نشست کل است و در این پروژه، دو عامل دیگر از حالت حدی خود تجاوز نکرده‌اند.



(الف)

(ب)

(ج)

(د)

(ه)

(و)

(ز)

شکل۳. تعیین نقاط اجباری در بخش مورد مطالعه

۳-۳- تحلیل حساسیت روی پارامترهای مؤثر بر انتخاب سیستم روسازی

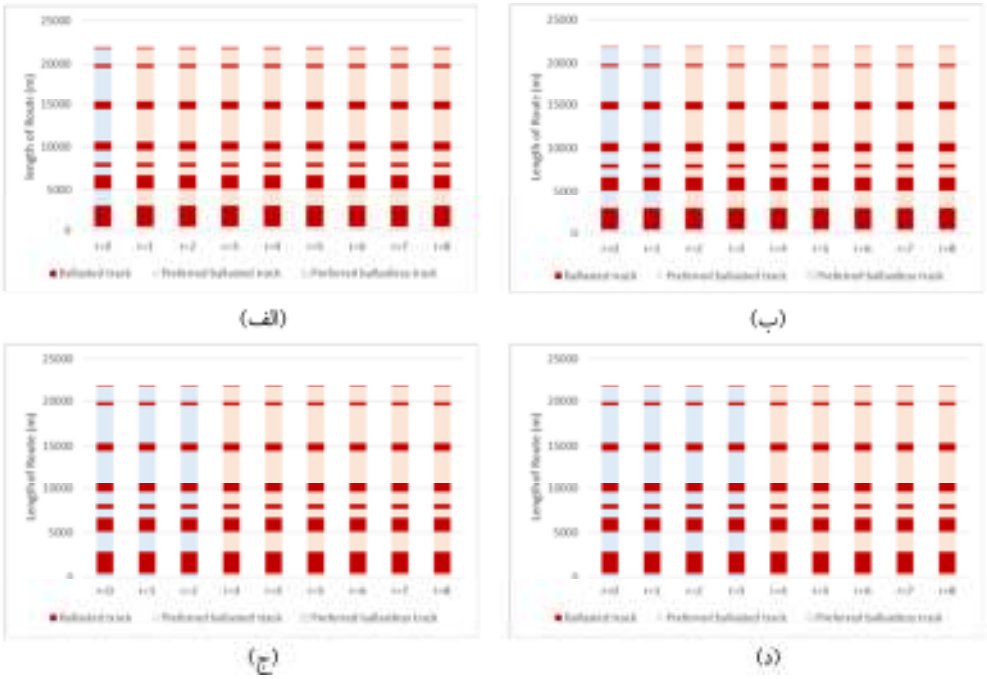
با توجه به مدل ارایه شده در سند IRS 70727، دو پارامتر نرخ تورم و نرخ تنزیل مهم‌ترین اثر را در تحلیل اقتصادی انتخاب سیستم روسازی ایفا می‌کنند. منظور از نرخ تنزیل، میزان تغییرات در افتی است که ارزش سرمایه در طول زمان نسبت به ارزش امروز آن تجربه می‌کند، در حالی که نرخ تورم، برابر است با تغییرات نسبی در شاخص قیمت که معمولاً شاخص قیمت مصرف‌کننده است.

از آن‌جا که مطابق با معیارهای فنی ارایه شده، نوع سیستم روسازی در بعضی از قطعات مسیر مشخص شده است، در این بخش با فرض دوره عمر زیرساخت برابر با صد سال، محاسبات مربوط به هزینه دورهٔ عمر انجام شده و بر اساس آن، نوع سیستم روسازی در سایر قطعات مسیر مشخص شده است. با توجه به اهمیت قابل توجه مقادیر نرخ تورم و نرخ تنزیل، با تغییر این دو پارامتر در بازه ٪۸≤r≤٪۰ و ٪۳≤i≤٪۰، تأثیر آن‌ها بر هزینه دوره عمر و نوع سیستم روسازی در بقیه مسیر مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته و نتایج در قالب طول سیستم روسازی بالاستی و بدون بالاست، اختلاف هزینهٔ دوره عمر روسازی و پراکندگی سیستم روسازی بالاستی و بدون بالاست در طول مسیر ارائه شده است. در ادامه روی هر یک از نتایج به دست آمده توضیحاتی ارایه می‌شود.

۳-۳-۱- تأثیر نرخ تنزیل و تورم بر طول سیستم روسازی

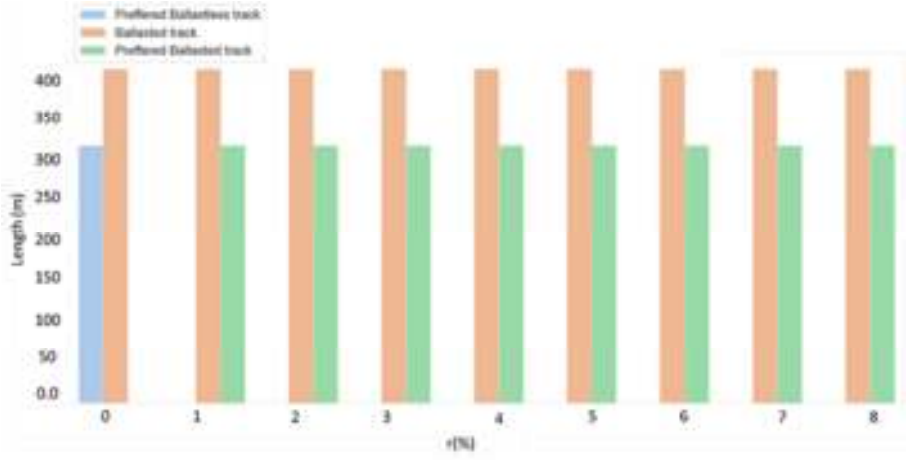
مطابق شکل ٤، بر اساس معیارهای فنی و نقاط اجباری تنها امکان استفاده از روسازی بالاستی وجود دارد، به بیان دیگر، در این نقاط، اجرای روسازی بدون بالاست با محدودیت فنی مواجه است. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود، نقاط اجباری که با رنگ ■ مشخص شده‌اند، نشان‌دهندهٔ استفاده اجباری از روسازی بالاستی می‌باشند. تعیین تکلیف سیستم روسازی در سایر نقاط، تابع پارامترهای i و r می‌باشد.

لذا با بررسی هزینه دوره عمر برای بقیه نقاط مسیر، ترجیح بر استفاده از روسازی بالاستی در برخی نقاط و در سایر نقاط ترجیح بر استفاده از روسازی بدون بالاست خواهد بود که این موضوع مشخصاً تابع نرخ تنزیل و تورم انتخاب شده می‌باشد. با توجه به تغییر پارامترهای i و r در محدوده‌های پیش‌گفته، رنگ‌های ■ و ■ در شکل شماره ٤، به ترتیب نواحی روسازی ترجیحاً بالاستی و ترجیحاً بدون بالاست را نشان می‌دهد.

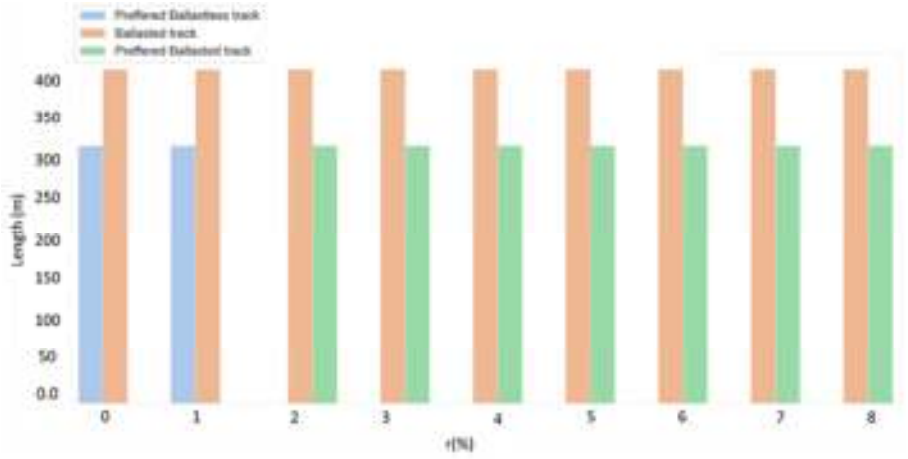


شکل٤. تأثیر نرخ تنزیل (r) و نرخ تورم (i) بر انتخاب سیستم روسازی ((الف) i=۰ (ب) i=۱ (ج) i=۲ (د) i =۳ درصد)

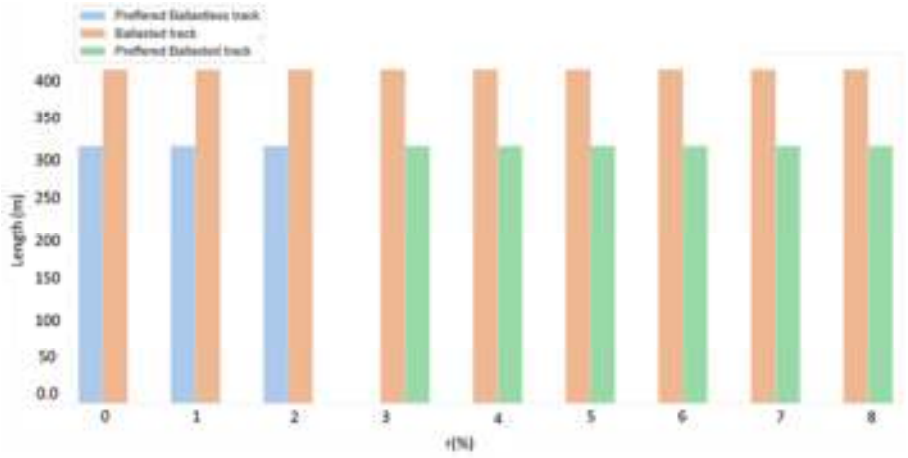
به کمک شکل ٤ و محاسبه مجموع طول خطوط بالاستی، ترجیحاً بالاستی و ترجیحاً بدون بالاست، نمودارهای موجود در شکل ۵ حاصل می‌شود که در آن رنگ ■، ■ و ■ به ترتیب معرف موارد فوق‌الذکر است.



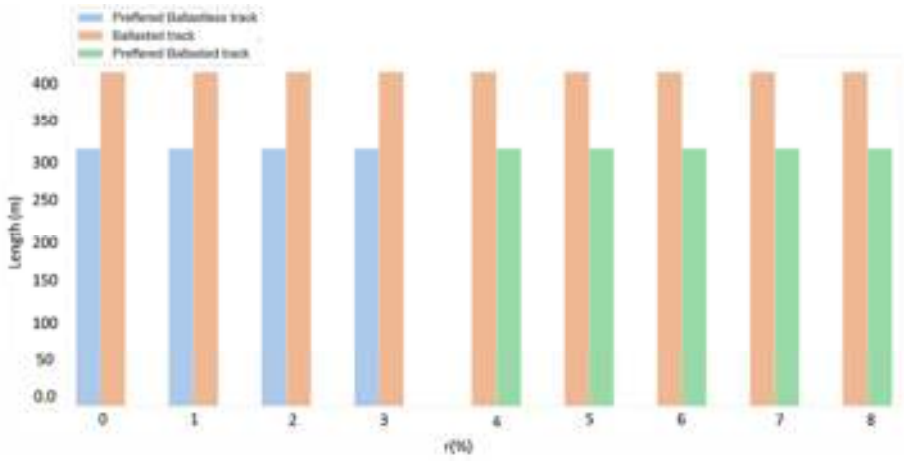
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

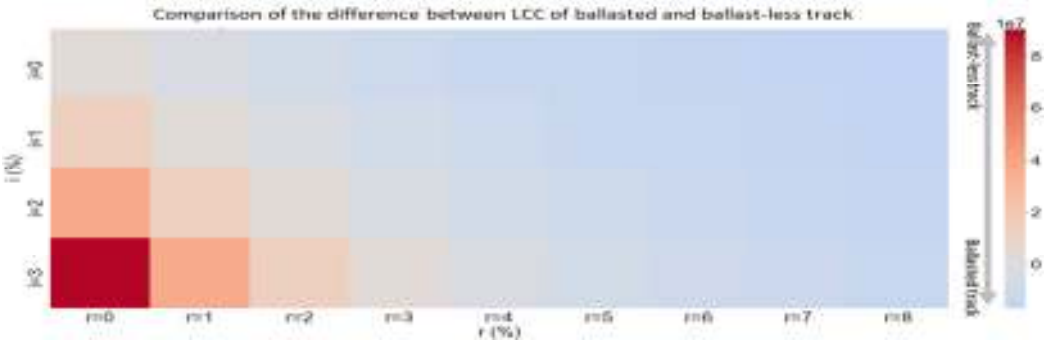
شکل۵. تأثیر نرخ تنزیل و تورم بر طول سیستم روسازی ((الف)۰=i (ب) ۱=i(ج)۲=i (د)۳= i درصد)

همانطور که در شکل ۵ ملاحظه می‌شود، با افزایش نرخ تنزیل در نرخ تورم ثابت، روند انتخاب سیستم روسازی از بدون بالاست به بالاستی تغییر خواهد یافت. به بیان دیگر می‌توان ادعا کرد. تا زمانی که نرخ تنزیل کمتر از نرخ تورم است، افت ارزش سرمایه در طول زمان بر سود سرمایه‌گذاری غالب خواهد بود. بدین معنا که اگر هزینه نوسازی خط در سال نوسازی آن، به ارزش فعلی آن در سال ساخت پروژه برگردانده شود، بسیار بیشتر از هزینه ساخت خط در سال اول خواهد بود و با توجه به نیاز خط بالاستی به دو دوره نوسازی در طول ۱۰۰ سال، این افزایش هزینه در خط بالاستی چشمگیرتر است. بنابراین در این حالت، روسازی بدون بالاست به عنوان روسازی مطلوب انتخاب می‌شود. از طرف دیگر، در صورتی که نرخ تنزیل بیشتر از نرخ تورم باشد، سود حاصل از سرمایه گذاری در سال اول بر کاهش ارزش سرمایه در طول زمان غلبه نموده و با برگرداندن هزینه اولین دوره نوسازی به ارزش فعلی آن در سال اول ساخت، کمتر از هزینه ساخت (سرمایه‌گذاری اولیه پروژه) خواهد بود. در چنین مواردی، هزینه ساخت نقش مهمی در هزینه دوره عمر سیستم روسازی ایفا نموده و خط بالاستی، به دلیل هزینه ساخت کمتر، به عنوان روسازی مطلوب انتخاب می‌شود.

۳-۳-۲- تأثیر نرخ تنزیل و تورم بر اختلاف هزینه دوره عمر سیستم روسازی

مطابق شکل ۱، در گام نهایی انتخاب سیستم روسازی، نوع روسازی نقاط باقیمانده با محاسبه اختلاف هزینهٔ دوره عمر روسازی بالاستی و روسازی بدون بالاست در دوره عمر صد ساله تعیین می‌شود. همانطور که در شکل ٦ نشان داده شده است، اختلاف LCC بین خط بالاستی و بدون بالاست، هنگامی که نرخ تنزیل کمتر از نرخ تورم است، دارای مقدار منفی است. بدین معنا که هزینه دوره عمر خط بدون بالاست کمتر از خط بالاستی است. در این مواقع، روسازی بدون بالاست به عنوان روسازی ارجح انتخاب می‌شود. این در حالی است که اگر نرخ تورم کوچک‌تر از نرخ تنزیل باشد، اختلاف LCC بین دو مسیر بالاستی و بدون بالاست عددی مثبت است و روسازی بالاستی روسازی مطلوب خواهد بود.

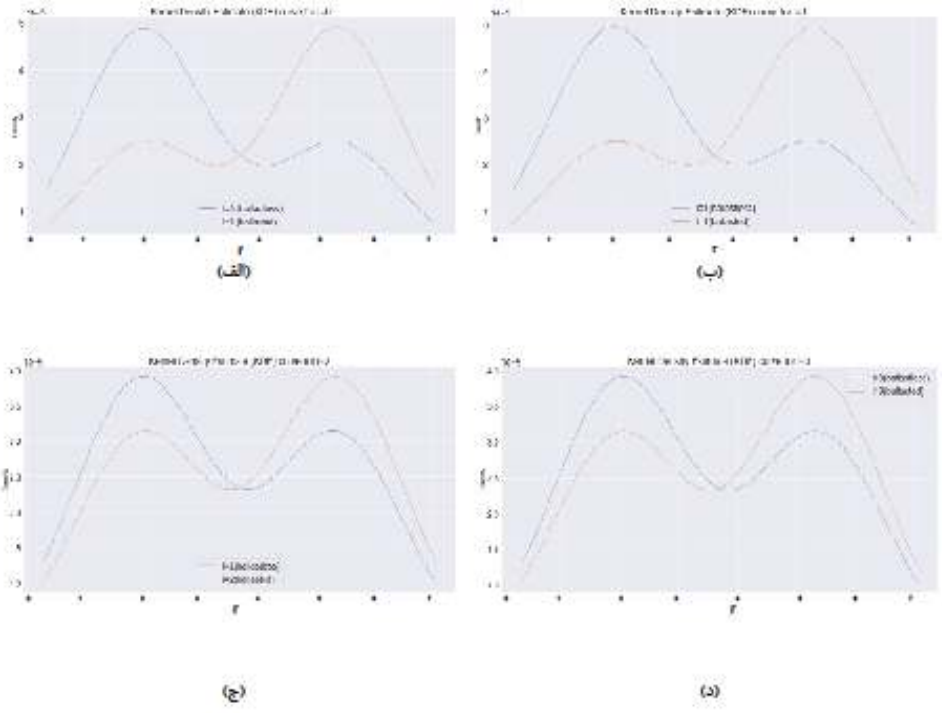
با توجه به شکل ٦ می‌توان این گونه استنباط نمود در حالتی که مقدار نرخ تنزیل و تورم صفر است، ارزش سرمایه در طول زمان ثابت خواهد ماند و از سوی دیگر، شاخص قیمت نیز تغییر نخواهد کرد. در چنین مواقعی، اجرای روسازی بدون بالاست به لحاظ اقتصادی مطلوب‌تر از روسازی بالاستی است.



شکل ٦. تأثیر نرخ تنزیل و تورم در اختلاف هزینه دوره عمر انواع روسازی

۳-۳-۳- بررسی توزیع سیستم روسازی در طول مسیر

همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، توزیع نوع روسازی در نرخ تورم صفر و۱ یکسان است. در نرخ تورم ۲ و ۳ نیز همین وضعیت مشاهده می‌شود. در هر چهار نمودار، تا زمانی که نرخ تنزیل از ۳ درصد کمتر است، تراکم روسازی بدون بالاست از روسازی بالاستی بیشتر است، لیکن با عبور از نقطه تلاقی نمودارها، تراکم روسازی بالاستی به تدریج افزایش یافته تا آنجا که تقریباً در نرخ تنزیل ۵ درصد، به حداکثر مقدار خود می‌رسد. در حالتی که نرخ تورم برابر با ۱ یا ۲ است، اختلاف تراکم دو نوع روسازی نسبت به نرخ تورم ۰ و ۱ کاهش می‌یابد. علت کاهش اختلاف تراکم در این دو حالت ناشی از افزایش نرخ تورم و در نتیجه، افزایش شاخص قیمت نسبت به نرخ تورم ۰ و ۱ درصد می‌باشد.



شکل۷. وضعیت توزیع نوع روسازی در طول مسیر

۵-نتیجه‌گیری

با توجه به آن که انتخاب سیستم روسازی از منظر بهینه‌سازی هزینه‌های ساخت، نگهداری و بازسازی دارای اهمیت ویژه‌ای است، تدوین روشی دقیق و مدون در انتخاب سیستم روسازی پروژه‌های ریلی در کشور ضروری به نظر می‌رسد. لذا در پژوهش پیش رو، با بررسی و تحلیل انتخاب روسازی در پروژه راه‌آهن سریع‌السیر تهران- قم- اصفهان در محدودهٔ Km 5 + 000~Km 29 + 110، با اعمال تغییراتی در معیارهای معرفی شده توسط IRS 70727 و متناسب‌سازی این سند با شرایط موجود در کشور، مدل کامپیوتری IRSST بر مبنای دو دسته معیارهای فنی و اقتصادی توسعه داده شد. در پایان بر روی پارامترهای مؤثر بر انتخاب سیستم روسازی مانند نرخ تنزیل و نرخ تورم در محدوده‌های پیشنهادی ادبیات فنی، تحلیل حساسیت صورت گرفت و تأثیر آن بر طول بخش بالاستی و بدون بالاست و توزیع آن‌ها در طول مسیر بررسی شد. نتایج حاصل از این پژوهش عبارتند از:

- به تمامی بخش‌هایی که در منطقه مورد بررسی، به لحاظ فنی دارای اجبار هستند، روسازی بالاستی اختصاص یافته است. به عبارت دیگر هیچ یک از معیارهای فنی بر لزوم اجرای خط بدون بالاست در بخش مورد مطالعه دلالت ندارند. به علاوه، تنها عامل موثر بر انتخاب خط بالاستی در این بخش‌ها، عامل «نشست» است و دو معیار فنی دیگر در این پروژه از حد مجاز ذکر شده فراتر نرفتند.
- زمانی که نرخ تنزیل کمتر از نرخ تورم باشد، استهلاک سرمایه، سود سرمایه گذاری را تحت الشعاع قرار می‌دهد. بنابراین، سرمایه گذاری بیشتر سود بیشتری به همراه دارد و مسیر بدون بالاست به عنوان روسازی ترجیحی معرفی می‌شود.
- در صورتی که نرخ تنزیل بیشتر از نرخ تورم باشد، سود حاصل از سرمایه‌گذاری در سال اول بر استهلاک سرمایه در طول عمر مسیر غالب است. در چنین مواردی هزینه ساخت نقش مهمی در هزینه دوره عمر سیستم روسازی دارد و معمولاً مسیر بالاستی به عنوان روسازی ترجیحی انتخاب می‌شود.

٦-مراجع

-سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، (۱۳۸٤)، "مشخصات فنی عمومی روسازی راه آهن"، نشریه شماره ۳۰۱.

-میرمحمدصادقی، س.ج.، (۱۳۸۰)، "اصول و مبانی تحلیل و طراحی خطوط بالاستی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران.

-مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، (۱٤۰۱)، "دستورالعمل انتخاب روسازی خطوط راه آهن (بالاستی- بدون‌بالاست)"، (در حال بررسی).

-مهندسین مشاور مترا، "گزارش تحلیل‌های ژئوتکنیکی کیلومتر ۰+۰۰۰ الی ۹۰+۵۰۰ راه آهن سریع السیر قم- اصفهان"، معاونت طرح و توسعه راه‌آهن ایران، وزارت راه و شهرسازی.

-Gailienė, I. and A. Laurinavičius, (2017), "The need and benefit of slab track:case of Lithania, Gradevinar.

-"Construction and development of transportation", (2018), tehran- qom- esfahan high speed railway project, in geological description for section g1k5+000～gk29+000=g2k29+100.

-"Construction and development of transportation, Tehran- Qom- Esfahan High Speed Railway Project", in Engineering Geological Profile of G1K5+000～GK29+000=G2K29+110.

-Fathali, M., (2020), "Selection of high-speed rail track system with a combined LCC-RAMS approach", in railway engineering, Post Doc research Proposal, Iran University of Science and Technology.

-Construction and development of transportation, (2017), "Tehran- Qom- Esfahan High Speed Railway Project", in Preliminary Design: Subgrade.

-Koriath, H., (2004), "Bringing Objectivity into System Decisions between Ballasted Track and Slab Track at Deutsche Bahn", Journal of Transport Geography.

-Orel, E.G., (2019-2020), "Comparison of ballasted and slab track based on LCC analysis in faculty of civil and environmental engineering", Sapienza Universita Di Roma: Roma, Italy.

-UIC, (2021), "Railway Application – Track superstructure decision-making", in IRS 70727.

-SARIK, V., (2018), "Decision-making model for track system of high-speed rail lines, Ballasted track, ballast less track or both? in School of Architecture and Built Environment", KTH Royal Institute of Technology: Stockholm, Sweden.

Developing a Technical-Economical Method for Selection of Railway System (Ballasted/Ballast-less)

Morteza Esmaeili, Professor, School of Railway Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
Marjan Mehvari, M.Sc., Student, School of Railway Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
Masoud Fathali, Assistant Professor, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran.

E-mail: m_esmaeili@iust.ac.ir

Received: January 2023- Accepted: June 2023

ABSTRACT
The railway system selection (ballasted/ballast-less) issue is usually a function of technical criteria and life cycle costs. In this paper, the IRSST decision-making model of railway system selection is developed based on both technical and economic criteria. In this regard, by developing a Python based computer model according to the requirements of IRS 70727, in the first step, the track system in mandatory sections of the route of Qom-Isfahan high speed railway in (Km 5 + 000 ~ Km 29 + 110) area zone was determined based on restrictive technical criteria, and then for other sections of the route, the track system was selected based on life cycle cost (LCC). Since the track system LCC is commonly a function of inflation rate (i) and discount rate (r), the proposed values of these parameters in IRS 70727 were adopted in absence of Iran railway routes accurate data. For sensitivity analysis's purpose, the range of $0 \leq i \leq 3$ and $0 \leq r \leq 8$ was adopted and their effect on LCC and consequently the track system selection was investigated. Finally, the outcomes of the sensitivity analyses were presented in the form of "variation of the track system along the track route", "total length of ballasted and ballast-less systems" and "Kernel density estimation curves (KDE)" for various values of i and r. Definitely it was observed when the discount rate is lower than the inflation rate, the capital depreciation overshadows the investment profits and ballast-less track is introduced as the preferred superstructure. Conversely, in the case that the discount rate is higher than the inflation, the profit from the investment in the first year prevails over the capital depreciation over time and the ballasted track is usually chosen as the preferred superstructure.

Keywords: Railway Superstructure System Selection, Ballasted Track, Ballast-less Track, Technical Criteria, Economic Criteria, Discount Rate, Inflation Rate