ارایه روشی جهت بررسی راهکارهای افزایش ظرفیت مسیرهای ریلی با استفاده از روش بهینه سازی همراه با مطالعه موردی مسیر بادرود- اردکان

مسعودیقینی(مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم وصنعت ایران، تهران، ایران
نریمان نیکو، کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم وصنعت ایران، تهران، ایران
محمد تمنایی، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
E-mail: yaghini@iust.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۱/۱۹ پذیرش: ۱۳۹۱/۰٤/۱۸

چکیده

با توجه به تقاضای روزافزون حمل و نقل ریلی، نیاز به افزایش ظرفیت در گلوگاه های ریلی گریز ناپذیر است. به همین منظور، باید با بکارگیری تمهیدات لازم، مشکل ظرفیتی این مسیرهای ریلی برطرف شود. هدف از این پژوهش، ارایه روشی برای بررسی راهکارهای مناسب جهت افزایش ظرفیت گلوگاههای ریلی است. ظرفیت مسیرهای ریلی به پارامترهای زیرساخت، ناوگان و بهره برداری وابسته است. در این مطالعه، یک مدل بهینه‌سازی جدید بر مبنای جریان چند کالایی برای مدل سازی مسیر ریلی و محاسبه ظرفیت، ارایه شده است. ورودیهای مدل، شامل خصوصیات مسیر ریلی و نوع قطارها است. از جمله مهم ترین محدودیتهای استفاده شده در این مدل می‌توان به محدودیت انواع قطارها و تعداد خطوط پهلوگیری در ایستگاهها اشاره کرد. همچنین در این مقاله، برای ارزیابی عملکرد سناریوهای مختلف افزایش ظرفیت در مسیرهای ریلی، شاخصهای مناسب بر مبنای ظرفیت و هزینه ارایه شده است. از مدل ارایه شده برای ارزیابی راهکارهای مختلف افزایش ظرفیت مسیر ریلی بادرود-اردکان به عنوان یکی از تنگناهای ظرفیتی کشور، استفاده شده است. نتایج مدل نشان می دهد که بر اساس درصد افزایش ظرفیت، احداث دو نقطه جدایی جدید با دو خط پهلوگیری مابین هر دو ایستگاه موجود بهترین گزینه محسوب می شود. بر اساس هزینه افزودن یک قطار، احداث دو نقطه جدایی جدید با یک خط پهلوگیری مابین هر دو ایستگاه موجود بهترین انتخاب است. در نهایت، بر اساس نسبت ظرفیت به هزینه، احداث یک نقطه جدایی جدید (دارای یک خط پهلوگیری) مابین هر دو ایستگاه موجود بهترین انتخاب محسوب می شود.

واژه‌های کلیدی: ظرفیت مسیر، سناریوهای افزایش ظرفیت، برنامه‌ریزی حمل‌ونقل ریلی، بهینه سازی، راه‌آهن ایران

۱. مقدمه

در امور بهره‌برداری از خطوط و شبکه‌های موجود در راه‌آهن، گاهی نرخ بهره برداری از خطوط با توجه به سرمایه‌گذاری کلان در بخش زیرساخت، بسیار اندک است و از طرف دیگر در برخی موارد با توجه به حجم بالای ترافیک، نیاز به توسعه بخشهای زیرساختاری احساس می‌شود. از آنجا که هزینه احداث خطوط جدید بخش عظیمی از هزینه ها را در بر می‌گیرد، باید سعی شود تا از خطوط موجود، بهره‌برداری مناسب به عمل آمده و نیز در صورت نیاز به ایجاد زیرساختهای جدید، این خطوط به صورت بهینه احداث شوند. در این زمینه روشهای محاسبه ظرفیت و نیز روشهای مختلف افزایش ظرفیت، کمک بسزایی در استفاده هرچه بهتر از زیرساختهای موجود و نیز جایابی مناسب‌تر و بهتر زیرساختهای جدید می‌کنند. آشکار است که ظرفیت هر یک از اجزا، در تعیین ظرفیت کل سیستم مؤثر است [Yaghini and Lesan, 2010].

در حال حاضر، برخی از مسیرهای ریلی نظیربادرود- اردکان به عنوان یکی از تنگناهای ظرفیتی راه آهن کشور محسوب می‌شوند که با توجه به این مسئله و نیز تقاضای روزافزون حمل و نقل ریلی، نیاز به افزایش ظرفیت در این بخش از شبکه ریلی کشور، امری محسوس است. به همین دلیل، در نظر است با بکارگیری تمهیدات لازم، مشکل ظرفیتی این مسیر ریلی برطرف شود. ظرفیت توانایی یک مسیر در عبور دادن تعداد مشخصی از وسیله حمل و نقلی است که در روشهای مختلف حمل و نقلی به گونه های مختلف محاسبه می شود. با توجه به عوامل تاثیرگذار در ظرفیت، می‌توان گفت 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.[Landex, Kaas and Hansen, 2006]

روشهای مختلفی برای افزایش ظرفیت در سیستم ریلی ذکر شده‌اند که از آن جمله می‌توان به دوخطه کردن مسیر ریلی، تراک‌بندی (ایجاد مناطق جدایی بدون شبکه خطوط برای افزایش ظرفیت مسیرها مانند چراغهای عبوری سیستم بلاک اتوماتیک)، برقی کردن، افزایش بار محوری (بهبود زیرسازی به منظور افزایش حداکثر تناژ قابل تحمل هر محور چرخ به دلیل عبور تناژ بیشتر قطار)، بازگشایی ایستگاههای بسته (کاهش طول سیرگاهها) اشاره کرد [Research Center, 2001]. میزان افزایش ظرفیت و نیز هزینه اجرا در هریک از روشهای مذکور متفاوت است و هر یک از آنها، بسته به شرایط حاکم ترافیکی و اقلیمی می‌تواند گزینه‌ای مطلوب برای رفع گلوگاه ظرفیتی به شمار آید.

هدف از این مطالعه، ارایه روشی برای بررسی راهکارهای مناسب جهت افزایش ظرفیت گلوگاههای ریلی است. در مدل ارایه شده، پارامترهای مؤثر بر ظرفیت از قبیل نوع قطارها، زیرساخت و برنامه ریزی حرکت قطارها در نظر گرفته شده‌اند و با استفاده از مساله جریان چندکالایی[۲] به مدل‌سازی مسیر ریلی و بر اساس تکنیک بهینه سازی به محاسبه ظرفیت پرداخته شده است. از ویژگی‌های این مدل در نظر گرفتن خصوصیات مسیر ریلی[۳]، خطوط پهلوگیری[۴] ایستگاه‌ها و خصوصیات قطارها به صورت همزمان است. همچنین ویژگی دیگر این مدل، ورودی محدود آن است. زیرا برای محاسبه ظرفیت، نیازی به داشتن برنامه زمانبندی حرکت قطارها[۵] نیست. نوآوریهای مقاله را می توان به صورت زیر دسته بندی کرد:

- نیاز نداشتن به برنامه حرکت قطارها برای محاسبه ظرفیت بر خلاف سایر روشهای بهینه سازی ارایه شده،
- ارایه شبکه مکان – زمان جدید برای نمایش مسیر ریلی،
- ارایه مدلی برای محاسبه ظرفیت بر اساس مدل جریان چند کالایی بر روی شبکه مکان–زمان،
- در نظر گرفتن تاثیر انواع قطارها بر روی ظرفیت مسیر،
- ارایه رویکردی جامع برای ارزیابی راهکارهای افزایش ظرفیت مسیر با در نظر گرفتن هزینه های احداث به منظور کاربردی کردن روش.

مقاله به این صورت سازماندهی شده است. در بخش دوم، مروری بر ادبیات موضوع انجام شده است. روش شناسی محاسبه و ارزیابی سناریوهای مختلف افزایش ظرفیت، در بخش سوم توضیح داده شده است. در بخش چهارم، به روش محاسبه ظرفیت

پرداخته شده است. در بخش پنجم به تجزیه وتحلیل ظرفیت مسیر ریلی بادرود- اردکان در شبکه راه‌آهن ایران با استفاده از مدل پیشنهادی پرداخته شده است. نتیجه‌گیری و جمع‌بندی مطالب در بخش ششم ارایه شده است.

۲. مروری بر ادبیات موضوع

در ابتدا مفاهیم اصلی مرتبط با مسیر ریلی، ارایه شده است. در ساده ترین شکل، یک گره صرفا یک نقطه اتصالی است که در آن قطار می تواند از یک خط به خطی دیگر برود. برخی از گرهها ایستگاه ها را تشکیل می دهند، که در آنها عملیات سبقت، تلاقی یا تغییر جهت قطارها انجام می گیرد. یک ایستگاه تشکیلاتی، مجموعه ای از تجهیزاتی است که به عنوان نقاط پایانی یا نقاط میانی مسیرها، به منظور تشکیل و تفکیک قطارها مورد استفاده قرار می گیرد. سیرگاه فاصله بین دو نقطه جدایی در خطوط راه‌آهن است که فقط یک ناوگان می تواند در آن قرار گیرد. نقاط جدایی می توانند شامل ایستگاهها، چراغهای راهنما، ایستگاههای اضطراری باشد [Nikou, 2011]. خط پهلوگیری خطی است که تلاقی، سبقتها و برخی عملیات مانور در آن صورت می گیرد [Yaghini and Lesan, 2010]. ایستگاه بسته (نیم بسته) به طور موقت سوزنها و علائم آن برچیده شده و قطارها در آن توقف نمی کنند [Yaghini and Lesan, 2010].

بر اساس تعریف ارایه شده در گزارش UIC ٤٠٦، ظرفیت، واژه‌ای مشخص و قابل اندازه گیری نیست و نیازمند تعیین شرایط و محاسبات بر اساس شرایط ذکر شده‌است. دلیل دشواری تعریف ظرفیت، تعدد پارامترهایی است، که بر روی ظرفیت تأثیر گذارند و باید اندازه‌گیری شوند [International Union of Railways, 2004]. بنابراین برای شناخت ظرفیت، ارایه تعاریف مختلف ظرفیت، بنا به کاربرد مورد نیاز است. ظرفیت فیزیکی (تئوری)، به صورت حداکثر تعداد قطارهایی بیان می‌شود که عبور آنها به صورت تئوری از یک مسیر مشخص، امکان پذیر باشد [Landex, 2008]. ظرفیت فیزیکی یا ظرفیت حداکثری به منظور مقایسه و بررسی سطح عملکرد سامانه با سامانه های مشابه قابل استفاده است. این ظرفیت برای هیچ خطی قابل دستیابی نیست. بنابراین بجای مفهوم ظرفیت فیزیکی از ظرفیت بهینه استفاده می شود که حداکثر تعداد قطارهایی است که می توانند با سطحی از تأخیر یا کیفیت بهره‌برداری قابل قبول از یک خط راه‌آهن بگذرند [Yaghini and Lesan, 2010].

روشهای محاسبه ظرفیت در شبکه راه آهن به چهار روش تحلیلی[٦]، شبیه سازی[٧]، پارامتریک[٨] و بهینه سازی[٩] تقسیم بندی می شوند. روشهای تحلیلی با استفاده از محاسبه حداقل سرفاصله زمانی قطارها به تعیین ظرفیت مسیر می پردازند. با استفاده از مدلهای تحلیلی می توان ظرفیت را در مدت زمان اندکی محاسبه کرد، اما اطلاعات کمی برای تحلیل در اختیار قرار می گیرد [Khadem-Sameni et al., 2010]. با توجه به سادگی روابط مورد استفاده و تقریبی بودن پارامترهای مربوط به آن، این روش از دقت کمتری برخوردار است [Pachl and White, 2004]. مدلهای شبیه سازی بسیار دقیق ترند، اما نیازمند داده ها و محاسبات کامپیوتری زیادی هستند. مدل های پارامتریک بین این دو روش قرار دارند [Khadem-Sameni et al., 2010]. مدلهای بهینه سازی با هدف ارزیابی ظرفیت، به بهینه سازی شبکه ریلی و به دست آوردن جدول بهینه زمانبندی حرکت قطارها می‌پردازند. روشهای بهینه سازی از سطح دقت بالاتری نسبت به مدلهای تحلیلی برخوردار بوده و با توجه به داده های ورودی در حد متوسط، مدل سازی مسئله، نسبت به مدلهای شبیه سازی ساده تر است و هزینه اجرایی آن نسبت به مدلهای شبیه سازی و پارامتریک کمتر است [Nikou, 2011]. بنابراین در این مقاله به منظور محاسبه ظرفیت از روش بهینه سازی استفاده شده است.

در ادامه به چند نمونه از مطالعاتی که با رویکرد بهینه‌سازی به تحلیل ظرفیت ریلی پرداخته اند، اشاره می‌شود. لیباردو و همکاران به مدل سازی و محاسبه ظرفیت در چند راهیها و تقاطعات راه آهن پرداخته اند [Libardo et al., 2011]. جانمایی چند راهی و برنامه زمانبندی از پیش تعریف شده، به عنوان محدودیتهای مدل بهینه سازی در نظر گرفته شده است. این مدل بر اساس تعریف UIC٤٠٦ میزان استفاده از ظرفیت را، با در نظر گرفتن تعداد

قطارها به عنوان ورودی، محاسبه کرده است. مرل و همکاران به محاسبه ظرفیت با در نظر گرفتن تعداد قطارها به عنوان ورودی، در مهم ترین چند راهی راه آهن فرانسه پرداخته اند. [Merel et al., 2009] در این مقاله، مدل خطی جدیدی برای این مسئله ارایه و از الگوریتمی ابتکاری برای حل این مدل استفاده شده است. هرود، با بررسی ٤٤ ترکیب مختلف شبکه خطوط و سرعتهای متفاوت قطارها به بررسی و مقایسه ظرفیت در این حالات پرداخته است .[Harrod, 2009] مدل بهینه سازی خطی ارایه شده در این مقاله با استفاده از مدل بهینه سازی بر مبنای جریان چند کالایی به مدل سازی شبکه ریلی پرداخته و تاثیر فاصله سیرگاه و نسبت انواع قطارها را بر روی ظرفیت بررسی کرده است. محدودیت مدل شبکه و خطوط پهلوگیری ایستگاهها نیز در مدل در نظر گرفته شده است. از مهم ترین ورودیهای این مدل، زمانبندی حرکت قطارها بوده است. تابع هدف مدل، بیشینه سازی مطلوبیت به منظور کاهش تاخیرات و افزایش تعداد قطارها است. بردت و کوزن، تکنیکها و روشهای تحلیل ظرفیت، برای تخمین قابلیت زیر ساختارها در عبور دادن ترافیک، در محدوده شرایط عملیاتی خاص را، مورد بحث و مطالعه قرار داده اند. [Burdett and Kozan, 2006] . در این مقاله همچنین یک مدل بهینه سازی برای محاسبه ظرفیت شبکه در چند حالت و با در نظر گرفتن محدودیتهای متفاوت پیشنهاد شده است.

لی و بارکان در مطالعه ای، با استفاده از تکنیک بهینه سازی، به تعیین بهترین گزینه ساخت برای افزایش ظرفیت در شبکه ریلی پرداخته اند. در این تحقیق برای تعیین بهترین گزینه به منظور افزایش ظرفیت، دو بار بهینه سازی انجام شده است. ابتدا گزینه های ممکن برای افزایش ظرفیت با بهینه‌سازی (کمینه هزینه ساخت) مشخص شده‌اند. سپس از بین گزینه‌های ممکن، گزینه‌ای که هزینه تأخیر کمتری دارد با ابزار بهینه‌سازی (مینیمم هزینه تأخیر) تعیین شده‌است. تابع هدف در این مطالعه، کمینه سازی هزینه ساخت (شامل هزینه ثابت ساخت کمان‌ها و هزینه حرکت بر کمانها) بوده‌است [Lai and Barkan, 2011]. در جدول ۱ مهم ترین کارهای ارایه شده در این زمینه که با استفاده از تکنیک بهینه سازی به محاسبه ظرفیت پرداخته اند، آمده است. مدلهای جریان چندکالایی از نوع برنامه ریزی عدد صحیح بوده و کاربردهای زیادی در زمینه‌های مختلف برنامه‌ریزی حمل‌ونقل دارند. در این مدلها کمانهایی انتخاب می شوند و با توجه به اثری

جدول ۱. محاسبه ظرفیت با استفاده از مدلهای بهینه سازی

نویسنده	محدوده مورد بررسی	تابع هدف	متغیرهای تصمیم	تعریف ظرفیت
لیباردو (۲۰۱۱)	تقاطع	کمینه کل زمان فشرده شده، بیشینه ظرفیت تقاطع از طریق تعداد قطارها در محدوه زمانی مورد مطالعه	تعداد قطارهای عبوری	بر اساس تعریف ارایه شده در فیش UIC 406
هرود (۲۰۰۹)	مسیر	بیشینه کردن مطلوبیت یکپارچه شده: تابع چند هدفه خروجی شبکه	حرکت قطار مشخص، از سیرگاه قبلی در زمان مشخص به سیرگاه بعدی در زمان مشخص است.	ظرفیت برابر است با تعداد مسیرهای قطارها در دوره زمانی مرجع در زمانبندی بهینه قطارها
بردت و کوزن (۲۰۰٦)	شبکه	بیشینه خروجی بین تمام زوج ایستگاه های مبدا–مقصد	تعداد قطارهای عبوری هر مسیر ورودی–خروجی	ظرفیت حقیقی شبکه مجموع کل تعداد قطارهایی است که بینن تمام مسیرها جابه جا می گردند

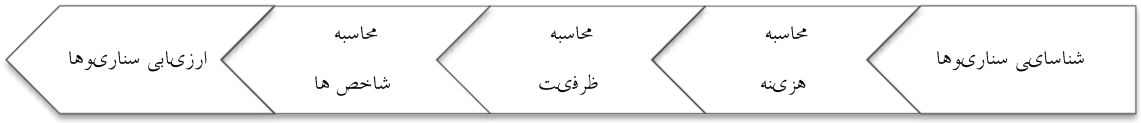
که بر روی خصوصیات عملیاتی شبکه می گذارند، به شبکه نهایی اضافه می شوند [Momeni, 2011]. در برخی از مدلهای طراحی شبکه تنها یک کالا باید بین مبدا و مقصد خود حرکت کند، در حالی که در سایر مدلها چندین کالا با مبادی و مقاصد مختلف می تواند وجود داشته باشد. جریان چندکالایی موضوعی است که بسیاری از زمینه‌های برنامه‌ریزی حمل‌ونقل ریلی را در بر می‌گیرد. در ادامه، چند مقاله ای که با در نظر گرفتن مدلهای جریان چند کالایی با گسسته سازی زمان در زمینه راه آهن ارایه شده اند، مورد بررسی قرار می گیرند. برانلند یک رویکرد بهینه سازی برای زمانبندی مسیرهای تک خطه ارایه کرده است.[Brannlund et al. 1998] از مهم ترین ورودیهای این مدل، زمانبندی حرکت قطارها بوده است. مدل آنها یک تابع سود که مجموع منافع قطارها در برنامه زمانبندی بوده و با استفاده از آزاد سازی لاگرانژی به حالت بهینه می رسد. در این مدل فقط تاخیرات برنامه ریزی شده محسوب می شوند، اما امکان توسعه مدل برای محاسبه تاخیرات عملیاتی نیز وجود دارد. ساهین نیز مانند برانلند برای بهینه سازی و کاهش هزینه ها و تاخیرها، به مدل سازی شبکه راه آهن و بهینه سازی زمانبندی حرکت قطارها پرداخته است. از مهم ترین ورودیهای این مدل، زمانبندی حرکت قطارها بوده است. محدودیتهای تعداد قطارها و خطوط پهلوگیری ایستگاهها نیز در مدل در نظر گرفته شده است [Sahin et al., 2010]. مدل هرود، کمانی به ازای هر سیرگاه به سیرگاه دیگر را در نظر گرفته است، در حالی که براندل و ساهین حرکت قطارها از هر ایستگاه به ایستگاه دیگر را به عنوان کمان شبکه مکان – زمان یعنی متغیرهای تصمیم مسئله در نظر گرفته اند. در برنامه ریزی بلند مدت، داده ها و اطلاعات محدودی در اختیار است و جدول زمانبندی اولیه وجود ندارد. از طرفی با مقایسه روشها نیاز به ارایه مدلی برای محاسبه و ارزیابی ظرفیت مسیر با در نظرگرفتن هزینه و شرایط واقعی احساس می شود.

۳. روش شناسی ارزیابی سناریوهای افزایش ظرفیت

با استفاده از نظر کارشناسان، سناریوهای افزایش ظرفیت شناسایی می شود. ظرفیت مسیر برای هر یک از مسیرها با استفاده از مدل ریاضی و هزینه های مربوط به هر سناریو، بر اساس داده های موجود محاسبه می شود. با محاسبه شاخصهای ارزیابی سناریوها، ارزیابی ظرفیت برای تصمیم گیری بهتر با تعریف شاخصهای ارزیابی انجام می گیرد. در شکل ۱ نمای کلی روش شماسی ارزیابی سناریوهای افزایش ظرفیت ارایه شده است.

به منظور محاسبه هزینه‌های احداث در سناریوهای مختلف، بایستی این هزینه‌ها شناسایی شوند. هزینه‌های عمده احداث زیرساختار ریلی، شامل هزینه‌های احداث خط، احداث علائم ایمنی برای ایستگاههای نوساز و احداث ساختمان اداری برای ایستگاههای نوسازند (جدول ۲). این جدول عمده ترین پارامترهای هزینه ای را برای احداث مناطق جدایش جدید و دو خطه کردن مسیر ارایه می کند.

هریک از سناریوها، ویژگی‌های خاص عملکردی و هزینه‌های متفاوت دارند. به منظور مقایسه دقیق بین سناریوهای مختلف، بایستی شاخصهای مناسب برای ارزیابی عملکرد سیستم تعریف و بکار گرفته شوند. در این مقاله، سه شاخص به این منظور برای ارزیابی ظرفیت ارایه شده اند: درصد افزایش ظرفیت، هزینه افزودن یک قطار و نسبت ظرفیت به هزینه. این شاخصها به منظور تصمیم گیری بهتر بر اساس در نظر گرفتن هزینه و ظرفیت و مقایسه بهتر سناریو ها ارایه شده اند. در صورتی که محدودیتی برای هزینه وجود نداشته باشد یا محاسبه بیشترین حد افزایش ظرفیت مورد نظر باشد، از درصد افزایش ظرفیت در هر سناریو می توان استفاده کرد. در صورتی که قصد مطالعه هزینه هایی، اضافه کردن یک واحد قطار به ظرفیت در هر سناریو باشد،



شکل ۱. روش شناسی ارزیابی سناریوهای افزایش ظرفیت

جدول ۲. پارامترهای عمده هزینه ای احداث در سیستم ریلی

موضوع احداث
احداث خط ریلی جدید (در هر کیلومتر)
احداث علائم ایمنی برای هر نقطه جدایی با یک خط پهلوگیری
احداث علائم ایمنی برای هر نقطه جدایی با دو خط پهلوگیری
احداث ساختمان اداری برای هر نقطه جدایی با یک خط پهلوگیری
احداث ساختمان اداری برای هر نقطه جدایی با دو خط پهلوگیری
احداث یک خط پهلوگیری به طول مفید ۸۵۰ متر+ تقاطعها و سوزنها

شاخص هزینه افزودن یک قطار در هر سناریو و به منظور در نظر گرفتن توامان ظرفیت و هزینه در هر سناریو شاخص نسبت ظرفیت به هزینه ارایه شده است. روابط شماره ۱ تا ۳ نحوه محاسبه این شاخص ها ارایه شده است.

٤. محاسبه ظرفیت

در این مطالعه، با استفاده از تکنیک بهینه سازی بر مبنای جریان چند کالایی به مدلسازی مسیر ریلی پرداخته شده است. همان طورکه در شکل ۲ نشان داده شده است، ورودیهای این مدل، خصوصیات زیرساخت، قطارها و پارامترهای زمانی است. در مرحله بهینه سازی بر اساس ورودیهای مدل، متغیرهای تصمیم مربوط به زمان سیر و توقف ایجاد می شود. سپس مدل بهینه سازی ایجاد شده با استفاده از زبان جاوا، بر مبنای متغیرهای تصمیم ایجاد شده در مرحله پیش پردازش و با نرم افزار بهینه سازی، حل می شود. به طور کلی، فرآیند مدلسازی این مسئله به دو بخش اصلی تقسیم می شود: ۱) ساخت متغیرهای مسیر و متغیرهای توقف قطارها، ۲) حل مسئله بهینه سازی بر مبنای متغیرهای ساخته شده.

٤-١ پارامترهای مسئله

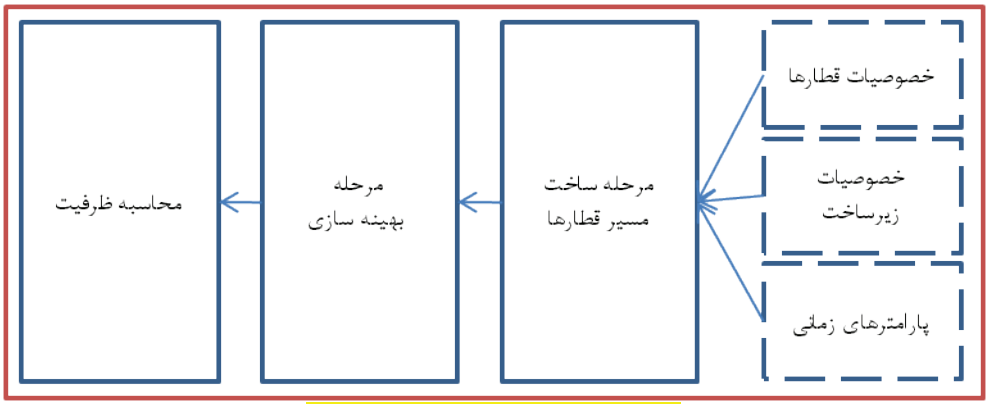
پارامترهای ارایه شده در این مدل به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

اندیس نوع قطارها r تعریف شده است و مجموعه قطارها به صورت $R = \{۱, ۲, \ldots\}$ تعریف می‌شود. R^{north} نشان‌دهنده قطارهای شمالی، قطارهای مسیر رفت و R^{south} نشان‌دهنده قطارهای جنوبی، قطارهای مسیر برگشت است. مجموعه گره ها (ایستگاهها و مناطق جدایش) به صورت $SN = \{۱, ۲, \ldots\}$ تعریف شده است. o_r، d_r و pd_r به ترتیب نشان‌دهنده مبدا، مقصد و ایستگاه قبلی قطار نوع r است. ns_i تعداد خطوط پهلوگیری گره i است. tmp_r نشان‌دهنده نسبت قطارهای نوع r در کل ترافیک مسیر است. t نشان دهنده دوره زمانی مورد بررسی است، که به عنوان زمان در دسترس محسوب شده و معمولا مقدار آن یک

$$\text{درصد افزایش ظرفیت در هر سناریو} = \frac{\text{افزایش ظرفیت مربوط به سناریو (تعداد قطار)}}{\text{ظرفیت در وضع موجود (تعداد قطار)}} \times 100 \quad (۱)$$

$$\text{هزینه افزودن یک قطار در هر سناریو} = \frac{\text{هزینه احداث مربوط به سناریو (میلیارد ریال)}}{\text{افزایش ظرفیت مربوط به سناریو (تعداد قطار)}} \quad (۲)$$

$$\text{نسبت ظرفیت به هزینه} = \frac{\text{ظرفیت مربوط به سناریو (تعداد قطار)}}{\text{هزینه احداث مربوط به سناریو (میلیارد ریال}} \quad (۳)$$



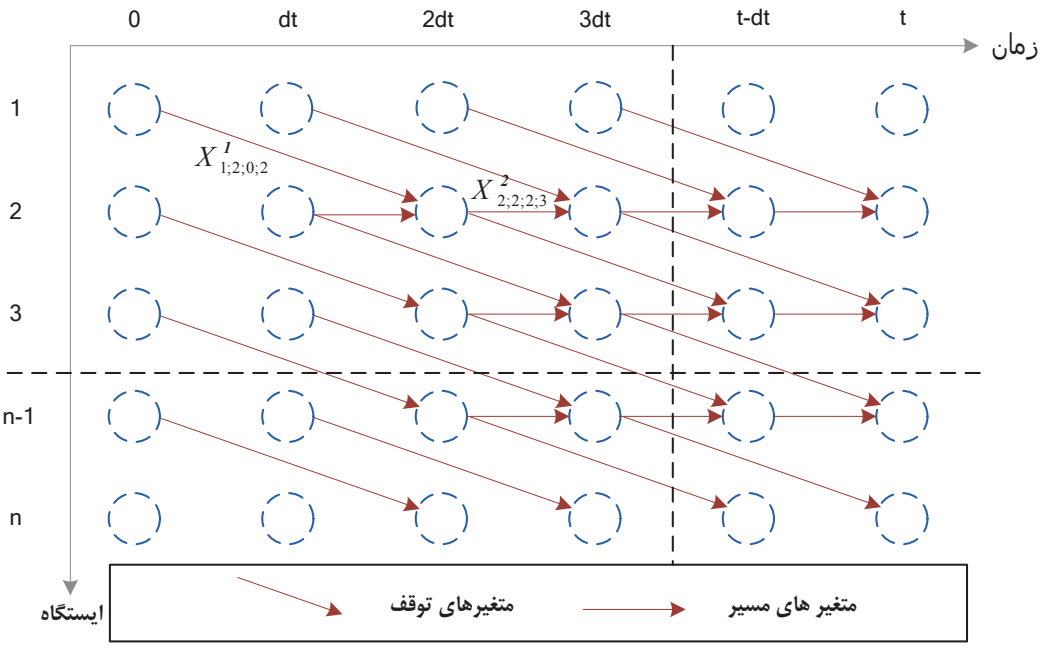
شکل ۲. مدل ارایه شده برای محاسبه ظرفیت

روز با در نظر گرفتن زمان مسدودی است. زمان مسدودی، زمانی است که مسیر به منظور نگهداری و تعمیرات مسدود می شود. dt کوچک ترین واحد زمانی گسسته شده است. T نشان‌دهنده مجموعه زمان گسسته بر حسب دقیقه است. به عنوان نمونه اگر دوره زمانی ۲٤ ساعت در نظر گرفته شود و dt=۱ باشد آنگاه t برابر ۱٤٤۰ خواهد شد. این زمان از ۱ شروع می‌شود و به مجموعه T = {۱, ۲,...,, ۱٤٤۰} تعلق دارد. i، j و p نشان‌دهنده گره و l و m نشان‌دهنده زمان است. $X_{(i,j,l,m)}^{r}$ نشان می‌دهد قطار r از ایستگاه i در زمان l حرکت کرده و در زمان m به ایستگاه j رسیده است.

٤-۲ ساخت مسیرهای حرکت قطارها

فعالیت دیگر مورد نیاز برای محاسبه ظرفیت، طراحی و پیاده سازی مرحله ایجاد مسیرهای ممکن حرکت قطارها یا همان متغیرهای تصمیم مسئله با هدف کاهش متغیرهای تصمیم است. ورودیهای این مرحله، خصوصیات زیرساخت، قطارها و پارامترهای زمانی است. خصوصیات زیرساخت با استفاده از پارامترهای ایستگاه قبلی، ایستگاه بعدی، طول سیرگاه، تعداد خطوط سیرگاه و تعداد خطوط پهلوگیری مناطق جدایش، نوع قطارها بر اساس پارامترهای ایستگاه مبدا، ایستگاه مقصد و سرعت متوسط قطارها مشخص شده و پارامترهای زمانی بر اساس دوره زمانی مورد مطالعه و زمان مسدودی خط مشخص می گردند. در این مرحله بر اساس ورودیهای مدل، متغیرهای تصمیم مربوط به زمان سیر و توقف ایجاد خواهد شد. برای نمایش چگونگی ایجاد این دونوع متغیر تصمیم از شبکه مکان – زمان استفاده شده است. همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، این شبکه دارای محور افقی است که نشان دهنده واحدهای زمانی گسسته در طول شبانه روز و محور عمودی است که نشان داده ایستگاهها و مناطق جدایش مسیر راه آهن است. از آنجا که در هر لحظه از زمان قطار یا در حال عبور از سیرگاه بوده یا در ایستگاه و یا مناطق جدایش ایستگاه متوقف بوده، مسئله دارای دو نوع متغیر تصمیم شامل متغیر مسیر و متغیر توقف قطارها است. متغیر مسیر قطارها مربوط به عبور قطارها از سیرگاه های مسیر و متغیر توقف قطارها مربوط به زمان توقف قطارها در ایستگاه‌هاست. در متغیر توقف قطارها مقدار ایستگاه قبلی و ایستگاه بعدی برابر است.

الگوریتم تولید متغیر مسیر با شروع از ایستگاه مبدا قطارها، ایستگاه به ایستگاه تا ایستگاه مقصد بر اساس زمان سیر قطارها (که بر اساس طول سیرگاه و سرعت متوسط قطارها محاسبه می شود) و بر اساس نوع قطارها در هر واحد زمانی تا زمانی که زمان برابر با اختلاف زمان در دسترس و زمان سیر قطار گردد پیش رفته و در هر گام، متغیر مسیر با پنج ویژگی ایجاد می شود. الگوریتم تولید متغیر توقف قطارها به ازای هر نوع قطار، برای هر ایستگاه میانی و در هر واحد زمانی پیش رفته تا زمانی که زمان برابر با اختلاف زمان در دسترس و زمان سیر قطار انتهایی گردد. به این ترتیب مجموعه متغیرهای تصمیم مسئله ساخته می شود. $X_{(i,j,l,m)}^{r}$ نشان می دهد که قطار r از ایستگاه i در زمان l حرکت کرده و در زمان m به



شکل ۳. شبکه مکان- زمان

ایستگاه j رسیده است. در صورتی که ایستگاه i و jبرابر باشند نشان دهنده متغیر توقف قطارها بوده و در غیر این صورت از نوع متغیرهای مسیر قطارها هستند. به عنوان مثال، $X^{1}_{۱,۲,۰,۲}$ متغیر تصمیم مسئله از نوع متغیر مسیر، نشان دهنده اشغال (۱) یا عدم اشغال (۰) قطار نوع ۱در سیرگاه ۱به ۲ از زمان ۰ تا ۲ است. $X^{2}_{۲,۲,۲,۳}$ متغیر تصمیم مسئله از نوع متغیر توقف، نشان دهنده توقف (۱) یا عدم توقف (۰) قطار نوع ۲ در ایستگاه ۲ از زمان ۲ تا ۳ به مدت ۱ دقیقه است. به این ترتیب مجموعه متغیرهای تصمیم مسئله دارای ۵ خصوصیت، شامل: نوع قطار، ایستگاه قبلی، ایستگاه بعدی، زمان حرکت از ایستگاه قبلی، زمان رسیدن به ایستگاه بعدی در این مرحله ایجاد می شود و به عنوان ورودی مدل بهینه سازی برای محاسبه ظرفیت مسیر مورد استفاده قرار می گیرد.

٤-٣ تابع هدف

در این مقاله مانند دیگر کارهای ارایه شده در این زمینه، زیر ساخت شامل مسیر ریلی و ایستگاههای آن با در نظر گرفتن فاصله ایستگاهها به عنوان جزء ثابت زیرساخت مسیر در نظر گرفته شده است. همچنین نوع قطار که دارای مبدا (ایستگاه مبدا) و مقصد (ایستگاه مقصد) و سرعت متوسط به عنوان جزء ثابت دیگر است نیز از دیگر زیر ساختهای مقاله است. اما تعداد قطارها و نوع آنها از خروجیهای مسئله است. به این معنا که هدف از مدل ریاضی بیشینه کردن تعداد قطارها بر اساس انواع قطار تعریف شده بر روی زیرساخت ریلی با شرایط بهره برداری راه آهن در نظر گرفته شده است. تابع هدف مدل، بیشینه کردن تعداد قطارهای عبوری کل مسیر ریلی است. به این ترتیب، تابع هدف مدل، تعداد مسیرهای قطار را بر روی شبکه زمان مکان بیشینه می کند. ظرفیت مسیر راه آهن با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$MAX: \quad Z = \sum_{r}\sum_{l}\sum_{m} X^{r}_{pd_r,d_r,l,m} \qquad (٤)$$

٤-٤ محدودیت ها

$$\sum_{i}\sum_{l} X^{r}_{ijlm} - \sum_{i}\sum_{m} X^{r}_{jilm} = 0 \qquad (٥)$$

$$\forall r \in R,\ \forall j \in SN \quad \forall l,m \in T$$

$$\sum_{r\in R^{south}}\sum_{l\le k-1 m\ge k}\sum X^{r}_{i(i+1)lm} + \sum_{r\in R^{north}}\sum_{l\le k-1 m\ge k}\sum X^{r}_{(i+1)i\,l\,m} \le 1 \qquad (٦)$$

$$\forall k \in T,\ \forall i \in SN$$

$$\sum_{r} X^{r}_{iill+1} \le ns_i \quad \forall l \in T, \qquad (۷)$$

$$\forall i \in SN, i \neq d_r, i \neq o_r$$

$$X^{r}_{ijlm} \in \{0, 1\} \quad \forall l,m \in T, \forall i,j \in SN \qquad \forall r \in R \quad (۸)$$

مجموعه محدودیت شماره ۵، محدودیت های بقای جریان را برای هر ایستگاه و در هر واحد زمان در نظر می گیرد که تضمین کننده توالی هر نوع قطار بین ایستگاه های مبدا و مقصد در هر واحد زمان است. بنابراین هر قطاری که وارد هر گره می شود باید آن خارج گردد. مجموعه محدودیت شماره ٦، محدودیت ظرفیت مسیرها است. این محدودیت ها، عبور حداکثر یک قطار را در هر واحد زمان و در هر سیرگاه با در نظر گرفتن جهت حرکت قطارها، شمالی یا جنوبی تضمین می کند. مجموعه محدودیت شماره ۷، نشان دهنده این است که در هر بازه زمانی، تعداد قطارهای متوقف در ایستگاه، نباید از تعداد خطوط پهلوگیری آن ایستگاه بیشتر شوند. مجموعه متغیرهای تصمیم این مدل با $X^{r}_{(i,j,l,m)}$ نشان داده شده است.

برای در نظر گرفتن تاثیر نسبت قطارها بر روی ظرفیت راه آهن، عبارت زیر در نظر گرفته شده است:

$$\sum_{l}\sum_{m} X^{r}_{pd_r;d_r;l;m} \ge (tmp)_r \sum_{r}\sum_{l}\sum_{m} X^{r}_{pd_r;d_r;l;m} \qquad (۹)$$

$$\forall r \in R$$

در مسیر های دو خطه، گراف برنامه زمان بندی حرکت قطارها، تقریبا برای هر خط به صورت مستقل ساخته می شود. معمولا یکی از خطوط به مسیر رفت وخط دیگر به مسیر برگشت اختصاص می یابد. برای در نظر گرفتن خطوط مجزا برای مسیرهای رفت و برگشت با در نظر گرفتن جهت حرکت قطارها، شمالی یا جنوبی، لازم است محدودیت های زیر وارد مدل گردند. این محدودیتها، تضمین کننده عبور قطارها در خطوط تک جهته است.

$$\sum_{r \in R^{south}} \sum_{l \le k-1} \sum_{m \ge k} X^{r}_{i(i+1)lm} \le 1 \qquad (۱۰)$$

$$\forall l,m \in T, \forall i \in LS$$

$$\sum_{r \in R^{north}} \sum_{l \le k-1} \sum_{m \ge k} X^{r}_{(i+1)i\,l\,m} \le 1 \qquad (۱۱)$$

$$\forall l,m \in T, \forall i \in LS$$

۵. مطالعه موردی: مسیر ریلی بادرود- اردکان

۵-۱ شناخت مسئله

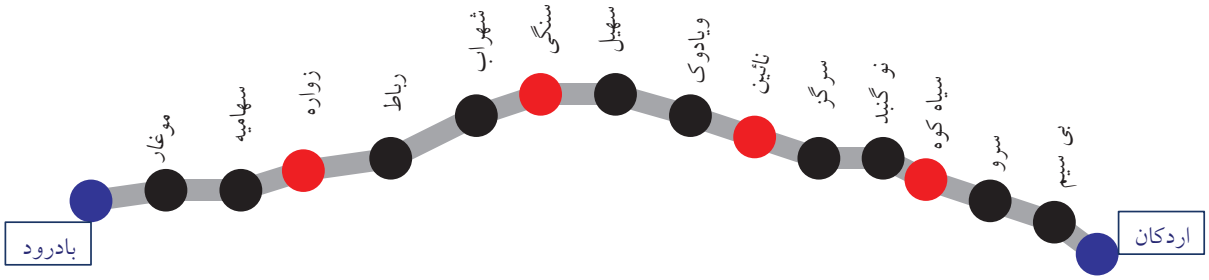
اداره کل راه آهن یزد یکی از نواحی ١٤ گانه راه آهن است. این اداره کل در سال ۱۳۵۰ با اتصال به شبکه راه آهن به منظور بهره‌برداری از معادن سنگ آهن و ذغال سنگ جهت تغذیه کارخانه ذوب آهن اصفهان، فعالیت خود را آغاز کرد. درحال حاضر این اداره کل با عبور از دو استان کشور(اصفهان و یزد) و اتصال سه ناحیه راه آهن (نواحی شرق، اصفهان و هرمزگان) به یکدیگر، سهم و اهمیت قابل توجهی را در شبکه حمل ونقل ریلی به خود اختصاص داده است. اداره کل راه آهن یزد از خروجی ایستگاه بادرود در استان اصفهان شروع و تا ایستگاه بافق در استان یزد امتداد دارد [Yazd.rai.ir]. مسیر بادرود – ارکان در اداره کل راه آهن یزد واقع است. این مسیر با شروع از ایستگاه بادرود و با عبور از ایستگاههای زواره، سنگی و نائین به ایستگاه تشکیلاتی اردکان می رسد. مسیر بادرود–اردکان یکی از مسیرهای مهم شبکه ریلی کشور است و ۲٤۰ کیلومتر طول دارد. در حال حاضر بخش قابل توجهی از حمل و نقل مسافر و بار جذب‌شده به سیستم ریلی، از طریق این مسیر تک‌خطه انجام می‌شود. تقاضای این مسیر ریلی۳٤٦۹۷٥٤ بوده و به دلیل اینکه از ظرفیت این مسیر بیشتر است، به عنوان یکی از گلوگاه های ریلی شبکه ریلی، شناخته می شود [Iran Rail, 2011]. در این بخش، از مدل ارایه شده جهت ارزیابی راهکارهای مختلف افزایش ظرفیت مسیر ریلی بادرود- اردکان استفاده شده است.

در جدول ۳، ایستگاههای موجود واقع در این مسیر و فاصله آنها از ایستگاه تهران نمایش داده شده‌است.

در این مطالعه، همان طور که در جدول ٤ نشان داده شده است، سناریوهای مختلف جهت افزایش ظرفیت ریلی مسیر بادرود- اردکان مطرح شده، مورد ارزیابی عملکردی قرار می‌گیرند. این سناریوها، با در نظر گرفتن نظرات کارشناسان مرکز تحقیقات راه‌آهن ایران تهیه شده‌اند.

سناریوی اول:

در این سناریو، فرض می‌شود که شرایط مسیر تک‌خطه، بدون



شکل٤. مسیر ریلی بادرود – اردکان

جدول ۳. ایستگاههای موجود در مسیر ریلی بادرود–اردکان

ردیف	نام ایستگاه	فاصله تا ایستگاه تهران (km)
۱	بادرود	۳٤۲
۲	زواره	۳۹۳
۳	سنگی	٤٤۰
٤	نایین	٤۹۰
۵	سیاه کوه	۵٤۰
٦	اردکان	۵۸۲

جدول ٤. سناریوهای افزایش ظرفیت

سناریو	تعداد نقاط جدایی	تعداد خطوط پهلو گیری	نوع خط
سناریوی اول	٦	۱۲	تک خطه
سناریوی دوم	۱۱	۱۷	تک خطه
سناریوی سوم	۱٦	۲۲	تک خطه
سناریوی چهارم	۱٦	۳۲	تک خطه
سناریوی پنجم	٦	۱۲	دوخطه

تغییر بماند. در این سناریو، فواصل ایستگاهها همان مقادیر ارایه شده در جدول شماره ۲ هستند. هریک از ایستگاههای مبدأ و مقصد و نیز ایستگاههای بین راهی، دارای ۲ خط پهلوگیری هستند.

سناریوی دوم:

در این سناریو، مابین هر دو ایستگاه موجود، یک نقطه جدایی جدید که دارای یک خط پهلوگیری است ساخته می شود. در نتیجه، در این سناریو ۱۱ نقطه جدایی در طول مسیر واقع است که ۵ ایستگاه، نوساز هستند. موقعیت ایستگاههای جدید در وسط سیرگاههای موجود در نظر گرفته شده است.

سناریوی سوم:

در این سناریو، مابین هر دو ایستگاه موجود، دو نقطه جدایی جدید که هریک دارای یک خط پهلوگیری هستند ساخته می‌شود. در نتیجه، در این سناریو ۱٦ نقطه جدایی در طول مسیر واقع هستند که ۱۰ نقطه جدایی، نوساز هستند. موقعیت مناطق جدایش جدید با توجه به مطالعات اولیه صورت‌گرفته توسط مرکز تحقیقات راه آهن کشور، مطابق جدول ۵ است.

سناریوی چهارم:

در این سناریو، مابین هر دو ایستگاه موجود، دو نقطه جدایی جدید که هریک دارای دو خط پهلوگیری هستند ساخته می شود. در نتیجه، در این سناریو ۱٦ نقطه جدایی در طول مسیر واقع هستند که ۱۰ ایستگاه، نوساز هستند. موقعیت مناطق جدایش جدید، مشابه سناریوی سوم است.

سناریوی پنجم:

در این سناریو، مسیر ریلی به صورت دوخطه در نظر گرفته می‌شود. تعداد و وضعیت ایستگاهها مشابه سناریوی اول است.

۵-۲ محاسبه و تحلیل نتایج

با در نظر گرفتن پارامترهای هزینه‌های ارایه‌شده در جدول ۲، هزینه تقریبی مورد نیاز در هریک از سناریوها قابل محاسبه است. در جدول ٦ این هزینه‌ها نمایش داده شده‌اند. این مقادیر، توسط تیم کارشناسان مرکز تحقیقات راه‌آهن کشور ارایه شده‌اند..

جدول ۵. مناطق جدایش واقع در مسیر ریلی بادرود- اردکان مربوط به سناریوی سوم

ردیف	نام ایستگاه	فاصله تا ایستگاه قبلی (km)	وضعیت	ردیف	نام ایستگاه	فاصله تا ایستگاه قبلی (km)	وضعیت
۱	بادرود	--	موجود	۹	ویادوک	۱۷	احداث نشده
۲	موغار	۱۷	احداث نشده	۱۰	نایین	۱٦	موجود
۳	سهامیه	۱۷	احداث نشده	۱۱	سرگز	۱۸	احداث نشده
٤	زواره	۱۷	موجود	۱۲	نوگنبد	۱٦	احداث نشده
۵	رباط	۱۵	احداث نشده	۱۳	سیاه کوه	۱٦	موجود
٦	شهرآب	۱٦	احداث نشده	۱٤	سرو	۱٦	احداث نشده
۷	سنگی	۱٦	موجود	۱۵	بی سیم	۱۳	احداث نشده
۸	سهیل	۱۷	احداث نشده	۱٦	اردکان	۱۳	موجود

برای هریک از سناریوهای پنجگانه مطرح‌شده در این مطالعه، خصوصیات مسیر ریلی شامل تعداد ایستگاهها و تعداد خطوط پهلوگیری و نیز انواع قطارهای باری و مسافری به عنوان ورودی به مدل ارایه شد. زمان در دسترس با در نظر گرفتن ۲٤۰ دقیقه زمان مسدودی، ۱۲۰۰ دقیقه در نظر گرفته شده است. دو نوع قطار باری با سرعت متوسط ٦۰ کیلومتر بر ساعت در جهت رفت و برگشت و دو نوع قطار مسافری با سرعت متوسط ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت در جهت رفت و برگشت در نظر گرفته شده است. در جدول ۷، تعداد کمانهای تولید شده، زمان حل مسئله، ظرفیت مسیر به تفکیک سناریوهای مختلف با در نظر گرفتن حداقل ۱۰ نسبت قطارهای باری در مسیر، ذکر شده‌است. برای پیاده‌سازی الگوریتم ساخت مسیرهای حرکت قطارها و مدل ریاضی پیشنهادی، از زبان برنامه‌نویسی جاوا و نرم‌افزار CPLEX استفاده شده است.

همان گونه که در جدول ۸ دیده می‌شود، مقدار تابع هدف مدل (بیشینه قطار قابل عبور) در سناریوی چهارم بیش از این مقدار در سایر سناریوهاست. همچنین با افزایش تعداد متغیرهای تصمیم مسئله، زمان حل مسئله نیز افزایش یافته است. در جدول ۷، نتایج محاسبه شاخص‌های ارزیابی ظرفیت به تفکیک سناریوهای مختلف ارایه شده‌است.

همان گونه که در جدول ۸ ملاحظه می شود، بیشترین ظرفیت مسیر با در نظرگرفتن سناریوی چهارم یعنی احداث دو ایستگاه جدید (دارای دو خط پهلوگیری) مابین هر دو ایستگاه موجود حاصل شده است. در این حالت در مسیر ۱٦ منطقه جدایش در نظر گرفته شده است. سناریوی دوم یعنی ساخت یک ایستگاه جدید (دارای یک خط پهلوگیری) مابین هر دو ایستگاه موجود، کمترین هزینه ساختمانسازی را دارد.

در شکل های ۵ و ٦ و ۷، رتبه بندی سناریو ها بر اساس درصد

جدول ٦. هزینه‌های تقریبی احداث در هر سناریو

سناریو	موضوع سناریو	هزینه تقریبی (میلیارد ریال)
سناریوی اول	حفظ وضع موجود	۰
سناریوی دوم	احداث یک نقطه جدایی جدید (دارای یک خط پهلوگیری) مابین هر دو ایستگاه موجود	۱۱۰
سناریوی سوم	احداث دو نقطه جدایی (دارای یک خط پهلوگیری) مابین هر دو ایستگاه موجود	۲۲۰
سناریوی چهارم	احداث دو نقطه جدایی (دارای دو خط پهلوگیری) مابین هر دو ایستگاه موجود	٤۰۰
سناریوی پنجم	دوخطه کردن مسیر	۲٤۰۰

جدول ۷. نتایج آنالیز ظرفیت در هر سناریو [مؤلف]

سناریو	تعداد متغیرهای تصمیم	زمان حل مسئله (دقیقه)	مقدار تابع هدف (ظرفیت مسیر)
سناریوی اول	۸۷۳۸	۰/۱۱	۷۲
سناریوی دوم	۱۵۰٤٦	۱۷/٤٦	۱۰۸
سناریوی سوم	۲۱٤۰۵	٤۵/٦۳	۲۰٤
سناریوی چهارم	۲۹۵۹٦	۵٤/۱۹	۲۰۸
سناریوی پنجم	۸۷۳۸	۰.۰۰۳	۱٤۸

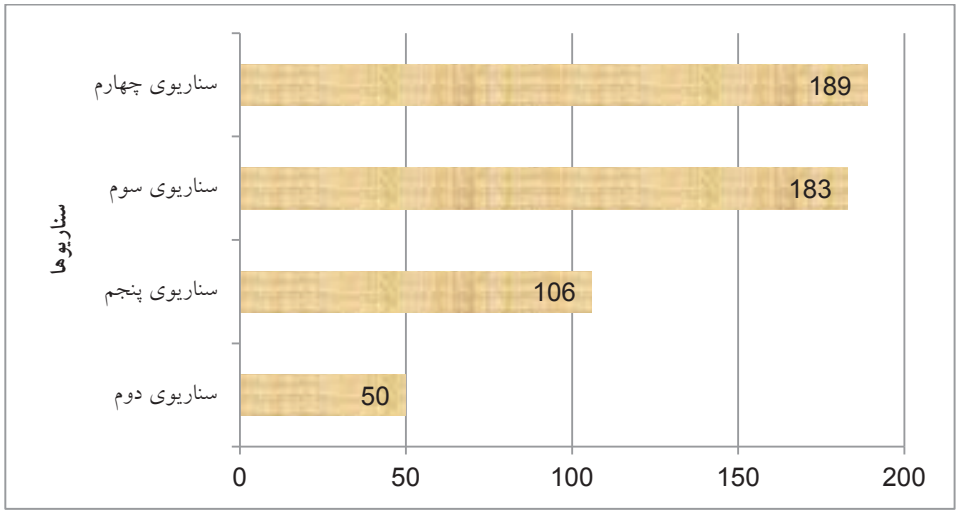
جدول ۸. نتایج محاسبه شاخص‌های ارزیابی ظرفیت

سناریو	ظرفیت (تعداد قطار در روز)	هزینه احداث (میلیارد ریال)	مقدار افزایش ظرفیت (تعداد قطار در روز)	درصد افزایش ظرفیت	هزینه افزودن یک قطار (میلیاردریال)	نسبت ظرفیت به هزینه
سناریوی اول	۷۲	–	–	–	–	–
سناریوی دوم	۱۰۸	۱۱۰	۳٦	٪۵۰	۳.۰٦	۰.۹۸
سناریوی سوم	۲۰٤	۲۲۰	۱۳۲	٪۱۸۳	۱.٦۷	۰.۹۳
سناریوی چهارم	۲۰۸	٤۰۰	۱۳٦	٪۱۸۹	۲.۹٤	۰.۵۲
سناریوی پنجم	۱٤۸	۲٤۰۰	۷٦	٪۱۰٦	۳۱.۵۸	۰.۰٦

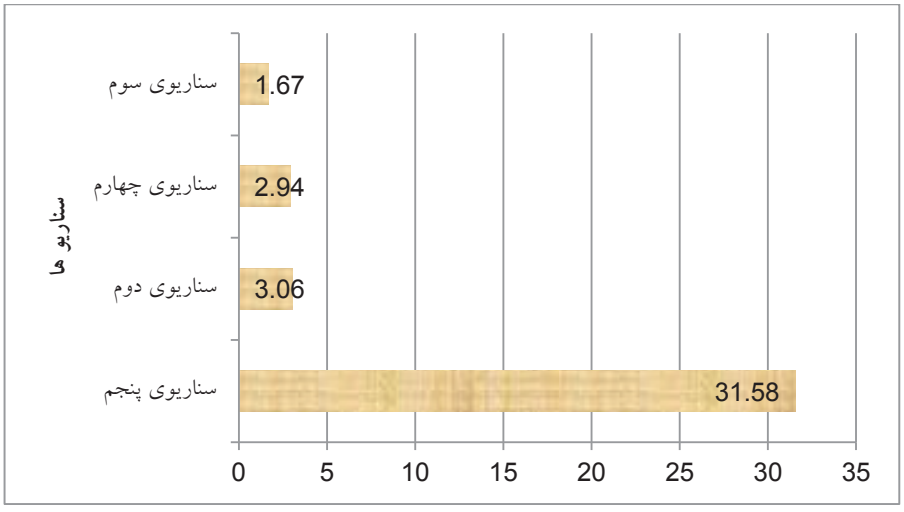
افزایش ظرفیت (شاخص اول)، هزینه افزودن یک قطار (شاخص دوم) و نسبت ظرفیت به هزینه (شاخص سوم) به تفکیک سناریوهای مختلف ارایه شده‌است.

همان گونه که در شکل ۵ دیده می شود، درصد افزایش ظرفیت (شاخص اول) در سناریوهای چهارم و سوم بیش از سایر سناریوها بوده‌است. تفاوت اصلی این دو سناریو با سایر سناریوها، کاهش فاصله بلاکها و افزایش تعداد ایستگاهها به ۱٦ ایستگاه است (تعداد ایستگاهها در سناریوی دوم ۱۱ ایستگاه و در سناریوی پنجم–مسیر دوخطه– برابر با ٦ ایستگاه است). نکته قابل توجه در این بخش آن است که با وجود بیشتر بودن تعداد خطوط پهلوگیری در سناریوی چهارم، میزان افزایش ظرفیت مربوط به این سناریو تفاوت چندانی با سناریوی سوم ندارد. به عبارت دیگر تأثیر خطوط اضافی پهلوگیری در ایستگاههای نوساز بسیار ناچیز است. همین مسئله سبب می‌شود تا هزینه افزودن یک قطار در سناریوی سوم نسبت به سناریوی چهارم کمتر باشد(شکل ٦).

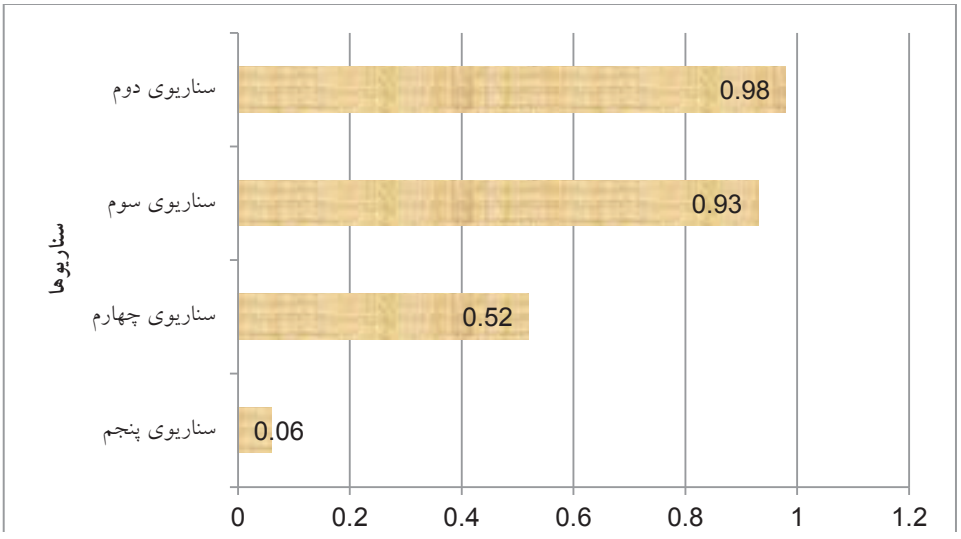
نتایج مربوط به سناریوی پنجم (دوخطه کردن مسیر ریلی با حفظ تعداد ایستگاههای موجود) نیز قابل توجه هستند. میزان ظرفیت در این سناریو در مقایسه با سناریوی اول بیش از دو برابر شده است. همچنین افزایش ظرفیت سناریوی پنجم در مقایسه با سناریوی دوم (افزایش تعداد ایستگاهها به ۱۱ عدد) حدود ۵٦ درصد بیشتر است، در حالی که با استفاده از روش کاهش طول بلاک (افزایش تعداد ایستگاهها به ۱٦ عدد) در سناریوهای سوم و چهارم، میزان افزایش ظرفیت بیشتر از افزایش ظرفیت به روش دوخطه کردن مسیر شده–است. از طرف دیگر، هزینه‌های بسیار سنگین دوخطه کردن مسیر (که در اشکال ٦ و ۷ قابل مشاهده است) مطلوبیت این سناریو را نسبت به سایر سناریوها کاهش داده‌است. نتایج مدل نشانگر آن است که بر اساس شاخص درصد افزایش ظرفیت، سناریوی چهارم (ساخت دو نقطه جدایی جدید



شکل ۵. مقایسه شاخص درصد افزایش ظرفیت در سناریوهای مختلف



شکل ٦. مقایسه شاخص هزینه افزودن یک قطار در سناریوهای مختلف



شکل ۷. مقایسه شاخص نسبت ظرفیت به هزینه در سناریوهای مختلف

دارای دو خط پهلوگیری مابین هر دو ایستگاه موجود) بهترین گزینه محسوب می شود. در حالی که بر اساس شاخص هزینه افزودن یک قطار، سناریوی سوم (احداث دو نقطه جدایی جدید دارای یک خط پهلوگیری مابین هر دو ایستگاه موجود) بهترین انتخاب است. نهایتاً بر اساس نسبت شاخص ظرفیت به هزینه، سناریوی دوم (احداث یک نقطه جدایی جدید دارای یک خط پهلوگیری مابین هر دو ایستگاه موجود) بهترین انتخاب محسوب می شود.

٦. نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از مدل ریاضی و روش بهینه سازی، بر اساس مدل جریان چند کالایی، روشی برای بررسی راهکارهای مناسب جهت افزایش ظرفیت گلوگاههای ریلی ارایه شد. در این روش با استفاده از نظر کارشناسان، سناریوهای افزایش ظرفیت شناسایی می شود. ظرفیت مسیر برای هریک از مسیرها با استفاده از مدل ریاضی و هزینه های مربوط به هر سناریو بر اساس داده های موجود محاسبه می شود. با محاسبه شاخصهای ظرفیت و هزینه، ارزیابی ظرفیت برای تصمیم گیری بهتر با تعریف شاخصهای ارزیابی انجام می گیرد. ویژگیهای این مدل در نظر گرفتن تأثیر همزمان خطوط و ایستگاه و همچنین عدم نیاز به برنامه زمان بندی حرکت قطارهاست. از مدل ارایه شده برای ارزیابی راهکارهای مختلف افزایش ظرفیت مسیر ریلی بادرود- اردکان استفاده شد. به این منظور، پنج سناریوی افزایش ظرفیت ریلی و سه شاخص ارزیابی عملکردی ارایه شد. نتایج مدل نشانگر آن است که بر اساس درصد افزایش ظرفیت، سناریوی چهارم (ساخت دو ایستگاه جدید با دو خط پهلوگیری مابین هر دو ایستگاه موجود) بهترین گزینه محسوب می شود. بر اساس هزینه افزودن یک قطار، سناریوی سوم (ساخت دو ایستگاه جدید با یک خط پهلوگیری مابین هر دو ایستگاه موجود) بهترین انتخاب است. نهایتاً بر اساس نسبت ظرفیت به هزینه، سناریوی دوم (ساخت یک ایستگاه جدید (دارای یک خط پهلوگیری) مابین هر دو ایستگاه موجود) بهترین انتخاب محسوب می شود.

مقاله حاضر ضمن ارایه مدلی با در نظر گرفتن نسبت قطارها برای محاسبه ظرفیت به شناخت دقیق از مفاهیم و تعاریف ارایه‌شده مرتبط با ظرفیت کمک بسیاری می کند. مدل ارایه‌شده می‌تواند در تصمیم‌گیری بلند مدت به مدیران و بهره‌برداران شبکه ریلی کمک شایانی نماید.

برای تحقیقات آتی استفاده از مدلهای شبیه سازی به منظور در نظرگرفتن سناریو های بیشتر، استفاده از الگوریتم های حل ترکیبی به منظور کاهش زمان حل، و ارزیابی روش های دیگر محاسبه ظرفیت از جمله UIC با استفاده از روش ارایه شده پیشنهاد می شود.

۷. پی نوشتها

1. Capacity
2. Multicommodity flow
3. Railway route
4. Siding track
5. Train timetable
6. Analytical
7. Simulation
8. Parametric
9. Optimization

۸. مراجع

- اداره کل راه آهن یزد، http://yazd.rai.ir.

- اداره کل سیر و حرکت (۱۳۹۰)، معاونت بهره برداری و سیر و حرکت، گروه مطالعات و برنامه ریزی حمل و نقل.

- مرکز تحقیقات راه آهن (۱۳۸۰) " بررسی امکان افزایش بار محوری در مسیر بافق- زرین شهر"، راه آهن جمهوری اسلامی ایران.

- مومنی، محسن (۱۳۹۰) "ارایه الگوریتم ترکیبی برای حل مسئله طراحی شبکه های جریان چندکالایی با در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن،

دانشگاه علم و صنعت ایران.

– نیکو، نریمان (۱۳۹۰) "ارایه مدل بهینه سازی برای محاسبه و ارزیابی ظرفیت در شبکه راه آهن"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران.

– یقینی، مسعود و انجمن علمی دانشکده مهندسی راه آهن (ترجمه) (۱۳۸۹) "زمانبندی و سیر و حرکت در راه آهن"، انتشارات پیشرو فناوری قائد.

– یقینی، مسعود و لسان، جواد (۱۳۸۹) " برنامه ریزی عملیات حمل و نقل ریلی"، ایران: انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.

- Brannlund, U., Lindberg, P., Nôu, A., and Nilsson, J. (1998) "Railway timetabling using Lagrangian relaxation". Transportation Science, Vol. 32, pp. 358-369.

- Harrod, S. (2007) "Railway capacity management and planning", Ph.D. Thesis, University of Cincinnati.

- Harrod, S. (2009) "Capacity factors of a mixed speed railway network", Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Vol. 45(5), pp. 830-841.

- International Union of Railways (2004) "UIC Leaflet406 capacity", Int. Nat. Union of Ralway

- Khadem-Sameni, M., Preston , J. and Armstrong, J. (2010) "Railway capacity challenge: measuring and managing in Britain", Proceedings of the 2010 Joint Rail Conference, JRC, Urbana, IL, USA, JRC-36280.

- Landex, A. (2008) "Methods to estimate railway capacity and passenger delays", In: Department of Transport, Technical university of Denmark: Kgs. Lyngby.

- Landex, A., Kaas, A. H. and Hansen, S. (2006) "Railway operation", Centre for Traffic and Transport, Technical University of Denmark.

- Libardo, A., Pellegrini, P. and Salerno, G. (2011) "Capacity in railway junctions and optimal route management", RAILROME.

- Merel, A., Gandibleux, X., Demassey, S. and Lusby, R.(2009) "An improved upper bound for the railway infrastructure capacity problem on the Pierre-fitte-Gonesse Junction", In Dixi`eme congr`es de la Soci´et´e Franc¸aise de Recherche Op´erationnelle et d'Aide `a la D´ecision, Proceedings of the ROADEF, pp. 62–76,

- Pachl, J. and White, T. (2004) "Analytical capacity management with blocking times", Transportation Research Board: 83rd Annual Meeting on January, pp. 11-15.

- Şahin, G, Ahuja, R. K. and Cunha, C. B. (2010)" Integer programming based solution approaches for the train dispatching problem", Sabanci University.